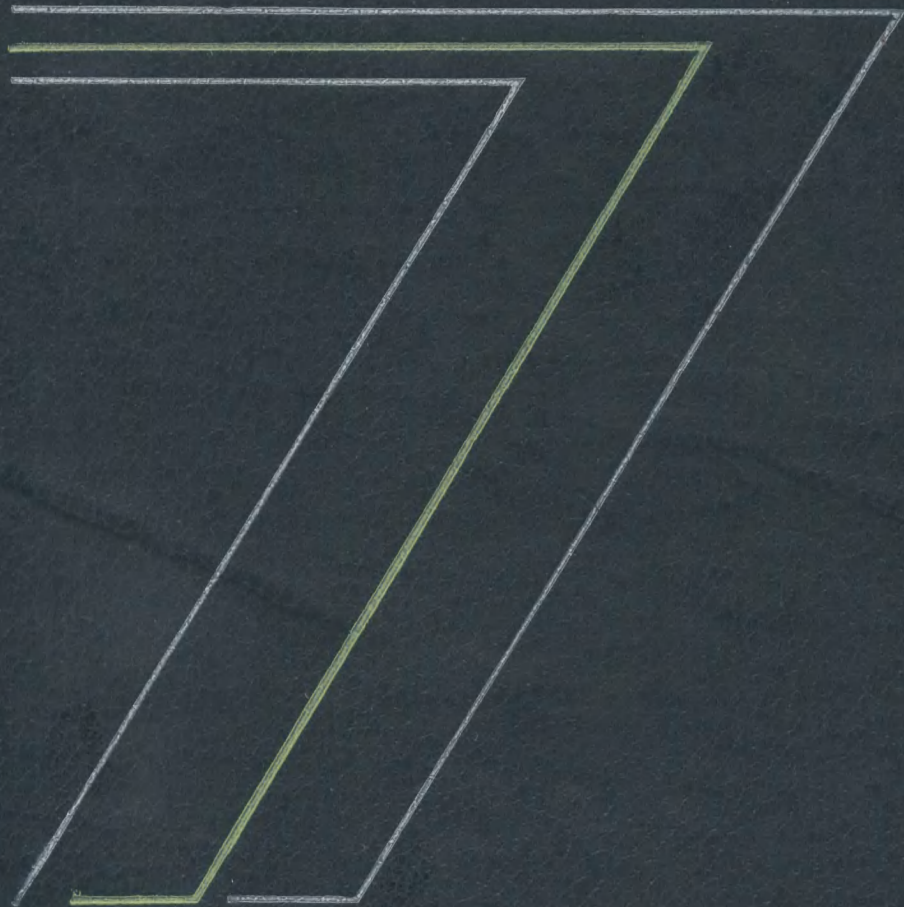


СПРАВОЧНИК КОНСТРУКТОРА РЭА

СПРАВОЧНИК КОНСТРУКТОРА

РЭА ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ
КОНСТРУИРОВАНИЯ



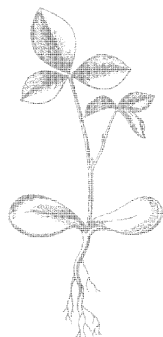
СПРАВОЧНИК конструктора РЭА

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Под редакцией
Р. Г. ВАРЛАМОВА



МОСКВА
«СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1980



Scan AAW

УДК 621.396.6.002.2 (031)

Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с., ил.

Рассмотрены факторы, влияющие на конструкцию РЭА, и особенности современных конструкций, даны характеристики условий, в которых работает РЭА, параметры объектов-носителей, описывается поведение человека-оператора в системе человек—РЭА. Представлены типовые несущие конструкции и конструкторская документация. Систематизированы материалы по методологическим, организационным и физико-математическим основам конструирования РЭА, по выбору и расчету источников питания, паразитным наводкам и принципам борьбы с ними, по выбору и расчету средств герметизации и защите РЭА от влаги, динамических и тепловых воздействий.

Справочник предназначен для конструкторов РЭА широкого профиля, а также может быть полезным для студентов вузов.

Рис. 244, табл. 82, библи. 204 назв.

Составители:

Андреева Л. Б., Барканов Н. А., Бегинин А. С., Варламов Р. Г., Василькевич И. В., Волин М. Л., Володин Ю. Г., Гаврилов Ю. А., Герценштейн В. С., Городилин В. М., Глушицкий И. В., Закс Д. И., Калакин А. С., Карпушин В. Б., Квасницкий В. Н., Киселев В. И., Киселев Ю. В., Кривоzubов А. В., Курейчик В. М., Лисяк В. В., Малюков Г. В., Носов О. Н., Одинцов Н. Г., Орловская И. А., Плево И. П., Плотицкий А. М., Семернев В. И., Синиченков А. С., Струков О. Д., Фефер А. И., Фролов А. Н., Чернякова М. М., Чукин В. Ф., Ярышев Н. А.

Редакция литературы
по вопросам космической радиоэлектроники

С $\frac{30404-047}{046(01)-80}$ 9-80 2401000000

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время существует обширная группа нормативно-технических документов в виде государственных и отраслевых стандартов, стандартов предприятий, руководящих технических материалов, которыми пользуются при разработке конструкций РЭА. Нужен ли в такой ситуации справочник, в котором в полном объеме невозможно изложить содержание всех этих документов?

Положительный ответ на этот вопрос был получен в 1972 г., когда в издательстве «Советское радио» вышел «Краткий справочник конструктора РЭА» тиражом 100 тыс экземпляров. Он предназначался для студентов, но как показала практика использовался и работниками промышленности.

Обобщение полученных данных определило структуру настоящего «Справочника конструктора РЭА».

В нем, в отличие от ОСТов, СТП и РТМ, где даются частные методики расчетов, кроме методик и примеров расчетов излагаются общие принципы и теория компоновки, защиты от тепловых и динамических воздействий и т. п. Базой для изложения этих принципов и теоретических положений являются:

- для описания общих принципов конструирования — тезис о творческом характере работы конструктора-разработчика;

- для изложения принципов конструкторских расчетов — рассмотрение РЭА в виде обобщенного преобразователя, описываемого методами математической физики

Это дает возможность не только познакомиться с практикой использования тех или иных методик и расчетов, но и разобраться с существом новых методик и расчетов, с которыми конструктору не приходилось сталкиваться в практической работе.

Материал «Справочника конструктора

РЭА (общие принципы конструирования)» изложен в двух частях:

- «Факторы, определяющие конструкцию РЭА» (современные радиосистемы, окружающая среда и ее воздействие на РЭА, объекты-носители РЭА, человек-оператор, характерные типовые конструкции РЭА, стадии проектирования РЭА и документация конструкторского труда);

- «Конструкторские расчеты РЭА» (физико-математические основы конструирования РЭА, источники энергии питания, защита от паразитных наводок, герметизация, защита от динамических и тепловых воздействий)

Предполагается издание второй книги «Справочник конструктора РЭА (элементная база, механизмы, оценка качества и надежности)», в которой будут изложены конструктивные особенности элементной базы и ее установки в РЭА, различные механизмы и их элементы и общая методология и практические расчеты по оценке качества и надежности РЭА.

Настоящий Справочник предназначен для специалистов-конструкторов, которым он будет полезен на стадиях эскизного и частично технического проектирования. Отдельные разделы Справочника могут быть использованы слушателями институтов и факультетов повышения квалификации, а также студентами вузов, обучающимися на радиотехнических и смежных с ними факультетах (автоматики, вычислительной техники и т. п.) при выполнении курсовых и дипломных проектов. Замечания и пожелания по Справочнику просьба направлять в издательство «Советское радио» по адресу: 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 693.

ВВЕДЕНИЕ *

В.1. СТРУКТУРА СПРАВОЧНИКА

Общие положения

При разработке РЭА конструктор сталкивается с различными физическими эффектами, возникающими при работе РЭА, что требует привлечения различных разделов физики, в которых по традиции принята (часто без соответствия ГОСТам или ОСТам) различная символика обозначений. Это приводит к тому, что одно и то же понятие (частота, амплитуда, сила, и т. п.) при описании электрических, тепловых, механических и других явлений имеет разные сокращения и обозначения, что затрудняет работу конструктора.

Для повышения информативности и облегчения пользования в Справочнике применены упорядоченные сокращения в виде унифицированных аббревиатур и индексов, единые условные обозначения и размерности физических величин в СИ по ГОСТ 9867—61, масштабирование иллюстраций.

В основу индексации положены рекомендации проекта ГОСТа (группа ТОЗ), которым устанавливается шесть зон для индекса: по одной сверху и снизу и по две слева и справа от символа. Если индекс один, то он размещается справа внизу. При этом для обозначения собственного значения (безразмерная величина) рекомендуется двойной однотипный индекс. Например:

К — критерий (общее обозначение)
К — коэффициент (общее обозначение)

$K_{исп}^{\sigma}$ — коэффициент использования объема

S — площадь

S_s — относительная (например, в процентах или долях) площадь

l — длина

Δl — изменение (приращение) длины

$\Delta l/l$ — относительное приращение длины.

Обозначение теплофизических критериев по традиции выполняется двумя латинскими буквами начала фамилии ученого. Для безымянных критериев используются комбинированные обозначения с использованием буквы К. Эти и другие приемы, существо которых излагается далее, позволили увеличить информативность материала Справочника.

В целях экономии места ГОСТы, ОСТы, СТП и РТМ в список литературы не выносятся, а ссылки на них даются только по тексту (при необходимости). При этом возможно использование неполного или сокращенного наименования ГОСТ, ОСТ, СТП или РТМ.

При поисках ГОСТ в Указателях необходимо учитывать разделы и их рубрикации по разделам, классам, группам и системам ГОСТ.

Раздел А —

Класс А0. Общие правила

Группа А00 Термины и обозначения

А10 Классификация

А19 Методы испытаний.

Упаковка. Маркировка

Раздел А. Горное дело. Полезные ископаемые. Раздел В. Нефтяные продукты. Раздел В. Металлы и металлические изделия. Раздел Г. Машины, оборудование и инструмент. Раздел Д. Транспортные средства и тара. Раздел Е. Энергетическое и электротехническое оборудование. Раздел Ж. Строительство и стройматериалы. Раздел И. Силикат-

* Составитель Р. Г. Варламов.

В.2. Сокращения и обозначения

но-керамические и углеродные материалы и изделия. Раздел К. Лесоматериалы. Изделия из древесины. Целлюлоза. Бумага. Картон. Раздел Л. Химические продукты и резиноасбестовые изделия. Раздел М. Текстильные и кожевенные материалы и изделия. Раздел Н. Пищевые и вкусовые продукты. Раздел П. Измерительные приборы, средства автоматизации и вычислительной техники. Раздел Р. Здравоохранение. Предметы санитарии и гигиены. Раздел С. Сельское и лесное хозяйство. Раздел Т. Общетехнические и организационно-методические стандарты. Раздел У. Изделия культурно-бытового назначения. Раздел Ф. Атомная техника. Раздел Э. Электронная техника, радиоэлектроника и связь.

В настоящее время действуют следующие межотраслевые системы стандартов: 1 — государственная система стандартизации (ГСС); 2 — единая система конструкторской документации (ЕСКД); 3 — единая система технологической документации (ЕСТД); 4 — система показателей качества продукции (СПКП); 5 — стандарты на аттестованную продукцию; 6 — унифицированные системы документации (УСД); 7 — система информационно-библиографической документации; 8 — государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ); 9 — единая система защиты от коррозии и старения материалов и изделий (ЕСЗКС); 10 — стандарты на товары, поставляемые на экспорт; 11 — прикладная статистика; 12 — система стандартов безопасности труда (ГСБТ); 13 — микрофильмирование; 14 — единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП); 15 — разработка и поставка продукции на производство; 16 — управление технологическими процессами; 17 — система стандартов в области охраны природы и улучшения природных ресурсов; 18 — количественные методы оптимизации параметров объектов стандартизации; 19 — единая система программной документации (ЕСПД); 20 — единая система государственного управления качеством продукции; 21 — система проектной документации для строительства (СПДС). При исполь-

зовании той или иной системы стандартов принято пользоваться указанными в скобках аббревиатурами.

В.2. СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначения наиболее часто используемых понятий, терминов и величин даются аббревиатурами, составленными, как правило, из двух заглавных букв. Для удобства пользования список основных аббревиатур дается в начале каждой главы. Для унификации обозначений вида сила, поток, сопротивление, проводимость и т. п. используются поясняющие индексы

Сводный перечень индексов, характерных функций и критериев

а) Индексы буквенные

абс — абсолютный
ад — адиабатический
ак — акустический
акт — активный
ам — амортизированный
аэр — аэродинамический
бл — блочный
в — вертикальный
вб — вибрационный
вз — взаимный
вл — влажный
вн — внутренний
внш — внешний
воз — возбужденный
вр — вращательный
вс — высший
вт — ветровой
вх — входной
вул — вулканизированный
выд — выдержанный
вых — выходной
выс — высушающий
выв — выводной
г — горизонтальный
гз — газообразный
гл — гололедный
д — действительный
дб — добротный
дин — динамический
дем — демпфированный
доп — допустимый
доп — дополнительный
дс — диссипативный
ж — жидкостный
з — зарядный

зз — зазорный (зазор)
 зр — зарядно-разрядный
 и — импульсный
 ид — идеальный
 из — изгибающий
 изл — излучательный
 изол — изоляционный
 ин — инерционный
 инф — информационный
 исп — используемый
 ист — источникный
 кв — кратковременный
 квл — квалификационный
 кдв — количества движения
 кин — кинетический
 км — кинематический
 кн — конечный
 конв — конвекционный
 конд — кондукционный
 кп — компенсирующий
 кр — крутильный
 л — лучистый
 лп — латентного периода
 м — магнитный
 мх — механический
 н — начальный (в начале)
 нар — наружный
 нв — новизны
 нг — нагрузочный
 нз — низший
 нк — накальный
 ном — номинальный
 нп — непрерывный
 нс — насыщенный
 об — оборотный (оборот)
 ос — осевой (аксиальный)
 осн — основной (основания)
 ост — остаточный
 оп — опорный (эмпирический)
 отв — отводный
 отс — отслоенный
 п — повторенный
 пар — паразитный
 пд — полезного действия
 пл — плавления
 пол — полезности
 пот — потеря
 пр — произвольный
 прд — предельный
 прив — приведенный
 пт — потенциальный
 пит — питания
 р — разрядный
 рад — радиоактивный
 рас — рассеянный
 рез — резонансный
 рб — рабочий
 рз — разрывной
 ркт — реактивный
 рс — ресурсный

рсв — работы свежего ЭЛ (ХИТ)
 рст — растяжения
 рхр — работы в конце срока хранения ЭЛ (ХИТ)
 с — связи, связанный
 св — световой
 сб — сброса
 сд — сдвигающий
 сж — сжимающий
 сл — службы, служебный
 слж — сложности
 см — смещения
 ср — средний
 ст — стандартный
 стц — стационарный
 т — теоретический
 тв — твердый
 тп — тепловой
 тр — трущийся (трения)
 у — удельный
 увз — увеличения зазора
 уд — ударный
 упр — управляющий
 ус — усиленный
 усл — условный
 ф — фазовый
 фт — фальтрационный
 хм — химический
 хр — хранения
 хрп — хрупкости
 е — электрический
 эк — эквивалентный
 экр — экранированный
 эл — элементный
 эм — электромагнитный
 эт — эталонный

б) Индексы знаковые

∞ — бесконечный
 \square — квадратный
 \sim — переменный
 \triangle — треугольный
 \circ — заданный (значение)
 \bigcirc — круглый
 \perp — перпендикулярный
 θ_0 — собственный (значение)
 \parallel — параллельный
 \equiv — постоянный

в) Индексы латинские

F — силовой
 G — весовой
 d — диаметровый
 i, j — порядковый (№)
 l — линейный
 m — массовый
 max — максимальный
 min — минимальный
 n — нормальный (нормаль)

r — сопротивлений
 S — поверхностный
 t — временной
 v — объемный

г) Индексы греческие

Σ — суммарный (полный)
 α — ослабления
 γ — распространения
 δ — затухания
 ν — частотный
 τ — касательный
 ω — угловой

д) Некоторые функции и критерии

Bi — Био критерий
 G — Гельмгольца функция
 G_b — Гиббса функция
 Gr — Грасгофа критерий
 G_d — Гудрича функция
 θ_n — Кюри точка
 θ_m — по Мартенсу теплостойкость
 V — модуль объемного сжатия
 Nu — Нуссельта критерий
 Pe — Пекле критерий
 Pr — Прандтля критерий
 μ — Пуассона коэффициент
 Re — Рейнольдса критерий
 τ — сдвига модуль
 $K_{сб}$ — Стефана — Больцмана постоянная
 Fo — Фурье критерий
 E — модуль упругости (Юнга)

В.3. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ

Таблицы

Для повышения наглядности и информативности материала в Справочнике широко используются сводные буквенно-цифровые графические таблицы. В них используются условные фигуры и знаки, буквенные обозначения величин, численные характеристики величин и в ряде случаев наглядные графические изображения.

При этом используются таблицы с неравномерным масштабом шкал, на которых отложены по равномерной сетке различные как по величине, так и по области использования физические величины. Рассмотрим в качестве примера построения такой буквенно-цифровой графической таблицы (табл. В.1) в виде справочных сведений по радиостанциям низовой народнохозяйственной радиосвязи 1, 2 и 3 групп (по ГОСТ 16019—78)

Используя наглядное представление этих данных в виде графиков и сопроводительного текста, эту и дополнительную информацию можно представить в более компактной форме (рис. В.1).

Последовательность составления такой буквенно-цифровой таблицы следующая. Выписываем численные

Рис. В.1. Пример преобразования таблицы в график с неравномерными шкалами

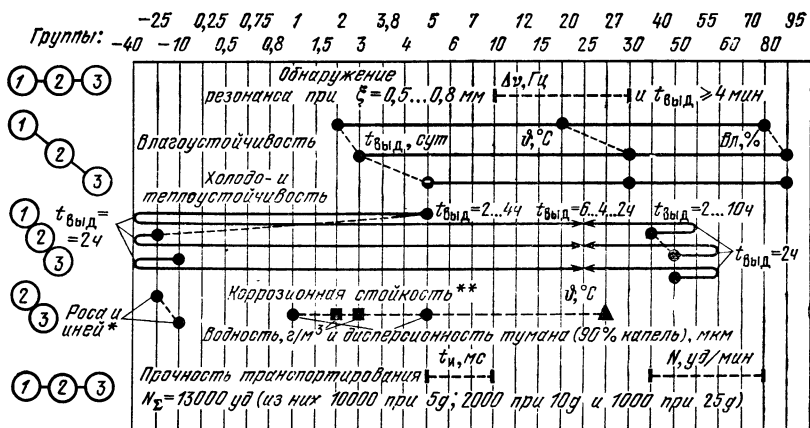


Таблица В.1

Виды испытаний радиостанций 1, 2 и 3 групп

Наименование показателей и виды испытаний	Нормы испытаний по группам		
	1	2	3
1. Обнаружение резонанса: диапазон частот, Гц амплитуда, мм время выдержки при каждом по- ложении радиостанции, мин, не менее	4	От 10 до 30 От 0,5 до 0,8 4	4
2. Влагоустойчивость: относительная влажность, % ¹ время выдержки, ч температура, °С время выдержки в нормальных климатических условиях, ч	80 48 20	95 72 30 От 6 до 12	95 120 30
3. Холодоустойчивость: рабочая температура, °С время выдержки при рабочей тем- пературе, ч предельная температура, °С время выдержки при предельной температуре, ч время выдержки в нормальных климатических условиях, ч	+5 —40 2	—25 От 2 до 4 —40 2 От 4 до 6	—10 —40 2
4. Устойчивость к воздействию инея и росы: пониженная температура, °С время выдержки при пониженной температуре, ч время выдержки в нормальных климатических условиях, ч	—1 — —	—25 2 3	—10 2 3
5. Теплоустойчивость: рабочая температура, °С время выдержки при рабочей тем- пературе, ч предельная температура, °С время выдержки при предельной температуре, ч время выдержки в нормальных климатических условиях, ч	40 55 2	50 От 2 до 10 60 2 От 2 до 4	50 60 2
6. Устойчивость к пониженному ат- мосферному давлению: температура, °С атмосферное давление, мм рт. ст.	— —	—10 460	— —

Продолжение табл. В 1

Наименование показателей и виды испытаний	Нормы испытаний по группам		
	1	2	3
7. Коррозионная стойкость: температура в камере, °С дисперсность тумана (90% ка- пель), мкм водность тумана, г/м³ время выдержки, ч	27	27	27
	24	От 1 до 5 От 2 до 3 48	48
8. Прочность при транспортирова- нии: длительность ударного импуль- са, мс частота ударов в минуту общее количество ударов, не ме- нее ускорение, g	От 5 до 10 От 4 до 80		
	5	13 000 10	25
9. Вибропрочность на одной частоте: частота, Гц ускорение, g время выдержки, ч, не менее	20 2 0,5	20 2 0,5	20 2 0,5
	—	3 10	3 10
10 Брызгозащищенность: интенсивность, мм/мин время выдержки, ч, не менее	—	3 10	3 10
11 Пылезащищенность: скорость воздушного потока, м/с, не менее время выдержки, мин, не менее	—	10 1	10 1
	—	10 1	10 1

значения всех параметров испытаний всех групп радиостанций в возрастающий ряд: — 40; — 25; — 10; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 1; 1,5; 2; 3; 3,8; 4; 5; 6; 7; 10; 12; 15; 20; 25; 27; 30; 40; 50; 55; 60; 70; 80; 95. Из этого ряда исключаем те значения, которые нецелесообразно помещать на график (по пп. 4, 6, 7, 9, 10 и 11), а проще дать в виде примечания. Если параметр изменяется в диапазоне значений, то границу интервала обозначаем вертикальными линиями и соединяем их штриховой линией, если обозначаются несколько связанных друг с другом параметров, то они обозначаются кружками, квадратами, треугольниками и другими фигурами. При стыковке в одной точке двух

групп одинаковых параметров с общим числовым значением (например, $t_{\text{выд}} = 4 \dots 6$ и $t_{\text{выд}} = 2 \dots 4$ ч дается обобщенное обозначение в виде $t_{\text{выд}} = 6 \dots 4 \dots 2$ ч).

Численные данные, которые нецелесообразно изображать в виде графиков, выносятся на свободное место в таблице, даются в примечаниях или в подрисуночной подписи. Для облегчения пользования такими буквенно-цифровыми таблицами в каждой подрисуночной подписи дается пример определения параметров.

Рисунки

Рисунки, как правило, выполняются в виде полосных блоков. Если на рисунке даны изображения эле-

ментов разных размеров, то в пределах одной полосы (рисунка) они выполнены в одном и том же масштабе. Каждый рисунок имеет подрисовочную подпись, в составе которой может быть дана расшифровка ряда понятий.

В.4. СИСТЕМА ЕДИНИЦ

Система единиц физических величин, их размерностей в этой системе и условных обозначений представляет собой своеобразный язык, с помощью которого описываются явления, процессы, изделия (конструкции). Наряду с графическими символами и чертежами они составляют тот технический язык (информационный базис), которым конструктор РЭА пользуется при анализе и синтезе конструкций.

В Справочнике в основном используются единицы СИ. В связи с тем, что на практике в конструкторских расчетах встречаются различные системы единиц (МКС, СГС, англо-американские и т. п.), далее приводятся основные, дополнительные, производные единицы СИ с их размерностями, а также и соотношения внесистемных единиц с единицами СИ.

Основные и дополнительные единицы СИ

Основные единицы СИ: длина — обозначение l , размерность $[L]$, единица м; масса — m , $[M]$, кг; время — t , $[T]$, с; сила электрического тока — I , $[I]$, А; сила света — J , $[J]$, кд; термодинамическая температура — θ , $[\theta]$, К. В связи с тем, что во многих ГОСТах и других нормативных документах до настоящего времени используется значение температуры в градусах Цельсия, а для инженерных расчетов можно полагать равенство $^{\circ}\text{C} = \text{K}$, в Справочнике приняты следующие обозначения температур.

Если в нормативном документе температура дается в градусах Цельсия, то в Справочнике приводится это же значение, но с указанием в скобках температуры в градусах Кельвина. Если речь идет о перепаде температур, то используется либо

словесное обозначение (например, перегрев в 20 градусов или град.), либо эквивалентное ему обозначение $\Delta\theta = 20 \text{ K}$. Во всех остальных случаях используется обозначение температуры в градусах Кельвина ($\text{K} = 273 + ^{\circ}\text{C}$).

Производные единицы СИ

Размерность единиц вместо $\dim \xi = L$ даются в квадратных скобках $[L]$

Амплитуда ξ , $[L]$, м (см, мм, мкм)

Вес G , $[LMT^{-2}]$, Н (сила тяжести)

Взаимоиндуктивность $L_{\text{вз}}$,

$[L^2 MT^{-2} I^{-2}]$ Г

Время (длительность) t , $[T]$, с (мин, ч, сут, мес, г)

Высота h , $[L]$, м (см, мм, мкм)

Вязкость динамическая $\eta_{\text{дин}}$,

$[L^{-1} MT^{-1}]$, Па · с

Вязкость кинематическая $\eta_{\text{км}}$,

$[L^2 T^{-1}]$, $\text{м}^2/\text{с}$

Глубина проникновения δ , $[L]$, мм (мкм)

Давление p , $[L^{-1} MT^{-2}]$, Па

Диаметр d , $[L]$, м (см, мм)

Длина l , $[L]$, м (см, мм)

Декремент затухания логарифмический ψ , [1]

Длина волны λ , $[L]$, (км, м, см, мм, нм)

Добротности коэффициент $K_{\text{дб}}$, [1]

Емкость (ИП) Q , $[TI]$, А · ч

Жесткость k , $[MT^{-2}]$, Н/м

Импульс (количество движения) K , $[LMT^{-1}]$, Н · с

Импульса момент M_t , $[L^2 MT^{-1}]$, Н · м/с

Импульс силы F_t , $[LMT^{-1}]$, Н/с

Инерции момент $M_{\text{ин}}$, $[L^2 M]$, кг · м²

Индуктивность L , $[L^2 MT^{-2} I^{-2}]$, Г

Индукция магнитная B , $[MT^{-2} I^{-1}]$, Тл

Индукция магнитная, остаточная

$B_{\text{ост}}$, $[MT^{-2} I^{-1}]$, Тл

Количество электричества $Q_э$, $[TI]$, Кл

Координаты декартовы x (\leftarrow), y (\searrow), z (\uparrow), $[L]$

Коэффициент (общее обозначение) K , [1]

Коэффициент расширения:

линейный α_l , $[L\theta^{-1}]$

поверхностный α_s , $[L^2\theta^{-1}]$

объемный α_v , $[L^3\theta^{-1}]$

Коэффициент связи (в сложных формулах) β , [1]

Коэффициент теплопроводности λ ,
 $[LMT^{-3}\Theta^{-1}]$, Вт/м · К
 Коэффициент теплоотдачи α ,
 $[L^2 M^{-1} T^{-3} \Theta^{-1}]$, Вт/м² К
 Масса m , [М], кг (г, мг)
 Модуль колеса зубчатого m , [1]
 Момент силы M , $[L^2 MT^{-2}]$, Н · м
 Мощность P , $[L^2 MT^{-3}]$, Вт
 Напряжение электрическое U ,
 $[L^2 MT^{-3} I^{-1}]$, В
 Напряженность поля магнитного H ,
 $[L^{-1} I]$, А/м
 Намагниченность при насыщении I^{nc} ,
 $[L^{-1} I]$, А/м
 Объем V , $[L^3]$, м³ (см³)
 Освещенность (блеск) $E_{св}$, $[L^{-2} J]$, лк
 Отдача η
 Перемещение Δl , [L], м (см, мм)
 Передаточное число (зубчатой пары)
 i [1]
 Проницаемость:
 абсолютная диэлектрическая ϵ_0 ,
 $[L^{-3} M^{-1} T^4 J^2]$, Ф/м
 абсолютная магнитная μ_0 ,
 $[LMT^{-2} I^{-2}]$, Г/м
 относительная диэлектрическая ϵ_r ,
 [1]
 относительная магнитная μ_r , [1]
 Проводимость тепловая $\sigma_{тп}$,
 $[L^2 MT^{-3} \Theta^{-1}]$, Вт/К
 Проводимость электрическая σ_e ,
 $[L^{-2} M^{-1} T^3 J^2]$, См
 Плотность ρ , $[ML^{-3}]$, кг/м³
 Прочность механическая $\rho^{мх}$, $[LT^{-2}]$,
 Н/м
 Прочность электрическая E_e ,
 $[L MT^{-3} I^{-1}]$, В/м
 Поток:
 магнитный Φ , $[L^2 MT^{-2} I^{-1}]$, Вб
 массовый Φ_m , $[MT^{-1}]$, кг/с
 объемный Φ_v , $[L^3 T^{-1}]$, м³/с
 тепловой $\Phi_{тп}$, $[L^2 MT^{-3}]$, Вт
 тепловой удельный $\Phi_{тп}^u$, $[MT^{-3}]$,
 Вт/м²
 частиц, радиационный Φ_N , [1], шт.
 световой $\Phi_{св}$, [J], кд/ср
 Площадь S , $[M^2]$, м²
 Путь обобщенный s
 Работа A , $[L^2 MT^{-2}]$, Дж
 Радиус вращения $r_{вр}$, [L], м (см, мм)
 Расход массовый η_m , $[MT^{-1}]$, кг/с
 Расход объемный η_v , $[L^3 T^{-1}]$, м³/с
 Реакция опоры механической R ,
 $[LMT^{-2}]$, Н
 Светимость $\Phi_{св}^s$, $[L^{-2} J]$, лм/м²
 Сечение (провода) s , $[L^2]$, мм²
 Сила:
 механическая F $[LMT^{-2}]$, Н

магнитодвижущая Θ , [I], А
 обобщенная X
 электродвижущая E , $[L^2 MT^{-3} I^{-1}]$, В
 света (энергетическая) $J_{св}$,
 $[L^2 MT^{-3}]$, Вт/ср
 тока (электрического) I , [I], А
 скорость v , $[LT^{-1}]$, м/с (мм/с)
 Сопротивление:
 акустическое $r_{ак}$, $[L^{-4} MT^{-1}]$,
 Па · с/м³
 механическое $r_{мх}$, $[MT^{-1}]$, Н · с/м
 полное (электрическое) z ,
 $[L^2 MT^{-3} I^{-2}]$, Ом
 тепловое $r_{тп}$, $[L^2 MT^{-3} \Theta^{-1}]$, К/Вт
 удельное (электрическое) ρ ,
 $[L^3 MT^{-3} I^{-2}]$, Ом · м
 электрическое r , $[L^2 MT^{-3} I^{-1}]$, Ом
 Температура θ , $[\Theta]$, К или ϑ , °C $[\Theta]$
 Теплоемкость:
 при постоянном давлении c_p ,
 $[L^2 MT^{-2} \Theta^{-1}]$, Дж/К
 при постоянном объеме c_v ,
 $[L^2 MT^{-2} \Theta^{-1}]$, Дж/К
 Температуропроводность a , $[L^2 T^{-1}]$,
 м²/с
 Ускорение свободного падения g ,
 $[LT^{-2}]$, 9,81 м/с²
 Ускорение линейное a , $[LT^{-2}]$, м/с²
 Ускорение угловое ε , $[T^{-2}]$, 1/с²
 Частота ν , $[T^{-1}]$, Гц
 Частота вращения n , $[T^{-1}]$, с⁻¹
 Частота круговая (угловая) ω —
 $= 2\pi\nu$, $[T^{-1}]$, с⁻¹ или Гц
 Число (предметов, элементов) N , [1],
 шт
 Ширина b , [L], м (см, мм)
 Энергия (общее обозначение) W ,
 $[L^2 MT^{-2}]$, Дж
 Энергия световая $W_{св}$, $[TJ]$, лм · с
 Яркость $J_{св}^s$, $[L^{-2} J]$, кд/м²
 Десятичные соотношения единиц
 10¹² тера—Т
 10⁹ гига —Г
 10⁶ мега—М
 10³ кило—к
 (10² гекто—г)
 (10¹ дека—да)
 (10⁻¹ деци—д)
 (10⁻² санти—с)
 10⁻³ милли—м
 10⁻⁶ микро—мк
 10⁻⁹ нано—н
 10⁻¹² пико—п
 10⁻¹⁵ фемто—ф
 10⁻¹⁸ атто—а
 (в скобках указаны не рекомендуемые соотношения).

Соотношения с внесистемными единицами**Время:**

- 1 сутки = 86400 с
- 1 неделя = $6,05 \cdot 10^5$ с
- 1 месяц = $2,59 \cdot 10^6$ с
- 1 год = $3,16 \cdot 10^7$ с

Давление:

- 1 бар (бар) = 10^5 Н/м² = 10^5 Па
- 1 миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.) = 133 Па
- 1 техническая атмосфера (ат или кг/см²) = $9,81 \cdot 10^4$ Па
- 1 миллиметр водяного столба (мм вод. ст.) = 9,81 Па

Длина:

- 1 микрон (мк, μ) = 10^{-6} м
- 1 ангстрем (\AA) = 10^{-10} м

Масса:

- 1 тонна (т) = 10^3 кг
- 1 центнер (ц) = 10^2 кг
- 1 карат (сг) = $2 \cdot 10^{-4}$ кг

Мощность: 1 л. с. = 736 Вт
(75 кг м/с)

Объем: 1 литр (л) = 10^{-3} м³

Площадь:

- 1 ар (а) = 100 м²
- 1 гектар (га) = 10^4 м²

Плотность поверхностная теплового потока:

- 1 калория на квадратный сантиметр за секунду (кал/(см² · с)) = $4,19 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²

- 1 килокалория на квадратный метр за час (ккал/(м² · ч)) = 1,16 Вт/м²

Поток тепловой:

- 1 калория в секунду (кал/с) = 4,19 Вт
- 1 килокалория в час (ккал/ч) = 1,16 Вт

Работа и энергия:

- 1 ватт-час (Вт · ч) = 3600 Дж
- 1 электрон-вольт (эВ) = $1,6 \times 10^{-19}$ Дж

Сила: 1 тонна-сила (тс) = $9,81 \times 10^3$ Н

Скорость угловая:

- 1 об/мин = 0,105 рад/с
- 1 об/с = 6,28 рад/с

Теплоемкость удельная:

- 1 калория на грамм-градус кал/(г · °С) = $4,19 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К)
- 1 килокалория на килограмм-градус ккал/(кг · °С) = $4,19 \times 10^3$ Дж/(кг · К)

Теплопроводность:

- 1 калория на сантиметр-секунду-градус: кал/(см · с · °С) = $4,19 \cdot 10^2$ Вт/(м · К)

1 килокалория на метр-час-градус: ккал/(м · ч · °С) = 1,16 Вт/(м · К)

Теплота:

- 1 калория (кал) = 4,19 Дж
- 1 килокалория (ккал) = $4,19 \times 10^3$ Дж

Теплота удельных фазовых превращений и химический реакций:

- 1 калория на градус (кал/°С) = 4,19 Дж/К

1 килокалория на градус (ккал/°С) = $4,19 \cdot 10^3$ Дж/К

Плоский угол:

- 1 градус (°) = $1,75 \cdot 10^{-2}$ рад
- 1 минута (′) = $2,91 \cdot 10^{-4}$ рад
- 1 секунда (″) = $4,85 \cdot 10^{-6}$ рад

Угол поворота: 1 оборот (об.) = 6,28 рад

Основные физические постоянные**Авогадро число**

$6,02 \cdot 10^{26}$ 1/кмоль

Больцмана постоянная

$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Вина постоянная смещения

$2,9 \cdot 10^{-3}$ м · К

Гравитационная постоянная

$6,67 \cdot 10^{-11}$ м³/(кг · с²)

Заряд элементарный

$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Лошмидта число

$2,69 \cdot 10^{25}$ 1/м³

Планка постоянная

$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с

Ридберга постоянная

$1,1 \cdot 10^7$ 1/м

Стефана—Больцмана постоянная

$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴)

Фарадея число

$9,65 \cdot 10^7$ Кл/кг-эквивалент

Универсальная газовая постоянная

$8,32 \cdot 10^3$ Дж/(К · кмоль)

Объем одного моля газа

22,4 м³/кмоль

Перевод основных англо-американских мер в метрические**Меры длины:**

- 1 миля (морская) = 10 кабельтовых = 6080 футов = 1853,2 м
- 1 миля (сухопутная) = 1760 ярдов = 1609 м
- 1 ярд = 3 фута = 91,44 см
- 1 фут = 12 дюймов = 304,8 мм
- 1 дюйм = 25,4 мм

Меры площади:

1 кв. миля = 640 акров = 258,99 га
 1 акр = 4840 кв. ярдов = 404 кв. м
 1 кв. ярд = 9 кв. футов = 0,836 кв. м
 1 кв. фут = 0,093 кв. м
 1 кв. дюйм = 6,45 кв. см.

Меры объема

1 куб. ярд = 27 куб. футам = 0,76 куб. м
 1 куб. фут = 1728 куб. дюймам = 0,028 куб. м
 1 куб. дюйм = 16,39 куб. см

Меры объема жидкостей:

1 галлон США = 0,83 брит. галлона = 3,78 л.
 1 кварта США = 0,83 брит. кварты = 0,946 л.
 1 кварта США = 2 пинтам США = 32 жидким унциям США
 1 брит. галлон = 1,2 галлона США = 4 брит. квартам = 8 брит. пинтам = 160 брит. жидким унциям = 277,41 куб. дюймов = 4,55 л

Меры веса:

1 «длинная» тонна = 2240 фунтов = 1,016 т
 1 «короткая» тонна = 2000 фунтов = 0,907 т
 1 центнер = 112 фунтов = 50,8 кг
 1 фунт коммерческий = 16 унций = 256 драм = 7000 гранов = 453,6 г
 1 унция коммерческая = 16 драм = 28,35 г
 1 драхма коммерческая = 27,34 гра = 1,77 г
 1 гран коммерческий = 64,8 мг

Меры давления:

1 фунт/кв. дюйм = 0,703 · 10⁻³ кг/мм² = 6,9 · 10³ Па

В.5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКИХ РАСЧЕТОВ

Общие соображения

Для увеличения объема сведений в Справочнике (при возможности и целесообразности) приводятся минимум расчетных графиков и номограмм, вместо них даются формулы. Кроме этого, запись формул дела-

ется строчной. Например, вместо обычной формы записи

$$K \frac{a+b}{c} \sin \alpha + A e^{-\beta \gamma / \varepsilon} - \arccos \delta$$

дается

$$K (a+b) d^{-1/c} e^{-1/c} \sin \alpha + A \exp (-\beta \gamma / \varepsilon) - \arccos \delta$$

или

$$K (a+b) d^{-c^{-1}} e^{-1/c^{-1}} \sin \alpha + A \exp (-\beta \gamma \varepsilon^{-1}) - \arccos \delta.$$

Вместо переводных таблиц единиц измерения дается формульная запись (например, 1 фут = 0,304 м и т. п.).

Такие формы записи, давая экономию объема Справочника, неудобны при ручных методах расчетов или при использовании логарифмической линейки. Это, так же как и рост сложности и точности конструкторских расчетов, требует использования машинных методов расчетов с помощью электронных клавишных вычислительных машин ЭКВМ (микрокалькуляторов), которые позволяют увеличить скорость расчетов по сравнению с расчетом на логарифмической линейке в 5 ... 7 раз при повышении точности расчета до 6 ... 8-й значащей цифры. Поэтому для успешного использования материала Справочника необходимо овладеть практическими приемами работы и правильно выбрать тип ЭКВМ.

Рекомендации по выбору ЭКВМ для конструкторских расчетов

В практике конструкторских расчетов целесообразнее всего использовать микрокалькуляторы для инженерных расчетов (Scientific Calculator, Electronic Scientific Calculator, Hand-size Programmable Calculator, Taschenrechner и т. п.), которые позволяют производить арифметические вычисления, автоматически или по программам вычислять до 30 и более научных функций, вести цепные вычисления, вычисления по сложным формулам и с запоминанием промежуточных результатов.

Основными частями ЭКВМ являются (рис. В.2, а): клавишное устройство и переключатели, с помощью которых в устройстве ввода данных формируются команды для оперативного запоминающего устройства, арифметико-логического устройства, постоянного (внутреннего или сменного внешнего) запоминающего устройства ЗУ и устройства управления. Из устройства управления через устройство вывода данных проходят команды формирования цифр и знаков (в программируемых ЭКВМ) на экран комбинированного монодисплея и (при необходимости) команды блокировки в устройства ввода данных. Генератор опорных частот формирует тактовые сигналы, используемые в работе частей ЭКВМ. Источник питания обычно выполняется в виде универсального устройства, позволяющего работать от гальванических элементов, аккумуляторов и стабилизированного сетевого блока питания (Adaptor).

Так как в современных ЭКВМ используется алгебраическая логика (данные вводятся так же, как записываются числовые значения в формулу), то для выполнения многих расчетов достаточно знать назначение и расположение клавиш и правила их использования. В настоящее время стандартизовано расположение только цифровых клавиш и клавиш плавающей запятой (запятой, которая может быть введена между любыми разрядами числа). Расположение остальных клавиш в ЭКВМ даже одной и той же страны или фирмы может быть разным. Поэтому на панели ЭКВМ можно выделить только области расположения клавиш и вспомогательных переключателей (рис. В.2, б).

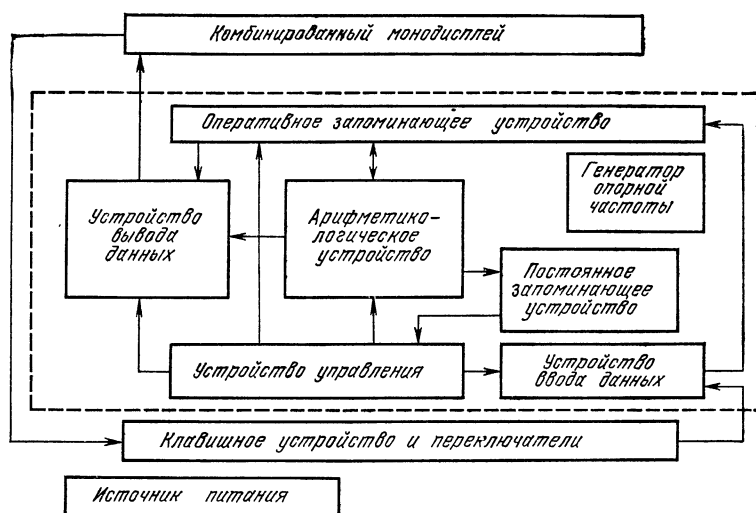
По назначению и наиболее распространенным обозначениям клавиш ЭКВМ можно сгруппировать следующим образом (рис. В.3): для ввода числа и показателя степени 1, ..., 6, работы с памятью 7, ..., 10, выполнения арифметических расчетов и вычисления алгебраических функций 11 ... 13, вычисления логарифмических и комбинаторных функций 14, 15, тригонометрических и гиперболических функций 16, 17, статистических функций 18, перево-

да значений единиц измерения 19 и ввода специальных функций 20.

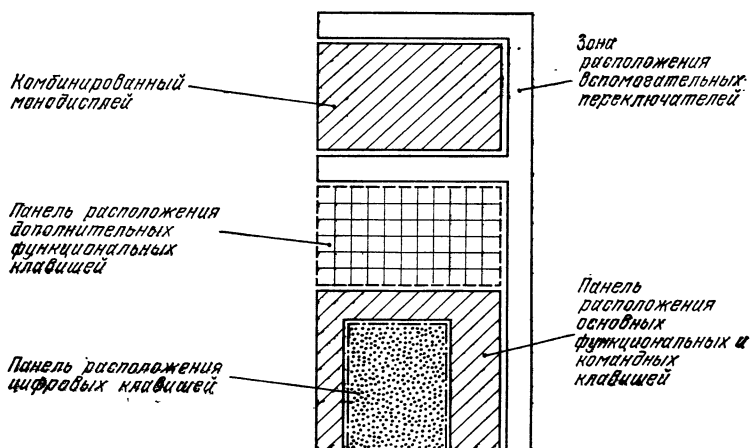
В некоторых ЭКВМ при расчетах тригонометрических функций имеется возможность ввода данных в радианах, десятичных градусах, градусах, минутах и секундах и гонах g ($g = 1,57 \cdot 10^{-2}$ рад = 0,01 прямого угла) и их перевода друг в друга, что создает большие удобства (например: 1 рад = $57,3^\circ = 57^\circ 18' = 63,7$ гон), а также возможность выполнения вычислений с простыми дробями (символы a^b/c или просто $/$). Использование префиксных клавиш (клавишей совмещения функций F и P) позволяет использовать клавиши ввода данных дважды или трижды, что существенно уменьшает площадь панели и габариты ЭКВМ в целом.

При прочих равных условиях для пользователя ЭКВМ наиболее важными являются показатели ее экономичности и возможности вычислений. Экономичность зависит от типа микросхемы и параметров индикатора монодисплея. Самые экономичные индикаторы выполняются на жидких кристаллах (с ними ЭКВМ потребляет 0,4 ... 0,6 мВт, цифры темного цвета на песочном фоне), менее экономичны индикаторы на светолучающих диодах с красным свечением (потребление ЭКВМ 0,2 ... 0,4 Вт) и люминесцентные с зеленым или сине-зеленым свечением (0,25 ... 0,6 Вт). Программируемые ЭКВМ с внутренним или внешним ЗУ потребляют 0,7 ... 1,5 Вт.

Возможности вычислений определяются количеством разрядов числа (мантиссы) и показателя степени (экспоненты), быстродействием, количеством вычисляемых функций и числом ЗУ. Наиболее распространены ЭКВМ с 8-разрядным индикатором, который иногда может использоваться для индикации 5-разрядной мантиссы и 2-разрядной экспоненты. 10-разрядный индикатор мантиссы с 2-разрядной экспонентой, как правило, дает излишнюю точность. Наиболее приемлем для инженерных расчетов индикатор с 8-разрядной мантиссой и 2-разрядной экспонентой. Точность вычислений гарантируется не ниже последнего или предпоследнего знака мантиссы. Существуют ЭКВМ, в которых при 8-разрядной



а



б

Рис. В.2. Функциональная схема ЭКВМ (а) и расположение ее элементов управления на лицевой панели (б)

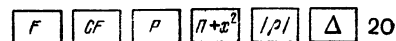
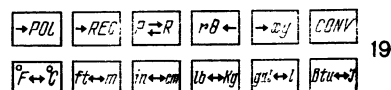
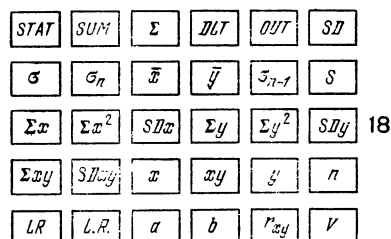
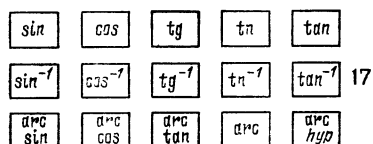
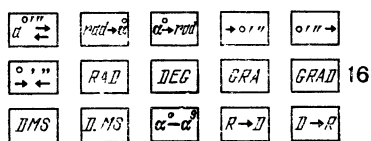
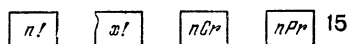
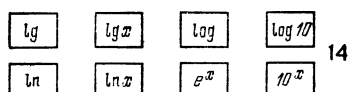
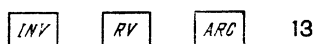
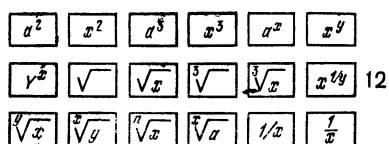
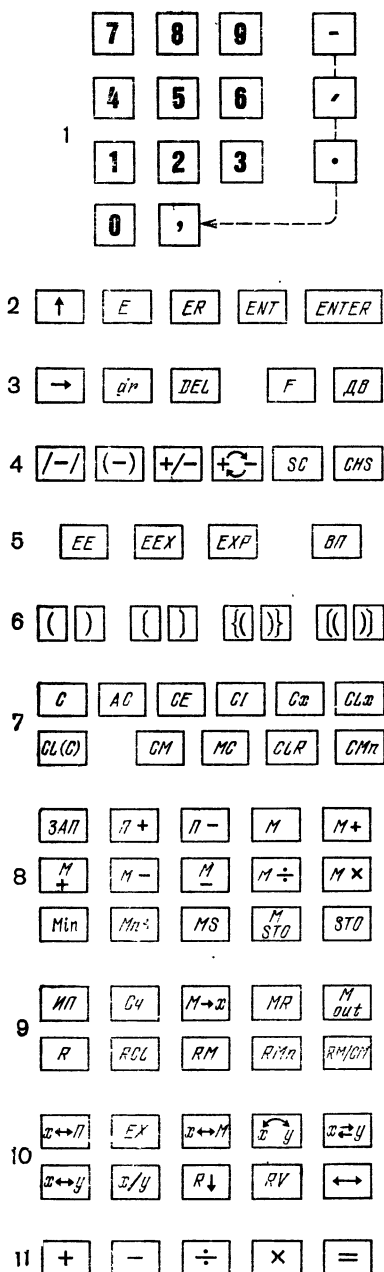


Рис. В.3. Наиболее распространенные символы обозначения операции:

1 — расположение цифровых клавиш и варианты обозначения плавающей запятой; 2 — окончание набора числа; 3 — последовательное стирание последнего неправильного набранного знака и стирание только одного последнего знака ($F+ДВ$); 4 — смена знака; 5 — ввод показателя степени 10^n (ввод порядка); 6 — скобки; 7 — полный сброс C (входные, выходные регистры и память); сброс входа x (дисплея), сброс регистров ввода — вывода CL (C), очистка всех регистров памяти или регистров с номером n ; 8 — ввод данных в постоянное ЗУ (при этом возможно выполнение действий сложения, вычитания, деления и умножения) либо ввод в постоянное ЗУ с номером n ; 9 — вывод данных из постоянного ЗУ на дисплей, вывод данных с последующей очисткой постоянного ЗУ (RMC/M); 10 — обмен данных между дисплеем и постоянным ЗУ, с регистром постоянного ЗУ какого-либо номера (нажать R и цифровую клавишу) обмен данных операнда и оператора (RV); 11 — знаки сложения, вычитания, деления, умножения и равенства (итога); 12 — алгебраические функции возведения в степень извлечения корня, знак получения обратной величины (инверсии); 13 — символы инверсии (в ряде ЭКВМ символ ARC используется как аналог $1/x$); 14 — символы логарифмирования и потенцирования; 15 — факториалы, сочетания и перестановки; 16 — перевод углов, записанных в градусах, минутах, секундах (DMS), в радианах (RAD), в гонах ($GRA CRAD$, gn) в десятичные градусы (DEG) и обратно; 17 — обозначение прямых (\sin , ...) и обратных (\sin^{-1} , \arcsin) тригонометрических, гиперболических (\sinh) и обратных гиперболических ($\operatorname{arctanh}$) функций; 18 — символы выполнения статистических расчетов (при одной и двух переменных), определения количества параметров (n), линейной регрессии (LR , $L R$), постоянных регрессии (a , b), коэффициента корреляции r_{xy} и коэффициента вариации V ; 19 — перевод полярных координат в декартовы и наоборот, обратный перевод ($CONV$), перевод англо-американских единиц измерения в метрическую систему и обратно; 20 — символы совмещенной функции (F), снятия режима совмещенной функции (CF), второй совмещенной функции (P) вычисления выражений вида A^2+B^2 и $\sqrt{A^2+B^2}$ и погрешностей (Δ)

мантиссе внутренние расчеты ведутся с 16-разрядными числами, что повышает точность вычислений

Быстродействие современных не-

программируемых ЭКВМ с индикаторами на жидких кристаллах составляет 2 ... 4 с, со светодиодными и люминесцентными индикаторами — 0,1 ... 0,5 с. В программируемых ЭКВМ быстродействие составляет 1 ... 5 с в зависимости от сложности программы вычислений. Количество вычисляемых научных функций обычно 20 ... 40, количество ЗУ (регистров памяти) — 5 ... 30. Для программируемых ЭКВМ дополнительными характеристиками являются: число шагов программы (обычно в пределах 49 ... 224), количество ЗУ (8 ... 30), число подпрограмм (до 10), число переходов вида $x < y$, $x \geq y$; $x \neq y$; $x = y$; $x < 0$, $x \geq 0$; $x > 0$; $x \neq 0$; $x = 0$ и возможность использования внешних магнитных карт. Масса ЭКВМ с индикаторами на жидких кристаллах составляет 60 ... 80 г, на светодиодных и люминесцентных индикаторах — 125 ... 250 г и программируемых — 400 ... 1500 г.

Таким образом, зная расчетные задачи, можно по приведенным рекомендациям выбрать подходящий

Рис. В.4. Отечественные ЭКВМ для инженерных расчетов: БЗ-18А (а), СЗ-15 (б) и программируемая БЗ-21 (в)

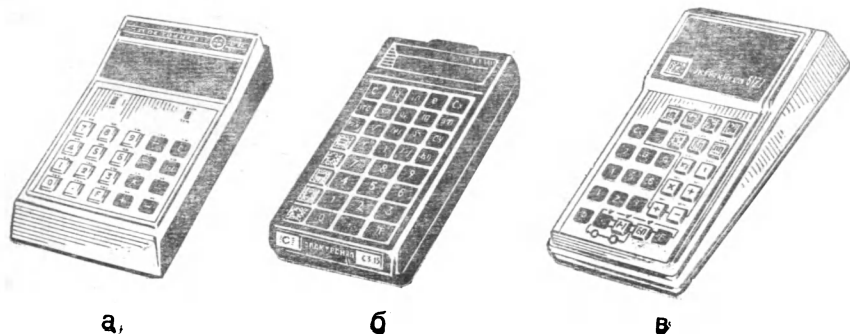


Таблица В.2

Основные параметры отечественных ЭКВМ для инженерных и научных расчетов (рис. В.4)

Тип	Разряды		Число функций	Количество ЗУ	Число шагов внешней программы	Число подпрограмм
	мантиссы	экспоненты				
БЗ-18А	8	—	24	2	—	—
БЗ-37	8	—	24	2	—	—
БЗ-36	8	2	19	2	—	—
СЗ-15	10	2	21	3	—	—
БЗ-21	7	2	14	10	60	5

тип ЭКВМ. Для большинства обычных инженерных расчетов достаточны ЭКВМ с внутренними программами

вычисления логарифмических и тригонометрических функций (БЗ-18А, БЗ-18М, БЗ-19М, СЗ-15), при необходимости частых вычислений гиперболических, комбинаторных и статистических функций следует использовать ЭКВМ, имеющую такие программы, или программируемую ЭКВМ. При работах по частным программам и при вычислениях нестандартных функций лучше применять ЭКВМ с программированием (БЗ-21) (табл. В.2).

Так как соотношения стоимости ЭКВМ для инженерных расчетов с программированием (во внутреннее ЗУ или на внешнюю магнитную сменную карту) примерно равно 1 : 1,5 2 : 2,5 ... 3, то нет смысла использовать более сложную ЭКВМ, чем это нужно для расчетов.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНСТРУКЦИЮ РЭА

1. КЛАССИФИКАЦИЯ РЭА *

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Термин радиоэлектронная аппаратура (РЭА) появился в 1963 г. для общего описания изделий радиотехники (приемников, передатчиков), вычислительной техники (ЭВМ и устройств для обработки данных), промышленной электроники (устройства управления технологическими процессами, приборы для воздействия на материалы и детали) и т. п. В настоящее время различают радиоэлектронные системы (радиосвязи, радиолокации и навигации, управления и т. п.) и радиоэлектронные устройства (радиоприемные, радиопередающие и т. п.). В литературе по конструированию термин РЭА относят к широкому классу изделий, в которых используют преимущественно электромагнитные сигналы для передачи, приема и преобразования информации.

Основной физический механизм работы РЭА — многократное преобразование природы сигналов. Например, в простейшем радиоприемнике (рис. 1.1, а) входной сигнал, зашифрованный в свойствах электромагнитного поля I , преобразуется на выходе антенны в сигнал высокой частоты 2. Аналогичные эффекты происходят в детекторе Д и громкоговорителе Гр. По первому впечатлению таких преобразований не происходит в усилителях высокой и низкой частоты (природа входных 2 и 3 и выходных 2' и 3' сигналов одинакова). Однако рассмотрение упрощенной схемы усилителя низкой частоты (рис. 1.1, б) показывает, что он является сложным преобразова-

телем, включающим в себя нить накала нн (преобразователь электрической энергии в тепловую), катод к (преобразователь тепловой энергии в энергию электронного газа), промежуток сетка—катод с — к (преобразователь энергии входного управляющего сигнала $W_{вх}$ в энергию электрического поля) и т. д.

При работе резисторов происходит преобразование электрической энергии в тепловую. При работе конденсаторов и катушек индуктивности требуется не только наличие соответствующим образом выполненных проводников, но определенного пространства (емкость или индуктивность [1] — способность проводников с током и окружающего их пространства накапливать энергию электрического или магнитного поля). Таким образом, все схемотехнические элементы, устройства и системы — преобразователи, требующие при работе дополнительного объема пространства для поглощения или накопления тепловой, акустической, световой, электромагнитной и т. п. энергии. Поэтому решение конструкторско-компоновочных задач требует обязательного учета как природы эффектов преобразования, так и дополнительных объемов для их нормального протекания. Необходимая степень учета этих факторов зависит от конструктивных особенностей РЭА.

Таким образом, конструкцию РЭА следует рассматривать в виде определенного образом упорядоченной статической комбинации (структуры) исходных свойств (материалов, элементов) и их взаимосвязей, обеспечивающих заданное динамическое преобразование физической природы

* Составитель Р. Г. Варламов.

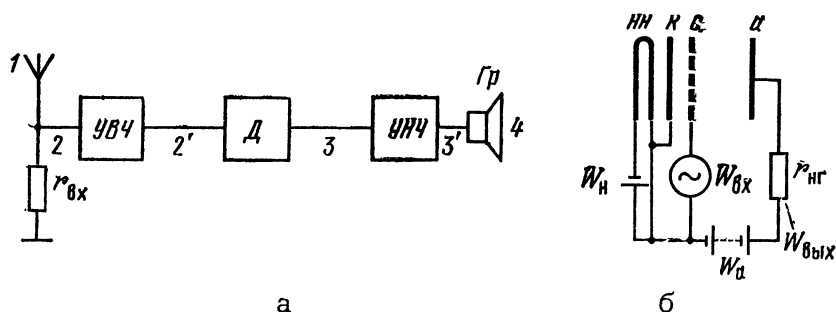


Рис. 1.1. Функциональная схема приемника прямого усиления (а) с указанием различной природы сигнала, несущего информацию 1...4, и упрощенная схема усилителя низкой частоты (б) в виде совокупности отдельных преобразователей

сигналов, преимущественно электромагнитной природы. В свою очередь она разделяется на:

— определенные упорядоченные статические структуры материалов, «запомнивших» воздействия при изготовлении элементов конструкции (шестерни, резисторы, микросхемы и т. п.), — собственно конструктивные и схемные элементы,

— определенные статические или динамические связи, определяемые компоновкой и связями элементов конструкции, электромонтажные, механические и др.,

— специальные каналы, с помощью которых осуществляются эффекты энерго-массопереноса (обмена) со средой или специальными устройствами (ввода—вывода, теплообмена, экранирования и т. п.), а также человеком-оператором.

Особенности конструкции РЭА определяются областью ее использования (объектом-носителем), схемотехническим назначением, используемыми элементной и конструктивной базами.

1.2. ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЭА [2 ... 5]

Области использования и объекты посетители РЭА определяют параметры конкретного микроклимата в месте расположения РЭА. Легче всего обеспечить нормальную работу РЭА в отапливаемых помещениях в стационарных условиях. Стационарная и переносная РЭА, предназначенная для работы на поверхности зем-

ли, должна иметь в конструкции защитные корпуса с уплотнением и элементную базу, обеспечивающую нормальную работу при воздействии климатических факторов.

Возимая РЭА для наземных транспортных средств подвергается воздействию вибраций, ударов и ускорений. Возможно воздействие пыли, паров бензина и масел.

Корабельная РЭА требует использования влагонепроницаемых корпусов и уплотнения осей органов управления.

Самолетная и вертолетная РЭА должна работать при пониженном атмосферном давлении, воздействии росы и инея, тумана, вибраций, ударов и других воздействий, определяемых конструкцией самолета и вертолета. Наиболее тяжелыми могут быть условия работы ракетной и космической РЭА.

Поэтому при разработке конструкции РЭА необходимо знание особенностей объектов-носителей и климатических условий местности эксплуатации РЭА, которые оказывают существенное влияние на конструктивно-компоновочные параметры РЭА, на выбор материалов элементной и конструктивной базы.

1.3. НАЗНАЧЕНИЕ РЭА [2]

В настоящее время РЭА используется для связи, управления, навигации, различных научных исследований и в производстве. Суть ее работы и определяющие факторы следующие.

Радио-, оптическая и проводная связь — передача радиосигналов от одного абонента к другому по радио-, оптическим или проводным линиям связи. Должна обеспечивать многоканальность, бесперерывное вхождение в связь, помехозащищенность от атмосферных и искусственных помех. При наличии промежуточных приемопередающих устройств получают радиорелейные линии связи.

Радиовещание и телевидение — передача речевых, музыкальных и визуальных ознакомительных или развлекательных сообщений большим группам людей. Должны обеспечивать достаточную дальность действия, число каналов и высокое качество воспроизведения сигналов (моно-, стерео- или квадрофоническое для акустических, черно-белое, цветное и объемное для визуальных). Могут использоваться для специальных целей в условиях работы промышленных, зрелищных, медицинских и других организаций (диспетчерские устройства связи, промышленное и медицинское телевидение, специальные звуковые эффекты и т. п.).

Радиоуправление — управление по эфиру или проводам с помощью радиосигналов промышленными, научными или военными объектами. Должно обеспечить простоту, точность и скрытность управления.

Радотелеметрия — получение информации о работе и состоянии объектов и людей с помощью специальных промежуточных преобразователей и линий связи. Аппаратура должна обеспечивать точность, быстродействие и быть (особенно для малогабаритных объектов) малогабаритной и экономичной.

Радиометеорология — получение информации, в основном, с помощью специально оснащенных ИСЗ (например, «Метеор», «Нимбус») и наземных комплексов об облачности, температуре, различных образованиях и других факторах на поверхности Земли, определяющих погоду. Должна обеспечивать точность и своевременность получения метеоинформации.

Радиолокация — определение координат и характеристик объекта активными (источники импульсного или непрерывного излучения в со-

ставе РЛС) или пассивными (источник радио- или теплового излучения сам объект) методами. Должна обеспечивать точность и достоверность работы, особенно в условиях пассивных или активных помех.

Радионавигация — особо точное определение координат объекта с помощью специальных источников радиоизлучения с точно известными координатами (например, береговые радиовещательные или специальные станции). Обеспечивает большую точность (особенно на больших расстояниях) по сравнению с радиолокацией.

Радиоастрономия — получение информации о космических объектах с помощью приема и анализа их радиоизлучения. Так как ширина «радиоокна» в атмосфере намного больше оптического, то и количество информации тоже намного больше. Должна обеспечивать наивысшую чувствительность и широкополосность системы, ибо ими определяется количество получаемой информации.

Медицинская радиоэлектроника — использование методов и средств радиоэлектроники в биомедицинских исследованиях, в качестве электронных стимуляторов деятельности отдельных органов человека, в создании протезов и диагностических систем. Должна обеспечивать высокую эффективность при минимальном нежелательном воздействии на организм и простом обслуживании.

Радиоизмерения — создание и использование специальных устройств для измерения или имитации различных сигналов, преимущественно электромагнитной природы. Должны обеспечивать требуемую точность, стабильность, уровень и быстродействие во всех научных исследованиях для которых предназначены измерительные приборы или комплексы, включая, в частности, наручные электронные часы, средства комплексного контроля и другие подобные устройства. Должны проводиться с минимальным влиянием на параметры контролируемой цепи.

Устройства обработки данных — обычно являются частью более сложных радиосистем или систем автоматизированного управления (АСУ), но могут быть выполнены и в виде

самостоятельных систем вида электронных цифровых, аналоговых или клавишных вычислительных машин (ЦЭВМ или просто ЭВМ, АЭВМ и ЭКВМ). Должны обеспечивать простоту ввода и вывода данных, точность, бесшумность и надежность работы.

Устройства записи и воспроизведения сигналов — приспособления для записи и воспроизведения акустических, визуальных и специальных сигналов на проволочных, ленточных, дисковых, плоских ферромагнитных (магнитная запись), оптических (в том числе голографическая запись) и других по форме и физической природе носителей (в виде магнитофонов, радиол, ЗУ и т. п.). Должны обеспечивать в первую очередь требуемое качество и простоту управления. Для специальных устройств (например, ЗУ) могут предъявляться требования разного быстродействия при записи и воспроизведении.

Устройства энергетического характера — приспособления для непосредственного воздействия на свойства материалов или объект управления (некоторые устройства квантовой электроники, используемые в технологии микросхем, высокочастотная закатка, аппаратура физиотерапии, специальные выходные устройства управления и т. п.). Должны обеспечивать избирательное энергетическое воздействие в соответствии с назначением. Их часто (как и некоторые электромеханические и фотооптические устройства) не включают в радиоэлектроник.

Рассмотрение характерных областей использования радиоэлектроники показывает, что она, в основном, предназначена для решения разнообразных информационных задач. Этим определяется как математический аппарат радионинженера, так и используемые им физические модели.

1.4. СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ (ЭЛЕМЕНТАРНАЯ) БАЗА РЭА [2 ... 4]

Антенны применяются для излучения и приема энергии электромагнитных колебаний в диапазоне ча-

стот $10^4 \dots 10^{15}$ Гц. Чтобы повысить эффективность работы антенн (направленность, чувствительность), необходимо иметь размеры антенн значительно больше рабочей длины волны, поэтому в диапазоне частот $10^4 \dots 10^5$ Гц даже при объемах антенн $\sim 10^9$ м³ эффективная площадь антенн оказывается незначительной, а диаграммы направленности весьма широкими. В диапазоне частот $10^8 \dots 10^{10}$ Гц возможно формирование весьма узких диаграмм направленности, что повышает дальность действия РЭА. Для малогабаритной переносной аппаратуры применяют малогабаритные магнитные и штыревые антенны, качество которых зависит от размеров антенн (особенно это касается наружных антенн).

Элементы антенных трактов используются для передачи энергии от приемных или передающих антенн (излучателей) к входным устройствам или резонансным контурам различного типа приемников или передатчиков либо обратно. В диапазоне частот $10^4 \dots 10^6$ Гц в качестве таковых используют специальные экранированные гибкие высокочастотные кабели и коаксиальные линии, на более высоких частотах — специальные коаксиальные кабели и коаксиальные линии, в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн — волноводы, в оптическом диапазоне — световоды. Кроме того, элементы антенных трактов используются для коммутации, согласования элементов с разным волновым сопротивлением, в виде фильтрующих и переходных элементов с различными электрическими и механическими (например, вращающиеся соединения) свойствами.

Резонансные контуры служат для создания резонансных эффектов тока (последовательный контур) или напряжения (параллельный контур). Могут быть выполнены из комбинаций индуктивностей и емкостей (дискретные элементы колебательных контуров в диапазоне частот $10^4 \dots 10^6$ Гц), в виде контуров переходного типа (дециметровый диапазон), в виде объемных резонаторов (сантиметровый и миллиметровый диапазоны). Колебательные контуры из дискретных элементов и переходных

го типа часто требуют использования внешних экранов, которые увеличивают объем контура в 3...4 раза (при приемлемом уменьшении добротности контура).

Резисторы применяются для снижения напряжения, силы тока, стабилизации режимов и сопротивлений нагрузки. Могут быть металлопленочные, композиционные, объемные и проволочные, что определяется схемными требованиями и условиями эксплуатации. В микросхемах резисторы выполняются в виде пленочных или объемных элементов на подложке или в толще кристалла. Являются основными источниками тепловыделений в РЭА.

Конденсаторы используются для разделения цепей по постоянному току (бумажные, пленочные и, частично, электролитические), в частотно-задающих цепях (керамические, слюдяные), в блокирующих и накопительных. Тепловые потери, как правило, столь незначительны, что ими при решении конструкторских задач можно пренебречь. Высоковольтные конденсаторы требуют увеличения объема пространства при компоновке из-за увеличения градиента потенциала и приближения его значений к пробойным. Конденсаторы переменной емкости требуют особой формы пластин для обеспечения заданных функциональных связей емкости с перемещением ротора и, в ряде случаев, весьма точных механизмов привода и качества их выполнения (особенно в измерительных устройствах).

Индуктивные элементы применяются для образования резонансных контуров и трансформаторов (как в высокочастотных цепях, так и в силовых и цепях управления). Выполняются в виде отдельных катушек индуктивности или их разнообразных комбинаций. Для уменьшения габаритов используют различные ферромагнитные сердечники из ферритов, никелевых сплавов, трансформаторной стали. При наличии постоянного тока подмагничивания часто используют сердечник с воздушным зазором.

Электронные лампы служат для преобразования энергии анодных источников питания в энергию выходных сигналов с помощью управления

электронным газом в цепях управляющих сеток. Для формирования потока электронного газа требуются наличие накальных цепей, обладающих весьма низкими энергетическими характеристиками за счет многократных преобразований энергии накальных источников питания в энергию электронного газа. Могут иметь два (катод и анод) или больше основных электродов (комбинированные лампы). Влияние выходных цепей на входные цепи очень слабое, что важно для работы ряда электронных схем. Лампы в каскадах преобразования и «усиления» маломощных сигналов высокой и низкой частоты практически всю энергию питания (анодных и накальных цепей) обращают в тепло, мощные генераторные лампы и лампы выходных каскадов «усилителей» могут иметь к. п. д. по анодным цепям до 0,5 и несколько выше.

Полупроводниковые приборы предназначены для тех же целей, что и электронные лампы. Отличаются большей экономичностью (за счет отсутствия цепей накала), могут быть в виде многоэлектродных композиций (в том числе и с дискретными миниатюрными резисторами и конденсаторами), образующих широкий класс различных микросхем, либо в виде дискретных элементов типа диодов и транзисторов. Влияние выходной цепи на входную весьма велико, что часто является причиной существенного усложнения схемы устройства. Весьма малогабаритны, прочны, обладают большим сроком службы.

Входные и выходные преобразователи служат для преобразования механических (ларингофоны, звуко-снятатели), акустических (микрофоны), магнитных (записывающие магнитофонные головки) или оптических (фотопреобразователи, иконоскопы) сигналов в электрические и наоборот (рекордеры, телефоны и громкоговорители, воспроизводящие магнитные головки, кинескопы и люминесцентные устройства). Это обширный и расширяющийся класс преобразователей, используемых в современной РЭА. Ларингофоны преобразуют механические колебания голосовых связок в электрические сигналы, источником механических ко-

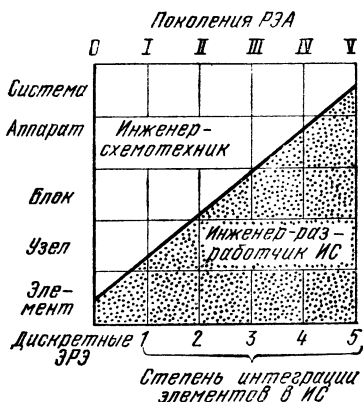


Рис. 1.2. Относительная доля участия радиоинженера-схемотехника и инженера-разработчика интегральных микросхем в проектировании элементов, узлов, блоков, аппаратов и систем РЭА.

Раньше при разработке дискретных электрорадиоэлементов радиоинженер и разработчик радиоделателей имели одинаковый вес, теперь это равенство сохраняется только на уровне систем РЭА 5-го поколения

лебаний иглы головки звуконосителя является звуковая бороздка моно- или стереофонического характера. Микрофоны преобразовывают акустические колебания воздуха (и мембраны микрофона), записывающие магнитные головки — изменение намагнитченности носителя, фотопреобразователи и иконоскопы — изменение яркости и цветности. В телефонах и громкоговорителях, воспроизводящих магнитных головках, кинескопах и люминесцентных индикаторах — преобразование обратного характера.

Коммутационные устройства применяются для легкоразъемного соединения и разделения электрических цепей. Выполняются в виде электрических разъемов, тумблеров, кнопок, переключателей (механический привод управления коммутацией), реле, контакторов, магнитных контактов (электрическое управление) Используются для внутренних электрических соединений модулей и узлов РЭА друг с другом и с печатной платой-основанием, внешних электрических соединений РЭА в целом и различных видов коммутации. Габариты тем больше, чем выше напряжение

коммутации или разрывная мощность контактов.

Электрические контакты служат для электрического соединения выводов элементов схемы друг с другом. Выполняются в виде соединительных проводников, монтажных жгутов, многожильных и высокочастотных кабелей, плоских гибких кабелей (шлейфов), печатных плат. Проводники, полученные методом осаждения, менее надежны. Наименее надежным элементом электрического соединения является стык двух проводников в виде пайки, сварки, накрутки. Весьма сложно выполнять особо гибкие надежные соединения.

В настоящее время особенности конструкции РЭА характеризуют степенью интеграции схемных элементов, полагая для общности нулевой степень интеграции РЭА на дискретных элементах.

Степень интеграции схемных элементов в конструкциях РЭА принято оценивать номером поколения от 0 до 5, начиная с использования дискретных электрорадиоэлементов или полупроводниковых приборов, резисторов, конденсаторов и других ЭРЭ и кончая устройствами молекулярной электроники (рис 1.2).

РЭА нулевого поколения — набор дискретных элементов, схема соединений которых выполняется радиоинженером, определяющим и функциональную, и принципиальную схему РЭА. Конструктивно выполняются на общих или отдельных модулированных платах, преимущественно с печатным монтажом и с разнообразным расположением в объеме РЭА.

РЭА 1 и 2 поколений — набор микросхем (иногда с дополнительными дискретными элементами), имеющих степень интеграции 1 ... 2 (10^1 ... 10^2 элементов в корпусе). В этом случае схемотехническое решение на уровне функционального узла определяется в основном разработчиком интегральной микросхемы (ИС), который оказывает влияние и на схемотехническое решение блока Радиоинженер, в основном, определяет схемотехнику РЭА только от уровня блока и выше. Конструктивно РЭА выполняется в виде плоских «листов» — плат с ИС в виде этажерочных, книжных, веерных и т. п. конструкций.

РЭА 3 и 4 поколений — набор микросхем (практически без дополнительных дискретных элементов), имеющих степень интеграции $3 \dots 4 (10^3 \dots 10^4)$ элементов в одном корпусе). Схемотехника узла и, в основном, блока — в руках разработчика ИС. Радионинженер определяет схемотехнику только на уровне аппарата и системы в целом. Конструктивно выполнение аналогично РЭА 2 и 3 поколений с жесткой унификацией размерно-параметрических рядов по классам изделий.

РЭА 5 поколения — функциональная или системная микроэлектроника, когда в одном корпусе ИС может быть свыше 10^5 элементов. Схемотехника блока и, в основном, аппарата — в руках разработчика ИС. Радионинженер определяет только системотехнику сложной системы. Конструктивное выполнение определяется либо в каждом частном случае (например, ЭКВМ, в которой составными элементами являются БИС, клавиатура, индикатор и корпус), либо для унифицированных размерно-параметрических рядов несущих конструкций широкого профиля.

При дальнейшем повышении степени интеграции и повышении плотности компоновки ИС в РЭА необходимо в каждом случае учитывать выпуск изделия (массовость) и возможную стоимость его, выбирать рациональную степень интеграции в ИС (чем она выше, тем больше будет типоразмеров ИС и затруднительнее выпуск), рассчитывать на ранних стадиях проектирования тепловые режимы РЭА (чем выше плотность компоновки ИС в РЭА, тем больше объем, сложность и энергопотребление систем обеспечения тепловых режимов), предусматривать новое технологическое оснащение для выполнения соединений на разных уровнях (число точек соединений может достигать до $10^4 \dots 10^6$).

1.5. КОНСТРУКТИВНАЯ БАЗА [2...5]

Конструктивной базой называют совокупность механических элементов конструкции РЭА, обеспечивающих механическую прочность и защиту от дестабилизирующих воздей-

ствий, а также механическое управление РЭА. Так же как и для элементной базы в конструктивной базе принято различать иерархические уровни от низшего в виде печатной платы или панели (которые могут быть не только конструктивным элементом, но и полем электрических соединений) до сложных размерно-параметрических рядов корпусов изделий.

Механические устройства управления выполняются в виде кнопок, рычагов (головок тумблеров) и ручек, с помощью которых обеспечивается плавное или скачкообразное вращательное и поступательное перемещение рабочих органов регуляторов (резисторов, конденсаторов и т. п.). В ряде случаев механические устройства управления выполняются в виде ножных педалей.

Электромеханические устройства служат для электрического управления механизмами РЭА и для повышения их динамичности. Включают в себя электродвигатели различных типов, сельсины, электромагнитные муфты и т. п. устройства, используемые в механизмах настройки, антенных приводах, механизмах протяжки, знакопечатающих и др.

Механизмы применяют для механического перемещения рабочих элементов устройств настройки и других отсчетных приспособлений, облучателей и антенных зеркал, дисковых и пленочных носителей информации, механических устройств ввода и вывода. Очень часто включают в себя разнообразные электромеханические устройства.

Несущие конструкции предназначены для механического закрепления, защиты и обеспечения доступности схемных элементов при сборке и эксплуатации РЭА. Выполняются в виде шкафов, кожухов, блоков, плат, специальных направляющих и т. п. устройств. Нередко выполняются в виде модулированных элементов, являющихся основой размерно-параметрических типовых рядов изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брон О. Б. Электромагнитное поле как вид материи. — М.: ГЭИ, 1962.

2. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Сов радио, 1975.
3. Ефимов И. Е. Современная микроэлектроника. — М.: Сов. радио, 1973.
4. Краткий справочник конструк-

тора РЭА/Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов радио, 1972.

5. Справочник по радиоэлектронным устройствам в 2-х т./ Р. Г. Варламов, С. Д. Додик, А. И. Иванов-Цыганов и др.; Под ред. Д. П. Линде. — М.: Энергия, 1978, — Т.2; разд. 9.

2. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЭА

Основные аббревиатуры

- В** — обозначение РЭА, пригодной для эксплуатации в любом районе на поверхности земли
Вл — относительная влажность
ГВР — гололедно-ветровой район
ГИО — гололедно-изморозевые отложения
ИИ — ионизирующие излучения
ИС — интегральная микросхема
М — морской умеренно-холодный климат
МФ — метеорологические факторы
О — обозначение РЭА, пригодной для эксплуатации в любом (кроме морей и озер) районе на поверхности земли
ОМ — обозначения РЭА, пригодной для эксплуатации на судах с неограниченным районом плавания
ПДИ — поглощенная доза излучения
ПИЧ — перенос ионизирующих частиц
РС — солнечная радиация
СНВ — скоростной напор ветра
Т — обозначение РЭА, пригодной для эксплуатации в сухом и влажном тропическом климате
ТВ — тропический влажный климат
ТС — тропический сухой климат
ТМ — тропический морской климат
У — умеренный климат
ХЛ — холодный климат
ЭГ — эквивалентный гололед (толщина)

В зависимости от размещения РЭА на поверхности земли (в том числе в горных местностях), в атмосфере

или в толще вод рек, морей и океанов, характер и интенсивность внешних естественных дестабилизирующих факторов будут различными. Их влияние может быть как усилено, так и ослаблено при размещении РЭА на или внутри различных объектов. Освоение космического пространства требует учета дестабилизирующих факторов космического пространства и знаний условий работы РЭА на поверхности планет и других космических тел. Для земной РЭА определяющими естественными дестабилизирующими факторами являются климатические: воздействие тепла (холода) (характеризуемое температурой в °С или К), относительная влажность Вл (в процентах), роса и обледенение (гололед), морской туман (солевой), пыль и песок, солнечная радиация (инсоляция) РС и плесневые грибы. Нормальные климатические условия: $\phi = 25 \pm 10^\circ\text{C}$ (288 ... 308 К), Вл составляет 45 ... 80%, атмосферное давление $p = (8,36 \dots 10,6) \cdot 10^4$ Па (630 ... 800 мм рт. ст.). Если $\phi > 30^\circ\text{C}$ (303 К), то Вл $\leq 70\%$.

2.1. КЛИМАТ, КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ И ХАРАКТЕРНЫЕ ГРУППЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ [2, 11] *

Климат — характерная для данной области (региона) на поверхности земли совокупность типичных изменений атмосферных процессов, обуславливаемых географическими координатами и уровнем солнечной ра-

* Составитель Р. Г. Варламов.

2.1. Климатические зоны и характерные группы эксплуатации

диации, строением земной (подстилающей) поверхности, вертикальным теплообменом и другими определяющими метеорологическими факторами за длительный (обычно 20–30 лет) время. В зависимости от размеров пространства земной поверхности различают макро-, мезо- и микроклимат.

Макроклимат определяется географическими координатами, положением по отношению к океану, большими горными массивами и регулярными циркуляциями воздуха; местные условия при оценке макроклимата не учитываются. Мезоклимат определяется только местными влияниями (местные изменения рельефа поверхности, влияние реки или озера и т. п.). Параметры макро- (частично) мезоклимата учитываются при конструировании РЭА. Параметры микроклимата (сухой или сырой участок земной поверхности) весьма локальны, характерны для малых объемов (десятки м³) и практически не учитываются. Большая динамичность факторов окружающей среды требует не только их дифференцированного учета, но и четких определений.

Основными климатическими факторами внешней среды являются: солнечная радиация, температура, относительная влажность воздуха, его плотность, движение, наличие твердых и газообразных примесей, образование снега, тумана, инея, плесневых грибов. Динамичность этих параметров заставляет рассматривать нормальные, номинальные, рабочие и предельные значения.

Предельные значения климатических факторов проявляются чрезвычайно редко, в течение не более 6 ч, и допускают в этих условиях только сохранение работоспособности РЭА (без соблюдения номинальных значений параметров, отклонения которых оговариваются в ТУ). Рабочие значения характеризуют области сохранения номинальных параметров при экономически целесообразных сроках службы РЭА. Записанные в ТЗ, ТУ или стандарты рабочие значения являются номинальными значениями параметров, при которых обеспечивается нормальная эксплуатация. Нормальными называют уточненные при проектировании зна-

чения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места расположения изделия.

Солнечная радиация РС (интегральная плотность теплового потока для высот от 15 000 м включительно) равна 1125 Вт/м² (из них 42 Вт/м² падает на ультрафиолетовую часть спектра 280...400 нм). Ее колебания и свойства среды в данном месте определяют температуру. Если за счет РС дополнительное повышение температуры ≤ 3 К, то говорят о практическом отсутствии влияния РС.

Различают эффективную температуру внешней среды: температуру для тепловых расчетов изделий; среднюю (из ежегодных максимумов или минимумов) в виде среднеарифметического значения за многолетний период и температуру внешней среды при эксплуатации. Для изделий с естественным воздушным (водяным) охлаждением температура внешней среды — это температура газовой среды (воды) на уровне расположения РЭА, на расстоянии, при котором влиянием рассеивания тепла от РЭА можно пренебречь (это оговаривается в ТУ). Для РЭА с принудительным газовым или вторичным водяным охлаждением за температуру внешней среды принимают температуру газа или жидкости на входе в систему охлаждения, а для РЭА, работающей в почве, — температуру почвы на уровне погружения в нее РЭА и на расстоянии, при котором влиянием тепла от РЭА можно пренебречь. Относительная влажность (Вл) воздуха — отношение количества невидимых глазу водяных паров при данной температуре в объеме воздуха к их максимальному количеству. Абсолютная влажность — количество водяных паров в граммах в 1 м³ воздуха; не зависит от температуры. Точка росы — температура, при которой наступает насыщение (100% Вл).

Осадки, жидкие (туман, дождь, роса) и твердые (град, снег, крупа, иней), возникают вследствие охлаждения влажного воздуха ниже точки росы. Капельки малых размеров (туман) висят в воздухе (при охлаждении у поверхности земли капли больших размеров образуют росу),

2.1. Климатические зоны и характерные группы эксплуатации

Рис. 2.1. Диапазоны изменения температур (индексы: пв и рв — предельное и рабочее верхнее значение, пн и рн — предельное и рабочее нижнее значение, ср — среднее значение) в °С для умеренного У, холодного ХЛ, тропического Т, тропического сухого и влажного ТС и ТВ, морского М, тропического морского ТМ климатов и для РЭА, работающей во всех наземных районах О, на морских судах с неограниченным районом плавания ОМ и во всех районах на суше и на море В (а); температуры охлаждающей воды для проточных водяных систем охлаждения в °С (штриховой линией показаны диапазоны значений при циркуляционных системах и использовании градиент, искусственных прудов и т. п.) (б); сочетание значений относительной влажности, температуры в °С и продолжительность влажного периода в месяцах $t_{вл}$ (в); условия хранения РЭА для легкой Л, средней С, жесткой Ж и особо жесткой ОЖ групп сочетания параметров (г); коррозионная активность атмосферы для различных категорий РЭА и (1, 1.1... 5) и видов исполнения (У, ОМ) (д); содержание в атмосфере сельской местности I, промышленных II и морских III районов сернистого газа и хлористых солей мг/м³ сут (е); число частиц N, давление P (мм рт. ст.) и относительная электрическая прочность B_э в зависимости от высоты H, км (ж)

больших размеров выпадают в виде дождя. Если температура воздуха значительно ниже точки росы, то образуются твердые осадки в виде некристаллических концентрических округлых градин (размеры от горошины до голубинового яйца), снежинок, крупы (кристаллики льда) или различных видов инея. Интенсивность дождя для зон У, ХЛ, ТС 3 мм/мин, для остальных зон 5 мм/мин — верхнее рабочее значение.

При изменении высоты над уровнем моря происходит значительное изменение плотности и температуры воздуха, при постоянной высоте влияние температуры на плотность незначительное.

Ветер — горизонтальное движение воздуха (вертикальное — восходящий ветровой поток или термическая циркуляция) — характеризуется направлением, силой в баллах (или скоростью в м/с) и порывами.

Наличие твердых или газообразных примесей существенно влияет на характер воздействия воздушной среды на РЭА. Пыль характеризуется размерами частиц (тонкая < 20 мкм, грубая > 20 мкм), их числом или

массой на единицу объема (0,02 ... 500 мг/м³). Специфические газообразные отходы промышленности могут обладать заметным разрушительным действием. Воздействие пыли и ее состав регламентируются ЧТУ.

Плесневые грибки способны разлагать высокомолекулярные естественные (древесина) и искусственные (пластмассы) соединения и нарушать работу РЭА.

В соответствии с ГОСТ 15150—69 различают 6 макроклиматических районов: умеренного У ($\vartheta = +40 \dots -45^\circ\text{C}$ 313 ... 228 К), холодного ХЛ ($-\vartheta > -45^\circ\text{C}$), влажного тропического ТВ ($\vartheta > 20^\circ\text{C}$ (293° К) при Вл > 80% 12 или более часов в сутки непрерывно в течение 2 ... 12 мес. в году), сухого тропического ТС ($+\vartheta > +40^\circ\text{C}$ 313 К), умеренно холодного морского М и тропического морского ТМ климатов.

Климатические районы СССР и Земного шара (Приложение 6 ГОСТ 15150—69) следующие: У — основная часть территории СССР Европа, США (кроме Аляски), юг Австралии. ХЛ — северо-восток СССР, Аляска, Антарктида и Арктика. ТВ — Панамский перешеек, север Южной Америки, средняя часть Африки, Индия, Индокитай, север Австралии. ТМ — полоса Мирового океана между 30° с. ш. и 30° ю. ш. Горные районы — Кордильеры (Южная Америка), Тибетское нагорье, отдельные районы Африки.

Наземная РЭА, годная для работы в районах ТВ и ТС («тропическое исполнение»), имеет обозначение Т, годная для работы во всех наземных районах — О РЭА, установленная на морских судах с неограниченным районом плавания, имеет обозначение ОМ, пригодная для всех районов на суше и на море — В.

Изделия, эксплуатируемые на открытом воздухе (категория 1 ГОСТ 15150—69), могут храниться в помещениях (категория 4). РЭА, размещенная в помещениях типа палаток, кузовов, прицепов, ангаров или под навесами и т. п., относится к категории 2. Она соответствует категории 1 при отсутствии прямого воздействия РС и атмосферных осадков. Эксплуатация РЭА в закрытом помещении с естественной вентиля-

цией (без искусственного регулирования климатических условий) при существенном уменьшении воздействия РС, ветра, атмосферных осадков, при отсутствии росы, колебаний температуры и Вл, уменьшении воздействия плесневых грибов, по сравнению с их воздействием на открытом воздухе — категория 3.

В закрытых наземных или подземных помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (категория 4) выделяют помещения с кондиционированием воздуха и помещения лабораторного, капитального, жилого и др. типа. Эксплуатация РЭА при повышенной Вл (неотапливаемые и неентилируемые помещения, в которых может быть влага или ее частая конденсация) — категория 5 Сводные данные по климатическим факторам даны на рис 2.1. Если поверхность РЭА нагревается Солнцем, то значения θ должны браться на 15 ... 30 К выше, чем указано на рис. 2.1, а

Рабочие значения температуры почвы на глубине 1 м равны: для У — 5 ... 25; ХЛ — 20 ... 10; ТС, ТВ, Т — 10 ... 35 и О, В — 20 + 35°С (или 268 ... 290, 253 283, 283 ... 308 и 253 ... 308 К). Температура окружающего воздуха за 8 ч может изменяться для исполнений У, ХЛ, ТС, Т, О, В на 40°С, ТВ, ТМ на 10°С, М, ОМ на 30°С.

2.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЕТРА И ГОЛОЛЕДА [1, 3, 5...7, 15]*

Специфическим видом климатических воздействий на элементы наземной РЭА, расположенные вне помещений и укрытий, является одновременное воздействие ветра и гололеда. При оледенении увеличиваются поперечные размеры и масса элементов, что приводит к росту аэродинамических и механических нагрузок. Случайный характер метеорологических факторов МФ, формирующих гололедно-ветровой режим (гололедно-морозовых отложений ГИО, изменение скоростей ветра и температур), требует вероятностного подхо-

да к решению задачи, которая описывается следующими основными параметрами:

- d_0 — диаметр цилиндрического элемента конструкции
- $\delta_{\text{ЭГ}}$ — толщина стенки эквивалентного гололеда ЭГ;
- $\delta_{\text{д}}$ — действительная толщина ГИО;
- $\delta_{\text{ср}}$ — среднее значение толщины стенки ЭГ;
- F_T — обеспеченность сочетаний интенсивностей МФ с периодом повторения $T_{\text{п}}^{\text{МФ}}$;
- F_x — обеспеченность интенсивности x ;
- $F(x, y)$ — обеспеченность сочетаний интенсивностей x и y ;
- $f(x)$ — плотность распределения вероятностей интенсивности x ;
- $f(x, y)$ — плотность распределения вероятностей сочетаний интенсивностей x и y ;
- h — высота над поверхностью земли;
- $K_{\text{д}}^{\text{ГИО}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий действительную величину ГИО;
- $K_{\text{дин}}^{\text{р}}$ — коэффициент динамичности, учитывающий динамическое воздействие, вызываемое порывистостью скоростного напора ветра СНВ;
- $K_{\text{пр}}^{\text{р}}$ — коэффициент порывистости СНВ;
- $K_{\text{д}}^{\delta}$ — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость толщины стенки ЭГ от диаметра цилиндрического элемента;
- $K_{\text{н}}^{\text{р}}$ — поправочный коэффициент на возрастание СНВ в зависимости от высоты над поверхностью земли;
- $k_{\text{ХГ}}$ — параметр уравнения Гудрича, аппроксимирующего распределение вероятностей интенсивности x ;

* Составители А. В. Кривозубов, И. П. Плево.

- K_h^0 — поправочный коэффициент на возрастание толщины стенки ЭГ в зависимости от высоты над поверхностью земли;
 N — общее число наблюдений;
 n_i^{MF} — абсолютная частота (число наблюдений) i -го интервала интенсивности МФ;
 $n_{xГ}$ — параметр уравнения Гудрича в виде показателя степени, аппроксимирующего распределение вероятностей интенсивности x ;
 $P(x < X)$ — вероятность интенсивности x ;
 p_0 — нормативный ветровой напор;
 p_0 — нормативная распределенная гололедная нагрузка;
 p_i^{MF} — относительная частота i -го интервала интенсивности МФ;
 $10p_0$ — СНВ на высоте до 10 м над поверхностью земли;
 T_c — период собственных колебаний конструкции;
 T_p^{MF} — период повторения интервалов интенсивности МФ;
 t_{np}^{MF} — непрерывная продолжительность действия интервала интенсивности МФ;
 t_{Σ}^{MF} — суммарная продолжительность действий интервалов интенсивности МФ;
 $Q(x)$ — повторяемость интенсивности x ;
 $Q(x, y)$ — повторяемость сочетаний интенсивностей x и y ;
 q_0 — нормативная погонная гололедная нагрузка;
 u — скорость ветра;
 $u_{ср}$ — среднее значение скорости ветра;
 X, x, Y, y — интенсивности МФ;
 ρ_0 — плотность ЭГ

Расчет интенсивности метеорологических факторов

Для получения расчетных значений интенсивности МФ используются

в основном графоаналитические методы обработки климатологических данных [1, 3]. Данные многолетних наблюдений группируются по интервалам интенсивности МФ, после чего подсчитываются абсолютная частота n_i^{MF} и относительная частота i -го интервала $p_i^{MF} = n_i^{MF}/N$ (здесь N — общее число наблюдений). Совокупность интервалов группирования и их относительных частот называют дифференциальным распределением (плотностью) распределения вероятностей. Последовательно суммируя относительные частоты интервалов, получают накопленные относительные частоты: повторяемость $Q(x)$ и обеспеченность $F(x) = 1 - Q(x)$. Совокупности интервалов группирования и накопленных относительных частот называют интегральными распределениями.

Для расчета интенсивности x параметров гололедно-ветрового режима широко используют формулу распределения Гудрича

$$F(x) = \exp(-k_{xГ} x^{n_{xГ}}). \quad (2.1)$$

Откладывая на одной оси двойные логарифмы дроби $1/F(x)$ или $1/Q(x)$, а на другой — логарифмы x , получают функциональные шкалы сетчатки, на которой кривая (2.1) спрямляется.

Повторяемость сочетаний интенсивностей x и y двух МФ определяется по формуле

$$Q(x, y) = P[x < X, y < Y] = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f(x, y) dx dy,$$

где $f(x, y)$ — плотность распределения вероятностей сочетаний интенсивностей МФ.

Если интенсивности x и y являются независимыми случайными величинами, то

$$f(x, y) = f(x) f(y), \quad (2.2)$$

где $f(x)$ и $f(y)$ — плотности распределений вероятностей интенсивностей x и y двух МФ в отдельности.

ГГО, плотность которых изменяется в пределах от 20 до 900 кг/м³, приводится к чистому гололеду с плотностью $\rho_0 = 900$ кг/м³ как экви-

валентному [3]. При этом рассчитывается толщина стенки ЭГ δ , равномерно охватывающая цилиндр диаметром $d_0 = 10$ мм, расположенный на высоте $h = 10$ м над поверхностью земли.

Расчеты коэффициентов корреляции и значимостей [5] характеризующих статистические связи между толщинами стенки ЭГ и максимальными скоростями ветра при ГИО v , выполненные по большому числу метеостанций, показывают, что связь между этими переисными незначительна, а коэффициенты корреляции близки к нулю. Это позволяет пользоваться для определения плотности распределения вероятностей сочетаний δ и v выражением (2.2), для определения аппроксимации распределений толщин стенок ГИО и максимальных скоростей ветра при ГИО — формулой (2.1). Уравнение поверхности двумерного распределения накопленных относительных частот сочетаний δ и v имеет вид [6]

$$Q(\delta, v) = 1 - F(\delta, v) =$$

$$= k_{\delta\Gamma} n_{\delta\Gamma} k_{v\Gamma} n_{v\Gamma} \int_0^{\delta} \int_0^v \{(\delta/\delta_{\text{ср}})^{n_{\delta\Gamma}-1} \times$$

$$\times (v/v_{\text{ср}})^{n_{v\Gamma}-1} \exp[-k_{\delta\Gamma} \times$$

$$\times (\delta/\delta_{\text{ср}})^{n_{\delta\Gamma}} - k_{v\Gamma} (v/v_{\text{ср}})^{n_{v\Gamma}}]\} \times$$

$$\times d\delta dv,$$

где $k_{\delta\Gamma}$, $n_{\delta\Gamma}$, $k_{v\Gamma}$, $n_{v\Gamma}$ — параметры уравнений Гудрича, характеризующие режимы ЭГ и ветра при ГИО соответственно; $\delta_{\text{ср}}$ и $v_{\text{ср}}$ — средние значения толщин стенки ЭГ и скорости ветра при ГИО соответственно.

В пересечении поверхности $F(\delta, v)$ с плоскостями, параллельными плоскости dv , получают изолинии равной обеспеченности сочетаний δ и v характеризующие гололедно-ветровой режим метеостанции при соответствующем периоде повторения $T_{\text{п}}^{\text{мф}}$.

Гололедно-ветровое районирование

Нормативные сочетания скоростей ветра, действующих на высоте 10 м над поверхностью земли, с толщинами стенок ЭГ, соответствующими диа-

Таблица 2.1

Скорости ветра v [м/с] в гололедный период года при отсутствии ГИО

ГВР	$T_{\text{п}}^{\text{мф}}$ лет				
	1	5	10	15	20
I	20,5	24,0	25,5	26,0	26,5
II	18,0	21,0	22,0	23,0	23,5
III	20,5	24,0	25,5	26,0	26,5
IV	26,5	30,0	32,0	32,5	33,0
V	28,5	33,5	36,0	36,5	37,0
VI	35,5	40,0	43,0	44,0	45,0

метру цилиндрических элементов конструкций 10 мм, расположенных на той же высоте, принимаются в зависимости от периодов их повторения $T_{\text{п}}^{\text{мф}}$. Карта-схема гололедно-ветровых районов (ГВР) на территории СССР показана на рис. 2.2. Нумерация ГВР принята с учетом возрастания интенсивности гололедно-ветрового воздействия при увеличении номера ГВР.

Расчеты нормативных сочетаний δ и v произведены с учетом их значений, установленных в [15]. Используя метод графической интерполяции [1, 3], получаем кривые $Q(\delta)$ и вычисляем $F(\delta)$. Аналогичные построения производим для максимальных скоростей ветра при ГИО. Определяем обеспеченность сочетаний δ и v для заданных $T_{\text{п}}^{\text{мф}}$ по формуле $F_1 = 1/T_{\text{п}}^{\text{мф}}$ (выборка состоит из годовых максимумов ГИО). С учетом (2.2) $F(v) = F_{\text{т}}/F(\delta)$, что позволяет определить скорости ветра при ГИО, соответствующие заданным $T_{\text{п}}^{\text{мф}}$, по кривой $Q(v)$. Построенные таким образом нормативные изолинии сочетаний δ и v показаны на рис. 2.3, а.

Скорости ветра, действующие в различных ГВР в гололедный период года (с октября по апрель) при отсутствии ГИО на высоте 10 м над поверхностью земли приведены в табл. 2.1.

При анализе результатов расчетов параметров гололедно-ветрового режима преимущественно учтены данные метеостанций, расположенных на наветренных склонах возвышен-

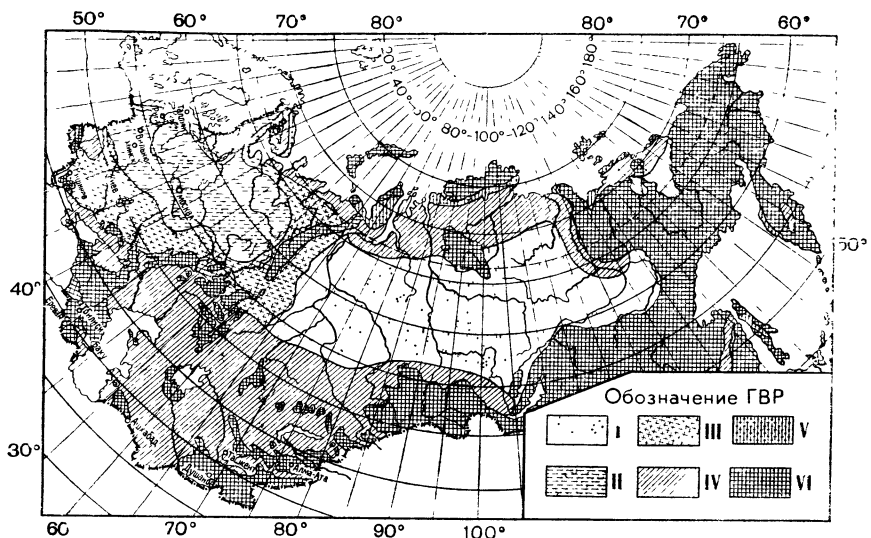


Рис. 2.2. Гололедно-ветровое районирование СССР

ностей и крутых берегах больших рек, вершинах возвышенностей и водораздельных плато с относительной высотой более 50 м, а также на островах и открытых побережьях морей. Это позволяет оценить возможные отклонения параметров гололедно-ветрового режима от нормативных значений. Для I ... V ГВР эти отклонения невелики, и, с учетом принципа равновероятного пребывания РЭА на территории характеризуемого района и понятия об изделии общего применения [12], допустимы. В горных местностях VI ГВР следует считаться с возможностью превышения нормативных значений скоростей ветра в 1,6 раза, а толщин стенок ЭГ в 2 раза [7].

При оценке работоспособности РЭА эксплуатируемой в условиях гололедно-ветровых воздействий, необходимы сведения не только об интенсивности МФ, но и о непрерывной продолжительности их действия $t_{\text{нп}}^{\text{МФ}}$. Зависимости средней непрерывной продолжительности действия ветра в гололедный период года и ЭГ от их интенсивностей представлены на рис. 2.3, б и в.

При расчете прочности элементов РЭА широко используется метод

эквивалентных нагрузок, основанный на обработке графиков загрузки этих элементов во времени. Для построения этих графиков необходимы сведения о суммарной продолжительности ветра и ЭГ $t_{\Sigma}^{\text{МФ}}$. Значения суммарных продолжительностей скоростей ветра за гололедный и теплый периоды одного года указаны в табл. 2.2, а огибающие кривые суммарных продолжительностей ЭГ за год представлены на рис. 2.3, г (продолжительность гололедного периода принимается равной 5110 ч).

Температура воздуха при ГИО в высокогорных местностях с отметками более 1000 м над уровнем моря и на территории к востоку от Енисея (очень холодный район [2]), за исключением береговой полосы океанов и морей (ширина береговой полосы принимается равной 100 км, но не более, чем до ближайшего горного хребта), принимается равной 253 К, а на остальной территории страны — равной 288 К. Абсолютный минимум температуры при ГИО в очень холодном районе принимается равным 233 К, а на остальной территории страны 238 К. В высокогорных местностях с отметками более 1000 м над уровнем моря и в

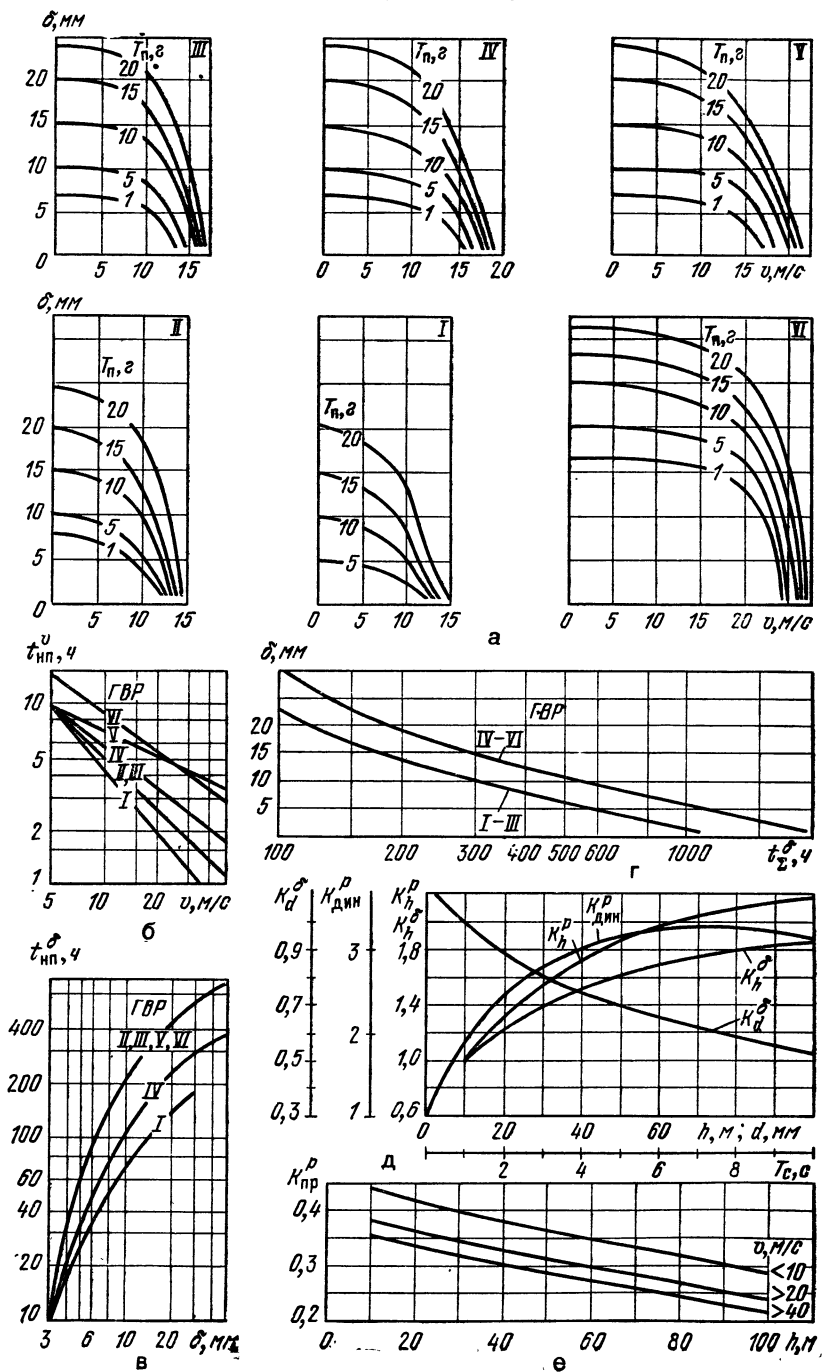


Рис. 2.3. Нормативные изолинии сочетаний δ и v для гололедно-ветровых районов ГВР I...VI (а); зависимость непрерывной продолжительности ветров $t_{\text{нп}}^v$ от их скорости v в гололедный период в ГВР I...VI (б); зависимость непрерывной продолжительности гололеда $t_{\text{нп}}^{\delta}$ от толщины стенки эквивалентного гололеда ЭГ δ (в); зависимость толщины стенки ЭГ δ от суммарной продолжительности гололеда t_{Σ}^{δ} (г); зависимости K_h^p , $K_h^{\delta} = f(h)$, $K_{\text{дин}}^p = f(T)$ и $K_d^{\delta} = f(d)$ (д); зависимость $K_{\text{пр}}^p = f(h)$ при различных v (е).

очень холодном районе в гололедный период следует считать с возможностью абсолютного минимума температуры, равного 208 К, а на остальной территории страны — равного 233 К.

Нормативные ветровая и гололедная нагрузки. Гололедно-ветровая нагрузка определяется как геометрическая сумма ветровой (горизонтальной) и гололедной (вертикальной) нагрузок.

Нормативный ветровой напор p_v , действующий на наветренную поверхность конструкции в рассматриваемой зоне ее протяженности по высоте, рассчитывается по формуле

$$p_v = 10 p_v K_h^p (1 + K_{\text{пр}}^p K_{\text{дин}}^p), \quad (2.3)$$

где $10 p_v = 0,612 v^2$ — скоростью напор ветра на высоте до 10 м над поверхностью земли, Па; K_h^p — поправочный коэффициент на возрастание СНВ в зависимости от высоты над поверхностью земли; $K_{\text{пр}}^p$ — коэффициент порывистости СНВ;

$K_{\text{дин}}^p$ — коэффициент динамичности, учитывающий динамическое воздействие, вызываемое порывистостью СНВ.

Для цилиндрических элементов конструкций нормативная погонная гололедная нагрузка q_{δ} определяется по формуле:

$$q_{\delta} = 981 \pi \delta K_h^{\delta} K_d^{\delta} (d_0 + \delta K_h^{\delta} K_d^{\delta}) \times \times \rho_{\delta} \cdot 10^{-6} \text{ [Н/м]},$$

где K_h^{δ} — поправочный коэффициент на возрастание толщины стенки ЭГ в зависимости от высоты над поверхностью земли; K_d^{δ} — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость толщины стенки ЭГ от диаметра цилиндрического элемента.

Для остальных элементов конструкций нормативная распределенная по площади гололедная нагрузка ρ_{δ} определяется по формуле:

$$\rho_{\delta} = 6 \delta K_h^{\delta} \rho_{\delta} \cdot 10^{-3} \text{ [Па]}. \quad (2.4)$$

При расчете степени заполнения проникаемых конструкций (решеток, сеток, ферм и т. п.) ГИО действительная толщина стенки отложения δ_d определяется по формуле $\delta_d = K_d^{\text{гио}} \delta$,

где $K_d^{\text{гио}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий действительную величину ГИО (табл. 2.3) Для промежуточных значений периода повторения $K_d^{\text{гио}}$ определяется линейной интерполяцией.

Пример расчета. Требуется определить нормативные ветровые и гололедные нагрузки, действующие на

Таблица 2.2

Суммарная продолжительность (в часах) скоростей ветра v в ГВР за год

v, м/с	Гололедный период				Теплый период			
	I—III	IV	V	VI	I—III	IV	V	VI
5...10	3000	3000	2785	2400	2750	2570	2050	1700
10...15	500	1000	1300	1450	900	1000	1200	1100
15...20	100	200	650	650	—	80	365	600
20...25	—	50	280	370	—	—	35	175
25...30	—	—	95	160	—	—	—	50
30	—	—	—	80	—	—	—	25

Таблица 2.3

Значения поправочного коэффициента $K_d^{ГВР}$ при различной скорости ветра v [м/с]

$T_n^{мф}$ лет	ГВР					
	I	II	III	IV	V	VI
Скорость от 0 до 8 м/с						
1	5,0	3,0	3,0	3,0	3,5	4,0
10	4,0	2,0	2,0	2,0	2,5	3,0
20	3,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5
Скорость свыше 8 до 16 м/с						
1	6,5	5,0	4,0	4,0	5,5	4,0
10	6,0	3,0	2,5	2,5	3,0	3,0
20	5,0	2,5	2,0	2,5	3,0	3,0
Скорость свыше 16 м/с						
1	—	4,3	2,5	3,5	4,0	5,0
10	6,0	4,0	4,5	4,0	5,0	4,0
20	6,5	3,5	4,0	3,5	4,0	4,0

сплошной отражатель, установленный на высоте 50 м над поверхностью земли в VI ГВР при периоде повторения воздействия $T_n^{мф} = 20$ лет и периоде собственных колебаний системы отражатель—опора $T_c \approx 1$ с.

1. По изолинии $\delta - v$ (рис. 2.3, а) при $T_n^{мф} = 20$ лет определяем сочетания δ и v и заносим их значения в табл. 2.4.

2. По кривым рис. 2.3, д при $h = 50$ м и $T_c \approx 1$ с получаем $K_h^p = 1,85$ и $K_{дин}^p = 2,0$. Формула (2.3) преобразуется к виду

$$p_v = 1,13v^2 (1 + 2K_{пр}^p) \text{ [Па]}. \quad (2.5)$$

Таблица 2.4

Сводные данные к расчету нормативных нагрузок

v , м/с	δ , мм	$K_{пр}^p$	p_v , Па	p_δ , Па
5	31	0,37	49	268
10	30	0,37	197	259
15	29	0,34	439	251
20	26	0,34	761	225
25	17	0,31	1145	147
27	5	0,31	1345	43

По кривым рис. 2.3, е получаем значение $K_{пр}^p$, соответствующие скоростям v и заносим их в табл. 2.4. Используя пары значений v и $K_{пр}^p$, рассчитываем по формуле (2.5) p_v и заносим в табл. 2.4. В случае, когда $\delta = 0$, скорость ветра при $T_n^{мф} = 20$ лет принимается равной 45 м/с по табл. 2.1, чему на основании кривых рис. 2.3, е соответствует $K_{пр}^p = 0,29$, и тогда рассчитанный по формуле (2.5) нормативный ветровой напор $p_v = 1,13 \cdot 45^2 (1 + 2 \times 0,29) = 3610$ Па.

3. По кривым рис. 2.3, д при $h = 50$ м получаем $K_h^p = 1,6$ и тогда формула (2.4) приобретает вид

$$p_\delta = 8,65 \delta \text{ [Па]} \quad (2.6)$$

Используя указанные в табл. 2.4 значения δ , рассчитываем по формуле (2.6) соответствующие им величины p_δ и заносим их в табл. 2.4.

2.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАГИ, ПЫЛИ, СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ [2, 11] *

Воздействие влаги

Воздействие влаги на металлы и изоляционные материалы имеет разную природу, но одинаковый конечный результат — разрушение исходной структуры материала. В металлах это происходит за счет коррозии, в изоляционных материалах — за счет влагопоглощения.

Термодинамической причиной коррозии является переход корродирующего металла из менее стабильного состояния, в котором он используется в конструкции РЭА, в более стабильное первоначальное состояние, из которого он был получен (в виде окислов, сульфидов, карбонатов и т. п.). На скорость коррозии влияют: концентрационная поляризация, перенапряжение и пассивность металлов.

Чисто химическая коррозия происходит во время реакции сухого

Составитель Р. Г. Варламов.

газа с металлом при высокой температуре (окалина на поверхности стали) Наличие влаги — причина электрохимической коррозии, реакции которой идут при низких температурах

Коррозия может быть равномерной (по всей поверхности изделия), неравномерной (например, за счет повреждения защитного слоя и образования затем отверстий в металле) и межкристаллической (распространение вдоль границ кристаллов и разрывов их структуры)

Влага является причиной и различных побочных явлений, увеличивающих дестабилизирующее воздействие пыли и биологических факторов.

Влияние влаги на изоляционные материалы определяется отсутствием изоляционных пластмасс, которые могут противостоять воздействию влаги. Низкокачественные изоляционные материалы с макроскопическими порами или трещинами поглощают влагу за счет капиллярных эффектов. В высококачественных изоляционных материалах (используемых обычно в РЭА) определяющим фактором влагопоглощения является диффузия. При процессах герметизации важен третий режим — проникновение (режим переноса влаги через полупрозрачную оболочку).

Диффузия — поглощение изоляционным материалом (растворителем) растворимого вещества (паров воды) до полного уравнивания давлений в окружающей среде и внутри изоляционного материала, после чего процесс поглощения влаги прекращается

Проникновение водяных паров через пленку включает в себя три стадии: проникновение влаги через поверхность пленки со стороны повышенной концентрации влаги; диффузия влаги от наружной поверхности пленки к внутренней; выход влаги через внутреннюю поверхность пленки в область пониженной концентрации влаги. Свойства поверхности пленки оказывают существенное влияние.

Процесс диффузии определяется в основном свойствами, формой и размером изоляционной детали при наличии разности давлений водяных паров в среде и детали. Процесс про-

никновения определяется в основном разницей степени концентрации водяных паров между наружной и внутренней поверхностями перегородки

За счет достаточно высокой электропроводности воды по сравнению с электропроводностью изоляционного материала при диффузии влаги имеет место существенное (на 2 ... 4 порядка) падение сопротивления изоляции, рост $\tan \delta$ и изменение относительной диэлектрической постоянной

При поглощении или отдаче влаги (набухание и усадка) происходит изменение объема и размеров изоляционных деталей, что может быть причиной возникновения заметных механических напряжений в материале. Иногда это приводит к ускоренному и увеличенному влагопоглощению (из-за трещин), нарушению механической прочности элементов или их работоспособности

Сухое тепло и сухой холод. Некоторые сплавы меди при $\phi < -20^\circ\text{C}$ (253 K) склонны к холодной хрупкости. Термоактивные изоляционные материалы сохраняют свою форму до момента разрушения из-за термохимической цепной реакции разложения. Термопластические — при температурной перегрузке сначала становятся эластичными и текучими и только после этого разрушаются. Термочувствительны и многие резины

Смазочные материалы при низкой температуре увеличивают свою вязкость и могут совсем застыть. При высокой температуре вязкость смазки уменьшается и смазка может совсем испариться.

Изменение температуры деталей особенно сложной формы и из разнородных материалов может быть причиной значительных механических напряжений и даже разрушений (гальванического или лакокрасочного покрытия, слоя глазури и т. п.).

Песок и пыль

Максимальная опасность — не относительно крупные частицы пыли и песка (у них меньше острых граней), а мелкие, взвешенные в атмосфере, с величиной зерна 1 ... 40 мкм. Результаты их воздействия в под-

шипниках и механизмах — падение точности, заедания; в зазорах с контактами — препятствие нормальной работе реле и переключателей; на поверхности изоляционных деталей из-за гигроскопичности — паразитная проводимость; на поверхности металлических деталей — увеличение скорости коррозии.

Во всех случаях в тропических условиях пыль может быть питательной средой для плесневых микроорганизмов. Пыль в пустыне из-за высокого содержания кварца более твердая и абразивная.

При значительной запыленности, повышенной температуре пыли, наличии кислорода и источника энергии — пыль взрывается, что может быть причиной больших разрушений. Оптимальные условия работы контактов в РЭА — обеспыливание воздуха и поддержание постоянной влажности.

Солнечная радиация

Различают две группы воздействия РС: фотолитическое и фотоокислительное (перегрев). Фотолитическое характеризуется избирательным поглощением солнечных лучей в полосах поглощения. Воздействие фотонов приводит к отрыву фотозлектронов и разрыву молекулярных связей. Следствием этого является изменение цвета ряда полимерных материалов, хрупкость и потеря прочности, нарушение лакокрасочных покрытий.

Фотоокислительное воздействие РС — разрыв химических связей при одновременном воздействии излучения, воздействие кислорода, воздуха и влаги. Результат — усиленная коррозия (особенно в условиях тропического климата).

Перегрев РЭА до 25 ... 30 К от поглощения энергии солнечных лучей происходит за счет: непосредственного излучения Солнца; излучения, рассеянного и отраженного атмосферой; теплых слоев воздуха, излучения от грунта, теплопроводности воздуха и грунта.

Специфическим видом воздействий, которым подвергается РЭА и ее материалы, является воздействие СВЧ излучений.

Биологические факторы [2, 11]

К биологическим факторам относят плесневые грибки, насекомых и грызунов. Важнейшая группа биологических факторов — плесневые грибки. Основной фактор их развития — высокая влажность (80 ... 100% Вл), наличие естественных или искусственных высокомолекулярных соединений для питания и малая освещенность помещения.

Изоляционные материалы на основе целлюлозы при воздействии плесневых грибов ухудшают свои механические и электрические параметры и могут даже разрушиться (табл. 2.5).

Насекомые редко повреждают РЭА. Наиболее опасны для РЭА, работающей в тропических условиях, термиты. Они поедают преимущественно древесину, поэтому опасны для приборов, имеющих деревянные детали и пластмассы с древесными наполнителями и установленными в деревянных строениях. Наиболее эффективная защита от термитов — бетонный фундамент зданий, пропитка фунгицистическими составами деревянных материалов и специальные пластмассы. В особо термитоопасных районах для надежной защиты подземных кабелей используют, кроме свинцовой оболочки, дополнительную оплетку, пропитанную ядом против термитов. Однако такой кабель очень дорог.

Опасность летающих насекомых в том, что они (главным образом ночью) летят на источник тепла и света и погибают. Кроме случайных повреждений органических материалов трупы насекомых опасны для открытых контактов и при высокой влажности, так как, кроме коррозии, образуют питательную среду для развития плесневых грибов. В связи с этим вентиляционные и другие отверстия в РЭА следует закрывать мелкой сеткой.

Кабели в пластмассовой и неармированной резиновой изоляции могут повреждать грызуны (крысы, мыши). Для защиты изоляции применяют стальную оплетку, но обычно повреждения кабеля и проводов грызунами не превышают 2%, поэтому целесообразнее устранить слу-

Таблица 2.5

Влияние плесневых грибов на изоляционные материалы

Наименование спор	Штамм	Типичные культуры	Свойства
<i>Aspergillus niger</i>	v. Tieghem	ATCC.6275	Обильно растут на многих материалах и стойки к солям меди
<i>Aspergillus terreus</i>	Thom	PQMD82j	Воздействуют на пластмассы
<i>Aureobasidium pullulans</i>	(de Barry) Arnand	ATCC 9348	Воздействуют на краски и лаки
<i>Paecilomyces varioti</i>	Bainier	JAM 5001	Воздействуют на пластмассу и кожу
<i>Penicillium ochrocheloron</i>	Biourge	ATCC.9112	Стойки к солям меди
<i>Penicillium funiculosum</i>	Jhom	JAM 7013	Воздействуют на многие материалы, особенно на текстильные
<i>Scopulario-psig Bain</i>	(Sacc)	JAM 5146	Воздействует на резину
<i>Brevicaulis var. Glabrathom</i>			
<i>Trichoderma viride</i>	Pers. Ex Er.	JAM 5161	Воздействуют на целлюлозу, текстиль и пластмассы

чайное повреждение, чем применять дорогостоящие защитные мероприятия.

2.4. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ СВЧ [8, 12 ... 14, 16, 19 ... 21] *

В электромагнитном поле СВЧ ряд определяющих свойств материалов существенно изменяется. За счет поверхностного эффекта уменьшается проводимость металлов и сплавов; за счет явления поляризации изменяется диэлектрическая проницаемость и увеличиваются потери в диэлектриках; за счет гиromaгнитного эффекта изменяется магнитная проницаемость ферритов.

Металлические материалы на СВЧ используются в качестве токопроводящих поверхностей, линий передачи, объемных резонаторов, интегральных микросхем и т. д. Поверхностный эффект — уменьшение плотности тока СВЧ в направлении от поверхности внутрь проводника по экспоненциальному закону — опре-

деляется глубиной проникновения δ (толщиной поверхностного слоя, в котором плотность тока уменьшается в $e \approx 2,72$ раза). Глубина проникновения зависит от длины волны СВЧ поля в свободном пространстве λ_0 , относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной проводимости σ : $\delta \approx 0,029 \sqrt{\lambda_0 / \mu_r \sigma}$. С ростом частоты тока, магнитной проницаемости и проводимости металла возрастает поверхностный эффект; при этом ток протекает вблизи поверхности проводника, что вызывает увеличение активного сопротивления. Потери энергии СВЧ определяются величиной удельного активного поверхностного сопротивления: $\rho = 1/\delta\sigma$. Значения σ характерных материалов приведены в табл. 2.6.

Проводимость зависит не только от физических свойств материала, но и от вида обработки токонесущей поверхности (табл. 2.7). При выборе способа обработки токонесущей поверхности следует учитывать, что после чистовой механической обработки образуется поверхностный слой толщиной до десятков микрометров с размерными до 0,001...0,01 мкм

* Составитель О. Н. Носов.

Таблица 2.6

Удельные проводимости металлов и сплавов на постоянном токе $\sigma =$
[См/м] при 293 К

Материал	$\sigma = \cdot 10^7$ См/м	Материал	$\sigma = \cdot 10^7$ См/м
Серебро (100%)	6,17	Бронза фосфатная	0,82...2,52
Медь (100%)	5,97	Вольфрам	1,78
Серебро (10% Cu)	4,96	Тантал	1,55
Золото	4,10	Никель	1,28
Алюминий (100%)	3,54	Платина	0,91
Латунь отожженная:		Палладий	0,91
90% Cu	2,52	Родий	0,66
80% Cu	1,88	Олово	0,65
70% Cu	1,65	Свинец	0,45
60% Cu	1,51	Ртуть	0,10
Хром	2,23	Нихром	0,10
Магний (100%)	2,18	Титан	0,22
Цинк	1,7	Цирконий	0,23
Магниеые сплавы	0,56...1	Константан	0,21
Молибден	2,1	Инвар	0,14
		Графит	0,013

зернами металла. Такой слой будет иметь меньшее электрическое сопротивление, чем шлифованный или полированный поверхностный слой металла толщиной не более 0,1 мкм, но с частицами полировальной пасты и абразива. Поэтому (особенно в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн) полирование токонесущей поверхности не всегда

приводит к уменьшению потерь, необходимо удалять поверхностный слой путем химического или электрохимического полирования.

Диэлектрические материалы широко используются в качестве заполнителей различных линий передачи, герметизирующих и согласующих вставок, антенных обтекателей, покрытий, поглотителей мощности.

Таблица 2.7

Удельные проводимости (См/м $\times 10^7$) основных конструктивных материалов при $\theta = 293$ К на постоянном ($\sigma =$) и переменном (σ при $\nu = 9$ ГГц) токах при различных видах обработки токонесущей поверхности

Материал	Характеристика обработки поверхности			
	Необработанная $\sigma = / \sigma_{\sim}$	Отожженная в вакууме $\sigma = / \sigma_{\sim}$	Ручная полировка $\sigma = / \sigma_{\sim}$	Электрополировка $\sigma = / \sigma_{\sim}$
Серебро	6,17/4,75	6,28/4,45	6,17/5,30	—
Медь	5,97/4,57	6,09/5,42	5,97/5,25	5,97/4,90
Алюминий	3,54/2,80	3,60/3,30	3,54/2,94	—
Латунь мягкая	1,51/1,44	—	1,51/1,51	1,51/1,41

Примечание. Ручная полировка наждачной бумагой допускается только в продольном направлении.

Таблица 2.8

Параметры основных диэлектрических материалов $\theta=293\text{ К}$ ($\nu=10^6\text{ Гц}$)

Материал	ρ_e^p , Ом·см	ϵ_r	$\lg \delta_e \times 10^{-4}$	D , г/см ³	n_m , К	α , К ⁻¹ × 10 ⁻⁴
Полиэтилен						
ПЭВД (ГОСТ 16337—70)	10 ¹⁷	2,3	3	0,93	358	5,5
ПЭНД (ГОСТ 1638—70)	10 ¹⁷	2,1	5	0,96	358	5,5
ПЭСД	—	2,4	4	0,96	358	—
Полипропилен (МРТУ6-05-1105—67)	10 ¹⁶	2,2	5	0,9	—	1,1
Полистирол блочный (ГОСТ 9440-60)	10 ¹⁴	2,6	4	1,06	348	0,8
Ударопрочный полистирол (ТУ6-05-1604—72)	10 ¹⁵	2,7	7	1,06	358	—
Сополимер стирола (САМ) МРТУ6-05-828—68	10 ¹⁶	2,6	5	1,1	—	0,8
Фторопласт-4 (ГОСТ 10007—72)	10 ¹⁷	2,2 ¹	1 ¹	2,1	383	1,2
Фторопласт-4Д (ГОСТ 14906—69)	10 ¹⁶	2,2	3	2,2	—	—

Примечание. На частоте $\nu=10^{10}\text{ Гц}$ значения объемного термического коэффициента расширения $\sim 3\alpha$.

и т. д. Их электрические и магнитные свойства полностью определяются величинами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = |\epsilon| e^{j\delta_e}; \quad \mu = \mu' - j\mu'' = |\mu| e^{j\delta_m}.$$

Качество материала определяется тангенсом угла электрических потерь $\lg \delta_e = \epsilon''/\epsilon'$ и магнитных $\lg \delta_m = \mu''/\mu'$. Если $\delta_e = \delta_m = 0$, то среда без потерь (идеализированная).

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$, магнитная $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}\text{ Г/м}$. При практических расчетах пользуются

Таблица 2.9

Некоторые параметры пенопластов $\theta=293\text{ К}$, $\nu=10^6\text{ Гц}$

Материал	D , г/см ³	θ , К	$\sigma_{с}^{мх}$, МПа	$\sigma_{р}^{мх}$, МПа	$\sigma_{н}^{мх}$, МПа	ρ_e^p , Ом·см	E , кВ/мм	ϵ_r	$\lg \delta_e \times 10^{-3}$
ПС-1 плиточный	0,1	213...333	1	2	2,2	10 ¹²	2	1,1	1,2
(ТУ МХП 3202—54)	0,2	213...333	3	4,2	6,5	—	5	1,18	2,4
ПХВ-1 плиточный	0,1	213...333	0,9	2	2	10 ¹⁰	3,9	1,6	3,6
(ТУ МХП 4392—54)	0,2	213...333	2,6	4,5	4	10 ¹²	4,1	2,4	1,6
К-40 (АМТУ 429—59)	0,23	до 523	0,8	0,58	—	—	—	1,21 ¹	1,3 ¹
ПУ-101 (АМТУ 420—75)	0,2	до 423	2,85	1,81	4,2	—	—	1,25 ¹	4,45 ¹
ФФ (МХП М—652—55)	0,23	до 423	4	1,18	—	—	—	1,31 ¹	10 ¹

Примечания. 1. На частоте 10^{10} Гц . 2. $\sigma_{с}^{мх}$, $\sigma_{р}^{мх}$, $\sigma_{н}^{мх}$ — пределы прочности при сжатии, растяжении, изгибе.

Таблица 2.10

Лаки и эмали для покрытия токонесущих поверхностей устройств СВЧ
($\nu = 10^9$ Гц)

Материал	$\rho_e^{0^1}$, Ом·см	$\operatorname{tg} \delta_e^2$	ϵ_r^2
Лак 976—1	$10^{14}/10^{13}$	0,005/0,012	3,9/4,3
Лак СБ-1С (ТУ МХП 2785—54)	$15 \cdot 10^{14}/10^{12}$	0,02/0,02	3,4/2,6
Эмаль ЭП-74Т (СТУ ЯН141—59)	$4 \cdot 10^{15}/4,9 \cdot 10^{14}$	0,026/0,028	3,2/4,5

Примечания. 1. Значения для сухого /влажного материала; 2. В нормальных условиях при $\theta = 293$ К/после 100 ч пребывания в условиях тропической влажности

Таблица 2.11

Некоторые параметры пластмасс с наполнением титановыми соединениями ($\theta = 293$ К, $\nu = 10^6$ Гц)

Материал	D , г/см ³	$\sigma_p^{\text{мх}}$, МПа	α , К ⁻¹ ×10 ⁻⁵	θ_m , К	E_e , кВ/мм	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta_e \times 10^{-4}$
ПТ-3	1,1	30	7	353	35	2,8	7
ПТ-5	1,6	30	5	353	27	5,0	8
ПТ-7	1,8	28	4	358	20	7,0	9
ПТ-10	2,1	24	3	358	15	10,0	12
ПТ-16	2,6	18	2	363	10	16,0	20

Таблица 2.12

Значения ϵ_r при $\theta = 273$ К, $p = 10^5$ Па (~ 760 мм рт. ст.)

Вещество	Водород	Кислород	Воздух, свободный от углекислого газа	Азот	Углекислый газ
ϵ_r	1,000264	1,000530	1,000574	1,000589	1,000988

Примечание. ϵ_r практически постоянны в широком диапазоне частот.

Таблица 2.13

Основные параметры ферритов СВЧ ($\theta = 293\text{ K}$)

Марка	$\mu_0^{\text{НС}}$, Тл	В, Тл	В _г , Тл	Нс, А/м	μ_r	θ_M , К	ϵ_r'	$\text{tg } \delta_e \times 10^{-3}$	D, кг/м ³	ρ_e , Ом·м	$\frac{2\Delta H, \text{ кА/м}}{\lambda_0 = 3\text{ см}}$ $\frac{\lambda_0}{10\text{ см}}$
Никелевые ферриты											
1СЧ	0,45	0,34	0,175	160	107	543	10,4	11	5,4	$8,2 \cdot 10^4$	33,4
1СЧ2	0,29	0,22	0,05	240	86	673	12,2	16	4,5	$1,7 \cdot 10^7$	22,3
1СЧ3	0,44	0,36	0,22	160	86	673	8,5	11	4,4	$1,3 \cdot 10^3$	32,0
1СЧ4	0,48	0,4	0,275	160	83	673	11,1	17	5,0	$4,8 \cdot 10^6$	13,5
2СЧ	0,22	0,17	0,126	880	10	773	9,2	10	4,1	$5,9 \cdot 10^4$	55,6
2СЧ4	0,45	0,39	0,14	160	47	723	12,5	9,8	4,9	$5,3 \cdot 10^6$	9,6
3СЧ8	0,45	0,35	0,183	280	46	643	10,4	—	4,1	$8,7 \cdot 10^4$	35,8
4СЧ8	0,32	0,14	0,04	360	14	723	—	—	4,8	$7,9 \cdot 10^2$	47,7
4СЧ9	0,23	0,26	0,104	320	27	723	—	—	5,1	$2,0 \cdot 10^2$	22
4СЧ10	0,22	0,19	0,042	320	22	803	9,5	6,6	5,0	$7,8 \cdot 10^7$	17,5
5СЧ	0,31	0,23	0,064	120	94	613	11,9	5,4	4,8	$3,0 \cdot 10^6$	11,1
Магнeвые ферриты											
1СЧ1	0,21	0,151	0,115	320	20	723	8,2	4,1	3,5	$5,5 \cdot 10^6$	80
2СЧ1	0,20	0,152	0,104	320	24	643	10,6	6,4	3,8	$5,0 \cdot 10^6$	42
3СЧ	0,18	0,120	0,100	400	13	593	11,6	5,6	4,1	$5,5 \cdot 10^6$	52
3СЧ1	0,17	0,126	0,098	480	13	643	8,2	6,5	3,7	$1,9 \cdot 10^7$	57
3СЧ2	0,11	0,53	0,014	800	14	583	65,0	15	3,1	$4,1 \cdot 10^5$	64
3СЧ3	0,22	0,178	0,107	320	13	603	9,5	17	4,6	$5,1 \cdot 10^4$	32
3СЧ4	0,22	0,175	0,119	240	56	493	11,4	8,5	4,1	$5,1 \cdot 10^4$	48
3СЧ5	0,23	0,241	0,185	240	54	573	12,5	6,7	4,3	$3,9 \cdot 10^8$	32
3СЧ6	0,33	0,309	0,235	80	140	473	12,2	17	4,6	$1,1 \cdot 10^5$	8
3СЧ7	0,19	0,150	0,103	240	23	603	11,1	1,7	4,1	$3,2 \cdot 10^8$	24
3СЧ9	0,34	0,295	0,243	80	40	503	13,2	1,7	4,4	$1,0 \cdot 10^4$	9,6
3СЧ15	0,22	0,160	0,130	160	12	633	12,0	8,0	4,5	$4,7 \cdot 10^7$	32
4СЧ	0,08	0,048	0,023	440	8	543	5,2	3,3	2,1	$9,0 \cdot 10^5$	—
4СЧ1	0,10	0,055	0,027	400	9	523	6,5	2,1	2,7	$4,0 \cdot 10^5$	56
4СЧ2	0,08	0,060	0,034	520	8	553	5,5	1,1	2,5	$5,2 \cdot 10^6$	56
4СЧ3	0,11	0,050	0,025	940	5	673	—	—	2,0	$1,6 \cdot 10^5$	64
4СЧ4	0,17	0,113	0,078	280	18	583	9,5	12	3,5	$4,8 \cdot 10^5$	40
4СЧ5	0,12	0,079	0,046	720	11	633	7,8	8,0	3,8	$7,0 \cdot 10^6$	64
4СЧ11	0,22	0,212	0,168	160	20	593	9,5	3,6	4,2	—	24

Продолжение табл. 2.13

Марка	$\mu_0^{НС}$	B , Тл	B_r , Тл	H_c , А/м	μ_r	θ_M , К	e_r	$\lg \delta_e \times 10^{-3}$	D , кг/м ³	ρ_e , Ом·м	$\frac{2\Delta H, \text{ кА/м}}{\lambda = \frac{\lambda_0}{-3 \text{ см}} = 10 \text{ см}}$
Магнитные ферроалюминаты											
4СЧ6	0,12	0,094	0,067	360	15	563	9,2	2,9	3,7	$3,6 \cdot 10^6$	48
6СЧ1	0,15	0,063	0,025	160	61	423	11,6	3,2	4,2	$3,0 \cdot 10^6$	24
8СЧ1	0,08	0,069	0,048	400	12	563	9,8	1,6	3,6	$1,5 \cdot 10^6$	48
10СЧ	0,08	0,060	0,030	400	12	573	9,6	1,9	4,0	$2,0 \cdot 10^7$	44,8
20СЧ	0,05	0,040	0,018	320	10	433	10,4	3,6	3,9	$5,5 \cdot 10^5$	20,8
30СЧ2	0,11	0,109	0,078	80	48	413	10,5	1,0	4,2	$1,7 \cdot 10^6$	16
30СЧ	0,09	0,069	0,023	160	36	423	10,5	1,9	3,9	$7,2 \cdot 10^8$	22,4
Никелевые и магнитные феррохромиты											
10СЧ1	0,07	0,054	0,032	400	11	413	8,5	1,8	3,4	$6,8 \cdot 10^5$	17,6
10СЧ8	0,07	0,056	0,035	160	17	413	9,5	2,8	3,5	$5,8 \cdot 10^5$	20
10СЧ12	0,11	0,089	0,059	390	8	623	9,0	8,5	4,8	$5,2 \cdot 10^4$	—
15СЧ	0,12	0,076	0,038	720	9	593	4,8	6,0	4,5	$6,8 \cdot 10^4$	59,2
15СЧ1	0,06	0,048	0,015	200	20	383	6,7	4,2	3,2	$3,2 \cdot 10^5$	24
30СЧ	0,07	0,060	0,031	160	13	453	9,1	2,1	3,6	$3,3 \cdot 10^5$	18,4
30СЧ1	0,13	0,098	0,060	240	26	503	8,2	1,4	3,9	$3,0 \cdot 10^6$	23,2
40СЧ	0,09	0,067	0,025	80	40	373	10,4	2,9	4,0	$9,7 \cdot 10^6$	12
40СЧ1	0,08	0,064	0,033	160	36	373	7,1	3,4	3,6	$1,1 \cdot 10^9$	25,6
Иттриевые ферриты-гранаты											
10СЧ6	0,18	0,168	0,095	80	97	553	14,8	1,6	5,0	$1,2 \cdot 10^{10}$	5,5
30СЧ3	0,12	0,12	0,065	80	86	503	14,8	3,4	5,0	$3,8 \cdot 10^9$	6,4
30СЧ6	0,13	0,118	0,022	80	76	553	15,5	5,8	5,4	$3,1 \cdot 10^8$	5,6
40СЧ2	0,08	0,075	0,034	80	44	453	14,1	8,1	4,9	$5,1 \cdot 10^{11}$	6,4
40СЧ4	0,09	0,082	0,024	160	31	553	15,5	1,7	5,6	$9,9 \cdot 10^{10}$	13,6
60СЧ	0,05	0,05	0,032	80	28	403	14,0	0,4	4,9	$9,0 \cdot 10^9$	4
80СЧ	0,03	0,036	0,009	160	23	393	13,5	1,4	4,9	$1,6 \cdot 10^9$	5,6
40СЧ5	0,07	0,063	0,040	48	—	443	14,5	3,0	4,9	$1,0 \cdot 10^{10}$	—
90СЧ	0,02	0,030	0,009	40	—	373	13,0	2,0	4,9	$2,0 \cdot 10^{11}$	—

Примечание $\mu_0^{НС}$ измерена методом Фарадея в поле 400...640 кА/м; B_r , B_c и H_c определены на кольцевых образцах баллистическим методом при максимальной напряженности поля в образце 4 кА/м; значения e_r даны при $v = 1,1$ МГц, а e_r и $\lg \delta_e$ при $v = 3000$ МГц

относительными значениями $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ и $\mu_r = \mu/\mu_0$. При этом вещественные части ϵ_r и μ_r характеризуют плотность электрической и магнитной энергии, а мнимые — электрические и магнитные потери.

В табл. 2.8, 2.9 приведены свойства твердых диэлектриков с $\epsilon_r < 6$ и пенопластов с $\epsilon_r < 2$. Характеристики лаков и эмалей, используемых для покрытия токонесущих поверхностей устройств СВЧ, приведены в табл. 2.10.

Для миниатюризации различных устройств СВЧ (волноводы, полосковые устройства и т. д.) их заполняют пластмассами с наполнением титановыми соединениями, имеющими высокое значение ϵ_r (табл. 2.11). Тракты СВЧ могут заполняться газообразными веществами (табл. 2.12).

Ферриты используются при создании различного рода устройств СВЧ: резонансных вентилях (однонаправленные линии передачи), фазовращателях, циркуляторах, переменных аттенуаторов (ослабителей), модуляторов, переключателей, ограничителей мощности, направленных ответвителей, настраиваемых резонаторов, излучателей антенн и т. д. Ферриты — твердый, хрупкий материал с механическими свойствами, близкими к керамике. По химическому составу ферриты СВЧ можно разделить на группы: никелевые, магнелиевые, магнелиевые ферроалюминаты; никелевые и магнелиевые феррохромиты, иттриевые ферриты — гранаты.

К основным параметрам ферритов СВЧ относятся: ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH [А/м], намагниченность при насыщении I_{nc} [Тл], относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_e$, точка Кюри θ_K [К]. Кроме того, ферриты характеризуются параметрами: магнитной индукцией B [Тл] остаточной магнитной индукцией B_r [Тл]; коэрцитивной силой по магнитной индукции H_c [А/м]; относительной магнитной проницаемостью μ_r ; плотностью D [кг/м³] и удельным электрическим сопротивлением ρ_e^0 [Ом · м]. Основные параметры ферритов СВЧ приведены в табл. 2.13.

Никелевые ферриты используются в основном в диапазонах милли- и сантиметровых волн; имеют большие значения намагниченности при насыщении и высокую термостабильность. Их недостаток — высокие значения начальных потерь.

Магнелиевые ферриты используют в основном в средней части сантиметрового диапазона; обладают малыми магнитными и диэлектрическими потерями, высоким коэффициентом прямоугольности, но меньшей термостабильностью по сравнению с ферритами из никеля. Максимальной намагниченностью при насыщении обладают ферриты марки ЗСЧ6 и ЗСЧ9.

Магнелиевые ферроалюминаты и феррохромиты используют в длинноволновой части диапазона СВЧ; характеризуются малыми значениями индукции при насыщении; недостатком является низкая термостабильность.

Никелевые феррохромиты применяют в резонансных устройствах при работе на высоком уровне мощности.

Иттриевые ферриты-гранаты используют в низкочастотной области СВЧ диапазона.

2.5. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ [9, 12, 17, 18, 22 ... 26]*

Ионизирующие излучения (ГОСТ 15484—74) — любые излучения, взаимодействие которых со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков.

Первичное ИИ в рассматриваемом процессе взаимодействия со средой является или принимается исходным. Вторичное ИИ возникает в результате взаимодействия первичного с рассматриваемой средой.

ИИ могут быть электромагнитными (фотонными) в виде γ - и рентгеновского излучений и корпускулярными в виде потока частиц с массой покоя отличной от нуля (α - и β -излучения, нейтронное излучение).

ИИ характеризуется полем (пространственно-временным распределением ИИ в рассматриваемой среде); потоком ионизирующих частиц

* Составитель И. В. Ваонилькевич.

Φ_N , плотностью потока ионизирующих частиц Φ_N , потоком энергии ИИ $\Phi_{ИИ}$, плотностью потока энергии ИИ Φ , переносом ионизирующих частиц F_N , переносом энергии ИИ $F_{ИИ}$.

Поток ионизирующих частиц — отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих через данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу:

$$\Phi_N = dN/dt \text{ [част./с]}.$$

Плотность потока ионизирующих частиц — отношение потока ионизирующих частиц $d\Phi_N$, проникающего в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS :

$$\Phi_N = d\Phi_N/dS \text{ [част./с} \cdot \text{см}^2\text{]}.$$

Поток энергии ИИ — отношение суммарной энергии dE всех ионизирующих частиц, проходящих через данную поверхность за интервал времени dt , к этому интервалу:

$$\Phi_{ИИ} = dE/dt \text{ [Дж/с]}.$$

Плотность потока энергии ИИ — отношение потока энергии ИИ $d\Phi$, проникающего в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS :

$$\Phi = d\Phi/dS \text{ [Дж/(с} \cdot \text{см}^2\text{)]}.$$

Перенос ионизирующих частиц (ПИЧ) — отношение числа ионизирующих частиц dN , проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS :

$$F_N = dN/dS \text{ [част./см}^2\text{]}.$$

Перенос энергии ИИ — отношение суммарной энергии dE всех ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы dS :

$$F_{ИИ} = dE/dS \text{ [Дж/см}^2\text{]}.$$

Взаимодействие ИИ со средой оценивают поглощенной дозой излучения D и мощностью поглощенной дозы P . Поглощенная доза излучения

(ПДИ) — отношение средней энергии $dE_{ср}$, переданной ИИ веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = dE_{ср}/dm \text{ [Дж/кг или рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг]}.$$

Мощность ПДИ — отношение приращения поглощенной дозы излучения dD за интервал времени dt к этому интервалу:

$$P = dD/dt \text{ [Дж/(кг} \cdot \text{с) или рад/с]}.$$

При проектировании РЭА, как правило, учитывают воздействие нейтронов и γ -излучения, обладающих наибольшей проникающей способностью.

Радиационная стойкость изделия или материала (ГОСТ 18298—72) — свойство аппаратуры, комплектующих элементов, материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время воздействия ИИ. Критерием радиационной стойкости изделия (материала) является предельное значение определяющего параметра радиационной стойкости. Определяющий параметр — параметр изделия (материала), изменение значения которого в условиях воздействия ИИ свыше определенного значения исключает возможность его применения. Показателем радиационной стойкости изделия служит значение характеристики поля ИИ, при котором достигаются критерии радиационной стойкости.

Воздействие ИИ на изделие (материал) проявляется в виде радиационного и ионизационного эффектов, обратимого или необратимого радиационных дефектов, радиационного разогрева и других явлений. Радиационный эффект — изменение значений параметров изделий и материалов в результате воздействия ИИ. Ионизационный эффект — радиационный эффект, обусловленный ионизацией и возбуждением атомов вещества. Радиационный дефект — радиационный эффект, проявляющийся в нарушении структуры вещества под воздействием ИИ. Обратимый радиационный дефект — радиационный дефект в веществе, исчезающий с прекращением облучения. Необ-

ратимый радиационный дефект — радиационный дефект, длительно сохраняющийся в веществе после прекращения облучения. Радиационный разогрев — радиационный дефект, проявляющийся в повышении температуры материала в результате поглощения энергии ИИ.

Нейтронное излучение в основном является причиной радиационных дефектов, обусловленных физико-химическими преобразованиями в материалах (например, сшивание и деструкция при облучении полимеров, окисление). Возможны радиационный разогрев, выделение кислот и активных газов (хлор, фтор, водород).

При γ -излучении преобладают ионизационные эффекты. Скорость образования избыточных носителей заряда пропорциональна ПДИ. Увеличение концентрации избыточных носителей — основная причина увеличения проводимости диэлектрических и полупроводниковых материалов.

Влияние ИИ на материалы [9]

Металлы наиболее устойчивы к воздействию ИИ: им свойственна высокая концентрация свободных носителей заряда, а характеристики их слабо зависят от дефектов кристаллической решетки. Последствия нейтронного облучения начинают сказываться при ПИЧ порядка 10^{20} нейтр./см²; γ -излучение на свойства металлов практически не влияет. У большинства металлов при воздействии ИИ предел текучести возрастает в 2 ... 3 раза, ударная вязкость снижается, ρ^v повышается на 10 ... 30%. Наименьшей радиационной стойкостью обладают электро-технические стали и магнитные материалы, у которых изменяется μ , ρ_e при ПИЧ порядка 10^{13} нейтр./см².

Некоторые металлы, например, бор, марганец, кобальт, кадмий, цинк, молибден и др. после облучения тепловыми нейтронами становятся источниками вторичного ИИ.

Наименее устойчивы к воздействию ИИ полупроводниковые и органические материалы. У полупроводниковых материалов при облучении изменяются время жизни и подвижность носителей заряда, коэффициент

Холла. У органических — механические свойства, электрическая прочность, ϵ , $\text{tg } \delta$.

Неорганические материалы устойчивы к ИИ: ϵ , $\text{tg } \delta$ у них изменяются незначительно; у стекол изменяются оптические свойства и цвет.

Влияние ИИ на резисторы [9]

Воздействие ИИ вызывает обратимые или необратимые изменения сопротивления, увеличение уровня шумов, ухудшение влагостойкости резисторов. Основные причины: деградация электрофизических характеристик резистивного и электроизоляционных материалов (резкое увеличение проводимости из-за ионизационных эффектов в материалах, воздухе или другой среде, окружающей резистор); γ -излучение вызывает в основном обратимые изменения. После окончания облучения исходное значение сопротивления восстанавливается менее чем через 2 мс. Нейтронное излучение может стать причиной ухудшения влагостойкости резисторов и обратимых либо необратимых изменений их сопротивления. Последствия зависят от кинетической энергии частиц, ПДИ, типа резистора. Необратимые радиационные дефекты резисторов связаны с нарушением структуры материалов основания, защитных покрытий, опрессовки, резистивного слоя.

Наиболее устойчивы к воздействию ИИ керамические и проволочные резисторы. В конструкции этих резисторов используются лишь радиационно-стойкие материалы: металл, керамика, стекло. Так, облучение проволочных резисторов тепловыми нейтронами ПИЧ около 10^{19} нейтр./см² приводит к необратимому увеличению сопротивления (менее чем на 2% от исходной величины). При облучении их быстрыми нейтронами до ПИЧ 10^{20} нейтр./см² изменений в характеристиках не наблюдалось.

Менее устойчивы к ИИ металлопленочные и пленочные углеродистые резисторы. При их облучении одновременно быстрыми, тепловыми, надтепловыми нейтронами (соответственно величины ПИЧ: 10^{14} , 10^{18} , 10^{16} нейтр./см²) и γ -излучением (ПДИ

10^8 рад) отмечено постепенное увеличение сопротивления до 3,5%. При этом необратимые изменения составляют менее 2%. Устойчивость к влаге, уровень шумов и ТКС резисторов после облучения не меняются.

Бороуглеродистые резисторы ненадежны при облучении тепловыми нейтронами: ПИЧ около 10^{18} нейтр./см² вызывает существенное (на 20%) повышение сопротивления и снижение влагостойкости резисторов в 2 раза. Основная причина в нарушении структуры проводящей пленки.

Композиционные резисторы в равной мере нестойки к корпускулярному и фотонному излучениям. Длительное воздействие нейтронов ПИЧ 10^{14} нейтр./см² или γ -излучения ПДИ 10^8 рад приводит к снижению влагостойкости, возрастанию уровня собственных шумов в 2 раза, изменению номинального омического сопротивления $r_{ном}$ до 10%. Причиной перечисленных необратимых радиационных дефектов является нарушение структуры органических материалов, использованных в качестве связующих в проводящей композиции.

Тонкопленочные интегральные резисторы способны выдерживать потоки быстрых нейтронов ПИЧ более 10^{16} нейтр./см² без существенных изменений величины сопротивления и параметров надежности. Наибольшей стойкостью к ИИ обладают танталовые, никелевые, ни хромовые тонкопленочные резисторы, покрытые пассивирующей защитной пленкой.

В радиационно-стойкой РЭА рекомендуется применять резисторы с $r_{ном} < 10$ кОм. Высокоомные резисторы защищаются заливкой либо опрессовкой эпоксидной смолой. Увеличение толщины защитного покрытия в 10 раз позволяет снизить неустойчивость резистора в 6... 8 раз.

При уменьшении размеров резистора его устойчивость к ИИ повышается.

Влияние ИИ на конденсаторы [9]

Воздействие ИИ сказывается на параметрах электрической прочности конденсаторов, $r_{изол}$, $\lg \delta$, $C_{ном}$. Причины этих изменений: преобразование в структуре диэлектрика, меха-

нические деформации, ионизация диэлектрика и окружающей среды, выделение газов.

Рентгеновское и γ -излучение вызывают в основном обратимые радиационные дефекты. При облучении нейтронами возможны как обратимые, так и необратимые радиационные дефекты. Наибольшей стойкостью к ИИ обладают конденсаторы с неорганическим диэлектриком: керамические, стеклокерамические, слюдяные. Изменение их параметров при облучении нейтронами ПИЧ до 10^{16} нейтр./см² и воздействием γ -излучения ПДИ до 10^9 рад не превышает долей или единиц процентов (исключение составляют низкочастотные сегнето-керамические конденсаторы, изменение их емкости достигает 25%). Менее чем через 2 ч после окончания облучения параметры керамических, стеклокерамических и слюдяных конденсаторов восстанавливаются до исходных.

Конденсаторы с органическим диэлектриком (бумажные, полистироловые, лавсановые, триацетатные, фторпластовые) обладают пониженной устойчивостью к ИИ. При облучении таких конденсаторов резко падает $r_{изол}$, в 10 ... 20 раз увеличивается $\lg \delta$, изменения $C_{ном}$ составляют единицы или десятки процентов. Общая причина этих изменений — разложение полимерных материалов. Лишь через 200 ... 300 ч после облучения параметры таких конденсаторов восстанавливаются до допустимых пределов.

Электролитические конденсаторы при облучении ненадежны. Отмечены случаи разгерметизации из-за разложения электролита. Изменение емкости носит нерегулярный характер. Сведения о радиационной стойкости электролитических конденсаторов не достоверны.

Из интегральных тонкопленочных конденсаторов наиболее устойчивы к ИИ конденсаторы с диэлектриком на основе Ta_2O_5 и Al_2O_3 .

Влияние ИИ на полупроводниковые приборы [18, 23...26]

Воздействие ИИ служит причиной обратимых либо необратимых радиационных дефектов, являющихся

следствием ионизации и структурных нарушений в кристаллах

Ионизирующее действие радиации приводит к генерации в объеме полупроводника избыточных зарядов. Заряды, двигаясь под действием градиентов концентраций и электрических полей, создают фототоки. Величина избыточных фототоков пропорциональна эффективному (по сбору дополнительных носителей) объему прибора. Последний (для биполярных структур) определяется шириной области объемного заряда, площадью p - n -переходов и диффузионной длиной пробега неосновных носителей по обе стороны переходов. Поэтому минимизация размеров полупроводниковых приборов повышает их устойчивость к ИИ

Величина фототока зависит только от скорости поглощения энергии за счет электронных процессов и не зависит от типа и спектра ИИ. После окончания ИИ фототок уменьшается до нуля в соответствии со временем жизни неосновных носителей заряда

Структурные нарушения обусловлены взаимодействием ИИ с кристаллической решеткой полупроводника. Степень структурных нарушений зависит от вида и энергии частиц, ПДИ. Известно, что даже незначительные дефекты структуры кристаллической решетки вызывают существенное изменение параметров полупроводниковых материалов: подвижности, эффективной концентрации, времени жизни носителей заряда. Поэтому следствием структурных нарушений являются необратимые дефекты полупроводниковых приборов.

В зависимости от типа прибора, технологии его изготовления, условий работы, вида и энергии излучения, преобладает тот или иной механизм нарушений. Он и определяет радиационную стойкость прибора.

Полупроводниковые диоды

Основные радиационные эффекты в диодах: фототоки (на один-два порядка больше рабочих токов), изменение сопротивления полупроводника, времени жизни носителей заряда.

Германиевые диоды. Нейтронное ИИ при ПИЧ порядка 10^{11} нейтр./см²

вызывает заметное изменение вольт-амперных характеристик: проводимость диодов в прямом направлении уменьшается, в обратном — увеличивается; полный отказ наблюдается при ПИЧ более 10^{13} нейтр./см².

При воздействии фотонных ИИ (ПДИ 10^4 рад, мощность ПДИ 10^2 рад/с) возникают фототоки, возрастает обратный ток (на 10%), уменьшается емкость p - n -перехода (на 10%). Через несколько дней после прекращения ИИ параметры диодов восстанавливаются до первоначальных.

Кремниевые диоды. Нейтронное ИИ при ПИЧ порядка 10^{12} нейтр./см² вызывает заметное изменение вольт-амперных характеристик. При этом проводимость точечно-контактных диодов уменьшается в прямом и обратном направлениях. У плоскостных диодов проводимость в прямом направлении также уменьшается. В обратном направлении проводимость некоторых типов плоскостных кремниевых диодов с увеличением нейтронного потока увеличивается, достигает максимума при некоторой величине потока, после чего уменьшается. При $\theta = 423$ К воздействие ИИ на прямые характеристики скажется меньше, нежели при нормальной температуре. Облучение нейтронами позволяет до 1000 раз уменьшить время переключения кремниевых диодов. Полный отказ диодов при нейтронном облучении наблюдается при ПИЧ порядка $10^8 \dots 10^{17}$ нейтр./см²; γ -излучение вызывает обратимые изменения вольт-амперных характеристик.

Туннельные диоды. При нейтронном ИИ заметное изменение вольт-амперных характеристик диодов наблюдается лишь при ПИЧ порядка 10^{17} нейтр./см². Потенциальная устойчивость туннельных диодов к ИИ обусловлена низким ρ_c полупроводникового материала, сравнительно высокой рабочей θ , слабой зависимостью характеристик диодов от ионизационных эффектов.

Интегральные диоды. Радиационная стойкость обеспечивается при использовании коллекторного или эмиттерного переходов радиационно-стойкого транзистора. Наибольшей устойчивостью к ИИ обладают высокочастотные диоды (с тонкой базой).

Транзисторы

Биполярные транзисторы. Радиационная стойкость в основном определяется деградацией коэффициента передачи по току. Второстепенные эффекты: изменение вольт-амперных характеристик $p-n$ -переходов, уменьшение емкостей $p-n$ -переходов. Главная причина деградации параметров биполярных транзисторов при ИИ — радиационные дефекты в полупроводниковом материале.

Максимально допустимый ПИЧ, который может выдержать биполярный транзистор для заданного изменения параметра h_{21} , определяется из соотношения:

$$F_N \leq 5, 15K\gamma_\alpha (h_{21}/h_{21}^n - 1)/h_{21},$$

где γ_α — граничная частота усиления транзистора по току в схеме с общей базой, Гц; h_{21} — коэффициент передачи транзистора по току в схеме с общим эмиттером до начала ИИ, h_{21}^n — коэффициент передачи транзистора по току в схеме с общим эмиттером после ИИ; K — постоянная, зависящая от типа транзистора, нейтр. · с/см² (для германиевых транзисторов $p-n-p$ -типа $K = (4,2 \pm 0,2) \cdot 10^7$ и $n-p-n$ -типа $K = (1,8 \pm 0,2) \cdot 10^7$; для кремниевых транзисторов $p-n-p$ -типа $K = (0,3 \pm 0,04) \cdot 10^7$ и $n-p-n$ -типа $K = (0,46 \pm 0,033) \cdot 10^7$).

При облучении биполярных транзисторов, не имеющих на поверхности кристалла защитных покрытий, наблюдается обратимое возрастание тока I_{KO} из-за ионизационных эффектов. Удовлетворительного метода прогнозирования изменений I_{KO} при ИИ пока не найдено. При прочих равных условиях наиболее устойчивы к ИИ транзисторы с минимальными размерами структуры и ступенчатым распределением примеси в $p-n$ -переходах.

Для повышения радиационной стойкости РЭА рекомендуется применять высокочастотные транзисторы с пассивирующими покрытиями на поверхности кристалла и с низкой мощностью рассеяния, работающие в режиме больших токов.

Униполярные транзисторы. Радиационная стойкость определяется из-

менениями поверхностных и объемных состояний, обусловленными процессами в окисле, покрывающем поверхность приборов. Униполярные транзисторы выдерживают уровни ИИ меньшие, нежели биполярные. Наиболее чувствительны к воздействию ИИ униполярные транзисторы с изолированным затвором (МДП транзисторы). Уже при ПДИ фотонного излучения менее 10^4 рад и ПИЧ, равном 10^{12} част/см², наблюдается необратимый сдвиг характеристик прямой передачи в сторону более отрицательных смещений затвора (изменение порогового напряжения). Направление сдвига не зависит от типа проводимости канала и напряжения на затворе. Равные дозы различных излучений создают одинаковый сдвиг характеристик. Абсолютная величина сдвига зависит от толщины и материала диэлектрической пленки (чувствительность к ИИ снижается в следующей последовательности: SiO₂, SiN₄, SiO, Al₂O₃), материала электродов, технологии изготовления приборов, напряжения на затворе. Наиболее устойчивыми к ИИ являются МДП структуры с диэлектриком на основе Al₂O₃. Они выдерживают фотонные излучения с ПДИ до 10^7 рад и уровни быстрых нейтронов ПИЧ до 10^{15} нейтр./см². Униполярные транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом обладают большей устойчивостью к ИИ, чем МДП транзисторы. Последствия ИИ проявляются в увеличении тока утечки затвора. Минимально изменяются и характеристики транзисторов с p -каналом: ток утечки затвора при ИИ не превышает 10 нА. В транзисторах с n -каналом при обратном смещении на затворе ток утечки может достигать 1 мА.

Таким образом, среди униполярных транзисторов наибольшей устойчивостью к воздействию ИИ обладают приборы с управляющим $p-n$ -переходом и p -каналом.

Интегральные микросхемы

Действие ИИ проявляется в обратимых нарушениях работоспособности, вызванных ионизационными эффектами, и в необратимой деградации параметров.

Основные причины нарушения работоспособности: изменение параметров у входящих в них элементов (резисторов, транзисторов и др.), повреждение межсоединений, ухудшение качества изоляции. Радиационная стойкость конкретных ИС определяется их конструктивно-технологическими и схемными особенностями.

Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости ИС следующие:

- обеспечение стойкости к ИИ активных и пассивных элементов;
- создание надежной электрической изоляции элементов в условиях воздействия ИИ;

- использование радиационно-стойких проводящих и диэлектрических пассивирующих материалов;

- ослабление первичного ИИ за счет рационального выбора конструкции корпуса и применение материалов, поглощающих энергию ИИ.

Наименее устойчивы к ИИ ИС с изоляцией встречно включенными $p-n$ -переходами. Уже при ПДИ $10^4 \dots 10^8$ рад существенно возрастает уровень электрических паразитных связей между элементами. Активизируются также паразитные переключающие четырехслойные структуры, связанные с изолирующими переходами. Все это вызывает сбой или полный отказ ИС. Совершенствование этого способа ведется по пути уменьшения площади изолирующего перехода (метод ионной имплантации и др.) и использования изоляции в виде двуокиси кремния, сапфира, керамики. При использовании сапфировых подложек можно получить ИС, способные работать при мощности ПДИ до 10^{11} рад/с. ИС на поликристаллической подложке выдерживает излучение с мощностью ПДИ до $10^7 \dots 10^8$ рад/с. Повреждение межсоединений может произойти из-за фототоковой генерации и теплового поглощения материалом межсоединений низкоэнергетических фотонных излучений.

Разрушение межсоединений из-за фототоковой генерации характерно для биполярных ИС, в которых при ИИ плотность тока в металлизации может возрасти в 100 раз. Для алюминиевой металлизации типичной толщины предел термоэлектрической прочности составляет $5 \cdot 10^3$ А/см², что

достигается при мощности ПДИ, равной $2 \cdot 10^{11}$ рад/с.

При тепловом поглощении фотонных излучений наблюдаются различные повреждения: от разрушения контактов до полного испарения межсоединений. Степень разрушений возрастает с ПДИ и зависит от атомного веса материала. Надежность алюминиевых соединений существенно не изменяется при действии ПДИ, полностью разрушающей золотые проводники.

Значительный интерес для использования в условиях ИИ представляют ИС на основе керамических элементов (керамические твердые схемы). Такие ИС способны работать при нейтронном ИИ при ПИЧ $10^{17} \dots 10^{19}$ нейтр./см² и ПДИ фотонных излучений до $10^{10} \dots 10^{11}$ рад.

С помощью конструктивно-технологических мер предполагается в ближайшие годы повысить радиационную стойкость ИС на 3 ... 4 порядка [22 ... 26]. В настоящее время хорошо отработаны и широко используются схмотехнические методы фототоковой компенсации, функциональное резервирование и другие меры, позволяющие повысить радиационную стойкость ИС на один-два порядка.

Данные по допустимым ПИЧ и ПДИ для некоторых материалов и ЭРЭ приведены на рис. 2.4.

Влияние ИИ на электровакуумные приборы

Основные радиационные дефекты при воздействии ИИ на электровакуумные приборы: комптоновские точки, разгерметизация или разрыв баллона, выделение газов (CO , CO_2 , O_2 пары H_2O) с последующим отравлением катода, вторичное ИИ.

Главным источником комптоновских электронов является сетка. Анодный ток при воздействии ИИ увеличивается так, как если бы на сетку было подано положительное напряжение. Степень возрастания анодного тока зависит от коэффициента усиления лампы и величины сопротивления между сеткой и катодом.

Степень воздействий ИИ на баллоны из стекла и керамики зависит от сорта материала. Наименее стой-

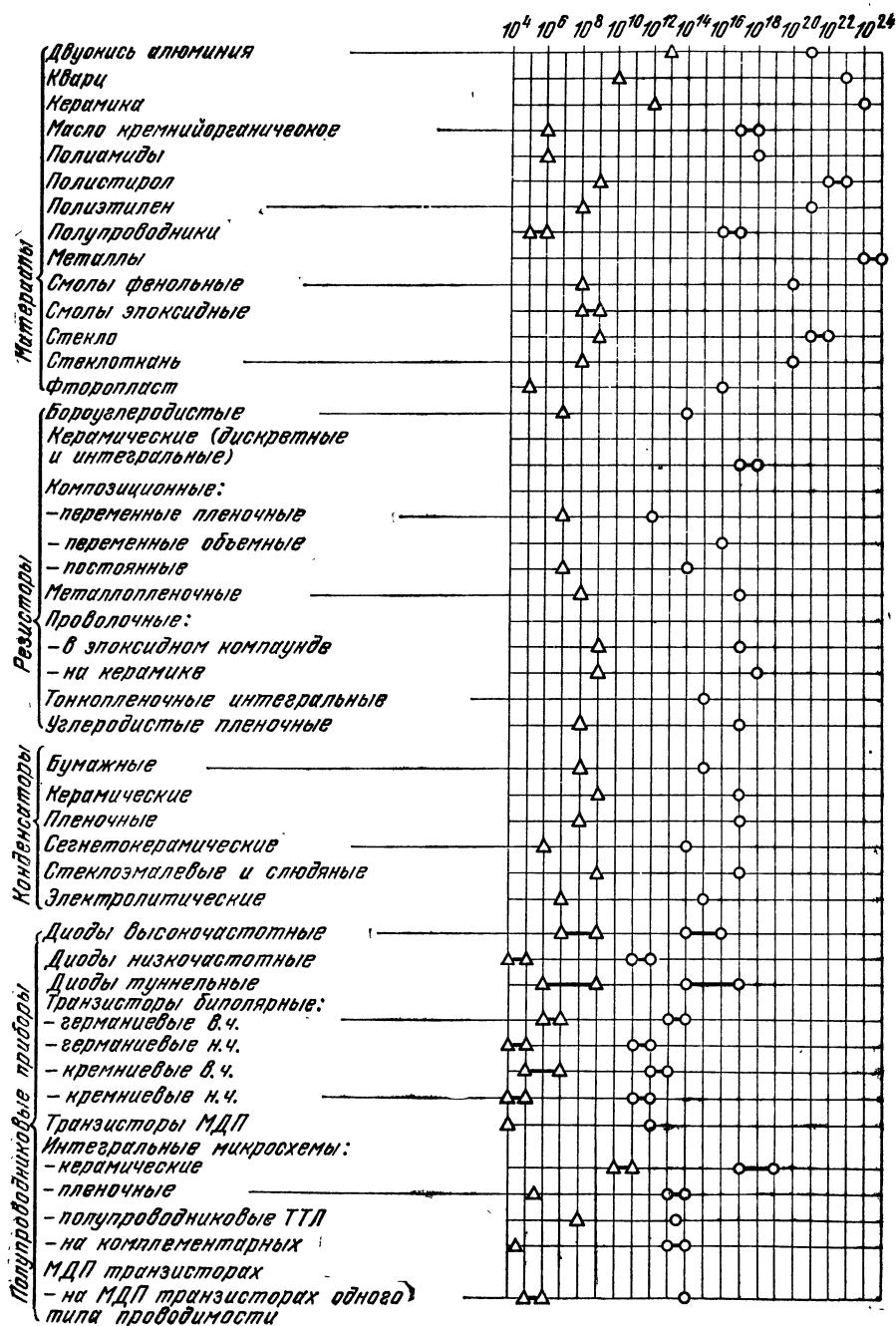


Рис. 2.4. Стойкость материалов и ЭРЭ к воздействию переноса ионизирующих частиц ПИЧ (о) F_N , нейтр./см² и к поглощенной дозе D (Δ), рад

кими к ИИ являются баллоны из стекла, содержащего бор: при ПИЧ порядка 10^{16} нейтр./см² они разгерметизируются. Радиационные дефекты керамических баллонов: повышенное газовыделение и в 2 ... 5 раз больше, нежели у стеклянных, второе ИИ (до 100 рад/ч).

Наибольшей стойкостью к ИИ обладают приемно-усилительные лампы (допустимый ПИЧ 10^{16} нейтр./см²). Фотоэлементы и электронно-лучевые трубки наименее устойчивы к ИИ (допустимый ПИЧ 10^{13} нейтр./см²): их отказ может произойти как из-за повреждения рабочих элементов, так и из-за изменения свойств защитных стекол

Защита РЭА от ИИ [18]

На рис. 2.5, а—д показаны характерные варианты защиты РЭА от ИИ. Общая экранировка (а) требует наличия массивного (для эффективности) экрана 1, защищающего РЭА 2 от ИИ с любой стороны. Если взаимное положение источника ИИ в РЭА известно и стационарно, то можно применить теневой экран (б). Для защиты от космического ИИ используют многослойные экраны (в) из металлов с высоким кулоновским барьером (например, свинец) 5 и поглощающие прослойки 6, 7. Большее число слоев (з) требует гамма-нейтронная защита, при которой, наряду с кожухом РЭА 8, используют полиэтилено-свинцовый

экран 9 для защиты от γ -излучения, термический противонейтронный экран 10 из полиэтилена с окисью бора, полиэтилено-графитовый замедлитель быстрых нейтронов 11 и нержавеющей сталь 12

Точная информация о свойствах источника ИИ и специфике РЭА позволяет комплексно применять все приемы защиты с целью минимизации ее размеров и массы. В этом случае наряду с защитным экраном 1 и радиационно-стойкими компонентами 2 используют локальную защиту отдельных компонентов РЭА 3 и специальное защитное покрытие 4 (д).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР — Л.: Гидрометеиздат, 1961.
2. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. — М.: Энергия, 1965.
3. Бургсдорф В. В., Муретов Н. С. Гололедные нагрузки воздушных линий электропередачи. — Труды ВНИИЭ, 1960, вып. 10.
4. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. — М.: Высшая школа, 1974.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Физматгиз, 1960.
6. Гарцман Л. Б., Меламед М. Н., Кривозубов А. В., Плевко И. П. Метод расчета интенсивности внешних воздействий на механические устройства радиотехнических систем. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая, 1975, вып. 6.

Рис. 2.5. Защита РЭА от ИИ общим (а); теневым (б) и многослойным экраном (в) и поглощающей прослойкой (г); схема гамма-нейтронной защиты (д)



7. Гарцман Л. Б., Меламед М. Н., Кривокубов А. В., Плево И. П. Расчет комплекса параметров гололедно-ветрового режима для проектирования механических устройств наземных радиотехнических систем. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая, 1976, вып. 7.
8. Горбунов Н. Д., Матвеев Г. Д. Ферриты и магнитоэлектрики: Справочник. — М.: Сов. радио, 1968.
9. Горячева Г. А., Шапкин А. А., Шишев Л. Г. Действие проникающей радиации на радиодетали. — М.: Атомиздат, 1971.
10. Гуревич Л. Г. Ферриты на сверхвысоких частотах — М.: Физматгиз, 1960.
11. Защита радиоэлектронной аппаратуры от влияния климатических факторов: Пер. с нем./ Под ред. Г. Юбиша. — М.: Энергия, 1970.
12. Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры/ Р. Х. Бальян, Н. А. Барканов, А. В. Борисов и др.; Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1972.
13. Конструирование и расчет полосковых устройств/ В. И. Голубев, И. С. Ковалев, Е. Г. Кузнецов и др.; Под ред. И. С. Ковалева. — М.: Сов. радио, 1974.
14. Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. — М.: Госэнергоиздат, 1961.
15. Нагрузки и воздействия: СНиП II-6-75. — М.: Стройиздат, 1975.
16. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. — М.: Высшая школа, 1972.
17. Плужников В. М., Семенов В. С. Пьезокерамические твердые схемы. — М.: Энергия, 1971.
18. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций: Справочник/ Под ред. Н. А. Сидорова, В. К. Князева. — М.: Сов. радио, 1976.
19. Фельдштейн А. П., Явич Л. Р.; Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. — М.: Сов. радио, 1967.
20. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот в 2-х т. — М.: Сов. радио, 1965. — Т. 1.
21. Штольд Н. Н., Пискарев К. А. Ферриты для радиочастот. — М.: Энергия, 1966.
22. Хасся А. Г.; Найман Д.; Симон Х. Радиационная стойкость тиристоров. — Электроника, 1968, т. 41, № 7, с. 65—69.
23. Olson R. J.; Alexander D. R.; Antonine R. J. Radiation response study of new radiation — hardened low power TTL series. — IEEE Trans., 1971, v. NS-18, № 6, p. 243—249.
24. Berger R. A., Azarewicz J. L.; Eisen H. Hardness assurance guidelines for moderate neutron environment effects in bipolar transistor and integrated circuits. — IEEE Trans., 1973, v. NS-20, № 6, p. 180—184.
25. Raymond J. P., Pocock D. N. Transient radiation effects in MOS/LSi. — IEEE Trans., 1974, v. NS-21, № 6, p. 179—185.
26. Gwyn G.; Gregory B. L. Designing ultrahard bipolar transistors. — Sol.-St. Tech., 1972, v. 15, № 4, p. 50—55.

3. ОБЪЕКТЫ-НОСИТЕЛИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РЭА*

Основные аббревиатуры

- В — вибрации
- Вл — влажность относительная
- ИС — интегральная микросхема
- КК — космический корабль
- СА — система амортизации
- У — удары (механические)
- УЛ — ускорения линейные

* Составители В. М. Городин, Р. Г. Варламов.

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЭА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕЩЕНИЯ И СВОЙСТВ ОБЪЕКТА-НОСИТЕЛЯ [1...18]

РЭА может размещаться на поверхности земли, в различных наземных или подземных помещениях (объектах), на разнообразных транс-

портных средствах (носителях), на человеке и выючных животных, для обозначения которых обычно пользуются собирательным термином объект-носитель.

Диапазон дестабилизирующих воздействий объекта-носителя очень широк: от климатических воздействий данного региона при эксплуатации РЭА на поверхности земли до специфических условий радиоотсеков самолетов и ракет. В соответствии с этим по ГОСТ 16019—78, 17167—71, 17785—72, 17412—72 и [1 ... 18] различают:

- стационарную РЭА (объекты-носители — поверхность земли или помещения),

- возимую на наземных транспортных средствах (объекты-носители — автомобильный, гусеничный и железнодорожный транспорт).

- возимую на речных и морских судах (объекты-носители — внутренние помещения, палубы и мачты судов),

- носимую и портативную (объекты-носители — человек или выючные животные, возможна работа вне помещений и на ходу),

- самолетную и ракетно-космическую (объекты носители — самолеты, вертолеты, ракеты и космические корабли).

В процессе эксплуатации различают два режима: 1) сохранение работоспособности РЭА при воздействии дестабилизирующих факторов с экстремальными значениями (обычно описывают термином устойчивость) и 2) обеспечение работоспособности в нормальных условиях непосредственно после воздействия дестабилизирующих факторов с экстремальными значениями на неработающую РЭА (обычно описывают термином прочность). Сохранение работоспособности РЭА при экстремальных значениях дестабилизирующих факторов обычно требуется при воздействии вибраций в диапазоне частот, ударов, повышенной влажности, пониженной и повышенной температуры и пониженном атмосферном давлении. Работоспособность в нормальных условиях (после воздействия экстремальных значений дестабилизирующих факторов) обычно проверяется при воздействии вибраций на одной частоте или в диапазоне частот, ударов

и падений, инея и росы, дождя и погружения в воду, пыли и соляного тумана, после обнаружения механических резонансов конструкции, циклических изменений температуры, проверки прочности при транспортировании. Все эти требования формулируются в ГОСТах, ТУ и ЧТУ на РЭА.

3.2. РАЗМЕЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ РЭА

[6, 7, 11, 13]

Общие положения

Стационарная РЭА по ГОСТ 16019—78 разделяется на стационарную, работающую в отапливаемых наземных и подземных сооружениях (1 группа) и стационарную, работающую на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях (2 группа).

При размещении РЭА 2 группы необходимо учитывать деление территории СССР на четыре климатических района: I, II, III и IV (I — сухая и длительная зима, короткий световой год, толщина снежного покрова до 1,2 м, среднесезонные температуры января и июля — -32°C и $+21^{\circ}\text{C}$ (241 К и 294 К), II — умеренная зима, толщина снежного покрова до 1 м, среднесезонные температуры — -14°C и $+21^{\circ}\text{C}$ (259 К и 294 К), III — континентальный климат с холодной зимой и жарким летом, незначительный снежный покров, большая интенсивность солнечной радиации, среднесезонные температуры — -20°C и $+25^{\circ}\text{C}$ (253 К и 298 К), IV — жаркое лето с интенсивной солнечной радиацией, относительно короткий зимний период, среднесезонные температуры — -15°C и $+28^{\circ}\text{C}$ (258 К и 301 К). Кроме четырех климатических районов, различают 16 подрайонов и геофизические показатели (нормативная глубина промерзания грунтов, наличие вечной мерзлоты, карстов, оползней и т. п.), которые определяют как микроклимат в месте расположения РЭА, так и требования к конструкции зданий и отдельных помещений.

Значения дестабилизирующих факторов для РЭА 1 и 2 группы приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы
для стационарной РЭА 1 и 2 групп (ГОСТ 16019—78)

Параметры	1 группа	2 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях:		
ν , Гц	20	20
a , м/с ²	19,6	19,6
$t_{\text{выд}}$, ч	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции:		
$\Delta\nu$, Гц	10...30	10...30
ξ , мм	0,5...0,8	0,5...0,8
$t_{\text{выд}}$, мин	$\geq 0,4$	≥ 4
3. Воздействие повышенной влажности:		
Вл, %	80	93
θ_I (θ_{II}), К	298 (298)	298 (313)
$t_{\text{выд}}$, ч	48	72
4. Воздействие пониженной температуры:		
$\theta_{\text{прд}}^I$ ($\theta_{\text{прд}}^{II}$), К	233 (233)	233 (223)
$\theta_{\text{рб}}^I$ ($\theta_{\text{рб}}^{II}$), К	278 (278)	263 (248)
$t_{\text{выд}}$, ч	2...6	2...6
5. Воздействие инея и росы:		
θ , К	—	263
$t_{\text{выд}}$, ч	—	2...6
6. Воздействие повышенной температуры:		
$\theta_{\text{прд}}$, К	328	333
$\theta_{\text{рб}}$, К	313	323
$t_{\text{выд}}$, ч	2...6	2...6
7. Воздействие пониженного атмосферного давления:		
θ , К	263	263
p , кПа	61	61
$t_{\text{выд}}$, ч	2...6	2...6
8. Прочность при транспортировании:		
$t_{\text{ж}}$, мс	5...10	5...10
ν , мин ⁻¹	40...80	40...80
a_{max} , м/с ²	49...245	49...245
N_{Σ} , ударов	13 000	13 000
9. Воздействие дождя с интенсивностью A :		
A , мм/мин	—	3
$t_{\text{выд}}$, мин	—	≥ 20
10. Воздействие воздушно-пылевого потока:		
ν , м/с	—	≥ 10
$t_{\text{выд}}$, мин	—	≥ 60
11. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсностью (95% капель) A и водностью B :		
θ , К	300	300
A , мкм	1...10	1...10
B , г/м ³	2...3	2...3
$t_{\text{выд}}$, ч	24	48

Примечание. Индексы I и II относятся к первой и второй степеням жесткости эксплуатации.

Требования к помещениям зданий

Помещения для размещения стационарной РЭА являются частью зданий, в которых, в общем случае, могут быть три вида помещений:

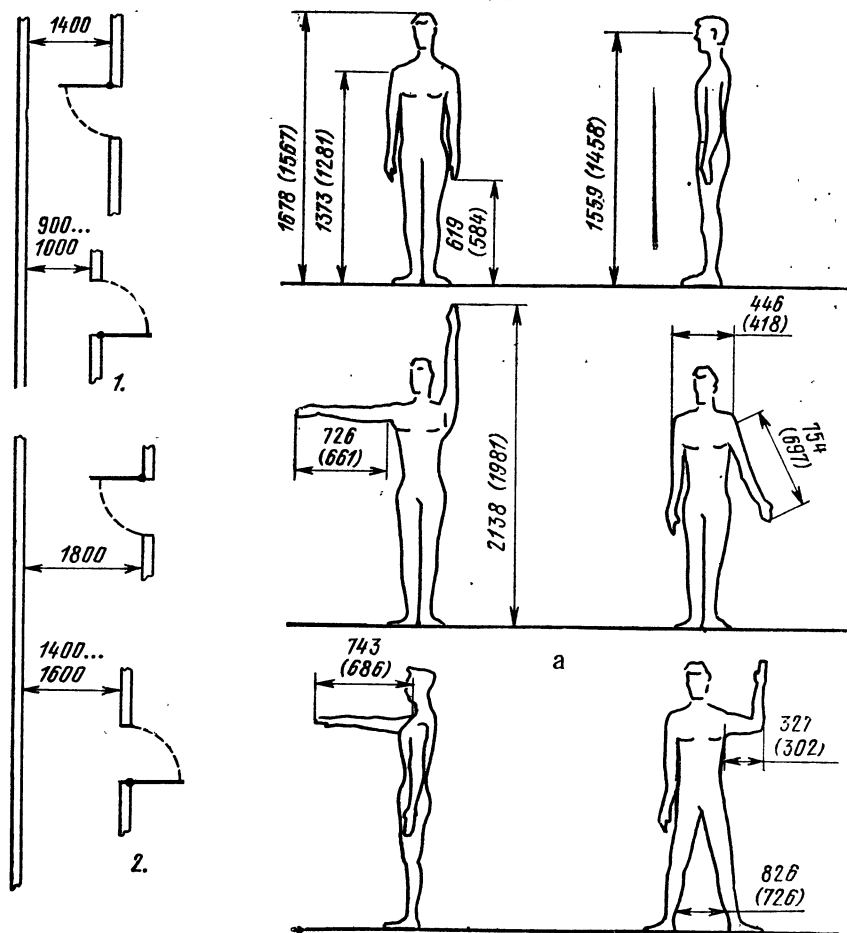
- основные (общие рабочие комнаты, лаборатории, кабинеты),
- вспомогательные (конференц-залы, залы для совещаний, выставоч и демонстраций, помещения для приема, переговоров и ожидания посетителей, для общественных органи-

заций, архивов, проектных кабинетов и технических библиотек, помещений для ЭВМ, копировально-множительных служб, макетных мастерских, бюро пропусков, экспедиций, телекоммуникационной связи),

- обслуживающие (вестибюли, гардеробные, курительные, санузлы, медпункты, столовые и буфеты, кладовые и т. п.).

В зависимости от назначения здания и используемой РЭА соотношение между этими видами помещений

Рис. 3.1. Ширина коридоров (а) при проходе одного (1) или двух (2) человек и открытии дверей внутрь коридора или помещения, средние размеры тела (б) мужчины и женщины (в скобках), определяющие размеры коридоров и проходов в помещениях.



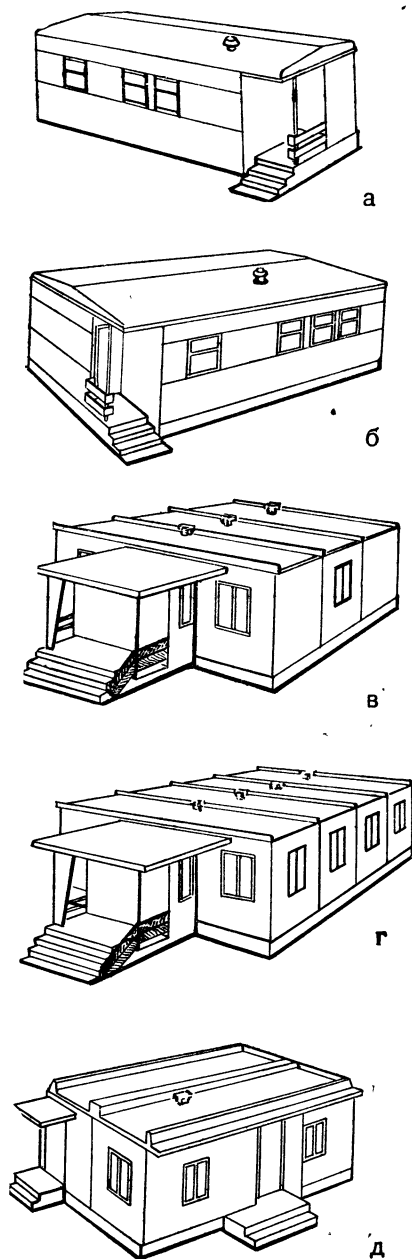


Рис. 3.2. Внешний вид экспериментальных инвентарных зданий:

общежития на трех человек ЭИЗ-1 с $S_{\Sigma} = 24,6 \text{ м}^2$ (а), столовой на 18 посадочных мест ЭИЗ-2 с $S_{\Sigma} = 49,2 \text{ м}^2$ (б) красного уголка на 40 мест ЭИЗ-3 в $S_{\Sigma} = 71,8 \text{ м}^2$ (в), здания конторского типа на 20 рабочих мест ЭИЗ-4 с $S_{\Sigma} = 95,7 \text{ м}^2$ (г) и бытового помещения с душевыми и туалетами на 20 человек ЭИЗ-5 с $S_{\Sigma} = 71,8 \text{ м}^2$ (д)

может изменяться. Для укрупненных оценок по СНиП используют следующие соотношения. Строительный объем на одного сотрудника берется $35 \dots 45 \text{ м}^3$ (им определяется общий объем здания), а площадь помещений основного назначения определяется из расчета $5 \dots 6 \text{ м}^2$ на одно рабочее место (без учета коридоров, лестничных клеток и т. п.). При наличии значительного количества крупных блоков и стоек РЭА (например, типа ЭВМ), внутренних транспортных средств, ЗИП, закрытых зон с ограниченным проходом, бытовых помещений и т. п. в качестве расчетной площади берется значение $15 \dots 20 \text{ м}^2$ на одного человека.

При решении планировочных задач размещения РЭА и обслуживающего персонала необходимо учитывать, что в основе современного строительства лежит единая модульная система (ЕМС) с основанием (модулем) $0,1 \text{ м}$ (М). Для размеров продольных и поперечных опорных несущих конструкций зданий принимают укрупненные модули 60М и 30М , для высоты — 12М , 6М и 3М . Под высотой этажа понимают расстояние между уровнями полов помещений (обычно $3,3 \dots 3,6 \text{ м}$), что дает в чистоте от пола до потолка помещения высоту $3 \dots 3,3 \text{ м}$. Высокая стоимость РЭА — причина использования для нее зданий высших (I или II) классов по долговечности.

При планировке здания необходимо правильно выбирать ширину коридоров (рис. 3.1, а), а при планировке помещений — учитывать габариты человека в разных позах (рис. 3.1, б). При оперативном размещении стационарной РЭА I группы и ее обслуживающего персонала целесообразно использовать экспериментальные инвентарные здания ЭИЗ (рис. 3.2), пригодные для эксплуатации при пониженной температуре

среды — 55°C (218 K) и повышенной $+30^{\circ}\text{C}$ (303 K), снеговой нагрузке до 2000 Н/м^2 и ветровой нагрузке до 550 Н/м^2 . Они рассчитаны на подключение к внешнему водопроводу, канализации, электрическим и водным сетям.

Особенности размещения в помещениях ЭВМ и устройств обработки данных

ЭВМ и устройства обработки данных обычно требуют специальных условий размещения. Стандартными требованиями являются: температура в помещении $19...23^{\circ}\text{C}$ ($292...296\text{ K}$), изменение температуры со скоростью не более 2 K/ч , $\text{Вл} = 60 \pm \pm (2...5)\%$ при малой запыленности с частицами не более $3...5\text{ мкм}$. Обеспечение этих требований возможно только при использовании кондиционеров.

При расчете $\Phi_{\text{ТПС}}$ кондиционера исходят из следующих величин: для оператора $\Phi_{\text{ТП}} = 120\text{ Вт}$, для лампы накаливания $\Phi_{\text{ТП}} = 0,97 P_{\text{пит}}$, для люминесцентной — $\Phi_{\text{ТП}} = 0,8 P_{\text{пит}}$, для большинства блоков ЭВМ и устройств обработки данных $\Phi_{\text{ТП}} = P_{\text{пит}}$. Для ориентировочных расчетов машинных залов ЭВМ можно положить $\Phi_{\text{ТП}} = 600\text{ Вт/м}^2$. Смена воздуха (сквозняки исключены) производится через отверстия в фальшполе и фальшпотолке или специальные решетки (их устанавливают там, где нет движения людей) со скоростью $50...20\text{ м}^3/\text{мин}$. В составе кондиционера должны быть водоиспарительные или пароувлажнительные системы и фильтры для очистки воздуха от пыли.

При требованиях к повышенной надежности работы ЭВМ и устройств обработки данных может потребоваться резервирование как основных, так и вспомогательных устройств. В частности, резервирование системы электропитания требует не только двух самостоятельных вводов от разных линий электропередачи, но и резервной аккумуляторной батареи с преобразователем и резервной дизельной электростанции, что необходимо учитывать при планировке помещений.

Специальными требованиями по размещению ЭВМ и устройств обра-

ботки данных являются: размещение склада с магнитными лентами и дисками вдали от возможных источников электрических помех, использование экранированных помещений или специальных металлических хранилищ с дополнительной противопожарной защитой, отдельное размещение кондиционера и резервных источников электропитания.

Противопожарные требования к помещениям

Как правило, помещения для РЭА группы выполняются с повышенной степенью огнестойкости (I или II), из негоряемых или трудносгораемых материалов с размерами дверей и проемов в чистоте $2 \times 1,2\text{ м}$. Помещения для хранения магнитных лент или дисков должны иметь высшую степень огнестойкости и дополнительные меры защиты. В системе огнетушения в помещениях для ЭВМ и устройств обработки данных используют галоновые газы, которые эффективно нарушают процесс горения и при малых концентрациях не требуют вывода людей из помещения, не влияют на работу РЭА и носители информации в виде перфолент, перфокарт, магнитных лент и дисков. Системы огнетушения требуют специальных помещений, что учитывается при выборе планировочных решений.

3.3. РАЗМЕЩЕНИЕ ВОЗИМОЙ РЭА [6, 7, 8, 10...12, 18]

Общие положения

Возимая РЭА (3 и 5 группы по ГОСТ 16019—78) размещается на объектах-носителях в виде легковых и грузовых автомобилей, автобусов, седельных автомобилей-тягачей с полуприцепами, автомобилей повышенной проходимости, автомобилей-фургонов, тракторов, вездеходов, транспортеров, железнодорожных локомотивов и вагонов. Значения дестабилизирующих факторов для РЭА 3 и 5 групп приведены в табл.3.2. Особенности транспортных средств, влияющие на размещение на них РЭА, даются отдельно для каждой группы.

Таблица 3.2

Продолжение табл. 3.2

Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для возимой РЭА и 3 и 5 групп (ГОСТ 16019—78)

Параметры	3 и 5 группы	Параметры	3 и 5 группы
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: ν , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд. ч}}$	20 19,6 $\geq 0,5$	$\theta_{\text{рб}}$, К $t_{\text{выд. ч}}$	323 2...6
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд. мин}}$	10...30 0,5...0,8 ≥ 4	10. Воздействие пониженного атмосферного давления: θ , К p , кПа $t_{\text{выд. ч}}$	263 61 2...6
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд. мин}}$	10...70 6,8...37 ≥ 12	11. Прочность при транспортировании: $t_{\text{н}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 49...245 ≥ 13000
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{н}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , уд. ов	5...10 40...80 147 ≥ 60	12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: $\Delta\nu$, Гц $t_{\text{выд. ч}}$ a , м/с ²	10...70 1,5...0,75 9,8...39,2
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд. ч}}$	223...333 2...6	13. Прочность при воздействии многократных ударов: $t_{\text{н}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147* ≥ 12000
6. Воздействие повышенной влажности: $Вл$, % $\theta_1(\theta_{II})$, К $t_{\text{выд. ч}}$	93 298(313) 72	14. Воздействие дождя с интенсивностью А: A , мм/мин $t_{\text{выд. мин}}$	3 ≥ 20
7. Воздействие пониженной температуры: θ^I ($\theta_{\text{прд}}^I$), К $\theta_{\text{рб}}^I$ ($\theta_{\text{рб}}^I$), К $t_{\text{выд. ч}}$	233(223) 249(233) 2...6	15. Воздействие воздушно-пылевого потока: ν , м/с $t_{\text{выд. мин}}$	≥ 10 ≥ 60
8. Воздействие инея и росы: θ , К $t_{\text{выд. ч}}$	263 2...6	16. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсностью (95% капель) А и водностью В: θ , К A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд. ч}}$	300 1...10 2...3 ≥ 48
9. Воздействие повышенной температуры: $\theta_{\text{прд}}$, К	333		

Примечания: 1 Индексы I и II относятся к первой и второй степеням жесткости эксплуатации. 2. Прочность при воздействии многократных ударов для РЭА 5 группы $a_{\text{max}}=245$ м/с².*

3.3. Размещение возимой РЭА

Рис. 3.3. Основные размеры автомобилей и кузовов

Автомобили

Для легковых автомобилей и автомобилей повышенной проходимости частота колебаний подвески около 1 Гц при амплитудах до 150 мм.

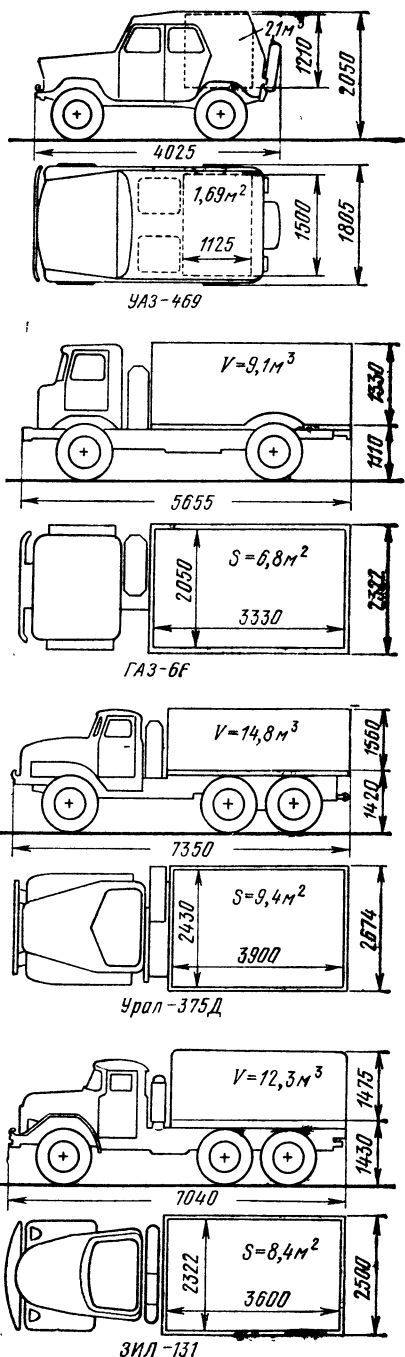
Резонансная частота поддрессирования $\nu_p = 8 \dots 12$ Гц при амплитуде $\xi = 0,5$ мм, а вибрации В и удары У возникают за счет толчков от неровностей дороги (асфальтобетон с неровностями 0,7 ... 1,2 см для дорог I категории и 1,5 ... 1,9 см для II категории). У двигателя В лежат в диапазоне частот 20 Гц и выше при $\xi = 0,05$ мм. Во всех этих случаях перегрузки от линейных ускорений УЛ обычно не более 0,98 ... 3,12 м/с². Поэтому собственные частоты систем амортизации СА берут в районе $\nu_0 = 25$ Гц, что позволяет избежать сложных резонансных явлений с устройствами подвески и поддрессирования.

Для грузовых автомобилей диапазон частот В сдвигается в область более высоких частот (соответствующие значения $\nu = 4, 20, 80$ Гц и выше при $\xi = 120, 0,15, 0,01$ мм) с максимальными перегрузками 1,96 ... 78,5 м/с², что требует выбора ν_0 СА в области выше 20 Гц и вдали от ν_0 элементов конструкции автомобиля.

В зависимости от габаритов РЭА и назначения она может быть расположена на легковом автомобиле (радиовещательный приемник, магнитофон, проигрыватель, телевизор, радиотелефон), автобусе (передвижные усилительные, телевизионные и звукозаписывающие установки), автомобилях и прицепах различного назначения (передвижные лаборатории, радиолокационные станции, связанное оборудование). Площади и объемы кузовов и полуприцепы для размещения возимой РЭА даны на рис. 3.3 и 3.4.

Гусеничный транспорт

Гусеничный движитель характеризуется тем, что в нем используется бесконечная лента (гусеницы)



с шагом звена (длинной трака) 120 ... 240 мм Это позволяет двигаться в условиях бездорожья гусеничным тракторам, вездеходам, бронетранспортерам и т. п.

РЭА 3 группы по ГОСТ 16019—78 располагается снаружи, в неотапливаемых или отапливаемых кабинах (в последних по ГОСТ 14892—69 теплоизоляция кабины должна обеспечивать с системой подогрева температуру не менее 10°C (283 К)). Воздействие В и У характеризуется резонансными и нестационарными явлениями в устройствах подвески ($\nu_{\text{осн}} = 1 \dots 3$ Гц при $\xi \sim 50$ мм) и в конструкции объекта ($\nu_{\text{осн}} \sim 100$ Гц при $\xi \sim 0,025$ мм), спектр которых может простираться до сотен и тысяч герц. Резонансные колебания поддрессирования зависят от скорости движения и шага звена: 0,045; 0,225 и 1,35 Гц при шаге 120 мм и $v = 2,10$ и 60 км/ч; 0,09; 0,45 и 2,7 Гц при шаге 240 мм и $v = 2,10$ и 60 км/ч.

Дополнительно на них будут накладываться вибрации двигателя (3 ... 30 Гц), а также толчки и удары на неровностях дороги. В зависимости от компоновочной схемы кабины или кузова возможно размещение РЭА одной или двух высот на индивидуальных амортизаторах (обычно серии АКСС или рамочных) с дополнительными точками крепления (для ограничения раскачивания) на задней стенке (рис. 3.5)

Наиболее характерные значения перегрузки 1,96 ... 19,6 м/с². Для СА рекомендуется выбирать $\nu_0 > 20$ Гц в нерезонансной области конструкции объекта-носителя.

Железнодорожные локомотивы и вагоны

Железнодорожный транспорт характеризуется наличием специального высококачественного пути с незначительными (по сравнению с автодорогами) уклонами, радиусами поворотов и неровностями.

Верхнее строение пути состоит из рельсов и креплений (в том числе противугонов), рельсовых опор (шпал), щебеночного балласта и песчаной подушки. Различают особо тяжелый путь для интенсивной нагрузки и больших скоростей (140 ...

Рис. 3.4. Основные размеры полуприцепа ОДА3-935 и допустимые нагрузки

Рис. 3.5. Размеры кузовов для шасси на гусеничном ходу. Длина кузовов обычно 3,74 ... 4,67 м

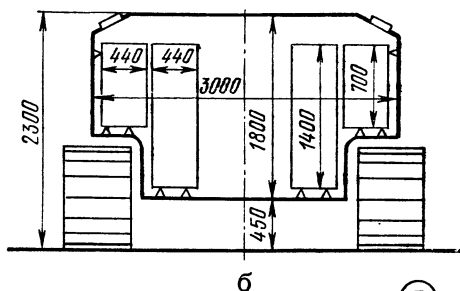
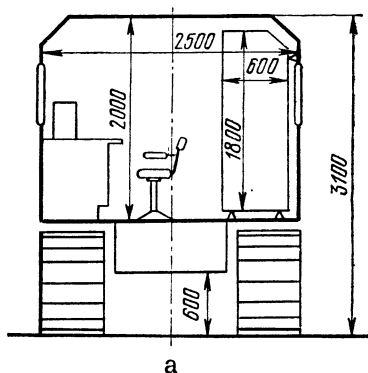
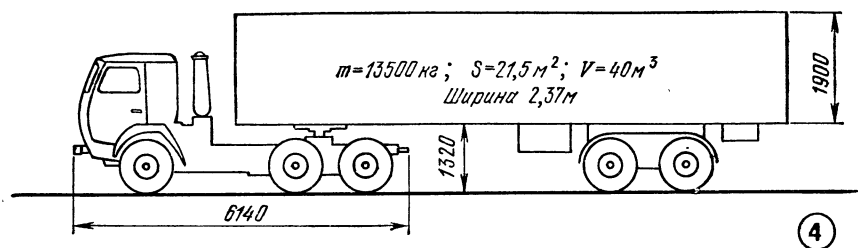
Рис. 3.6. Основные размеры четырехосных железнодорожных платформ, полувагонов, вагонов и дверных проемов в них (а), допустимые габариты подвижного состава железных дорог (б) и габариты приближения строений (в)

... 160 км/ч) и тяжелый для нормальной.

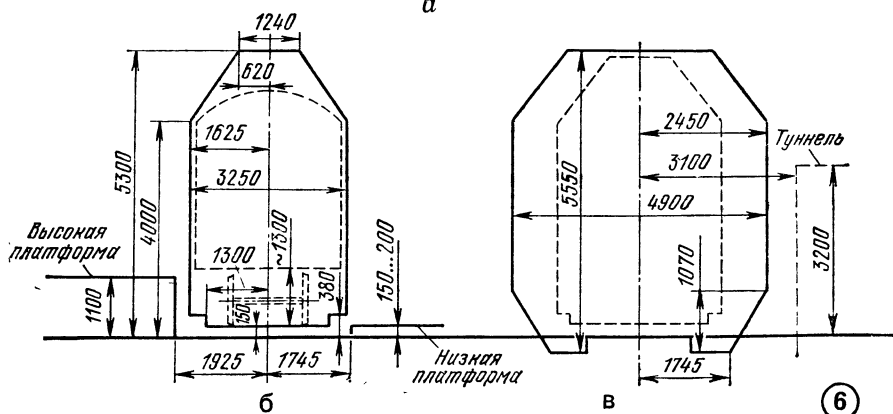
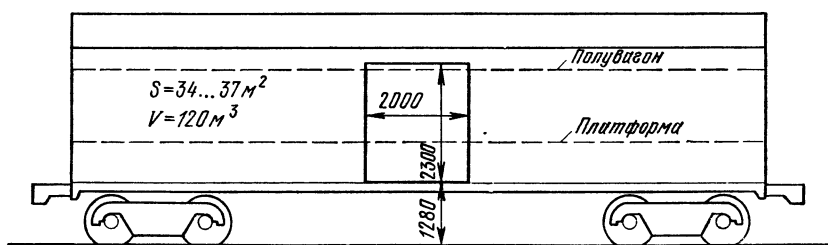
Особо крупные части РЭА в виде крупногабаритных антенн, комплексов РЭА, установленных на наземном транспорте (автомобильный и гусеничный транспорт), при перевозке по железным дорогам должны укладываться в габариты подвижного состава дорог. Предельные очертания погрузки грузов на открытый подвижной состав (при колее 1520 мм и скорости до 160 км/ч) должны соответствовать ГОСТ 9238—73 (рис. 3.6)

Основной расчетной базой при определении габаритов подвижного состава и погрузок груза является уровень головки рельсов, от которого ведутся все построения. Рельсы выпускаются четырех типоразмеров: Р75 (ГОСТ 16210—70: высота рельса от основания подошвы до верха головки 192 мм), Р65 (ГОСТ 8161—56, $h = 180$ мм), Р50 и Р43 (ГОСТ 7173—54, $h = 152, 140$ мм). Рельсы Р75 используются для особо тяжелого, а Р65 — для тяжелого пути. При оценке транспортабельности и удобства погрузочно-разгрузочных работ необходимо учитывать высоту шпал и подушки.

Для перевозки грузов используют, как правило, четырехосные вагоны (закрытые с дверным проемом в свету 2000 × 2300 мм), полувагоны и платформы, основные размеры которых показаны на рис. 3.6, а. Кроме предельных очертаний груза, расположенного на подвижном составе (рис. 3.6, б), для перевозки негабаритных грузов 0, 1, 2, 3 и 4 степеней негабаритности необходимо знать габариты приближения строений (рис. 3.6, в). Погрузка и перевозка негабаритных грузов выполняется только по согласованию с МПС СССР,



5



Перевозка крупногабаритных грузов может выполняться на открытых товарных платформах и полувагонах при воздействии всех метеорологических факторов местности перевозки и с дополнительным ветровым напором с $v = 33$ м/с, в закрытых неотапливаемых вагонах и в пассажирских отопляемых с нормальными для закрытых помещений условиями.

Дополнительными дестабилизирующими воздействиями при перевозке являются — В, У и УЛ. Их спектр широкий и неустойчивый, характеризуется резонансными и переходными явлениями в устройствах подвески и конструкции объекта-носителя за счет ударов на стыках рельс. Старые железнодорожные пути имеют рельсы с длиной плети 12,5 м, а новые — 25, 37,5 и 50 м. В соответствии с этим при различной скорости движения ($v = 4, 20$ и 120 км/ч) частоты вибраций в герцах будут следующие:

для 12,5 м — 0,086; 0,43; 2,6;
для 25 м — 0,043; 0,22; 1,3;
для 27,5 м — 0,029; 0,14; 0,86;
для 50 м — 0,021; 0,11; 0,65.

Дополнительно на них будут накладываться вибрации от стука колесных пар в тележке (база 1850 мм), $v = 0,58; 2,9; 17,5$ Гц и между тележками (база вагона до 10 000 мм), колебания за счет боковых наклонов рельсов колес и неравномерности тяги. Наиболее характерный диапазон частот вибраций $\Delta v = 2 \dots 100$ Гц с максимальной амплитудой $\xi = 40 \dots 2$ мм (перегрузки 1,96 ... 19,6 м/с² и более). Величина УЛ связана с У, возникающими при сцепке, трогании или торможении. Для товарных поездов У могут быть $t_{\text{н}} = 3 \dots 5$ мс и изменением $v = 2 \dots 5$ м/с, что вызывает появление перегрузок (при ускорении или замедлении движения) до 196 ... 392 м/с².

Чаще всего используют (при необходимости) амортизаторы, обеспечивающие $v_0 \sim 20$ Гц.

3.4. РАЗМЕЩЕНИЕ РЭА НА СУДАХ [6, 7, 11, 15, 17]

Общие положения

Все морские самоходные суда (включая суда смешанного плавания «река—море») делят на три группы по

водоизмещению: I — пассажирские и грузовые валовой вместимостью > 1600 рег. т, II — грузовые 1600 ... 300 рег. т, III — грузовые < 300 рег. т. Суда этих групп имеют район плавания от мест убежища на расстоянии > 20 миль (~ 37 км). Суда III группы могут быть с ограниченным районом плавания от мест убежища (< 20 миль). Этими подразделениями определяется состав РЭА, устанавливаемой на суда и общие требования к помещениям для РЭА.

На судах I и II групп для размещения РЭА предусматриваются: радиорубка, агрегатная или аккумуляторная. Площадь радиорубки должна быть не менее, чем в два раза больше площади, устанавливаемой в ней РЭА и оборудования, а $h > 2$ м. Переборки должны быть металлическими или металлизированные и надежно электрически соединенные между собой и корпусом судна с непрерывностью экранировки. Уровень акустических шумов ≤ 65 дБ. Двери радиорубки ($b > 600$ мм) должны обеспечивать выход на открытую палубу кратчайшим путем.

Расположение и крепление РЭА должно обеспечивать легкий и быстрый доступ для обслуживания и ремонта и отсутствие перемещений при крене и дифференте судна, У и В.

Общие требования к РЭА 4 группы по ГОСТ 16019—78 приведены в табл. 3.3. Дополнительные требования к РЭА, устанавливаемой на судах, даны в ГОСТ 17672—72.

По В суда можно разделить на две категории: большие и относительно тихоходные (пассажирские дизельэлектроходы, теплоходы, пароходы, военные крупнотоннажные корабли) и малые с повышенной скоростью (катера, суда на подводных крыльях).

На крупных судах (рис. 3.7, а) вибрации в области I определяются ударами о волны, в области III — В двигателя ($v = 0,5 \dots 25$ Гц с $a \sim 7,8 \dots 58,9$ м/с²) и В винта или другого движителя ($v = 4 \dots 100$ Гц с $a \sim 7,8 \dots 78,5$ м/с²). На малых судах (рис. 3.7, б) имеют место более высокочастотные В ($v = 5 \dots 150$ Гц с $a > 196$ м/с²). Возможны УЛ до 58,9 м/с². СА рассчитывают на $v_0 = 25 \dots 30$ Гц, на которой возможно увеличение амплитуды виб-

Таблица 3.3

Продолжение табл. 3.3

Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для РЭА, возимой во внутренних помещениях речных судов (4 группа по ГОСТ 16019—78)

Параметры	4 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: ν , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд.}}$, ч	20 19,6 $\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд.}}$, мин	10...30 0,5...0,8 ≥ 4
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд.}}$, мин	10...30 0,4...10,7 ≥ 4
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{ш.}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 ≥ 60
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд.}}$, ч	223...333 2...6
6. Воздействие повышенной влажности: $Вл$, % $\theta_I(\theta_{II})$, К $t_{\text{выд.}}$, ч	93 298(313) 72
7. Воздействие пониженной температуры: $\theta_{\text{прд}}^I(\theta_{\text{прд}}^{II})$, К $\theta_{\text{рб}}^I = \theta_{\text{рб}}^{II}$, К $t_{\text{выд.}}$, ч	233(223) 263 2...6
8. Воздействие инея и росы: θ , К $t_{\text{выд.}}$, ч	263 2...6
9. Воздействие повышенной температуры: $\theta_{\text{прд}}$, К $\theta_{\text{рб}}$, К $t_{\text{выд.}}$, ч	333 323 2...6

Параметры	4 группа
10. Воздействие пониженного атмосферного давления: θ , К p , кПа $t_{\text{выд.}}$, ч	263 61 2...6
11. Прочность при транспортировании: $t_{\text{ш.}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 49...245 $\geq 13\,000$
12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: $\Delta\nu$, Гц $t_{\text{выд.}}$, ч a , м/с ²	10...30 2 9,8...39,2
13. Прочность при воздействии многократных ударов: $t_{\text{ш.}}$, мс ν , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 $\geq 12\,000$
14. Воздействие дождя с интенсивностью А: A , мм/мин $t_{\text{выд.}}$, мин	3 ≥ 20
15. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсностью (95% капель) А и водностью В: θ , К A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд.}}$, ч	300 1...10 2...3 ≥ 48

Примечание. Индексы I и II относятся к первой и второй степеням жесткости эксплуатации.

раций при резонансе втрое. Устойчивость к качке определяется в течение $t \geq 5$ мин, периоде качки 7 ... 9 с при предельных углах наклона 45°.

Размещение РЭА и антенн

Конструкция судового РЭА имеет много общего с наземной стационарной РЭА, отличаясь от нее уст-

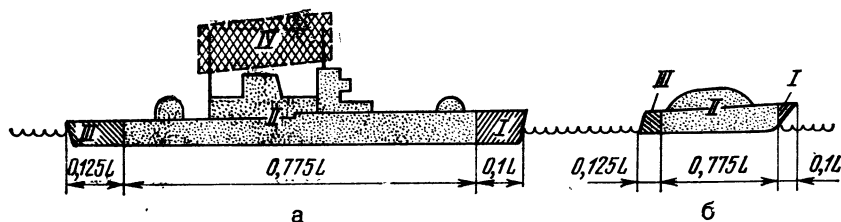


Рис. 3.7. Характерные зоны вибраций на больших (а) и малых (б) морских судах. Расположение РЭА целесообразно в зоне II, а антенн — в зоне IV, нецелесообразно располагать РЭА в зонах I и III, где вибрации значительные

ройствами водо- и брызгозащищенности, высоким уровнем типизации (упрощение ремонта и снабжения ЗИП), блочно-разборными конструкциями РЭА значительных размеров (ограниченность размеров люков и переходов на судне), защищенностью от сильных высокочастотных и низкочастотных (гидроакустические станции) полей, вибростойкостью и ударостойкостью (особенно для воен-

ных кораблей с артиллерийским, торпедным или ракетным вооружением), высокой степенью ремонтнопригодности в условиях эксплуатации, разнообразием конструкций.

Рис. 3.9. Расположение антенн (отмечены звездочкой) на различных судах

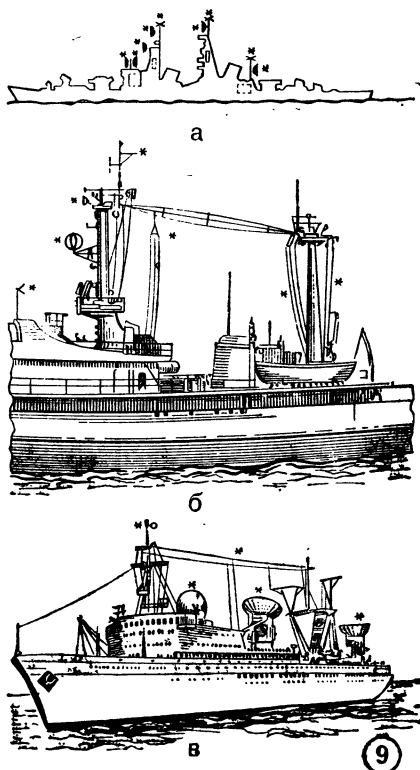
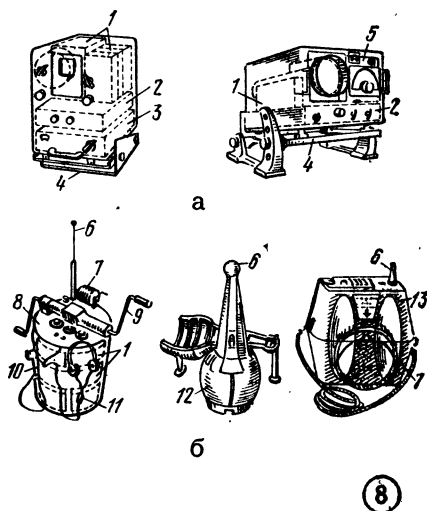


Рис. 3.8. Характерные виды малогабаритной морской РЭА:

1 — функциональные узлы; 2 — шасси; 3 — блоки питания; 4 — рама с амортизаторами; 5 — блок настройки; 6 — антенна; 7 — трос; 8 — пульт управления; 9 — привод ручного генератора питания; 10 — сигнальный фонарь; 11 — микрофонная гарнитура; 12 — аппаратура радиобузы с источниками питания; 13 — гермокорпус



Вся РЭА выполняется, как правило, брызгозащищенной. РЭА, устанавливаемая на открытой палубе — водозащищенная, а аварийная — герметичная. Малогабаритная судовая РЭА несколько напоминает самолетную, но отличается наличием уплотненного кожуха большей прочности (рис. 3.8, а). Различные варианты аварийных судовых радиий характеризуются наличием вспомогательных приспособлений (сигнальный фонарь, трос с лебедкой), положительной плавучестью и герметичностью (рис. 3.8, б).

На каждом судне устанавливается главная антенна, подключаемая с помощью антенного переключателя к любым видам радиоприемных и радиопередающих средств. Кроме этого, устанавливаются дополнительные антенные системы для радиосвязи, навигации, радиолокации и радиовещания. Общее количество антенных систем может доходить до нескольких десятков, что создает значительные трудности при их компоновке. Антенны должны работать при ветровой нагрузке со скоростью потока воздуха до 60 м/с. Возможные места расположения антенн на малом военном фрегате, противопожарном и научно-исследовательском судне показаны на рис. 3.9 а, б, в.

3.5. РАЗМЕЩЕНИЕ НОСИМОЙ И ПОРТАТИВНОЙ РЭА [6, 7, 11, 16]

Общие положения

Человек используется в качестве транспортного средства или объек-

та для установки РЭА в различных случаях: переноска РЭА с места на место в условиях лабораторий и цехов, переноска и работа РЭА на открытом воздухе или во временных сооружениях, использование РЭА, размещенной на человеке для развлечений (переносные радиоприемники, магнитофоны, телевизоры), управления или контроля производственного процесса (диспетчерские устройства), для связи в военных целях. Значения дестабилизирующих факторов для носимой и портативной радиоэлектронной аппаратуры 6 и 7 групп по ГОСТ 16019—78 приведены в табл. 3.4.

Человек как транспортное средство работоспособен в довольно узком диапазоне рабочих температур, рельефа и высоты поверхности данной местности над уровнем моря. Переносимая им РЭА при ходьбе или беге подвергается ударным воздействиям (смягчаемых рукой или мягкими тканями организма) с периодом 0,5 ... 0,8 с при ходьбе и 0,1 ... 0,3 с при беге с шагом 0,03 ... 0,3 м. На его работоспособность влияют режимы физической нагрузки, которая может быть легкой, средней и тяжелой (верхнее ее значение оценивают как очень тяжелую нагрузку). Длительность рабочей смены для легкой и средней нагрузки 8 ч, для тяжелой и очень тяжелой 6 или 4 ч. Сводные данные для мужчин (м) и женщин (ж) по максимальному весу груза G , мощности работы $P_{рб}$, характеру рабочего места, числу наклонов до 30° и энергозатратам за 8-часовую смену следующие.

Работа	G , Н	$P_{рб}$, Вт	Характер рабочего места	Число наклонов	Энергозатраты, 10 ⁶ Дж
Легкая (м)	до 29	6...12	Стационарное	—	1,7...3,6
(ж)	до 16	3,5...6,6		—	1,1...1,9
Средняя (м)	49...147	10...44	То же	50...100	2,9...12,7
(ж)	26...80	5,5...24		—	1,6...6,9
Тяжелая (м)	147...390	22...90	»	100...200	6,3...25,9
(ж)	80...216	12...49		100...300	3,5...14,1

Параметры РЭА и определяющие их дестабилизирующие факторы для носимой и портативной РЭА 6 и 7 групп (ГОСТ 16019—78)

Параметры	6 группа	7 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: ν , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 $\geq 0,5$	20 19,6 $\geq 0,5$
2. Обнаружение резонансов в конструкции: $\Delta\nu$, Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10...30 0,5...0,8 ≥ 4	10...30 0,5...0,8 ≥ 4
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: $\Delta\nu$, Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, мин	10...70 7,8...37 ≥ 12	10...30 2,4...10,7 ≥ 4
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{и}}$, мс ν , мин ⁻¹ $a_{\text{мах}}$, м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 98 ≥ 60	— — — —
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	223...333 2...6	223...333 2...6
6. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\theta_{\text{т}}(\theta_{\text{т}})$, К $t_{\text{выд}}$, ч	93 298 (313) 72	80 298 48
7. Воздействие пониженной температуры: $\theta_{\text{прд}}^{\text{I}}(\theta_{\text{прд}}^{\text{II}})$, К $\theta_{\text{рб}}^{\text{I}}(\theta_{\text{рб}}^{\text{II}})$, К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (223) 263 (248) 2...6	233 (223) 278 (263) 2...6
8. Воздействие инея и росы: θ , К $t_{\text{выд}}$, ч	263 2...6	— —
9. Воздействие повышенной температуры: $\theta_{\text{прд}}$, К $\theta_{\text{рб}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	333 232 2...6	328 313 2...6
10. Воздействие пониженного атмосферного давления: θ , К p , кПа $t_{\text{выд}}$, ч	263 61 2...6	263 61 2...6
11. Прочность при транспортировании: $t_{\text{и}}$, мс ν , мин ⁻¹ $a_{\text{мах}}$, м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 49...245 $\geq 13\ 000$	5...10 40...80 49...245 $\geq 13\ 000$
12. Прочность при воздействии синусоидальных вибраций: $\Delta\nu$, Гц	10...70	10...30

Параметры	6 группа	7 группа
$t_{\text{выд}}, \text{ч}$	1,5...7,5	2
$a, \text{м/с}^2$	9,8...39,2	9,8...39,2
13. Прочность при воздействии многократных ударов:		
$t_{\text{н}}, \text{мс}$	5...10	5...10
$v, \text{мин}^{-1}$	40...80	40...80
$a_{\text{max}}, \text{м/с}^2$	98	98
$N_{\Sigma}, \text{ударов}$	≥ 6000	≥ 6000
14. Прочность при падении с высоты h [мм]:		
$m \leq 5 \text{ кг}$	750	500
$m > 5 \text{ кг}$	500	—
$N_{\Sigma}, \text{ударов}$	11	11
15. Герметичность при погружении в воду на глубину h :		
$h, \text{м}$	$\geq 0,5$	—
$t_{\text{выд}}, \text{мин}$	≥ 60	—
16. Воздействие дождя с интенсивностью A :		
$A, \text{мм/мин}$	3	3
$t_{\text{выд}}, \text{мин}$	≥ 20	≥ 20
17. Воздействие воздушно-пылевого потока:		
$v, \text{м/с}$	≥ 10	—
$t_{\text{выд}}, \text{мин}$	≥ 60	—
18. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсионностью (95% капель) A и водностью B :		
$\theta, \text{К}$	300	300
$A, \text{мкм}$	1...10	1...10
$B, \text{г/м}^3$	2...3	2...3
$t_{\text{выд}}, \text{ч}$	≥ 48	≥ 48

Примечание. Индексы I и II относятся к первой и второй степеням жесткости эксплуатации.

При нестационарном рабочем месте протяженность ходьбы за смену для средней нагрузки 2 ... 4 км, а для тяжелой — 7 км и более. Темп ходьбы с нагрузкой в 156 ... 196 Н (м) и 78 ... 118 Н (ж) по практически ровной поверхности 100 ... 120 шагов в минуту при длине шага 0,6 ... 0,7 м, что соответствует скорости передвижения ~ 4 ... 5 км/ч. При подъеме с уклоном 5° темп падает на 20% (скорость 3 ... 4 км/ч), с уклоном 25 ... 30° — вдвое.

Зоны комфорта для человека в легкой одежде характеризуются θ среды 18 ... 24°C (291 ... 297 К), уровнем шума 70 ... 85 дБ, Вл 90 ... 20% и высотой над уровнем моря

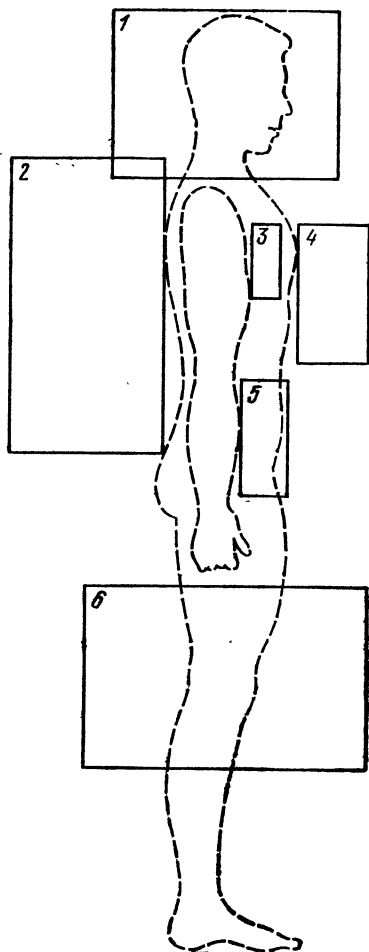
до 3 000 м. Превышение этих значений воспринимается как психологическая граница и существенно влияет на работоспособность человека. Если температура среды меньше или больше — 17°C (256 К) и 43,5°C (316,5 К), уровень шума > 120 дБ, Вл меньше единицы или долей %, а высота над уровнем моря > 6000 м то это воспринимается как физиологическая граница условий жизнедеятельности, в которых возможно существование человека в течение нескольких единиц или десятков минут. Для защиты от нежелательных воздействий человек пользуется различной защитной одеждой, перчатками, обувью, заглушками в ушах,

защитными очками, шлемами, комбинезонами и кислородными приборами, масса которых входит в допустимую для человека нагрузку и является причиной уменьшения допустимой полезной нагрузки на человека

Характерные компоновочные схемы размещения РЭА

Носимая и портативная РЭА может переноситься человеком на разной высоте (рис. 3.10). Для мужчин

Рис. 3.10. Схема расположения носимой и портативной РЭА



ны среднего роста 168 см высота расположения РЭА от уровня поверхности примерно следующая: на плече 1 (основание) — 140 см, на спине 2 — 97 см (низ) и 155 см (верх, чтобы не загораживать обзор), в кармане или на груди 3 (для малогабаритной РЭА) — 96 ... 135 см, на груди с шейным ремнем 4 (верх) — 126 см, на поясе 5 (верх) — 97 см, в вытянутой руке вниз 6 (верх) 68 см и не менее 20 см (низ). Для женщины ростом 157 см соответствующие размеры равны: 1 — 132 см, 2 — 88 см и 137 см, 3 — 88 см и 108 см, 5 — 98 см, 6 — 64 см и не менее 20 см

Высота переноски РЭА зависит от ее массы, которой определяются и принятые компоновочные схемы (рис. 3.11). Измерительные приборы 1 и 2 (допустимая масса $m \leq 15 \dots 20$ кг) переносятся одной рукой. Работа на ходу невозможна. Пеленгаторная станция 3 в упаковке (ящик-подставка) может иметь массу до 50. 60 кг и переносится двумя человеками. Переносная рация 4 ($m \leq 15 \dots 20$ кг) переносится на спине и при наличии второго человека-оператора допускает работу на ходу. Переносный измерительный прибор 5 носится на плечевом ремне на правом боку или животе человека, что позволяет работу этим прибором на ходу.

Переносная телекамера с передатчиком 6 выполнена из трех упаковок. Основной блок ($m \leq 15 \dots 20$ кг) носится на спине, собственно камера с видеоконсом и трубкой-монитором — в руках ($m \leq 3 \dots 5$ кг), выносной пульт управления ($m = 0,4 \dots 0,6$ кг) — на поясе. При общей массе телекамеры с передатчиком 5. 8 кг возможно выполнение ее в одной упаковке на плече на специальном упоре.

Переносная рация 7 массой до 3 ... 5 кг носится на шейном ремне и позволяет работать на ходу. Портативныерации 8 и 9 выполнены на ИС, имеют массу 0,3... 0,6 кг и могут носиться либо на частях одежды, либо в специальных карманах и обеспечивают работу на ходу.

Более мощная УКВ рация 10 массой до 10 ... 12 кг может работать на ходу (в одной руке собственно рация, в другой — микрофон-громко-

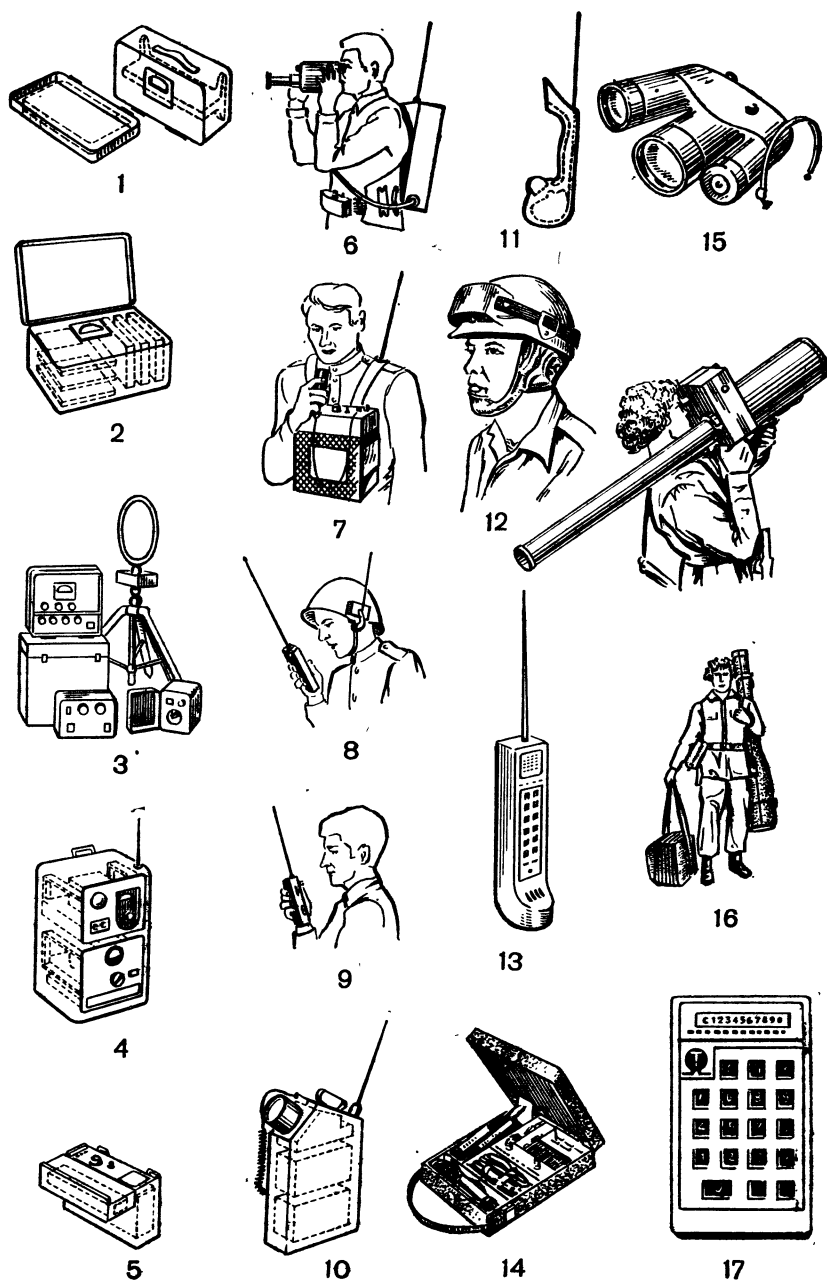


Рис. 3.11. Характерные компоновочные схемы носимой и портативной РЭА

говоритель с выключателем и переключателем рода работы). Компоновочная схема портативной радиации 11 в виде микротелефонной трубки ($m \sim 1$ кг) обеспечивает удобную работу, но требует специального кармана или упаковки для переноски.

Использование дифференциального микрофона и ИС дает возможность выполнить портативную радиацию 12 массой 0,2 ... 0,4 кг в виде упаковки на шлеме и освободить руки. Радиация 13 выполнена с кнопочным набором и имеет вид стилизованной микротелефонной трубки массой 0,6 ... 0,8 кг. Комплект измерительных приборов 14 с вспомогательным оборудованием выполнен в виде небольшого чемоданчика общей массой 1 ... 2 кг.

Лазерный приемопередатчик 15 ($m \sim 1$ кг) позволяет через монокулярный объектив наблюдать за абонентом, с которым ведется дуплексная связь. Две упаковки зенитного управляемого снаряда «Блаупайп» 16 имеют общую массу ~ 25 кг и переносятся одним человеком. Портативная ЭКВМ 17 умещается в кармане и имеет массу 0,2 ... 0,4 кг.

3.6. РАЗМЕЩЕНИЕ РЭА НА САМОЛЕТАХ, ВЕРТОЛЕТАХ, РАКЕТАХ И КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЯХ [2...7, 9, 11]

Общие положения

К воздушному и ракетно-космическому транспорту относятся воздушные шары, дирижабли, вертолеты, звуковые и сверхзвуковые самолеты, различные ракеты и космические объекты в виде ИСЗ, космических кораблей (КК) и космических лабораторий. Малые скорости передвижения воздушных шаров и дирижаблей позволяют рассматривать воздействие на их РЭА, в основном, только метеорологических факторов. Для всех остальных носителей влияние дестабилизирующих факторов объекта и окружающей его среды является определяющим.

Разнообразие условий и параметров носителей — причина того, что проведение испытаний РЭА для них

ведется, как правило, по частным ТУ, что затрудняет обобщение соответствующих значений. В табл. 3.5 приведены обобщенные данные по дестабилизирующим факторам для штатной и аварийной РЭА самолетов и вертолетов, РЭА для ракет и космических объектов.

Для авиационного, ракетного и космического оборудования определяющим параметром является относительная масса оборудования (примерно 50 ... 70% — это масса РЭА), которая лежит в пределах от 0,14 до 0,08 у пассажирских самолетов, истребителей и истребителей-бомбардировщиков с турбореактивными двигателями и падает до 0,02 ... 0,001 для космических ракет. Это определяет жесткие весовые требования к подобной РЭА.

В процессе эксплуатации бортовая штатная и аварийная РЭА подвергаются воздействию вибраций, ударов, линейных ускорений пониженного давления и разгерметизации, воздействию тепла и холода, влаги, морского (соляного) тумана, росы и обледенения, песка и пыли, солнечной радиации и плесневых грибов. Характер этих воздействий определяется зонами расположения РЭА.

Для самолетной РЭА различают центральную зону Цн (область, удаленная от двигателей и винтов А, вблизи двигателей или винтов В, амортизированная РЭА В), концевую Кн (хвостовое опорение Г, концы крыльев, подвесные контейнеры и выносные штанги Д) и двигательную Дв (установка РЭА непосредственно на двигателе Е либо в зоне установок двигателя Ж). При этом за направление полета принимается координата х. В соответствии с этими зонами на рис. 3.12 показаны значения перегрузок на различных частотах и для различных типов самолетов.

РЭА, расположенная в гермоконтейнерах или кабинах, работает при $p \approx 79,8$ кПа на высоте полета 10 ... 12 тыс. м. При расположении антенн и блоков РЭА на обшивке следует учитывать аэродинамический нагрев до 423 ... 573 К (в зависимости от скорости). Полет выше облаков — причина значительной солнечной радиации с интегральной ин-

Параметры РЭА и определяющие их факторы для воздушной и ракетно-космической РЭА [2...6, 9]

Параметры	Штатная для самолетов и вертолетов	Аварийная	Ракетная	Космическая
1. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	См. рис. 3.12	10...70 19,6...34,3 1	0...500 до 196,2 —	1,5...2500 4,9...58,9 0,5
2. Устойчивость к механическим ударам: t_n , м/с a , м/с ² N_{Σ} , ударов	15 58,8...117,7 18	— 736 500	10...12 490...981 —	— — —
3. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta\theta$, К	—	223...333	—	—
4. Воздействие повышенной влажности: Вл, % θ , К $t_{\text{выд}}$, сут	93...100 321...330 4...7	98 313 —	100 — —	— — —
5. Воздействие термоударов: θ_v , К/мин $\Delta\theta_{\text{прд}}$, К	2...10 213...588	— 221...325	— 208...437	— —
6. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па	$(2...101) \cdot 10^3$	$(2...101) \cdot 10^3$	$(0,13...101) \times 10^3$	$(0...101) \cdot 10^3$
7. Воздействие тумана с дисперсионностью A и водностью B : θ , К A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд}}$, сут	306±5 <20 2...3 —	— — — до 5	— — — —	— — — —
8. Прочность при падении с высоты h : h , мм N_{Σ} , ударов	— —	— —	750 10	— —

Примечания: 1. Воздействие повышенной влажности (п. 4) на ракетную РЭА проверяется при конденсации водяных паров в процессе эксплуатации и в заданном по ТУ диапазоне температур. 2. Прочерки в таблице ставились, когда в [2...6 и 9] имеются противоречивые данные либо когда данные определяются частными ТУ.

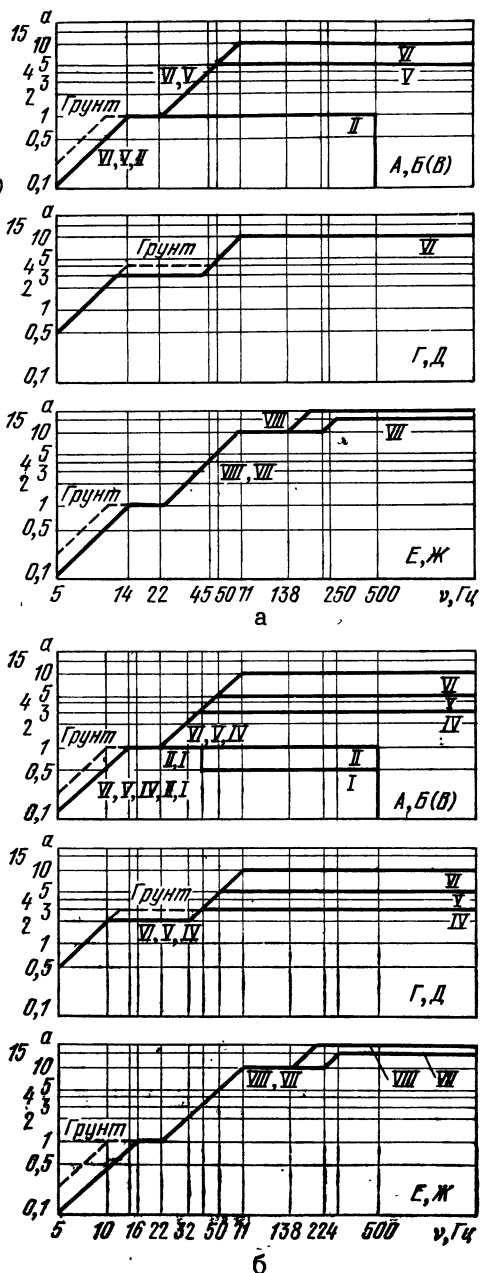
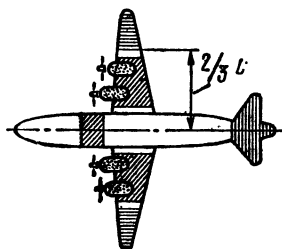
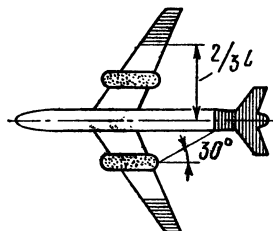
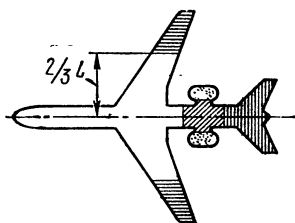
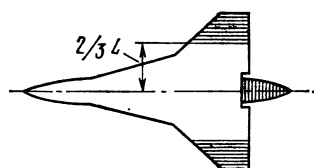


Рис. 3.12. Значения перегрузок a ($0,1g \dots 20g - 0,98 \dots 196 \text{ м/с}^2$) в диапазоне частот $\Delta\nu = 5 \dots 2000 \text{ Гц}$ для сверхзвуковых (а) и дозвуковых (б) гражданских самолетов I...VIII степени жесткости эксплуатации

тенсивностью 1125 Вт/м^2 при плотности ультрафиолетовой части спектра 42 Вт/м^2 ($\lambda = 0,28 \dots 0,4 \text{ мкм}$).

Компоновочные схемы самолетной РЭА

Возможные компоновочные схемы штатной РЭА для самолетов показаны на рис. 3.13. Они могут быть выполнены по централизованной или частично централизованной (чаще всего) и децентрализованной схеме. Основные компоненты: 1 — пульт управления, 2 — радиоотсек с основными блоками РЭА, 3 — хвостовой радиоотсек, 4 — РЛС и ее основные блоки, 5 — крупногабаритная РЛС, 6 — антенна в обтекателе, 7 — рабочий отсек для операторов, 8 — навигационно-пилотажное оборудование, 9 — устройство отображения, 10 — блоки РЛС, 11 — антенна РЛС за носовым обтекателем, 12 — диэлектрический кок, 13 — амортизационная рама с блоками, 14 — люк в радиоотсек, 15 — радиокompас, 16 — блоки РЭА, 17 — антенна дального номера.

Типовая конструкция амортизационной рамы и схема установки блоков самолетной РЭА (ГОСТ 17045—71 и 17413—72) показаны на рис. 3.14. Для увеличения полезного объема блока к корпусу добавляют пространство над внешними разъемами сзади, часть компонентов выносят на переднюю панель под крышку. Блоки быстросъемные, с врубными переходными разъемами, со стороны передней панели крепятся накладными болтами. Амортизационная рама укрепляется на амортизаторах. Обозначение типоразмеров блоков, их номинальные объемы и размеры сторон показаны на рис. 3.15.

Особенности компоновки антенн

Большое количество навигационной, связной и контрольной РЭА на самолетах и вертолетах, их высокие скорости и особенности эксплуатации предъявляют жесткие требования к конструкции и компоновке антенн, общее число которых доходит до двух-трех десятков (рис. 3.16, а): две для радиомаяков 1, две для станции дальней связи 2,

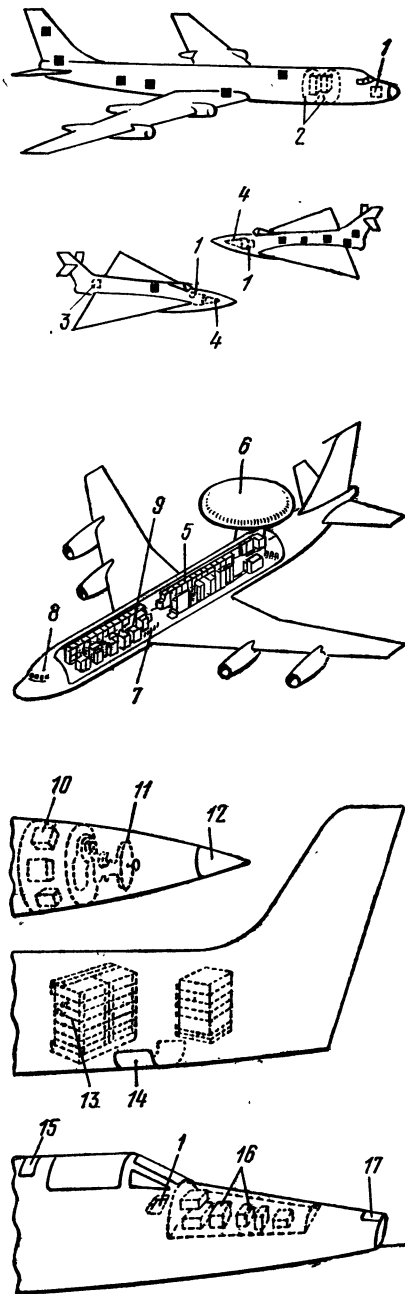


Рис. 3.13. Некоторые компоновочные схемы самолетной РЭА

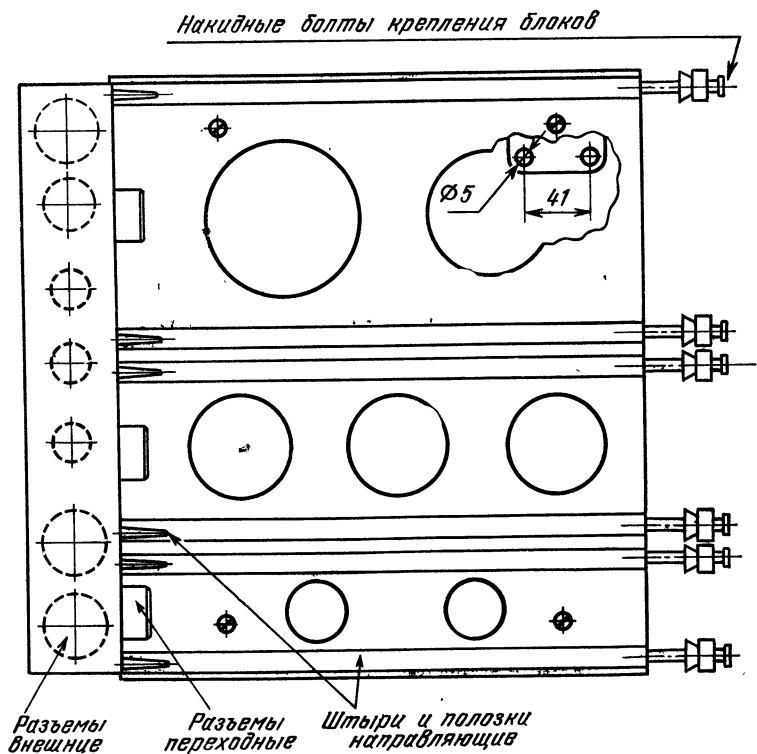
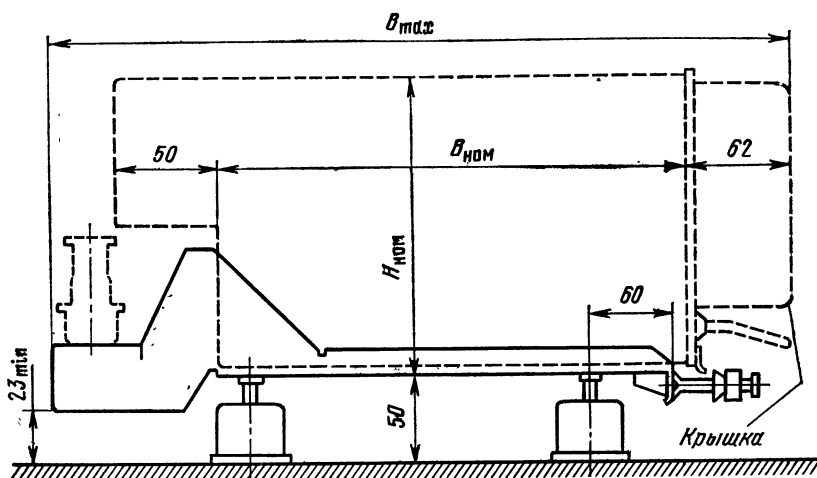


Рис. 3.14. Типовая амортизационная рама для блоков самолетной РЭА

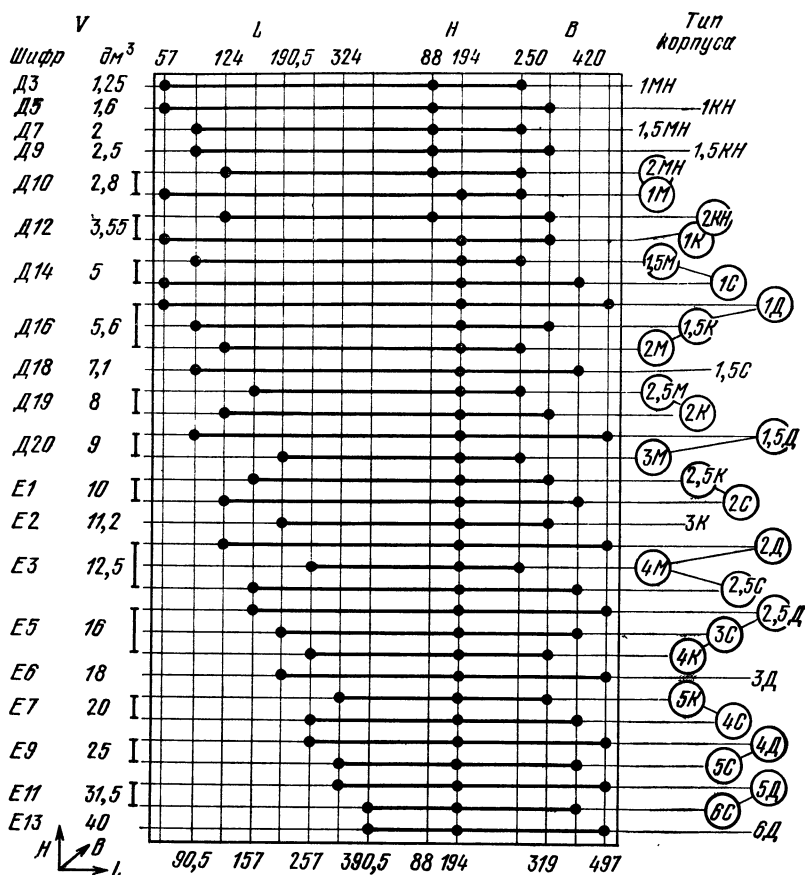


Рис. 3.15. Типоразмеры блоков самолетной РЭА по ГОСТ 17045—71 с округленными значениями объемов в $дм^3$ и их шифрами для номографической компоновки. Рекомендуемые типоразмеры даны в кружках (L , H и B в мм)

три для станции командной связи 3, две для связи с ИСЗ 4, одна основной станции УКВ 5, метеолокатора 6, две курсового маяка 7, две глоссадного 8, две ответчика 9, две дальномера 10, две высотомера 11, две радиокомпас 12, системы опознавания 13, аварийной УКВ станции 14, ответчика заданной высоты 15.

Антенны командной связи иногда выполняют в виде медной сетки, наклеенной на диэлектрическую вставку, форма которой зависит от скорости, измеряемой в числах M ($M = 1200$ км/ч) (рис. 3.16, б). Скорость полета влияет на форму вы-

реза в носовой части, форму обтекателя носовой РЛС и на углы прохождения сигнала через обтекатель при горизонтальном и вертикальном положениях антенны (рис. 3.16, в). При этом важно найти (обычно графически) оптимальные соотношения между размерами вырезов в самолете и обтекателе (рис. 3.16, г), чтобы обеспечить зоны прохода лучей во всех положениях (крайних) антенны (1 — верхнее, 2 — нижнее, 3 — при развороте к правому, а 4 — к левому борту, 5 — дополнительные углы в $2 \dots 3^\circ$ при косекансной форме диаграммы направленности).

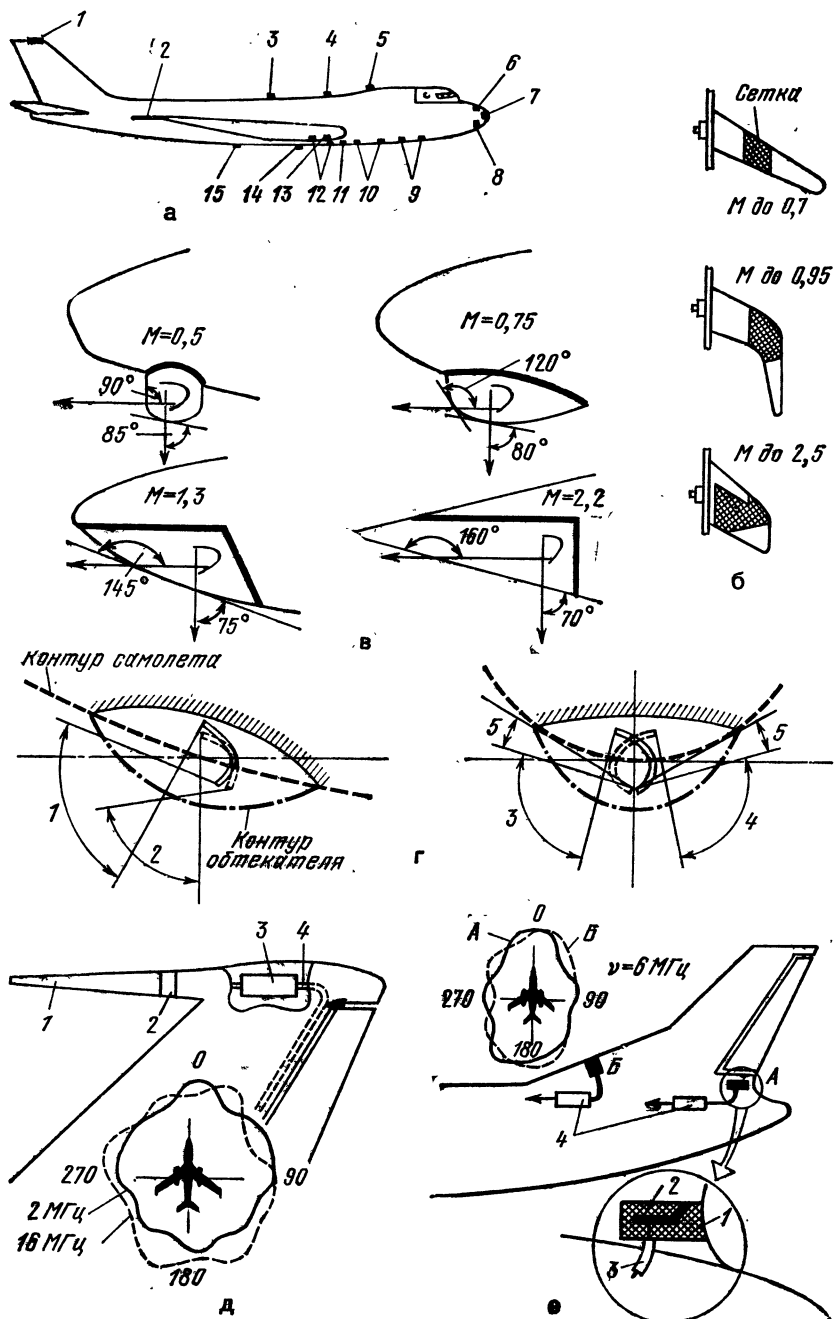
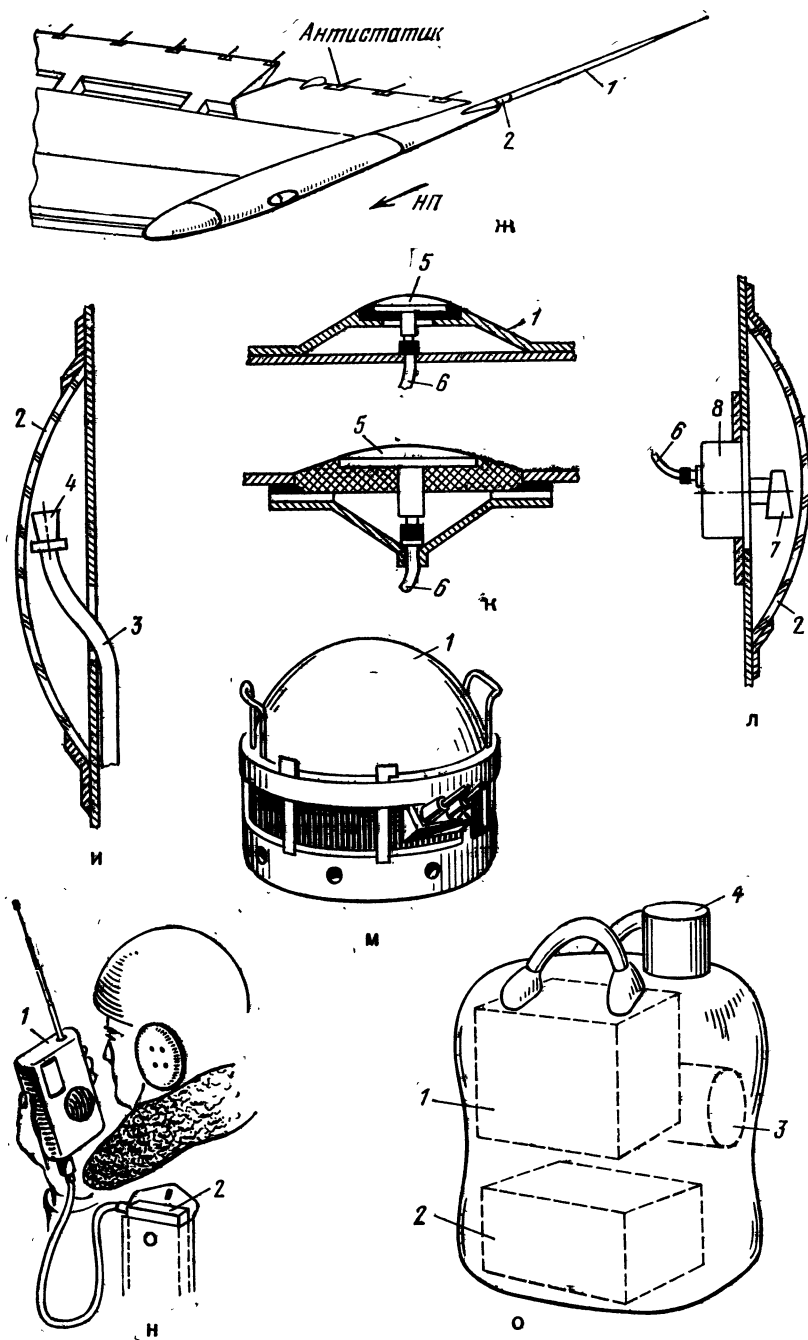


Рис. 3.16. Компонентные схемы антенн и аварийной самолетной РДА.

Места расположения комплекса антенн на пассажирском самолете (а), антенны командной связи (б), компоновка антенн РЛС при $M=0,5 \dots 2,2$ (в); схема определения размеров выреза в самолете и обтекателя (г), УКВ (д), наземная дифракционная (е) и шты-



ревая (ж) антенны, волноводная (и), дисковые (к) и рупорная с приводом (л) антенны, 12-канальный аварийный самописец (м), индивидуальная аварийная рация (н), аварийная рация АВРА в упаковке (о)

Штыревые УКВ антенны верхнего питания на киле (рис. 3.16, *д*) состоят из конусного металлического штыря 1, изолятора из стекловолокна на эпоксидной основе 2, согласующего устройства 3, фидера и трубы наддува и обдува согласующего устройства 4. При этом удается получить близкие по форме к окружности диаграммы направленности.

Пазовые дифракционные антенны станций дальней связи (рис. 3.16, *е*) располагают в вырезе 1 самого киля или в форкиле. Они имеют вид металлической пластины-возбудителя 2, соединенной коаксиальным кабелем 3 с согласующим устройством 4. Их диаграммы направленности по форме приближаются к эллипсу.

Штыревые «копьевидные» антенны устанавливают на консолях крыльев (рис. 3.16, *ж*). Они состоят из металлического штыря переменного сечения 1 и изолятора 2.

Волноводные (рис. 3.16, *и*), дисковые (рис. 3.16, *к*) и рупорные (рис. 3.16, *л*) антенны для улучшения их работы (на их работу влияет металлическая оболочка фюзеляжа) выносят за обводы фюзеляжа в поток на специальном пьедестале 1 или закрывают радиопрозрачным обтекателем 2. Их основные элементы: волновод 3, рупор 4, дисковая антенна 5, коаксиальный кабель 6, рупорная вращающаяся антенна 7 с приводом 8.

Аварийная авиационная РЭА

К аварийной авиационной РЭА относятся: аппаратура записи переговоров экипажа и аварийно-спасательные радиостанции метрового ($\nu_{\text{раб}} = 212,5$ и 253 МГц) и коротковолнового ($\nu_{\text{раб}} = 2182, 4364$ и 8364 кГц) диапазонов.

Аппаратура записи переговоров членов экипажа в защитном контейнере должна сохранять речевую информацию по четырем каналам в течение 30 ... 40 мин при воздействии в течение 15 мин тепловых ударов при $\nu \leq 1273$ К на 50% поверхности контейнера и статических нагрузках до 10000 Н в направлении всех трех осей с последующим воздействием всех дестабилизирующих

факторов самолета соответствующего типа в течение 60 сут и при одиночных ударах с $t_{\text{и}} = 10$ мс и $a \leq 1962$ м/с². Механизм аварийного самописца рис. 3.16, *м* (без блоков преобразования сигналов от датчиков) помещается в ударостойкий сферический корпус 1.

Аварийные радиостанции могут быть индивидуальные (рис. 3.16, *н*) мало-мощные и более мощные (рис. 3.16, *о*), в состав которых входят: портативный приемопередатчик с телескопической антенной и микрофоном 1 и блоком питания 2, лебедка с антенной 3 и воздушный змей 4.

Особенности компоновки ракетно-космической РЭА 4

К космической и ракетной РЭА предъявляется ряд особых требований, связанных с высокой безотказностью их работы, высокой ремонтопригодностью в предстартовый период, большими ударными нагрузками и совместным воздействием В и УЛ при старте. Это также работа в условиях термоударов на поверхности обшивки, длительная сохранность при многолетнем хранении и особая ограниченность объема и массы из-за минимизации стартового веса носителя.

В ряде случаев для повышения надежности работы РЭА и ракеты в целом используют термостатирование, хранение в специальных контейнерах с нейтральным газом, ответственные блоки хранят в специальных укупорках и т. д. Кроме параметров, приведенных в табл. 3.5, необходимо учитывать перегрузку, температуру и вибрации, возникающие в полете, постоянный (36 м/с) и порывистый (50 м/с) ветер, воздействие дождя с каплями $d = 2,5$ мм, снега со снежинками хлопьями $d = 1 \dots 3$ мм, града и крупной пыли ($d = 0,2 \dots 0,3$ мкм при ветре до $v = 18$ м/с и $\nu = 40^\circ\text{C}$ (313 К)) и другие параметры, оговариваемые в частных ТУ на изделие.

РЭА ИСЗ и КК чаще всего является необслуживаемой с длительным сроком автономной работы в условиях невесомости (без механических нагрузок), в среде азота с малой примесью гелия, фреона или аргона при $p = 53,2 \dots 159,6$ кПа и

Рис. 3.17. Компоновочные схемы космической РЭА:

для ИСЗ «Молния-1» (а), станции «Венера-4» (б) и ее спускаемого аппарата (в), ИСЗ «Интелсат» (г)

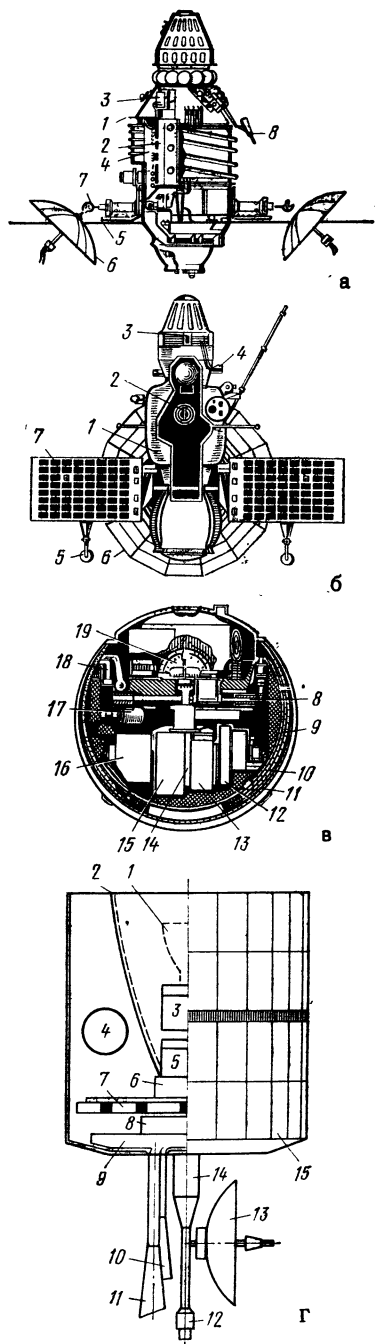
температуре 273 ... 313 К или в вакууме и при сильном воздействии солнечной радиации.

Кроме невесомости специфическим воздействием на космическую РЭА является воздействие естественного космического излучения потоков электронов и протонов с энергией > 1 МэВ до $3 \cdot 10^{13}$ электр./см² и до $2 \cdot 10^{10}$ протон/см² за год. При этом РЭА в гермоконтейнере должна выдерживать дозу радиации $\sim 10^4$ рад/г.

При выборе систем защиты от В следует учитывать v_0 характерных элементов: конструкция корпуса — 1 ... 150 Гц, миниатюрные лампы — 175 ... 500 Гц, резисторы и конденсаторы с проволочными выводами — 1000 ... 2500 Гц, шасси — 30 ... 200 Гц, гироскопы — 30 ... 50 Гц, сервомеханизмы органов управления — 10 ... 50 Гц. Обычно значение v_0 бортовой РЭА выбирают из условия $25 < v_0 < 100$ Гц.

Характерные компоновочные схемы РЭА для КК показаны на рис. 3.17. ИСЗ «Молния-1» (рис. 3.17, а) имеет двойное резервирование РЭА и антенн. Внутри корпуса 1 на специальной раме установлена РЭА 2, система терморегулирования 3, радиаторы 4. Солнечные батареи 5 располагаются на специальных «крыльях». Антенна ретранслятора 6 управляется приводом 7. Телекамеры имеют автономную систему наведения 8.

Станция «Венера-4» (рис. 3.17, б) состоит из двух частей: собственно станции и спускаемого аппарата. Основная РЭА располагается в орбитальном отсеке 1. Для ориентации используют датчик 2, двигатель 3 и микродвигатели 4. Для связи используются слабонаправленные 5 и остронаправленная параболическая антенна 6, для подзарядки аккумуляторов — солнечные батареи 7. У спускаемого аппарата (рис. 3.17, в) имеется специальная система терморегулирования 8 ... 11, программно-временное устройство 12, бор-



товой передатчик 13, блок питания 14, второй передатчик 15, блок коммутации 16, вентилятор 17 и две антенны 18 и 19.

В спутнике связи «Интелсат» (рис. 3.17, з) двигатель 1 закрыт тепловым экраном 2, на котором установлены топливные баки 4, аккумуляторы 3, блок управления антенной платформой 5, узел вращения антенной платформы 6, сама платформа с ЛБВ и их блоками питания 7, телеметрическое и командное оборудование 8, мультиплексоры 9, антенны 10, 13, укрепленные на антенной мачте 14, и солнечные батареи 15.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автомобилестроение:** Автомобили, прицепы и полуприцепы. — Сб. ГОСТов, отраслевых стандартов и отраслевых норм. — М.: Стандарты, 1974.
2. **Александров В. Г.** Справочник авиационного инженера. — М.: Транспорт, 1973.
3. **Братухин И. П.** Проектирование и конструирование вертолетов. — М.: Машиностроение, 1973.
4. **Белов Г. В., Зонштайн С. И., Осерко А. П.** Основы проектирования ракет. — М.: Машиностроение, 1974.
5. **Бессерер К. Ч.** Справочник по управляемым снарядам: Пер. с англ./Под ред. Д. М. Комарова, Х. Л. Мучника. — М.: Воениздат, 1972.
6. **Варламов Р. Г.** Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Сов. радио, 1975.
7. **Вудсон У., Коновер Д.** Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов: Пер. с англ.

Под ред. В. Ф. Венда. — М.: Мир, 1968.

8. **Забавников Н. А.** Основы теории транспортных гусеничных машин. — М.: Машиностроение, 1968.
9. **Кербер Л. Л.** Компоновка оборудования на самолетах. — М.: Машиностроение, 1972.
10. **Краткий автомобильный справочник/НИИАТ.** — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1975.
11. **Краткий справочник конструктора РЭА/Под ред. Р. Г. Варламова.** — М.: Сов. радио, 1972.
12. **Краткие технические характеристики советских тракторов.** — Научный авто-тракторный ин-т, 1970.
13. **Краткий справочник архитектора: Гражданские здания и сооружения /Ю. Н. Коваленко, В. Н. Шевченко, И. Д. Михайленко.** — Киев: Будівельник, 1975.
14. **Межотраслевые нормативные материалы НОТ, обязательные для применения при проектировании предприятий, технологических процессов и оборудования.** — НИИ труда ГК СМ СССР по вопросам труда и заработной платы и ВНИИТЭ ГК СССР, 1975.
15. **Правила по конвекционному оборудованию морских судов.** — Л.: Транспорт, 1975.
16. **Синельников Р. Д.** Атлас анатомии человека в 3-х т. — 4-е изд. — М.: Медицина, 1974. — Т.3.
17. **Справочник по серийным транспортным судам.** — М.: Транспорт, 1974.
18. **Чернышев М. А.** Железнодорожный путь. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1974.

4. ЧЕЛОВЕК-ОПЕРАТОР *

4.1. ЧЕЛОВЕК — ИНТЕГРАЛЬНОЕ ЗВЕНО УПРАВЛЕНИЯ

[1, 2, 4, 5]

Человек-оператор (Ч-О) является интегральным и определяющим звеном любой системы управления, независимо от степени автоматизации ее работы, им принимаются принципиальные решения, он является юридическим лицом. Все это заставляет внимательно подходить к вопросам работы Ч-О с РЭА, изучать и рационально использовать его навыки и способности, создавать для Ч-О комфортные условия работы.

В соответствии с ГОСТ 21033—75 Ч-О рассматривают как человека, осуществляющего трудовую деятельность посредством взаимодействия с машиной (РЭА) и окружающей средой. Система из Ч-О и РЭА, посредством которой человек осуществляет трудовую деятельность, называется системой человек—машина. В этой системе Ч-О может выступать в различных ролях.

Ч-О может выступать в роли «применика» осведомительной информации от РЭА, «ретранслятора» информации от одного ее звена к другому, «анализатора» информации и исполнителя принятого решения, выполнять программирование работы РЭА или просто исполнять получаемые с помощью РЭА команды. Все эти функции Ч-О выполняет с помощью различных технических устройств в виде индикаторов (представляющих необходимую Ч-О информацию) и регуляторов (с помощью которых Ч-О вводит в РЭА сигналы управления).

Для оптимизации связи в системе человек — РЭА необходимо раскодировать или закодировать информацию наиболее выгодным образом, выполнять «подгонку» РЭА под способности и возможности Ч-О, а не наоборот, ибо возможности ускорения познавательных процессов (ощущение, восприятие, представление и мышление) весьма незначительны, а перегрузка Ч-О может нарушить нор-

мальную работу сложных и ответственных комплексов.

Основными стадиями процесса работы системы человек—РЭА являются: восприятие показаний индикаторов, сравнение этих показаний с программой работы РЭА, принятие решения об изменении режима работы РЭА, воздействие на органы управления, реакция РЭА на сигналы управления, работа по новой программе, отражение этого режима на индикаторах и т. п. Определяющими параметрами этого процесса являются: скорость обращения сигнала по контуру, погрешности и надежность работы звеньев системы и скорость обработки информации.

Скорость обращения сигналов по контуру зависит от длительности латентного периода соответствующего анализатора $t_{\text{лп}}$ (время от момента появления сигнала средней интенсивности до момента ответа Ч-О на него действием), количества приборов, стрелок и знаков на индикаторных устройствах и их сложности, количества регуляторов и их сложности и длительности самопроизвольного отвлечения Ч-О от процесса управления РЭА. Длительность на один сигнал у основных анализаторов $t_{\text{лп}} = 0,09 \dots 0,22$ с. Сложная по управлению РЭА может потребовать на один цикл управления десятки и сотни секунд от самого квалифицированного оператора. Для повышения скорости обращения сигналов по контуру и приближения его к сумме элементарных $t_{\text{лп}}$ требуется специальная тренировка Ч-О, создание для него комфортных условий работы и (самое эффективное) сокращение числа регуляторов и индикаторов до обоснованного минимума.

Для уменьшения погрешностей в работе Ч-О и повышения его надежности используют следующие меры: оптимизируют темп приема X и выработки Y сигналов ($0,5 \dots 5$ бит/с), используют наиболее целесообразную модальность (природу) сигналов, определяют оптимальное соотношение между степенью полноты изображения и его знаково-стью, представляют Ч-О предвари-

* Составитель Р. Г. Варламов.

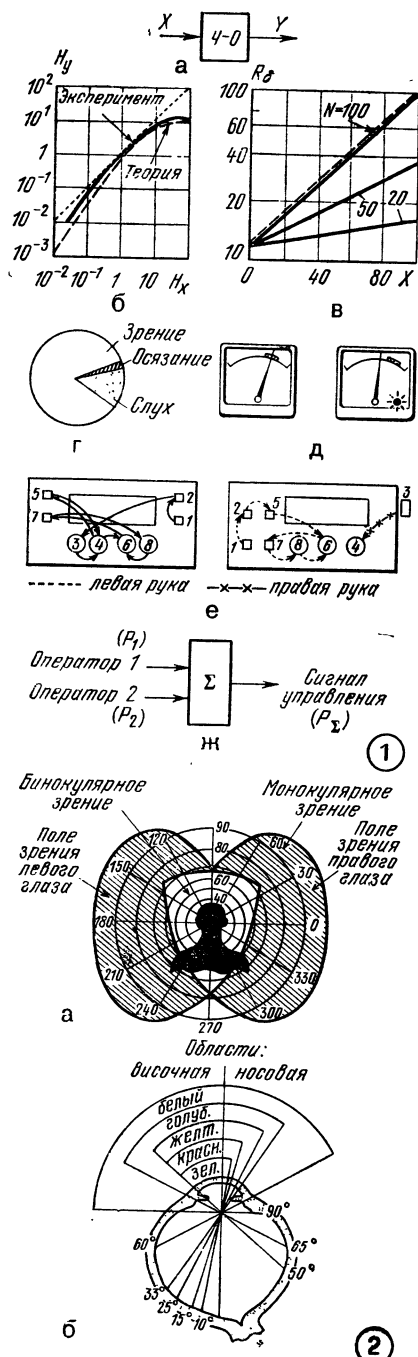


Рис. 4.1. Представление Ч-О в виде двух-стороннего преобразователя (а); амплитудная характеристика Ч-О при переработке информации и потоках входной N_x и выходной N_y информации в бит/с (б); амплитудная характеристика Ч-О при формировании сигналов управления и относительных (R_δ в процентах) сопротивлений перемещения R_δ , перемещения регулятора x и степени полноты регулировки N (в); относительная доля информации, воспринимаемой посредством зрения, осязания и слуха (г); пример использования суфлирующего сигнала в виде лампочки при приближении стрелки прибора к опасной зоне (д); схемы неупорядоченного (слева) и упорядоченного (справа) расположения регуляторов (е); схема повышения надежности управления (ж)

тельную информацию об особо важных сигналах, оптимизируют процесс управления, используют резервирование операторов (рис. 4.1).

Анализаторы Ч-О

Анализаторами (органами чувств) называют совокупность рецепторов (в которых под влиянием раздражений от внешних сигналов различной физической природы возникают возбуждения), нервных волокон (транслирующих эти возбуждения) и участков коры больших полушарий головного мозга (где формируется сетчатое, слуховое, осязательное или иное ощущение). При конструировании РЭА важно знать параметры зрительного, слухового, осязательного и двигательного анализаторов.

Зрительный анализатор включает в себя глаз, зрительный нерв и зрительный центр в затылочных областях коры головного мозга. На светочувствительной внутренней оболочке глаза — сетчатке — находятся светочувствительные окончания зрительных рецепторов: ~ 130 млн. палочек (черно-белое зрение) и ~ 7 млн. колбочек (цветовое зрение). Так как от группы палочек примерно в 100 шт. отходит одно нервное волокно, то они имеют меньшую разрешающую способность, но большую чувствительность, чем колбочки (разрешающая способность выше, чувствитель-

Рис. 4.2. Схема полей черно-белого изображения для одного и двух глаз (а) и цветового изображения для левого глаза (б)

ность ниже, зрение цветовое). Основные параметры зрения следующие: бинокулярное цветовое (объемное, двумя глазами) зрение имеет место в области от оси наблюдения $\pm 30^\circ$, бинокулярное черно-белое — от оси наблюдения $\pm 45^\circ$.

На рис. 4.2 показаны области различения цвета для различных цветов (самая узкая — зеленый $40 \dots 60^\circ$, затем красный, синий, желтый). Цветочувствительность зависит от освещения и имеет разницу максимумов на 0,048 мкм при дневном и сумеречном освещении, из-за чего меняется характер цветопередачи. Зависимость между расстоянием наблюдения и погрешностью отсчета показаний на шкале — нелинейная, оптимальное расстояние 300 ... 500 мм, при его увеличении точность отсчета падает. Среднее время наведения глаз в одну точку 0,17 с, точность определения площади двух фигур или их яркости $\sim 2\%$, разрешающая способность по углу до $3 \dots 12'$ при достаточной длительности наблюдений (не менее 0,5 с). Время адаптации при изменении освещенности от единиц до $30 \dots 40$ мин.

Для повышения скорости обработки информации выбирают ее характер, конструкцию индикатора, характер чтения и различимость сигнала.

Чем больше внутренняя логическая связь в отдельных сигналах тем большее количество информации Ч-О может воспринять и переработать в единицу времени. Например, знакомая информация воспринимается обычно с темпом 3 бит/с, работа на печатающих устройствах (наличие логической связи между знаками и их последовательностью) — 16 бит/с, считывание информации с выборкой нужной для решения данной задачи — $30 \dots 45$ бит/с.

Используя разные виды шкал, можно увеличивать число измерений («мерность» стимула), дающих сведения оператору, и скорость считывания и обработки информации. Например, круглая, полукруглая линейная горизонтальная и линейная вертикальная шкалы одной и той же длины и с одинаковым числом делений дают относительные по-

грешности 1; 1,6; 2,6 и 3,5. Разница между первой и второй парой шкал объясняется тем, что последние шкалы дают только одномерный стимул сигнала. Так как разрешающая способность глаза по горизонтали выше, чем по вертикали, то при считывании показаний с вертикальной шкалы погрешность больше. Однако если шкала расположена в пространстве так же, как меняется параметр, то в ряде случаев вертикальная шкала может оказаться более выгодной. Разница в погрешностях считывания с круглой и полукруглой шкалы объясняется уменьшением вдвое в последнем случае угла отклонения (первый параметр — положение указателя на шкале — одинаков для обеих шкал).

Более быстро командное чтение, но оно не позволяет оценить ситуацию, ситуационное чтение (панорамный индикатор) — медленнее, но более содержательное.

Оптимальное различение сигнала имеет место при его интенсивности в 3 ... 4 раза выше интенсивности фона (шума).

Слуховой анализатор включает в себя барабанную перепонку во внутреннем конце наружного уха, полость среднего уха с системой слуховых косточек и внутреннее ухо с улиткой и $\sim 20\,000$ поперечно натянутых волокон разной длины, которые и представляют собой слуховой рецептор.

Основные параметры слуха следующие: диапазон различаемых колебаний от 20 до 20 000 Гц (сильно зависит от индивидуума, его пола, возраста), разрешающая способность по частоте и уровню сигнала $0,2 \dots 5\%$, разрешающая способность по углу (без поворота головы на источник звука) $15 \dots 20^\circ$ и $3 \dots 4^\circ$ (при повороте), зависимость воспринимаемого уровня сигнала от частоты нелинейна (кривые равной громкости), порог слышимости зависит от уровня шума в помещении, модуляции сигнала и наличия мешающих сигналов, длительность звучания сигнала должна быть не менее 0,5 с.

Осязательный (тактильный) анализатор позволяет определить характер поверхности предмета (гладкая, шероховатая, сухая, влажная),

его форму (до 14 разновидностей), твердость, упругость, мягкость. Используется, когда зрение и слух заняты или когда нужны дополнительные подтверждающие сигналы.

Двигательный анализатор является органом мышечно-суставного чувства, тесно связан с эффекторным (двигательным) аппаратом и определяет выполнение и координацию движений и величину прилагаемых усилий (точность определения величины прилагаемого усилия выше точности определения положения рукоятки регулятора).

Рекомендации по использованию Ч-О в качестве «машинного» управления

Ч-О целесообразно использовать при обобщении результатов наблюдений, опознании и анализе образов, воздействии сигналов различных видов, выполнении разных по характеру действий, контроле работы сложных систем РЭА и решении возникающих при этом проблем, а также при возникших случайных и непредвиденных ситуациях. Эффективность работы Ч-О возрастает, если используется наглядное кодирование информации, работа выполняется по собственному темпу Ч-О, в сигнале нет лишней информации (которую надо отбросить, предварительно обдумав), нет пауз, сбивающих принятый Ч-О темп работы.

Если в процессе работы с РЭА Ч-О должен решать в уме различные арифметические задачи, держать в памяти большое количество информации применять общие принципы к частным решениям, выполнять повторяющиеся стандартные решения, прилагать большие усилия к органам управления и быстро реагировать на изменения режима работы РЭА, то его использование нецелесообразно и лучше поставить простейший автомат механического или электронного типа.

Зрительный анализатор целесообразно использовать для самоориентации, снятия показаний с многошкальных приборов, при сравнении быстро следующих друг за другом сигналов, при наблюдении за источниками информации и получении точной информации о нем, при оцен-

ке движения. Во всех этих случаях целесообразнее использовать дискретные сигналы.

Слуховой анализатор целесообразно использовать для индивидуальной одноканальной связи, передачи кратких циркулярных сообщений, сигнализации о завершении следующих друг за другом операций при условии плохой видимости, для суфлирующих (подсказывающих) сигналов. Во всех этих случаях целесообразнее использовать непрерывные по амплитуде сигналы с изменяющейся частотой.

Тактильный (осязательный) анализатор используется в качестве дополнительного для не особо ответственных операций управления или тогда, когда зрение и слух заняты.

Комфортная рабочая среда

Ч-О как звено системы человек—РЭА выполняет свою трудовую деятельность на рабочем месте, оснащенном средствами отображения информации, органами управления и вспомогательным оборудованием. Рабочее место Ч-О функционирует в условиях, определяемых окружающей средой. По ГОСТ 21035—75 эту среду называют рабочей, понимая под ней совокупность физических, химических биологических, информационных, социально-психологических и эстетических свойств внешней среды, воздействующей на Ч-О.

В зависимости от значения факторов внешней среды на рабочем месте различают комфортную, относительно дискомфортную, экстремальную и сверхэкстремальную рабочую среду. Допустимыми являются комфортная и относительно дискомфортная рабочая среда.

Наиболее важными факторами рабочей среды являются: температура, влажность, шум, вентиляция, отвод тепла и влаги, плотность воздуха, вибрации, освещенность и цвет.

Для комфортной рабочей среды рекомендуется температура среды 18 ... 24° С (291 ... 297 К) (наиболее благоприятные значения 20 ... 22° С или 293 ... 295 К) при относительной влажности 40 ... 80% и уровне шу-

ма 70 ... 75 дБ. При атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (101 кПа) на одного Ч-О должен приходиться объем помещения 35 ... 45 м³ при площади 5 ... 6 м² (без учета проходов и оборудования). В этом случае для обеспечения комфортной рабочей среды необходимо обеспечить в течение 8-часовой смены вентиляцию воздуха объемом 25 ... 50 м³, отвод влаги 350 ... 500 г и тепла 50000 Дж на каждый килограмм массы Ч-О. Для уменьшения вероятности простудных заболеваний неравномерность температуры по горизонтали должна быть не более пяти градусов, а по вертикали — три-четыре градуса (более теплый воздух должен быть у поверхности пола). Температура стен не должна быть более чем на три градуса отличаться от температуры воздуха в помещении, а скорость движения воздуха не должна превышать 0,5 м/с.

При работе Ч-О в кабинах самолетов и космических кораблей требования к температуре, влажности, вентиляции и отводу тепла сохраняются примерно на тех же уровнях, за исключением плотности воздуха. При высоте полета до 2 000 м давление в кабине равно внешнему или на 30 мм рт. ст. (3,99 кПа) выше, на высотах 2000 ... 7000 м равна 596 мм рт. ст. (79,27 кПа) и на высотах более 7000 м — 300 мм рт. ст. (39,9 кПа) для военных самолетов и не менее 540 мм рт. ст. (71,82 кПа) — для гражданских. Точные значения факторов рабочей среды при необходимости оговариваются в ЧТУ.

Ощущение дискомфорта у Ч-О возникают при понижении или повышении температуры в помещении, повышенной влажности, механических колебаниях и нерациональном освещении помещения.

В зависимости от характера выполняемой работы освещенность помещения должна быть 200 ... 1000 лк, предпочтительнее использовать рассеянное освещение. Рекомендуемая степень отражения света от потолка должна быть 0,8 ... 0,9, от стен — 0,5 ... 0,6, от панелей — 0,15 ... 0,2 и от пола — 0,15 ... 0,3. Рекомендуемые цвета окраски помещения: потолок — белый или светлый цветной, стены — желтые, салатовые, светло-голубые или серые, панели и

полы — темно-серые, темно-красные и коричневые тона.

Цвета теплой гаммы (красный, оранжевый, желтый) создают впечатление бодрости, возбуждения и замедленного течения времени. При этом повышается частота пульса и давление крови. Цвета холодной гаммы (синий, зеленый, фиолетовый) создают впечатление покоя, понижения температуры в помещении. Неквалифицированное цветовое решение интерьера помещения при одновременном использовании цветов теплой и холодной гаммы вызывает ощущение дискомфорта и нарушения нормальной работы Ч-О.

В РЭА, расположенной на рабочем месте Ч-О, могут быть источники магнитных полей, ионизирующих и СВЧ излучений, которые при недостаточной экранировке влияют на самочувствие и здоровье Ч-О. Магнитные поля вызывают дерматиты (зуд и покраснение кожи), понижение кровяного давления, нарушение работы нервной и сердечно-сосудистой систем. Ионизирующие излучения от высоковольтных кинескопов, ЛБВ, мощных клистронов и магнетронов могут быть причиной лейкоза. СВЧ поля вызывают перегревы организма, химические нарушения в клетках, мутацию генов, воздействуют на психику. Особенно чувствительны к СВЧ полям мозг, глаза и половые органы, имеющие развитую кровеносную сеть.

Поэтому при анализе рабочего места и рабочей среды Ч-О необходимо выполнять проверку наличия и допустимости уровней воздействия опасных и вредных физических, химических, биологических и психофизиологических факторов по ГОСТ 12.0.003—74, другим стандартам ССБТ и нормам ЧТУ.

К физическим факторам относятся:

- движущиеся машины, механизмы и их элементы, запыленность и загазованность воздуха, температура поверхностей оборудования, материалов и воздуха;

- уровень шума, вибраций, инфра- и ультразвуков,

- плотность воздуха, ее резкое изменение, подвижность и ионизация воздуха;

- ионизирующие и электромагнитные излучения, статические

заряды и повышенные напряжения в цепи, электрические и магнитные поля;

— отсутствие или недостаток естественного света, повышенная или пониженная освещенность, яркость и контрастность, блескость поверхности, пульсация светового потока;

— ультрафиолетовая или инфракрасная радиация.

К химическим факторам относятся:

— общетоксические, раздражающие, сенсibilизирующие, канцерогенные, мутагенные, влияющие на репродуктивную функцию;

— действующие через дыхательные пути, пищеварительную систему, кожный покров.

К биологическим факторам относятся:

— микроорганизмы (бактерии, вирусы, грибы, простейшие и т. п.),

— макроорганизмы (растения и животные).

К психофизиологическим факторам относятся:

— физические перегрузки (статические, динамические, гиподинамия),

— нервно-психические (умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2. ЧЕЛОВЕК — «МАШИНА» ПО ВЫРАБОТКЕ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ [4...6]

Ввод сигналов управления в РЭА от Ч-О может быть выполнен за счет преобразования данных физиологической активности в электрические сигналы, голосом и изменением пространственного положения рабочих органов различных регуляторов.

Преобразователи данных физиологической активности широко используются в разнообразных телеметрических системах контроля состояния космонавтов или больных и для формирования сигналов управления системами жизнеобеспечения или лечения. Их основой является датчик, преобразующий соответствующие физиологические пара-

метры (температуру поверхности кожи, ее влажность, частоту пульса и т. п.) в электрические сигналы. В качестве таких датчиков используются полупроводниковые, емкостные, резистивные или сложные комбинированные датчики (например, источник света и фотодиод).

Ввод сигналов управления голосом возможен для двух крайних режимов: управление простейшими операциями любым Ч-О и управление РЭА только определенным Ч-О.

В первом случае используется комбинация высокочувствительного микрофона с одним или несколькими простейшими фильтрами, настроенными на характерные для данных звуков полосы частот. По команде голосом может быть включен магнитофон, приемник и т. п.

Во втором случае система намного сложнее, так как она обеспечивает анализ индивидуальных характеристик голоса Ч-О и способна различать до 300 .. 1000 команд управления, например, ЭВМ. Для ее размещения требуется объем около 1 м³ с соответствующими компоновочными характеристиками по массе и энергопотреблению.

В настоящее время наиболее распространенными являются системы управления РЭА с помощью различных ручных и ножных регуляторов.

Человек — «машина» управления

Ч-О может работать в двух характерных вариантах «машины» управления: «человек-инструмент» и «человек-машина».

В варианте «человек-инструмент» Ч-О — основной источник энергии, необходимой для выполнения данного процесса управления. Характерные примеры: человек как источник энергии для работы РЭА через мускульный генератор, использование акустической энергии голоса как для питания микропередатчика (большая часть), так и для модуляции высокочастотного сигнала (меньшая часть). Такой вариант в системе человек—РЭА используется редко.

В варианте «человек-машина» Ч-О практически не является источником

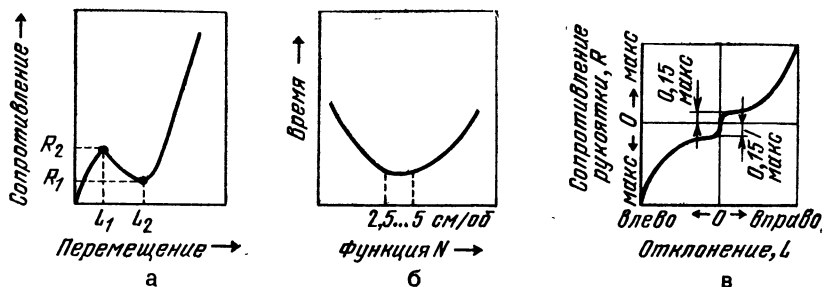


Рис. 4.3. Изменение сопротивления регулятора (усилия нажима) в зависимости от перемещения при движениях управления 1 и 2 классов (а); оптимальное значение передаточной функции N и зависимость сопротивления регулятора от величины его отклонения при движениях управления 3 и 4 классов (б и в)

энергии, необходимой для работы РЭА, а определяет только время, место и характер ввода сигнала управления. Это наиболее характерный вариант работы системы человек-РЭА. Для успешного выбора и конструирования регуляторов в этом варианте необходимо твердо помнить следующее:

— Ч-О — разумный, экономичный и гибкий источник малых, точно дозированных сигналов управления и поэтому пренебрежение к его двигательным навыкам значительно обедняет возможности по выработке и рациональному использованию сигналов управления;

— максимальный эффект управления может быть достигнут только при определенных и пропорциональных акту регулировки усилиях, определяемых конкретными параметрами задачи управления.

По решаемым задачам регуляторы (органы управления) делят на четыре класса. 1 класс — простые одиночные (дизъюнктивные) движения типа нажима кнопки или поворота рукоятки. Общее число отдельных микродвижений доходит до 80. Усилие нажима и перемещение рабочего органа должны быть такими, чтобы зависимость на первом участке была прямой, на втором — обратная (фиксация выполнения акта переключения), на третьем — резкое возрастание силы нажатия (рис. 4.3, а). 2 класс — повторяющиеся движения вращательного, нажимного или ударного характера. Максимальный темп работы зависит от размеров ру-

коятки или кнопки и момента трения. При работе по программе (печатание на машинке) темп ввода сигналов заметно выше, чем при ответе на внешние раздражители, когда сигнал проходит по внешнему контуру управления и длительность $t_{\text{дп}} \sim 0,5$ с. 3 класс — двигательные задачи при выполнении точной настройки регулятором по определенной программе. Общее число отдельных микродвижений до 100. Характеризуются рабочими (дозировочными) и корректирующими движениями. Определяющий параметр — передаточное число (функция), значение которого (рис. 4.3, б) оптимально в пределах 2,5 ... 5 см/об (перемещение указателя/число оборотов рукоятки). Для уменьшения дрожания руки (что снижает точность управления) регулятор должен иметь некоторый момент сопротивления (рис. 4.3, в). 4 класс — двигательные задачи при выполнении операции слежения за объектами, параметры которых изменяются в процессе слежения (изменение положения отметки на индикаторе, совмещение двух стрелок или меток и т. п.). Различают компенсирующее слежение (Ч-О имеет данные только о величине и знаке ошибки) и слежение с преследованием (когда Ч-О имеет данные об изменении входного и выходного сигналов и может оценить ситуацию в целом). При слежении с преследованием можно предвидеть характер изменения ошибки и получить точность в 1,5 ... 2 раза, большую, чем при компенсирующем слежении.

Рекомендации по оптимизации работы Ч-О в роли «машины» управления

Если движение регулятора соответствует движению указателя, то число ошибок в 2 ... 3 раза меньше, чем когда движения не соответствуют (рис. 4.4, а). Целесообразность использования различных видов сочетаний движений указателя и регулятора показана на рис. 4.4, б.

Расположение индикаторов и регуляторов должно соответствовать друг другу (рис. 4.4, в). Возможно их объединение в устройства вида светящейся при нажатии кнопки. При несоответствии положений индикатора и регулятора скорость работы Ч-О падает в 2 ... 4 раза.

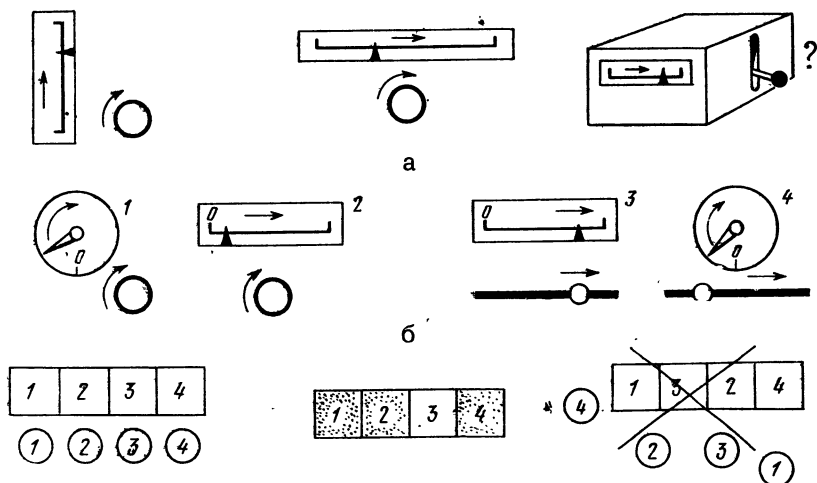
Если использовать для регулировки сигнала по амплитуде или скорости неподвижные рычаги (управляющий сигнал в виде изменения усилия на головке), то возможно увеличение точности на 25 ... 80% по сравнению с регулировкой качающимся рычагом. Количество ошибок управления пропорционально порядку системы (0 порядок — движение регулятора непосредственно

определяют движение указателя (изменение выходного параметра), 1 порядок — перемещение регулятора пропорционально скорости изменения выходного параметра, 2 порядок — перемещение регулятора пропорционально ускорению изменения выходного параметра).

Для повышения точности управления следует использовать (или вводить) дополнительные контуры управления, различные виды управления (виды движений) для различных задач управления. Для использования гностатических (познавательных) и приспособительных движений руки (что повышает точность и надежность управления) не следует выбирать форму рукоятки точно по «хватке» руки.

Ручное управление выгоднее ножного при точных, но не очень сильных сигналах управления (практически все виды регулировок в РЭА). Движение рук к себе быстрее, но менее точны, а от себя — менее быстры, но более точны. Поэтому для быстрых операций управления следует использовать движения к себе, а для точных — от себя. Для плавного и точного движения регуля-

Рис. 4.4. Рекомендуемые (слева и в центре) и не рекомендуемые (справа) сочетания движений регулятора и указателя (а); наиболее целесообразное 1 и наименее целесообразное 4 сочетания характеров движения регулятора и указателя (б); допустимое (слева), рациональное (в центре) и не рекомендуемое (справа) расположения индикаторов и регуляторов (в)



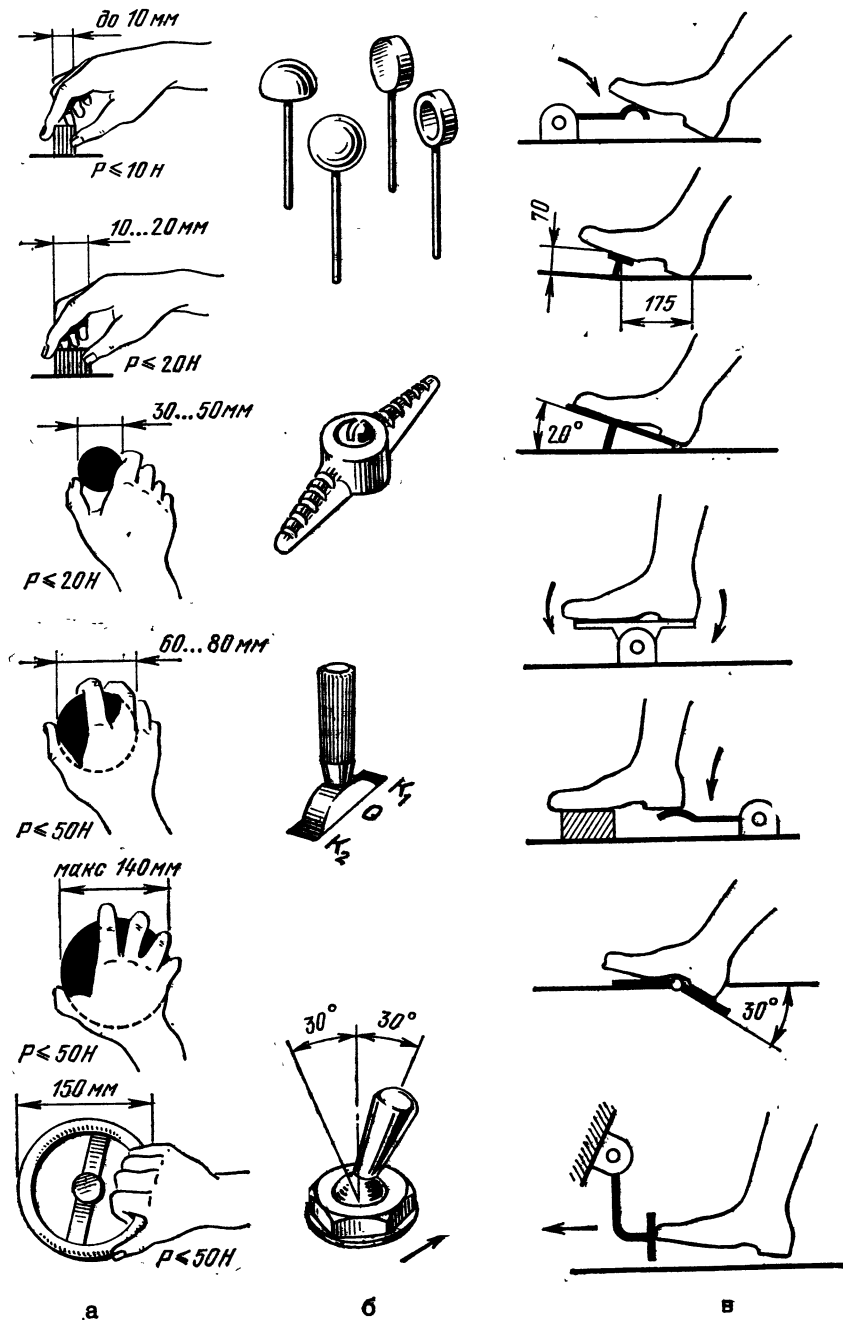


Рис. 4.5. Размеры рукояток в мм и усилия управления (а); характерные формы рычагов управления (б) и схемы ножных педалей (в)

торов следует использовать маховики или механизмы с вязкой смазкой. Характерные примеры ручного и ножного управления показаны на рис. 4.5.

4.3. ЧЕЛОВЕК — «МАШИНА» ПО ПРИЕМУ СИГНАЛОВ [3...6]

При работе Ч-О в качестве «машины» по приему сигналов чаще всего используют зрительный, слуховой и частично, тактильный анализаторы. Наибольшее количество информации Ч-О получает с помощью зрительного анализатора (~ 80%), заметно меньше слуховым (~ 15%) и немного (~ 5%) тактильным анализаторами. Однако «емкость» слухового анализатора достаточно велика (после соответствующей тренировки возможно выполнение взлета, полета по заданному курсу и посадки самолета только по слуховым сигналам), а зрительный анализатор (несмотря на его большие возможности) часто оказывается сильно перегруженным.

Визуальные индикаторы

Они выполняются в виде светофоров, счетчиков, шкал и светопланов различной конструкции.

Светофоры выполняются в виде индикаторных ламп с различным обрамлением и конструкцией в виде табло, светящихся кнопок, клавиш и их комбинаций. Характер информации — наличие или отсутствие свечения. Для улучшения наблюдаемости рекомендуется группировать ответственные светофоры, использовать мерцающий сигнал (с частотой доли герца или 3...10 Гц при длительности отдельных вспышек 0,05 с), нанесение черного контура (в виде затертой черной краской канавки по периметру обрамления), применить линзы с разной огранкой поверхности. Знаки на поверхности светофоров должны иметь высоту 3,3 мм при наблюдении с расстояния ~ 500 мм и быть черными на белом фоне (при хорошем освещении) и красными на черном (при недостаточном освещении).

Счетчики являются самыми точными отсчетными устройствами, так

4. Человек-оператор

как представляют Ч-О цифровую характеристику параметра. Могут быть электромеханическими и люминесцентными сегментного (знак получается при различных комбинациях светящихся сегментов) или знакового типа. Магнитогабаритные сегментные люминесцентные индикаторы часто выполняют в виде монодисплеев. Разновидностью счетчиков являются лимбовые ручки настройки с встроенными счетчиками, ленточные механизмы. Для улучшения наблюдения знаков (не только цифр, но и букв) конструкция счетчика должна быть выполнена так, чтобы вспомогательные элементы конструкции не мешали Ч-О воспринимать полезную информацию.

Шкалы имеют очень широкое применение и разнообразную конструкцию. Если параметр при наблюдении изменяется в широких пределах, то целесообразнее использовать неподвижную шкалу и подвижную стрелку. Шкалы в РЭА (для установки частоты, амплитуды и других параметров стабильных в процессе работы) часто выполняют с неподвижным указателем и подвижной шкалой. Основное требование к шкале — хорошая различимость ее делений и знаков. Для этого выбирают оптимальную ширину и длину рисок, простую форму знаков, соответствующую форму шкалы. Форма концов указателей должна быть простой и четко показывать деления на шкале. Начало отсчета должно быть справа или снизу шкалы. Знаки и цифры должны наблюдаться в нормальном положении Ч-О. Характерные конструкции шкал и их элементов приведены на рис. 4.6.

Светопланы

К ним относят в первую очередь разнообразные электронно-лучевые трубки и ряд комбинированных люминесцентных индикаторов. Для повышения контраста сигнала на экране следует использовать светофильтры с цветом свечения экрана. При ярком наружном освещении используют защитные тубусы, а для ликвидации бликов — систему из перекрестных поляризационных фильтров. Если на экране трубки должны быть шкалы, то их размещают на

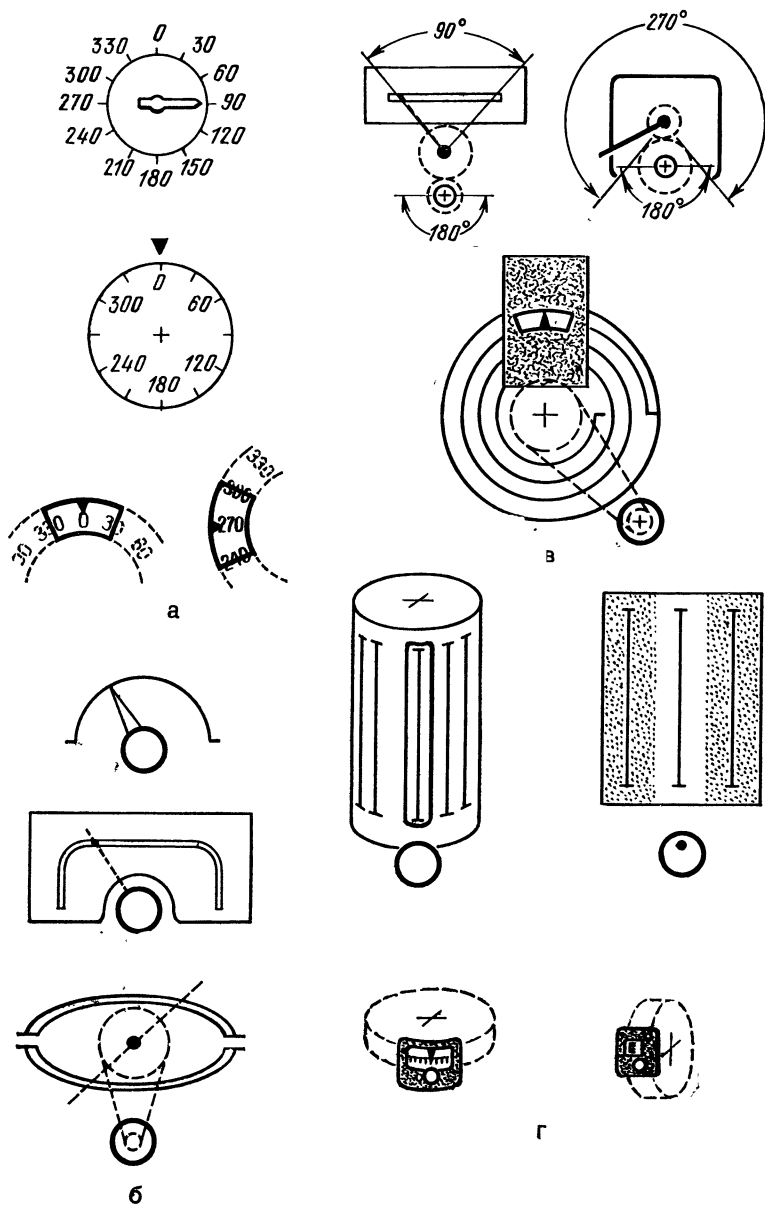


Рис. 4.6. Варианты оцифровки шкал (а); схемы выполнения указателей (б); шкалы с углами поворота указателя 90 и 270° и трехоборотная шкала с углом поворота 540° (в); варианты барабанных и плоской шкал (г)

защитном стекле (светофилтре) и группируют (при большом количестве) по 3—4 шт., используя разделение групп цветом или расположением. Характер внешнего обрамления светоплана должен соответствовать характеру изображения (характеру развертки). При требованиях широкого (до 180°) угла обзора целесообразнее применять плоские люминесцентные индикаторы, либо их комбинации, которые обеспечивают в 1,5 ... 2 раза более широкий угол обзора, чем электронно-лучевые трубки.

Акустические индикаторы

Выполняются в виде громкоговорителей и головных телефонов, свистков, вибраторов (зуммеров) и сирен. Для воспроизведения монофонических передач достаточно иметь один источник звука, для стереофонических — два или четыре (квадрофонические системы). Следует помнить, что для высококачественного воспроизведения звука, кроме высококачественного громкоговорителя или телефона, должны быть соответствующего качества усилители и дополнительные устройства в виде отражательных досок или специальных футляров с высокими акустическими показателями (чаще всего их выполняют в виде специальных звуковых колонок, отрегулированных и настроенных на заводе). Следует избегать расположения громкоговорителей прямо сзади и прямо спереди, так как ЧО не сможет их четко различить.

4.4. ЧЕЛОВЕК И ДИЗАЙН

[1, 3, 6]

Общие положения

В основе дизайна лежат положения эстетики — науки, изучающей прекрасное в окружающей нас действительности и общие принципы творчества по законам красоты. Теоретической основой дизайна является техническая эстетика, изучающая сущность и развитие промышленного искусства, нового вида художественного творчества в промышленно-

сти, направленного на создание предметной среды. В ее основе изучение художественных возможностей современного производства, выразительных средств промышленного искусства, эстетического в форме, композиции и цвете технических изделий.

В настоящее время сущность дизайна формулируют обычно так: дизайн — создание нового типа изделия, отвечающего новой общественной потребности при выполнении заданных функций, выборе утилитарной формы, использовании функциональной окраски и обладающего определенной эстетической выразительностью. Для эффективной и плодотворной работы дизайнер должен иметь тесный творческий контакт с конструктором и технологом РЭА.

Таким образом, главная цель дизайна — разработка на промышленной основе красивых, удобных и полезных изделий, позволяющих повысить производительность труда и его качество и способных дать человеку удовлетворение от работы и общения с предметной средой. Это предопределяет и другую характерную особенность современного дизайна — разработку комплексов и размерно-параметрических рядов изделий, которые могут «расти» (усложняться и развиваться) без нарушения исходных принципов их эстетического содержания.

Работа дизайнера начинается с предварительного анализа прототипов и их эстетического и эргономического анализа. Если нет прототипов, то прибегают к построению идеального образа изделия, который является исходной точкой для разработки. Затем выясняют несущие, компоновочные и структурные компоненты изделия, цветовую гармонию и стиливое единство изделия. После технологического анализа изделия, соответствия его моде и утилитарности переходят к наиболее важным стадиям: эргономическому и эстетическому анализу разработанного изделия.

Итогом работы дизайнера является художественно-конструкторский макет изделия в натуральную величину или в уменьшенном масштабе и комплект художественно-конструкторских чертежей-плакатов.

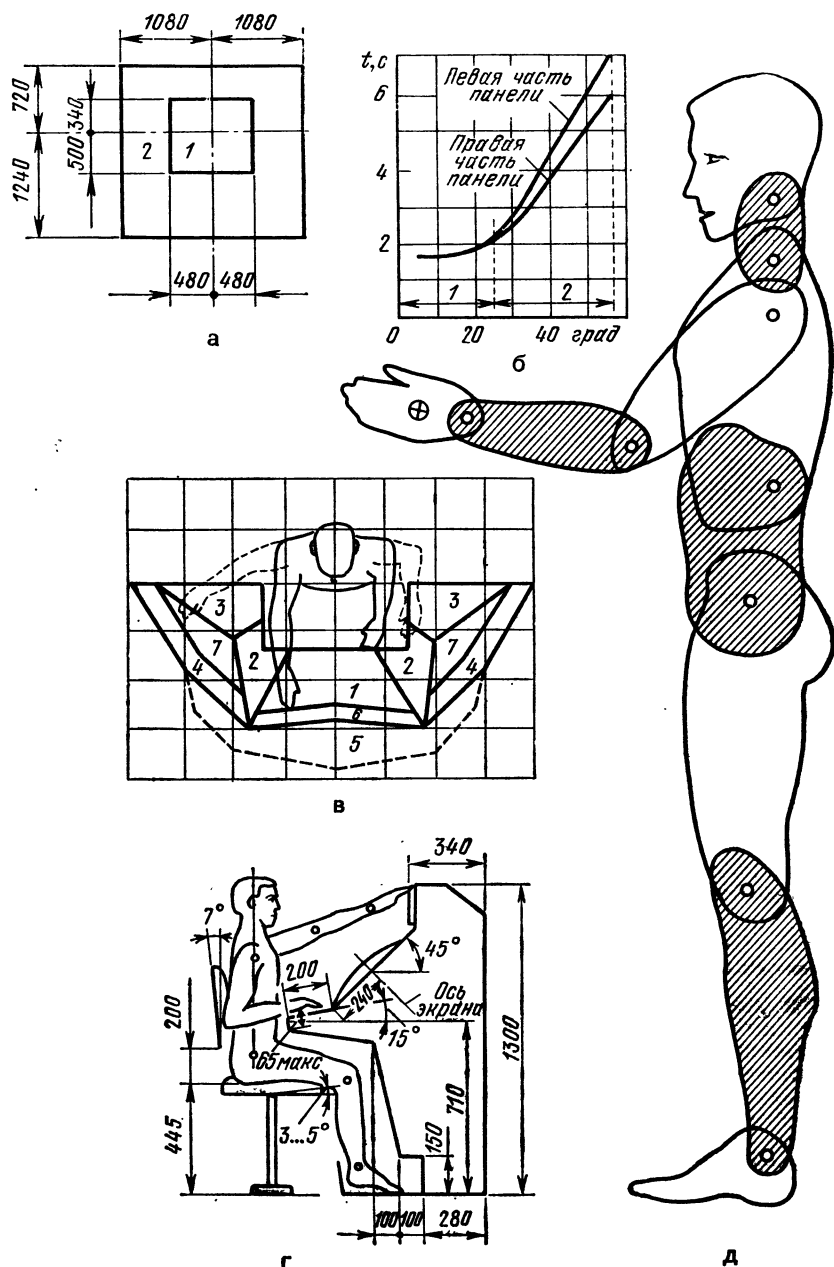


Рис. 4.7. Характерные зоны расположения индикаторных устройств (а) и время считывания показаний с них (б); рабочие зоны расположения регуляторов (чем ниже номер, тем более точная регулировка) (в); основные размеры пульта рабочего места Ч-О (г) и компоновочная шарнирная модель Ч-О (д)

Для рационального и квалифицированного художественного конструирования необходимо знать основные положения инженерной психологии (психотехнологии, технической психофизиологии), в которой изучают сенсорный вход Ч-О (органы чувств), моторный выход (двигательный аппарат Ч-О), распределение функций между Ч-О и РЭА (как преобразователями информации) и условия жизнедеятельности Ч-О. Эргономическая отработка конструкций базируется на эргономике, цель которой — совершенствование орудий и условий труда.

При эргономическом анализе исследуют рациональность выбранных зон расположения индикаторов и регуляторов, удобство пультов управления, для чего часто пользуются компоновочной моделью Ч-О (рис. 4.7)

Основные этапы художественно-конструкторской разработки можно представить в следующей последовательности: анализ ТЗ, предварительные эскизы, определение взаимосвязей Ч-О и РЭА, определение количества и качества индикаторов и регуляторов, определение общих объемов РЭА и доли в них регуляторов и индикаторов, прорисовка вариантов, поиск гармоничного по форме и цвету решения, выполнение промежуточных (обычно бумажных клеевых) макетов, окончательная отработка формы, выполнение демонстрационных плакатов и художественно-конструкторских макетов.

Художественно-конструкторская оценка РЭА

Используют четыре вида оценки художественно-конструкторских показателей РЭА: правовая защита оригинальности РЭА, количественная оценка эстетических и эргономических показателей, качественная оценка и приемка опытных образцов и установочных партий на этапе авторского надзора.

Оригинальность художественно-конструкторского решения РЭА дает право на авторскую защиту его в качестве промышленного образца, что учитывается при аттестации изделий на присвоение Знака качества. Эстетические показатели качества

РЭА оцениваются уровнем стиливого решения формы, ее функциональностью и композиционной законченностью и качеством отделки поверхностей. Эргономические показатели качества РЭА оцениваются по удобству обслуживания, его оперативности и безопасности. По ГОСТ 16456—70 используют четыре группы эргономических показателей: гигиенические (освещенность, вентилируемость, температура, влажность, давление воздуха, напряженность электрического и магнитного полей, запыленность, радиация, токсичность, шум, вибрации, гравитационные перегрузки и ускорения на объектно-носителе РЭА), антропометрические (соответствие форме, размерам тела человека и распределению его массы), физиологические и психофизиологические (соответствие силовым, скоростным и энергетическим возможностям человека и возможностям его зрительного, слухового и осязательного анализатора), психологические (соответствие закрепленным и вновь формируемым навыкам человека и его возможностям по восприятию, переработке и выработке сигналов управления). Для численных оценок этих параметров используют экспертные методы оценки.

При качественной оценке художественно-конструкторского уровня РЭА для присвоения государственного Знака качества, кроме оригинальности РЭА, принимают во внимание карты технического уровня изделий, где, кроме эстетических и эргономических показателей, учитываются и технические (функциональные) показатели. Считается, что весомость эстетических и эргономических показателей в комплексном показателе качества равна $\sim 0,1$.

Приемка опытных образцов и установочных партий РЭА на этапе авторского надзора служит для сохранения стиля, характера и используемых материалов (определяющих оригинальность в художественно-конструкторском макете выпускаемого изделия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович Л. Б.; Бурьян В. А.; Раутман Ф. И. Художественное конструирование в машинно-

- строении.— 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Техника, 1976.
2. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры.— 2-е изд., доп. и перераб.— М.: Сов. радио, 1975.
 3. Варламов Р. Г. Основы художественного конструирования радио-и электронной аппаратуры.— М.: Сов. радио, 1967.
 4. Вудсон У.; Коновер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов: Пер. с англ./ Под ред. В. Ф. Венда—М.: Мир, 1968.
 5. Ломов Б. Ф. Человек и техника: Очерки инженерной психологии.— М.: Сов. радио, 1966.
 6. Художественное конструирование в электронном машиностроении /В. К. Федоров, О. Д. Струков, А. П. Корольков, А. А. Смирнов, А. М. Плотницкий.— Обзоры по электронной технике: Сер. Технология и организация производства /ЦНИИ Электроника.— М., 1977, вып. 5 (211).

5. ХАРАКТЕРНЫЕ ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЭА

Основные аббревиатуры

ИС — интегральная микросхема
 КУ — уровень конструкции (иерархический)
 ММ — микромодуль (плоского или объемного типа)
 МПП — многослойная печатная плата (число слоев более двух)
 МС — микросборка
 МУ — микроэлектронный узел
 ПП — печатная плата (одно- или двухслойная)
 ТК — типовая конструкция
 ТЭЗ — типовой элемент замены (обычно в ЭВМ)
 ТЭК — типовой элемент конструкции (обычно из системы ТК)
 УТК — универсальная типовая конструкция
 ФЯ — функциональная ячейка
 ЭРЭ — электрорадиоэлементы (обычно навесного типа)

5.1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАЗМЕРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ РЯДОВ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ [2, 3, 7, 10...13] *

Общие положения

Конструкция РЭА — совокупность определенным образом связанных конструктивных и схемотехнических

элементов и компонентов. В основу ее классификации можно положить: назначение (радиоприемная, телевизионная, бытовая, самолетная и т. п.), элементная база (дискретные или микроэлементы различной степени интеграции), физическая природа определяющего работу РЭА эффекта (электрические и магнитные поля, механические связи, свет, тепловые и др. поля), важность (основная, вспомогательная), геометрия и масса (форма, размеры, объем, плотность объемная), условия эксплуатации (легкие, средние, жесткие), условные иерархические уровни конструкции. В зависимости от поставленной задачи используется та или иная классификация.

Разработка компонентов РЭА в виде элементов единых по структуре размерно-параметрических рядов (номиналы, допуски, мощности рассеивания и размеры резисторов, трансформаторов, конденсаторов, микросхем и т. п.) и относительно малые размеры компонентов по отношению к РЭА послужили основой разработки размерно-параметрических рядов типовых конструкций.

Типовая конструкция ТК — плоский или объемный несущий компонент размерно-параметрического ряда конструкций, используемый для размещения схемных элементов или компонентов РЭА. В простейшем случае несущий компонент — печатная плата. Возможно выполнение ТК в виде сложной трехмерной кон-

* Составители О. Д. Струков, Р. Г. Варламов, А. М. Плотницкий

струкции с защитным кожухом, опорными ножками или амортизаторами, встроенными системами охлаждения и другими приспособлениями. Столь широкий диапазон конструкторских решений существенно затрудняет построение размерно-параметрических рядов типовых конструкций.

Размеры сторон ТК могут изменяться по метрическому или ритмическому соотношениям, прилагаемым ко всем или части размеров сторон ТК. Возможно как совместное применение метрического и ритмического соотношений к размерам одной ТК, так и пропуски определенных значений.

При метрических соотношениях $a_n = a_0 + nt$, при ритмических — $a_n = a_0 K_m^n$, где a_n — значение n -го размера, a_0 — начальное значение размера (например, ширины, высоты, глубины) данного ряда; n — целое или дробное число, лежащее в основе размерно-параметрического ряда данной ТК и определяющее диапазон изменений размеров в пределах $a_0 \dots a_n$; t — величина приращения (модуль) при метрическом соотношении; K_m — коэффициент прогрессии ритмического соотношения, обычно в виде $K_m = \sqrt[n]{10}$. Часто модулем называют любой несущий компонент ТК или готовое изделие из данного размерно-параметрического ряда, особенно если $a_0 \neq t$. При использовании метрического ряда проще обеспечить стыковку различных несущих компонент, но при этом общее число компонент для обеспечения заданного объема или площади получается со значительной избыточностью, по сравнению с числом компонент ритмического ряда.

Факторы, определяющие выбор a_0 , n , t и K_m конкретного размерно-параметрического ряда ТК, следующие. Выбор значений a_0 для высоты, ширины и глубины ТК определяется минимальными размерами используемых компонентов или их групп, регуляторов, индикаторов, разъемов и конструктивных элементов для установки, смены и крепления ТК. Обычно значения a_0 лежат в пределах 20...100 мм. Значение n изменяется в пределах 4...24. Минимальное зна-

чение характерно для измерительных приборов, максимальное — для стоечной и шкафной РЭА. Общее число возможных вариантов объема или площади элемента ТК будет равно $n_1 n_2 n_3$ и $n_1 n_2$, где n_i — число значений высоты, ширины, глубины (для блоков) и ширины и длины (для плат).

Поэтому рекомендуется выбирать значения a_0 для высоты, ширины и глубины (или ширины и длины у плоских плат) разными, что дает возможность при минимальном количестве определяющих размеров ТК получить максимальное разнообразие значений объемов или площадей. Например, используя для ширины 13 значений по ряду предпочтительных чисел $R10$ от 31,5 до 500 мм, для высоты четыре значения от 45 до 224 мм и глубины четыре значения от 140 до 450 мм, получим [2] 208 или 1248 значений для объемов 0,198...50,4 дм³ (разница в 254 раза) при отклики каждого последующего значения от предыдущего на 25% и различные варианты выполнения. Если бы a_0 для высоты, ширины и глубины были одинаковы, то многие значения объемов многократно повторялись бы при незначительной (в ряде случаев) разнице друг от друга.

Значение t изменяется в пределах 20...120 мм. Его (как и n) целесообразно брать разным (например, по ширине $t_1 = 40$ мм, по глубине $t_2 = 120$ мм, по высоте $t_3 = 80$ мм). Значения K_m для различных соотношений берут обычно из рядов предпочтительных чисел $R5$, $R10$ или $R20$, иногда из рядов $E6$ и $E12$ (значения K_m при этом соответственно равны 1,58, 1,26, 1,12, 1,47, 1,21). Часто используют неполный ряд значений, пропуская одно или два и округляя полученные числа до рекомендуемых в стандартах величин.

Схематически модульную структуру ТК можно представить так (рис. 5.1, а): заданное пространство расчленяется на модули с размерами сторон по ширине, глубине и высоте t_1 , t_2 , t_3 . Минимальный размер модуля t_1 определяется необходимостью размещения в нем по ширине (глубине, высоте) заданного количества компонентов размером t_i .

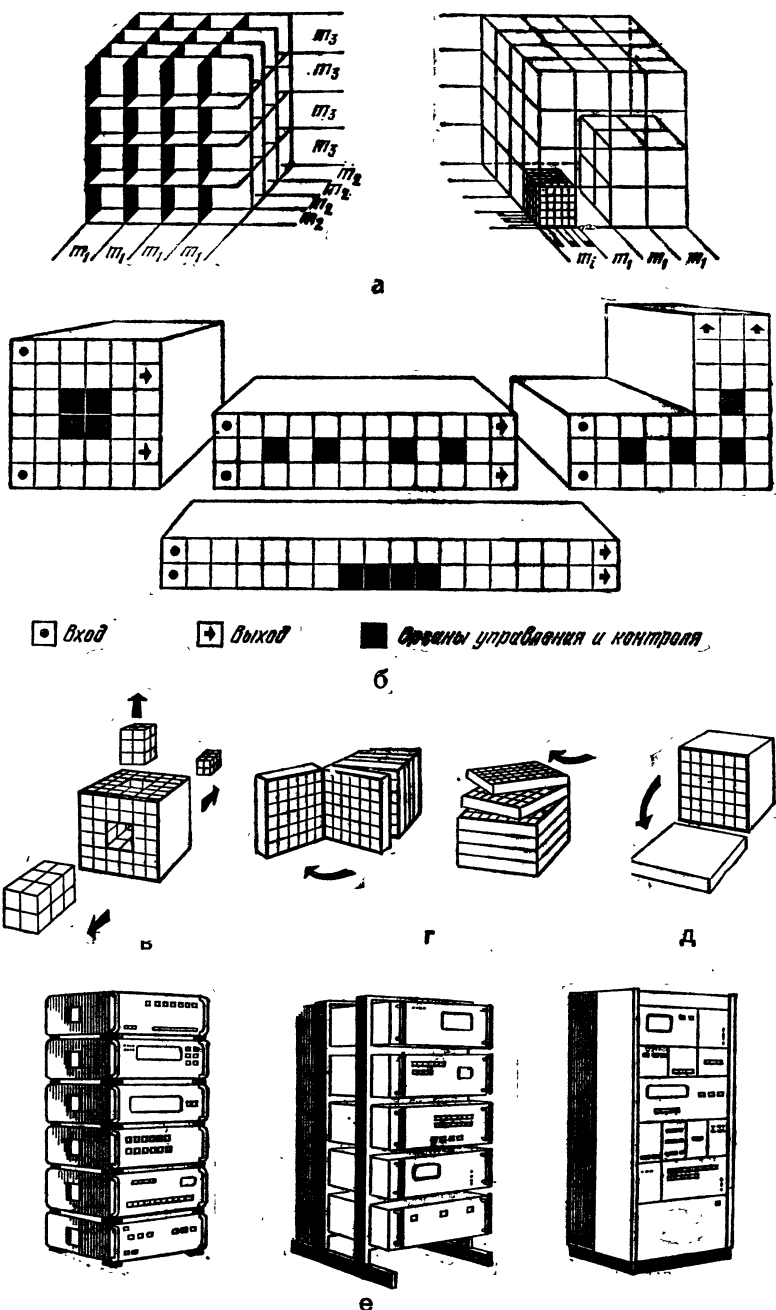


Рис 8.1. Схема модульной структуры ТК (а), варианты компоновки модулей [б] обеспечения доступности модулей (в, г, д) и варианты конструкций РЭА на базе элементов единой системы ТК (е)

Модульность структуры ТК позволяет получить различные компоновочные решения устройств входа и выхода, органов управления и контроля и РЭА в целом (рис. 5.1, б). При этом для обеспечения удобств при эксплуатации и ремонте используется выдвижение, повороты и раскрытие конструкции РЭА с возможностью доступа к любому элементу ТК (рис. 5.1, в, г, д). Использование разных вариантов корпусов ТК и их крепления дает возможность на единой конструкторской элементной

базе создавать квазишкафные конструкции (установка блоков друг на друга), стоечные (крепление блоков к специальной раме) и шкафные (установка блоков на специальных направляющих в шкафу), схематически показанных на рис. 5.1, е. Для крупногабаритной РЭА (в основном, шкафного типа) используют телескопические направляющие, в в виде «ножниц», роликов и шарниров (рис. 5.2).

Основными достоинствами модульного принципа построения конструкций РЭА являются:

- свобода доступа к модулю и его элементам,
- параллельность выполнения модулей в производстве,
- сокращение сроков проектирования и изготовления РЭА,
- простота модернизации как отдельных модулей, так и РЭА в целом,
- снижение стоимости РЭА при использовании стандартных модулей,
- гибкость конструктивной структуры РЭА.

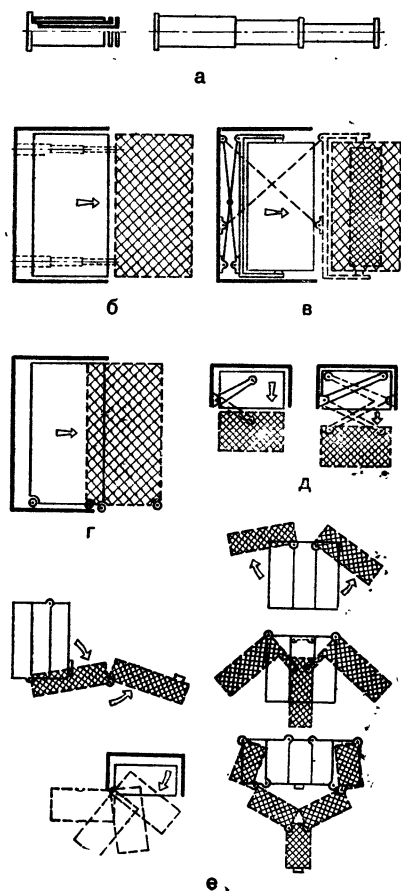
Иерархия несущих конструкций ТК и элементной базы

Современная сложная РЭА состоит из законченных конструкций в виде блоков, шкафов и пультов, в которые входят частные конструкции плат, ТЭЗ, ТЭК, частичных и комплектных блоков, на которых устанавливаются дискретные ЭРЭ или ИС и МС различной степени интеграции (рис. 5.3).

I иерархический (базовый) уровень или класс характеризует элементную базу, которая может быть в виде дискретных ЭРЭ, корпусных и бескорпусных ИС и МС различной степени интеграции.

II иерархический; уровень (класс) объединяет частные конструкции ТК, которые не имеют самостоятельного применения, так как и схемотехнически, и конструктивно являются частями III, более высокого уровня законченных конструкций ТК. Ко II уровню относятся: печатные платы с элементами и компонентами, защищенные (заливкой, обволакиванием, экранами и т. п.) и незащищенные. К этой же категории (при наличии электрических разъемов) часто относят типовые элементы заме-

Рис. 5.2. Телескопические направляющие (а) для шкафной РЭА (б), выдвижение РЭА из шкафа с «ножницами» с последующим поворотом (в), выкатывание на роликах (г), выдвижение на шарнирах (д), варианты «раскрыва» блоков (е).



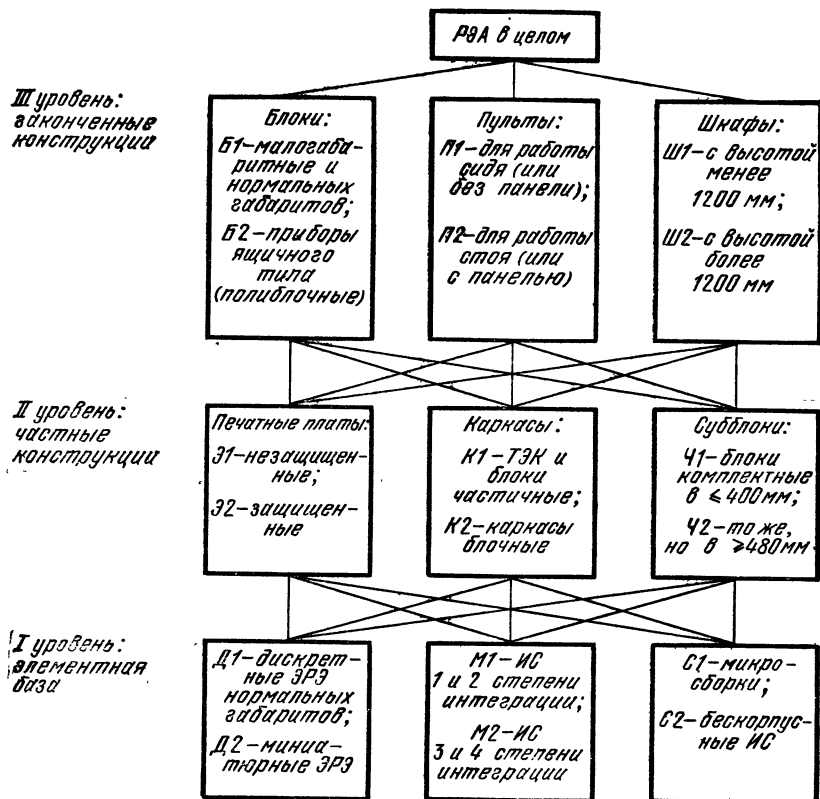


Рис. 5.3. Уровни конструкторской иерархии РЭА

ны ТЭЗ ЭВМ. В РЭА на микросхемах вместо гетинаксовых или текстолитовых печатных плат используют многослойные керамические с межсоединениями, на которых устанавливают МС и бескорпусные ИС высокой степени интеграции. К классу каркасов относятся типовые элементы конструкций ТЭК, блоки частичные и каркасы блочные. При выполнении субблоков с компонентами их разделяют по геометрическим размерам.

III иерархический уровень (класс) объединяет законченные конструкции сложной РЭА в виде блоков, пультов и шкафов. Деление шкафов по высоте определяется возможностью для сидящего оператора частично следить за другой аппарату-

рой при высоте шкафа ≤ 1200 мм, что затруднено или невозможно при высоте шкафа > 1200 мм.

Разработка элементов ТК в виде единой системы, допускающей разнообразные варианты компоновки, требует:

- конструктивной входимости элементов по всем иерархическим уровням,
- конструктивно-технологической преемственности возможных решений при модернизации,
- совместимости в масштабах отрасли, страны или межгосударственных организаций,
- единого художественно-конструкторского решения,
- использования современных технологических приемов,

— обеспечения надежной работы при эксплуатации.

При этом следует помнить, что самые рациональные структуры ТК окажутся экономически малоэффективными, если для одинаковых условий эксплуатации и функционального назначения разработка будет вестись в разных организациях и ведомствах и при невысоком уровне (по количеству и качеству) производства.

Все элементы и система ТК в целом должны отвечать определенным функциональным, конструктивным, технологическим, эстетическим и эргономическим требованиям, обеспечивающим требуемую надежность работы РЭА (ее безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость).

Функциональные требования. Обеспечение принципиальной возможности компоновки элементной базы заданного типа в конструкторских элементах данной системы ТК с обеспечением нормальных тепловых режимов, механической прочности, герметичности, экранирования, размещения регуляторов, индикаторов и разъемов натурными, номографическими, графо-аналитическими и машинными методами компоновки [2].

Конструктивные требования. Реализация функциональных требований по компоновке элементной базы заданного типа (внутренняя компоновка) и компоновке конструктивных элементов данной системы ТК с учетом рабочего места человека-оператора и (или) рабочей среды в месте размещения ТК на объектно-носителе (внешняя компоновка) в виде комплекта конструкторской документации по определенной системе (например, ЕСКД).

Технологические требования. Обеспечение выполнения подготовительных и монтажно-сборочных работ (как для существующих конструктивных элементов ТК, так и для новых, разработанных для данной конкретной конструкции) современными прогрессивными технологическими приемами с учетом масштаба и специализации производства, стандартизации технологических процессов и рационального использования материалов в виде комплекта техноло-

гической документации и соответствующего предприятия.

Эстетические требования. Обеспечение композиционной целостности формы за счет соразмерности, масштабности, пропорциональности и пластичности, цветовой гармонии элементов, ТК в целом и среды (объекта) и требуемого психологического комфорта, стилового единства на базе единых эстетических принципов, художественно-конструкторских методик и стандартизации (гл. 4).

Эргономические требования. Обеспечение оптимального сопряжения человека-оператора с рабочим местом в заданной рабочей среде с учетом его антропометрических (рабочая зона) и санитарно-гигиенических (температура, влажность, шум, вибрация, излучения и т. п.) требований, включая требования техники безопасности в соответствии с системой стандартов безопасности труда (ГОСТы 12-й группы) в процессе эксплуатации РЭА.

5.2. ОСОБЕННОСТИ РЭА НА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТАХ [1, 2, 5, 8] *

Элементную базу такой РЭА образуют микросистемные компоненты: микромодули (ММ) этажерочного или плоского типов с моно- и полиэлементными платами с пленочными или объемными элементами, ИС (МС) и модульные узлы (МУ) различной степени интеграции, в которой:

— наименьшей иерархической единицей служат не отдельные ЭРЭ, а МУ (ММ, ИС или МС),

— обеспечивается высокая плотность компоновки благодаря использованию стандартных модульных форм МУ (ММ, ИС или МС), унификация и стандартизация элементов конструкции,

— уменьшается число и объем межблочных соединений за счет межсоединений внутри самих МУ (ММ, ИС и МС) или в их подложках,

— создаются конструкции с эффективным отводом тепла от каждого МУ (ММ, ИС, МС), блоков и РЭА в целом.

* Составитель Н. А. Барканов

Принципы конструирования

Общие принципы конструирования РЭА на ИС и МС аналогичны принципам функционально-узловому конструированию с использованием модульных функциональных узлов. Для наиболее полной реализации преимуществ РЭА на ИС и МС рекомендуется использование систем автоматизации проектирования.

Выбор МУ (ММ, ИС и МС), выпускаемых промышленностью, осуществляется на основе анализа ТТ, схемотехнического анализа РЭА и выявленных при этом функциональной номенклатуре и технических характеристиках требуемых МУ. При их выборе оценивают следующее:

- функциональное назначение МУ и возможность реализации с их помощью требуемых функций проектируемой РЭА,

- электрические и эксплуатационные характеристики (входной и выходной ток или напряжение, быстродействие, полоса рабочих частот, потребляемая мощность, помехоустойчивость, надежность, удобство эксплуатации и т. д.),

- соответствие проектируемой РЭА принципам рациональности конструкции и технологичности,

- номинальные значения напряжений питания, требования к стабильности и пульсации,

- стоимость МУ,

- сроки разработки РЭА,

- предполагаемый объем производства РЭА.

На каждом этапе конструирования решающими могут быть различные требования и показатели, которые и должны учитываться в первую очередь при выборе МУ. Номенклатура и технические данные МУ содержатся в специальных ведомственных справочниках и каталогах.

Характеристики проектируемой аппаратуры должны быть связаны только с такими параметрами МУ, значения которых гарантируются ТУ и могут быть измерены. Не допускается специальный отбор МУ с улучшенными параметрами. Для обеспечения высокой надежности РЭА не допускается эксплуатация МУ в режимах, близких предельным, а также при неблагоприятных сочетаниях

электрических, механических и климатических воздействий.

Методика измерения электрических параметров МУ установлена ГОСТ 18683—73 и 19799—74. Конструирование РЭА на ИС и МС рекомендуется выполнять в соответствии с ОСТ4ГО.010.009 с учетом правил и особенностей монтажа МУ на ПП, установленных ТУ и руководствами по применению МУ и ОСТ4 ГО.010.030.

Высокая плотность монтажа с применением МУ резко ухудшает тепловой режим, для облегчения которого рекомендуется:

- выбирать ПП так, чтобы отношение длины к ширине было максимальным,

- в пределах установленных ограничений размещать требуемое число МУ на максимально возможном числе ПП,

- располагать ПП с МУ на максимально возможном расстоянии друг от друга с ориентацией каналов между ними либо по вертикали, либо (при принудительном охлаждении) по направлению движения охлаждающего агента,

- использовать в качестве дополнительных теплостоков теплопроводные шины (например, в виде рамок ПП)

Тепловые режимы РЭА на ИС и МС рассчитывают по ОСТ4 ГО.012.032, способы охлаждения узлов и блоков выбирают по ОСТ4 ГО.070.003. Если возможно, вместо МПП рекомендуется применять более надежные одно- или двухсторонние ПП, имеющие меньшее число переходных контактов между слоями проводников.

Конструкции РЭА на микромодулях

В составе узлов и блоков ММ соединяются с помощью ПП толщиной 1...2 мм (в зависимости от механических нагрузок, заданных в ТУ). Не рекомендуется устанавливать ММ на ПП толщиной более 2 мм, так как в этом случае трудно выполнить печатный монтаж с шагом 3 мм, которому соответствует расположение выводов ММ.

Материалом ПП служат низко-частотные фольгированные диэлек-

трики марок НФД-180-1 или НФД-180-2 (МЖ-44-63 ТУ), стекло-текстолиты СФ-1 или СФ-2 (МРТУ-16-509-001-64). ММ устанавливаются на ПП с шагом 12,5 мм, кратным шагу координатной сетки печатного монтажа. Между ПП и ММ предусматривается зазор 1,5...2 мм, необходимый для прохождения лака при лакировке ПП для повышения их влагостойкости. На ПП с односторонним печатным монтажом допускается установка ММ без зазора. Рекомендуется распаять все 12 выводов ММ на ПП, уменьшение числа распаянных выводов допускается только при положительных результатах механических испытаний при заданных перегрузках. Верхние (незапаянные) выводы ММ подрезаются до высоты 0,5 мм от торца с последующей заливкой изоляционным лаком (например, СБ-1).

РЭА на ММ следует разрабатывать с максимальным использованием ММ общего применения, типовых узлов и конструктивных элементов, предусматривать в конструкции возможности их замены в процессе производства и эксплуатации.

Части схемы, требующие экранировки, следует выделять в отдельные сборки с последующей общей экранировкой или выполнять в виде герметизированных с помощью металлических капсул ММ. Особое значение имеет разнесение входных и выходных цепей в ММ и узлах на них. Рационально дублирование основных цепей на ПП.

Съемные узлы, субблоки и блоки РЭА на ММ должны иметь ключ или специальную метку, обеспечивающую правильную их установку, на ПП маркируют отверстия, соответствующие первым выводам ММ.

Наибольшая плотность компоновки достигается при сплошной установке ММ («поле ММ») с шагом 12,5 мм, обеспечивающим необходимый минимальный технологический зазор и кратным шагу координатной сетки печатного монтажа (рис. 5.4, а). Однако при этом конструкция блока получается практически неремонтоспособной, так как при замене вышедшего из строя ММ установить в образовавшийся промежуток новый практически невоз-

можно. ПП для таких блоков сложны в изготовлении из-за очень плотного печатного монтажа и большого количества отверстий (число отверстий в ПП примерно в 15 раз больше числа ММ, установленных на плате).

Несложный печатный монтаж, хорошую технологичность и высокую ремонтпригодность имеют двухрядные микромодульные линейки, устанавливаемые на объединительные ПП. Хорошую плотность компоновки, технологичность и ремонтпригодность имеют конструкции блоков с многорядной компоновкой ММ через ряд. При стыковке двух плат ММ, расположенные на одной ПП, размещаются между ММ, установленными на второй ПП (рис. 5.4, ж). Можно монтировать ММ лежа (рис. 5.4, б, в, г, д), однако соединение их при этом менее технологично. Иногда используют размещение ММ между двумя ПП (рис. 5.4, е).

Для электрического соединения ММ с объединительными ПП или соединения между собой микромодульных блоков используют объемный монтаж, колодки или разъемы. Наиболее просто выполняется соединение объемным проводочным монтажом. Объемный монтаж упрощает ремонт и замену узлов, однако приводит к значительным потерям объема РЭА, так как объем соединительных элементов может занимать до 50% объема блока. Значительно уменьшают потери объема на соединения и повышают их надежность специальные переходные колодки.

С другими устройствами ММ блоки, как правило, соединяются с помощью разъемов. Если требуется повышенная надежность контактных разъемных соединений, то применяют разъемы с золочеными контактными парами, многоконтактные повышенной надежности или разъемы с последующей перепайкой контактных пар.

Несущие конструкции ММ блоков изготавливают из алюминиевых сплавов, конструкционных (Ст10, Ст20) и нержавеющей (1Х18Н9Т) сталей, титановых сплавов (ВТ1, ВТ5), пеноматериала ПУ-3 (армированного для прочности стеклотканью ЭСТБ ВТУ 215-53Л).

Расчет числа ИС на печатной плате. Максимальное число ИС на ПП

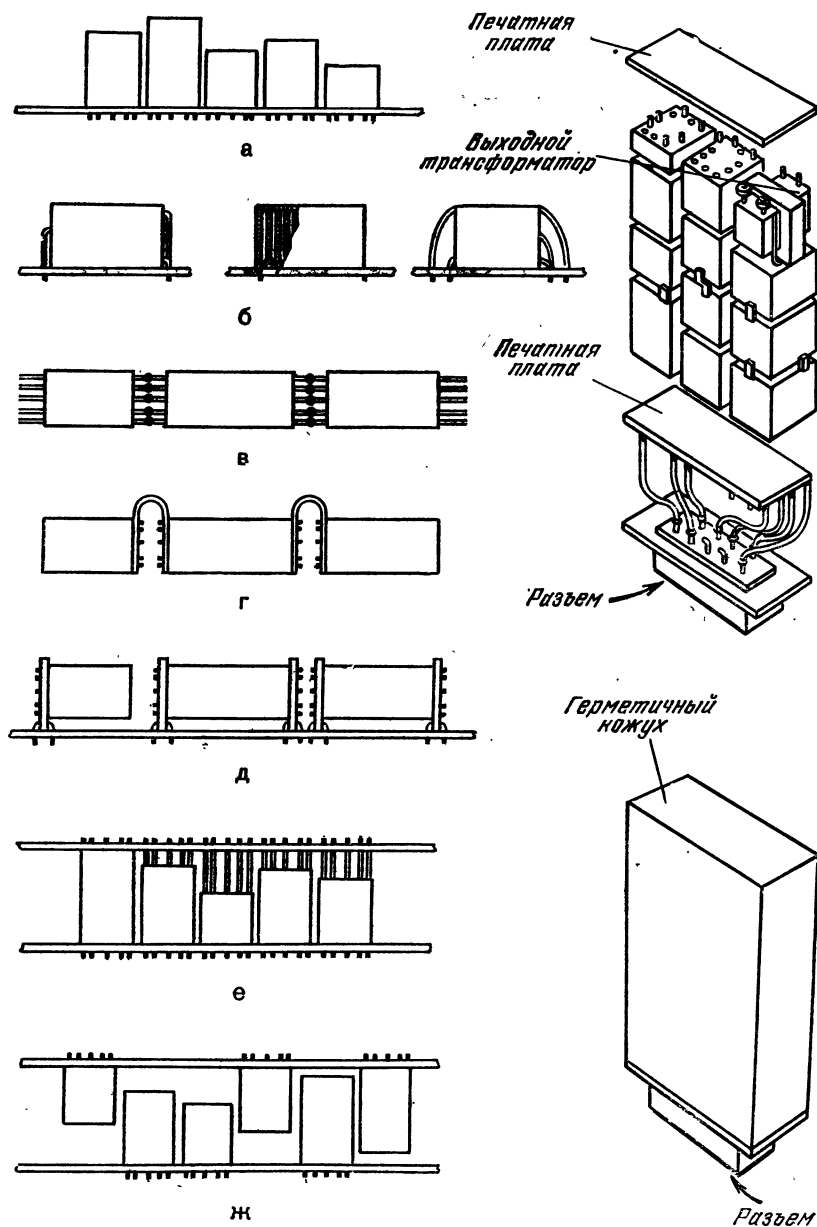


Рис. 5.4. Варианты компоновки этажерочных ММ

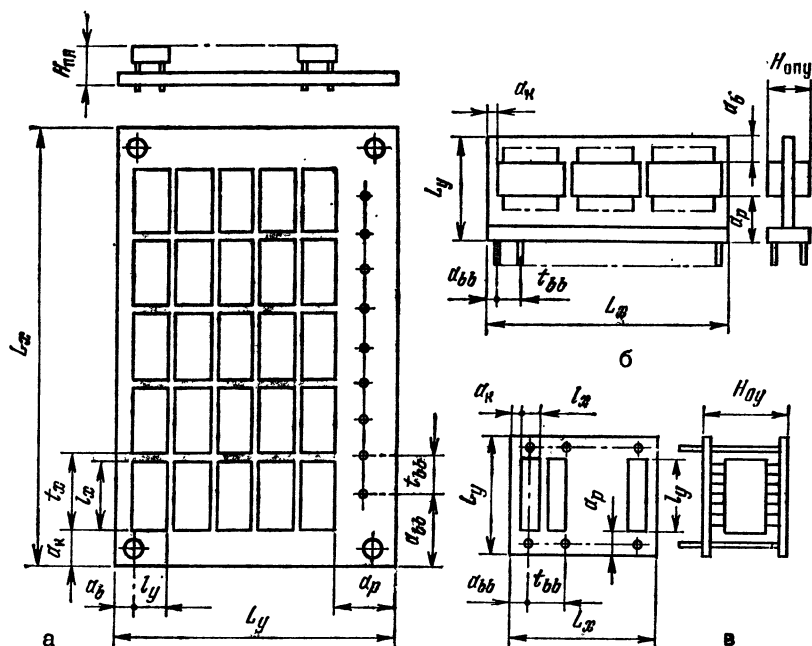


Рис. 5.5. Схема расположения ИС на ПП

при одностороннем их размещении и одинаковых корпусах равно $n_{1\max} = n_x n_y$, при двухстороннем размещении $n_{2\max} = 2n_x n_y$, где n_x — число ИС в одном ряду, n_y — число рядов ИС на ПП (рис. 5.5).

При этом

$$n_x \approx (L_x - 2a_k - l_x) / t_x + 1,$$

$$n_y \approx (L_y - a_p - a_b - l_y) / t_y + 1,$$

где L_x и L_y — размеры ПП по осям x и y , l_y и l_x — расстояние между крайними выводами корпуса ИС по осям x и y , a_k — краевые поля на плате по оси x ; a_p — краевое поле по оси y для элемента внешней коммутации (разъем, контакты площадки и т. п.), a_b — краевое поле по оси y для элемента контроля.

Размеры рекомендуемых шагов установки ИС, t_x , t_y , краевых полей a_b , a_k и a_p выбирают согласно рекомендациям ОСТ 4ГО.010.030. При этом учитывают типоразмеры корпусов ИС или подложек бескор-

пусных ИС и МС, сложность принципиальной электрической схемы (СхЭ), плотность компоновки, температурный режим блока, метод разработки топологии ПП (ручной или машинный).

ИС со штырьковыми выводами, расстояние между которыми 2,5 мм, размещают на ПП так, чтобы выводы совпадали с узлами координатной сетки. В противном случае хотя бы один вывод ИС располагают в узле координатной сетки, это относится также к бескорпусным и к ИС в корпусах с планарными выводами. Чтобы автоматизировать монтаж, ИС со штырьковыми выводами устанавливают только с одной стороны ПП, ИС с планарными выводами и бескорпусные можно монтировать на обеих сторонах ПП. ИС со штырьковыми выводами устанавливаются на ПП с зазорами около 1 мм без прокладок или подставок, однако иногда допускается устанавливать их с использованием изоляционных прокладок, применяя для крепления

мастику ЛН (ТУ МХП 3052—55), клей АК-20 (ТУ 6-10-1293—72) или клеи и лаки, указанные в ЧТУ на применение ИС. ИС с планарными выводами можно монтировать как с зазорами, так и без них.

Гибридные ИС повышенной степени интеграции рекомендуется крепить с помощью указанной мастики или клея. Допускается применение клеев дугих марок, согласованных в установленном порядке. Формовку выводов ИС рекомендуется производить в соответствии с указаниями ОСТ4ГО.010.030.

В особых, технически обоснованных случаях допускается отступление от указанных рекомендаций, если соблюдаются требования соответствующих ГОСТ или ОСТ и ТУ на ИС. Однако в этом случае формовку выводов, вариант установки ИС на ПП и установочные размеры необходимо оговаривать в сборочном чертеже и согласовывать с головной организацией по применению ИС или головным технологическим предприятием соответствующего министерства или ведомства. Эти требования связаны с тем, что при неправильной формовке можно повредить проходные изоляторы у выводов ИС, нарушить герметичность корпусов, что влечет за собой выход ИС из строя вследствие коррозии токоведущих дорожек на поверхности подложки или кристалла.

Расстояние от корпуса ИС до места изгиба, т. е. до оси вывода, изогнутого под углом 90° , или до места приложения паяльника или до зеркала припоя, должны соответствовать требованиям ОТУ и ЧТУ на ИС.

При отсутствии в ГОСТ, ОСТ или ТУ указаний о расстояниях до места изгиба при односторонней гибке или до места пайки обычно принимают следующие расстояния от корпуса ИС: до оси изогнутого вывода не менее 2 мм, до места пайки не менее 2,5 мм (при толщине ПП 1 мм).

Для сохранения работоспособности ИС, расположенных на ПП с максимальной возможной плотностью, необходимо обеспечить: конвекцию или теплостоки для теплонагруженных ИС, кроме того, термо- и магниточувствительные ИС должны быть отдалены от элемен-

тов, выделяющих большое количество тепла или являющихся источниками магнитных полей, доступ к любой ИС и возможность ее замены в ремонтируемой РЭА, возможность ручной или механизированной установки ИС, их групповой пайки и покрытия влагозащитным лаком в требуемых местах, установку массивных ИС (в РЭА, работающей в условиях значительных механических воздействий) вблизи точек крепления ПП.

Если какое-нибудь из перечисленных правил не удастся соблюсти, то придется уменьшить плотность компоновки ИС на всей или части ПП.

Особенности конструирования РЭА на микросхемах и микросборках

РЭА одного и того же назначения, выполненная на ЭРЭ или на ИС и МС, по схемотехническим и конструкторско-технологическим принципам будет представлять собой различные изделия, общими у которых будут только ТТ. В лучшем случае в основу разработки РЭА на ИС и МС можно положить лишь функциональную схему аппаратуры, подлежащей микроминиатюризации, да общие идеи компоновочных схем конструкции.

Одной из главных задач разработчика и конструктора РЭА на ИС и МС является отказ от применения в конструкциях аналоговых устройств на крупногабаритных ЭРЭ. Это достигается путем прямой миниатюризации (что не всегда возможно и имеет свои пределы), либо изменением принципов преобразования сигналов и электрической схемы с таким расчетом, чтобы функции схемного узла выполняли бы только ИС. Например, аналоговый RC-интегратор заменяют цифровым, резонансный усилитель LC — широкополосным RC-усилителем с интегральным полосовым или цифровым фильтром.

Примеры характерных аналогов, имеющих примерно одинаковые функции, но построенных на различных схемотехнических принципах, следующие:

РЭА на дискретных ЭРЭ

РЭА на ИС и МС

Частотно-избирательные узлы LC-типа на дискретных ЭРЭ

Интеграторы аналогового типа
Линии задержки на дискретных ЭРЭ, ультразвуковые объемного типа («механические»)

ЗУ на ферритовых сердечниках
Аналоговые устройства автоматики на дискретных ЭРЭ

Объемные волноводы и элементы СВЧ трактов

Пленочные индуктивности, активные интегральные фильтры, пьезо- и цифровые фильтры на ИС и МС

Цифровые накопители на ИС
Интегральные линии задержки на поверхностных волнах и цифровые ИС

Полупроводниковые ЗУ на ИС и МС
Цифровые устройства автоматики на ИС

Микрополосковые линии передачи и пленочные элементы СВЧ трактов

Методы конструирования РЭА по мере развития микроэлектроники претерпевали коренные изменения. При конструировании РЭА первого и второго поколений разработчики старались использовать в схемах минимально возможное количество ЭРЭ, особенно таких, как лампы и транзисторы из-за их относительно высокой стоимости и габаритов и понижения надежности РЭА по мере увеличения количества ЭРЭ. Ввиду относительно большой массы и объема ЭРЭ увеличение их числа в РЭА первого и второго поколений быстро увеличивало общую массу и габариты.

При конструировании РЭА третьего и четвертого поколений (которую иногда называют микроэлектронной аппаратурой МЭА) сформировался иной подход к конструированию, суть которого в использовании ИС возможно большей степени интеграции. Это объясняется тем, что ЭРЭ (в том числе и активные), входящие в состав ИС, намного дешевле и меньше по размерам дискретных аналогов, что позволяет существенно повысить надежность РЭА, уменьшить массу и габариты.

Конструкции РЭА на ИС и МС можно разделить на четыре характерные группы (табл. 5.1), отличающиеся степенью интеграции и плотностью компоновки.

Компоновочные структуры первой и второй групп применяются при конструировании массовой бытовой и лабораторной РЭА, а также аппаратуры, для которой требования по габаритам и надежности не являются жесткими. Структуры третьего и четвертого типов применя-

ются при конструировании РЭА, к которой предъявляются повышенные требования к надежности и габаритам.

Исходное значение плотности компоновки для четвертой группы равно 15 см^{-2} . Анализ данных показывает, что конструкция РЭА на ИС и МС упрощается с ростом плотности компоновки. Это объясняется тем, что «сложность» из конструкции аппаратуры переходит в МУ (ММ, ИС, МС) при росте их степени интеграции. Благодаря использованию более совершенных приемов интегральной технологии снижается трудоемкость и повышается надежность аппаратуры.

Конструктивной единицей РЭА на ИС и МС является функциональная ячейка (ФЯ) с каркасом или без него. Бескаркасные ФЯ представляют собой обычные ПП или МПП и применяются в аппаратуре, к которой не предъявляются жесткие требования в отношении механической прочности. В каркасных конструкциях несущим элементом служит металлическая рамка, она же является теплоотводом. Каркасные конструкции могут иметь одностороннюю (рис. 5.6), двухстороннюю и двустороннюю компоновочные схемы. ФЯ могут включать зону расположения навесных ЭРЭ. Несущая рамка с теплоотводами 3 на рис. 5.6 выполнена из алюминиевого сплава и имеет сквозные отверстия для зон межмикросхемной коммутации и зоны выходных отверстий или контактов.

В центральной зоне рамки к ее продольным планкам-теплоотводам с помощью демпфирующего теплоот-

Таблица 5.1

Особенности конструкций РЭА 3- и 4-го поколений, выполненных на ИС и МС

Параметр	Группа РЭА			
	1	2	3	4
Степень интеграции	1...2	3...4	2...3	3...4
Плотность компоновки	0,12	0,33	0,75	1
Наличие корпуса ИС, МС	Да	Да	Нет	Нет
Наличие корпуса РЭА: с уплотнением (герметичного)	Да (Да)	Да (Да)	Нет (Да)	Нет (Да)
Объем	16	5,3	2	1
Сложность конструкции	13	4	2	1
Число слоев ПП или МПП	2; 4	4	2; 4	4

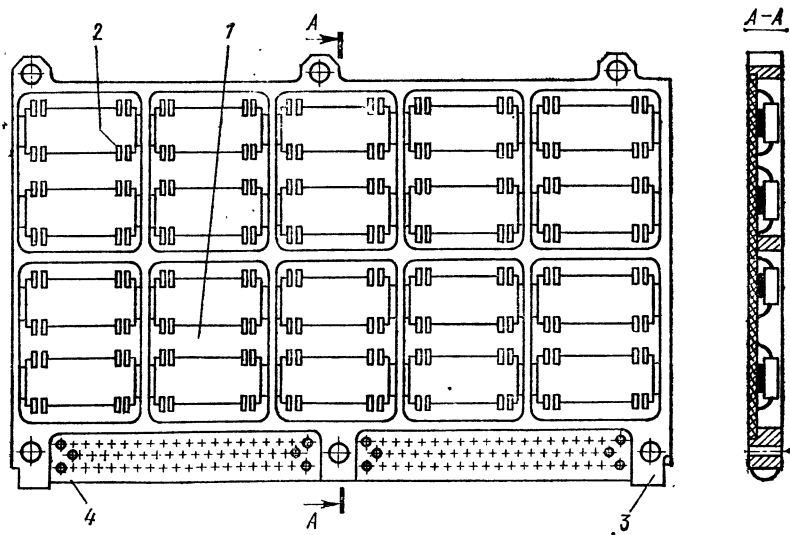
Примечания: 1. Плотность компоновки, объем и сложность конструкции даны в относительных единицах. 2. РЭА 1- и 2-й групп имеет на ПП разъем и армировку, 3-й группы — печатный разъем, 4-й группы — без разъема. 3. В качестве элементной базы в РЭА 1- и 2-й групп используются полупроводниковые или гибридные ИС, в 3-й — бескорпусные гибридные ИС, транзисторы и простейшие диодные матрицы, в 4-й — полупроводниковые или гибридные ИС и активные элементы в виде бескорпусных полупроводниковых ИС2 и ИС3 на общей теплоотводящей плате в виде своеобразной «непрерывной микросхемы».

водящего компаунда крепят бескорпусные гибридные ИС. Они выполняются на ситалловых подложках с навесными бескорпусными ЭРЭ. С противоположной по отношению к

ИС стороны к планкам-теплоотводам рамки через изолирующую прокладку с помощью клея крепится ПП. Электрическое соединение периферийных контактных площадок гиб-

Рис. 5.6. Несущая рамка — теплоотвод для ПП с ИС:

1 — ситалловая подложка, 2 — ЭРЭ, 3 — металлическая рамка, 4 — печатная плата



ридной ИС с контактными площадками ПП осуществляется с помощью золотых перемычек диаметром 30...50 мкм или золоченых медных полосок шириной 300 и толщиной 20 мкм.

В блоках аппаратуры групп 1 и 2 (табл. 5.1) ФЯ соединяются между собой по известным компоновочным схемам типа «сэндвич», «кассета» и т. п. При соединении ФЯ группы 3 и 4 оптимальной является «книжная» конструкция. До стягивания ФЯ в пакет винтом они могут разворачиваться подобно листам книги, этим достигается легкий доступ к любому элементу конструкции при контроле и ремонте. ФЯ соединяются с помощью гибкого печатного кабеля. Последовательное сложение ячеек в «книжку» образует пакет, который помещается в герметичный кожух и укрепляется в нем стяжными винтами.

Рассмотренные компоновочные схемы ФЯ и блоков являются наиболее эффективными, так как принципы их построения базируются на типовых, унифицированных элементах конструкции. Так, для ФЯ можно унифицировать габаритно-установочные размеры, шаг и размеры контактных площадок ПП, классы точности и чистоты обработки определяющих размеров и поверхностей. Типовая компоновка и монтаж ФЯ и блоков, унификация их типовых размеров, принципов размещения ИС и МС повышают их эксплуатационную надежность и взаимозаменяемость, снижают трудоемкость сборки, контроля и регулировки.

Конструкции микросборок представляют собой функционально-завершенные изделия, они могут быть

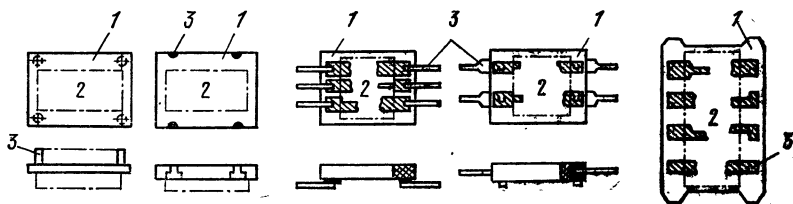
в корпусе или без него. Корпуса МС должны соответствовать ГОСТ 17467—78. Бескорпусные МС герметизируются в составе узлов и блоков, выполняются они, как правило, по гибридно-пленочной технологии с использованием активных и пассивных элементов и (или) бескорпусных полупроводниковых ИС, размещаемых на керамических или ситалловых подложках. Предпочтительные размеры подложек: 60×48, 60×24, 60×16, 48×30, 48×20, 48×15, 36×24, 30×24, 30×16, 24×20, 20×15 мм. Высота бескорпусных МС не превышает 5 мм. Размеры подложек МС, устанавливаемых в корпуса, определяются размерами монтажных площадок корпусов.

Внешними выводами бескорпусных МС могут служить проволоочки, балочки, штыри или лепестки, соединяемые с контактными площадками, металлизированными отверстиями или пазами подложек (рис. 5.7). Выводы, контактные площадки, отверстия или пазы размещаются по краям подложек в соответствии с шагом координатной сетки ПП.

Компоненты МС закрепляют на подложках клеем или пайкой с использованием методов защиты от воздействия статического электричества. Конструкция МС не должна допускать локальных перегревов элементов и компонентов, элементы и компоненты с температурными ограничениями нельзя располагать вблизи источников тепловыделений. Для повышения допустимой мощности рассеяния бескорпусные МС монтируют на теплоотводящих металлических шинах, являющихся частью

Рис. 5.7. Схемы конструкций бескорпусных МС:

1 — подложка; 2 — зона расположения компонентов МС; 3 — выводы МС



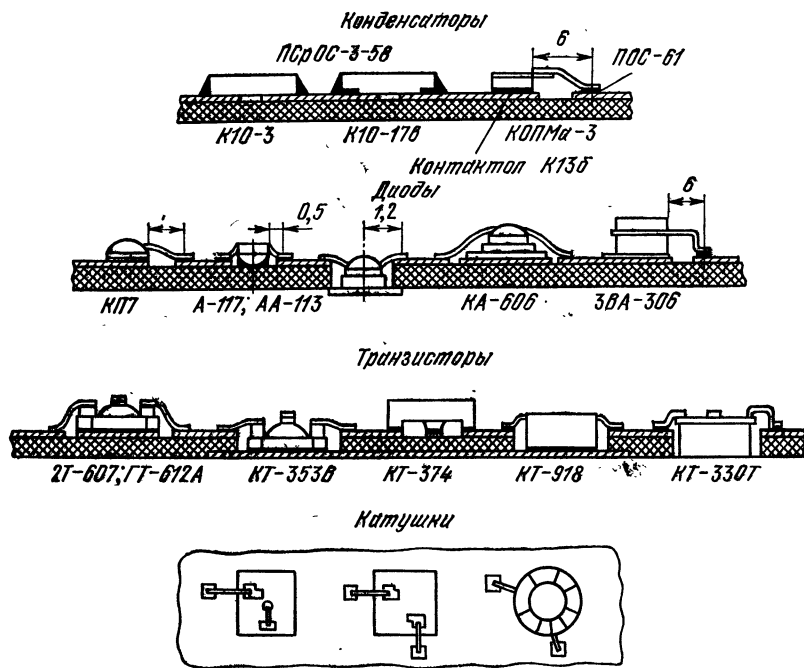


Рис. 5.8. Схемы установки монтажа компонентов МС

несущей конструкции узла, либо на тепловых трубках.

Чтобы улучшить технологичность конструкций рекомендуется применять минимальное количество типов-размеров подложек, а для соединения МС с общей ПП узла использовать плоские печатные кабели. Установка, формовка выводов и монтаж компонентов на подложке МС должны производиться в соответствии с требованиями ТУ. Пайку вести припоями ПОС-61, ПСР ОС-3-58, ПСР-3И, ПОСК-50-18, приклеивание — клеями марок ВК-9, КВК-68, Д-9. Если механическая прочность обеспечивается пайкой, клей можно не применять. На рис. 5.8 приведены примеры установки и монтажа некоторых компонентов на подложке МС. Правила конструирования МС установлены ОСТ4 ГО.010.043 «Микросборки. Установка бескорпусных элементов и микросхем. Конструирование».

Принципы создания высоконадежной аппаратуры

Применение полупроводниковых ИС высокой степени интеграции позволило резко увеличить надежность узлов и блоков РЭА, появилась возможность создавать устройства, обладающие адаптивностью по отношению к внешним эксплуатационным факторам.

Жесткие требования к стабильности электрических параметров в различных условиях эксплуатации накладывают ограничения на допустимые изменения напряжения питания, передаточные характеристики, диапазон рабочих температур. Требования высокой надежности работы РЭА при аномальных изменениях входных сигналов или нагрузки (вплоть до короткого замыкания) заставляют вводить дополнительные цепи защиты от этих воздействий.

В аппаратуре на дискретных радиоэлементах (или ИС с малой степенью интеграции) дополнительные стабилизаторы и корректирующие цепи увеличивали габариты и вес узлов, поэтому использование всякого рода защитных схем было проблематичным.

Преимущества использования бескорпусных ИС и МС позволяют по-новому решить проблемы создания РЭА высокой надежности. Схемы стабилизаторов напряжения и тока, регуляторы температуры подложки, различные корректирующие и управляющие цепи, защитные элементы можно изготавливать на том же основании ИС или МС, на котором расположена основная схема, без существенного увеличения размеров кристалла или подложки.

По зарубежным данным, придание МУ свойств адаптивности к внешним эксплуатационным факторам может уменьшить интенсивность отказов на один элемент до 10^{-11} ... 10^{-15} ч $^{-1}$.

Поэтому представляется целесообразным использовать новые возможности микроэлектронной технологии не только для разработки ИС или МС с улучшенными электрическими параметрами по отношению к выпускаемым (например, меньшая потребляемая мощность, большее быстродействие и т. д.), а создавать принципиально новый класс ИС и МС, надежность которых будет на несколько порядков выше, чем у современных. Номенклатура и области применения таких особо надежных МУ с высокой плотностью упаковки ЭЛ должны быть тщательно проработаны с целью создания стандартных МУ.

5.3. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЭА [2, 3, 4, 6, 7]*

Структура и состав РЭА

В зависимости от степени сложности ТК можно разделить на три конструктивных уровня: I — элементная база (конструктивно и тех-

нологически неделимая совокупность материалов), II — типовые компоненты (совокупность ТК I уровня и электрических и механических элементов, имеющая самостоятельное функциональное назначение), III — конструкция РЭА в целом (совокупность схемно и конструктивно-технологически законченных изделий).

Конструкции несущих элементов ТК строят по принципу входимости корпусов (модулей) одного уровня (младшего) в корпуса (модули) другого уровня (старшего) за счет сочетания условных рам, построенных в прямоугольных координатах. Внешняя граница этих рам определяется внутренними размерами рам старшего уровня, а внутренние — размерами рам младшего уровня. Поэтому можно строить новые корпуса, комбинируя условные рамы. Для частичного блока рамы, установленные с передней и задней сторон, соединяют одной или несколькими рамами *уз*. В комплектном блоке соединение осуществляют рамой *ху*. Для стойки характерна одна рама *уз*, а пульт чаще всего состоит из рам *ху* и *хз*. Некоторые стороны рам не воплощают в материале, а другие могут развиваться, превращая раму в объемную конструкцию.

Согласно принципу структурной иерархии элементы низших уровней входят в элементы верхних, в некоторых вариантах возможны переходные конструкции. При отсутствии их элементы отдельных уровней могут выпадать из структуры (табл. 5.2). Далее приводятся структуры основных ТК, которые имеют применение при проектировании РЭА (рис 5.9).

Размерная система. Размерная преемственность для несущих конструкций РЭА и ее аналогов отражена в отечественных стандартах, рекомендациях МЭК и СЭВ, нормах ведущих фирм, где даны ряды размеров и их сочетания. В основу размерной преемственности ТК корпусов РЭА в СССР положен модуль с размером 20 мм. Совместимость несущих конструкций РЭА в международном масштабе затрудняется применением модульных систем, построенных на основе размера

* Составители А. М. Плотицкий, О. Д. Струков, Р. Г. Варламов.

5.3. Типовые конструкции РЭА

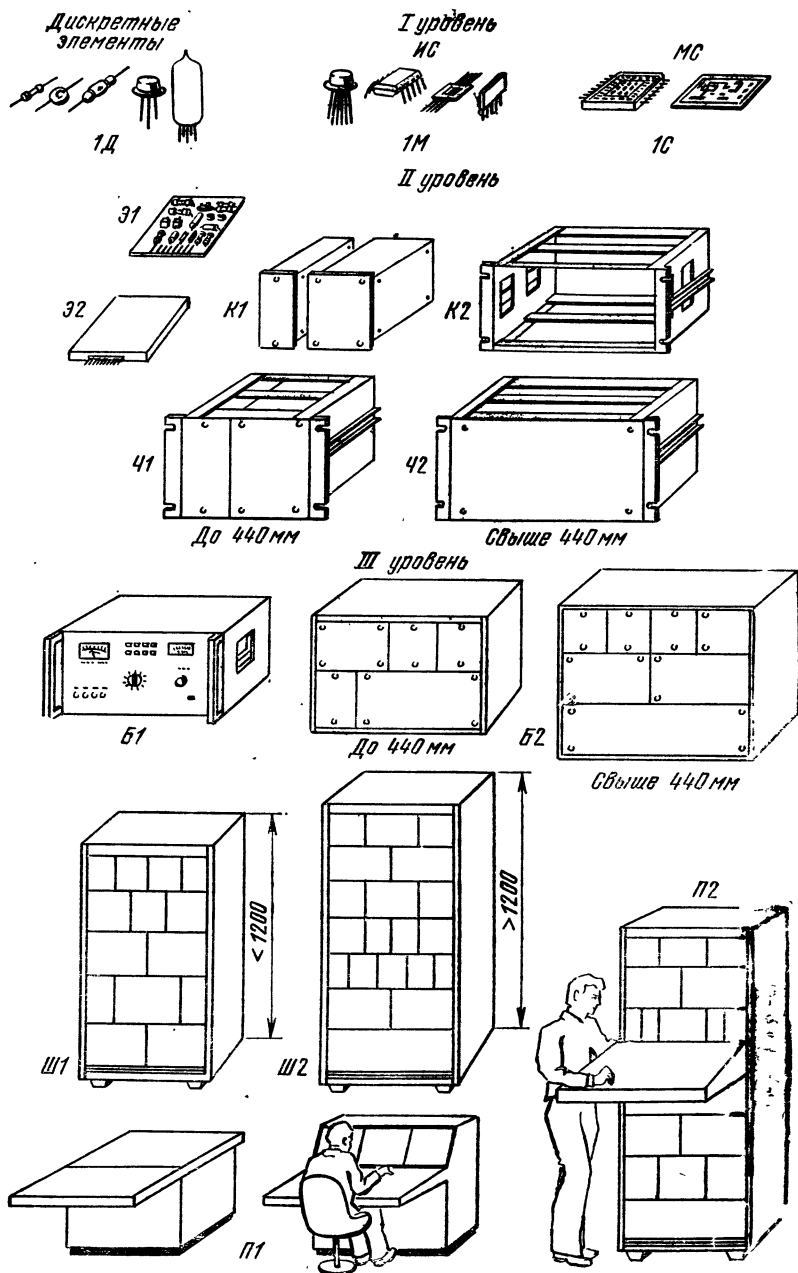


Рис. 5.9. Схематическое изображение конструкций ТК I, II и III уровней

Характер структурной иерархии ТК

Элемент ТК	Расположение направляющих	Возможное размерное развитие	Состав элемента ТК
Каркас блока частичного	Сверху и (или) снизу	По ширине лицевой панели	ПП, МПП, ТЭЗ
Каркас блока комплектного	Сбоку	По высоте лицевой панели	ПП, МПП, ТЭЗ, блоки частичные
Каркас блочный переходной	Сбоку	По высоте лицевой панели	Блоки частичные (с последующей установкой ТК в стойку и пульт)
Корпус стойки	Сбоку	По высоте стойки	Блоки комплектные и блоки частичные (в каркасах блочных переходных)
Корпус пульта	Сбоку (сверху и снизу)	По высоте и ширине пульта	То же

19" (482,6 мм), и тем, что этим размером в одних странах обозначают лицевую панель комплектного блока, а в других — его каркас. Так, например, в СССР, ГДР, ФРГ лицевые панели имеют размер 520 мм, каркасы 480 мм, что соответствует рекомендациям СЭВ, в ВНР, ПНР, ЧССР, США размеры лицевых панелей 482,6 мм, каркасов 444,4 мм (рекомендовано МЭК).

В конкретных разработках могут быть отклонения от размеров принятого модуля, так как существуют два способа назначения размеров на каркасы блоков и лицевых панелей. В первом способе номинальный размер лицевой панели выби-

рают, как правило, из ряда предпочтительных чисел. При установке в корпусе рядом двух блоков зазор между ними получается за счет допусков по системе вала. Во втором способе расстояние между блоками увеличивают введением нормированного зазора по широкоходовой посадке и уменьшают номинальный размер панели. Точность изготовления деталей при этом одинакова (рис. 5.10)

Таким образом, не удастся построить размерную основу, общую для всех ТК, а это затрудняет межведомственную кооперацию в разработках, увеличивает сроки проектирования РЭА.

Рис. 5.10. Схема полей допусков при системе вала (а) и широкоходовой посадке (б), h_0 — расчетный размер, h_1 — минимальный размер, h — номинал с полем допуска $P = H - B$

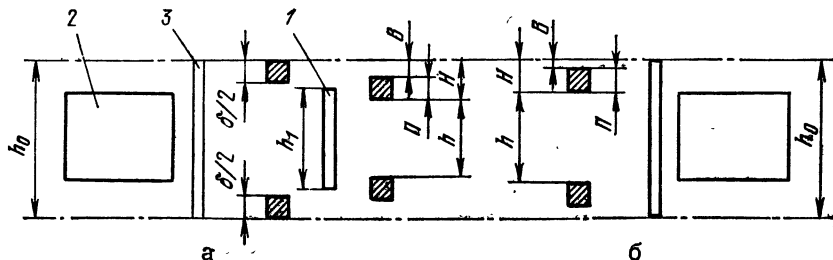


Таблица 5.3

Антропометрическая система на базе модуля 5 см

Малая функция				Основной ряд	Большая функция					
V_5^-	V_4^-	V_3^-	V_2^-		V_2^-	V_3^-	V_4^-	V_5^-	V_{5-1}	V_{5+}
75	85	100	120	170	240	300	340	380	210	550
45	55	60	75	105	150	185	210	235	130	340
30	35	40	45	65	95	115	130	145	80	210
	20	25	30	40	55	70	80	90	50	130
			20	25	35	45	50	55	30	80
				15		25	30	35	20	50
				10			20			
				5			10			

При разработке размерной системы необходимо не только соблюдать преимущество конструкции, но и найти оптимальную композицию изделия, уточнить внешний вид, выявить главные элементы композиции. В процессе разработки композиции изделие перестает быть механическим соединением модулей и приобретает законченный характер. Модульная координация размеров должна обеспечивать не только простую соизмеримость входящих в систему числовых значений, но и строиться с учетом антропометрии, устанавливающей основные стати-

ческие и динамические характеристики рабочей позы оператора в положении «сидя» и «стоя».

Антропометрическая модульная система (опирающаяся на совокупность правил координации геометрических параметров конструктивных элементов, элементов объемно-пространственной структуры изделий и самих изделий) может быть создана на базе модуля, равного 5 см (табл. 5.3), и полиметрического модуля (табл. 5.4). В табл. 5.4 горизонтальные ряды строятся на основе свойств ряда Фибоначчи, а вертикальные — по законам арифметической прогрес-

Таблица 5.4

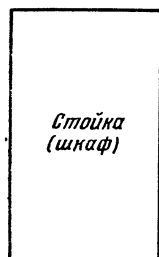
Антропометрическая система на базе полиметрического модуля

Модуль, М	Числа Фибоначчи						
	1	2	3	5	8	13	21
1/2	5	10	15	25	40	65	105
1	10	20	30	50	80	130	210
2	20	40	60	100	160	260	420
3	30	60	90	150	240	390	630
4	40	80	120	200	320	520	840
5	50	100	150	250	400	650	1050
6	60	120	180	300	480	780	1260
7	70	140	210	350	560	910	1470
8	80	160	240	400	640	1040	1680
9	90	180	270	450	720	1170	1890
10	100	200	300	500	800	1300	2100
11	110	220	330	550	880	1430	2310
12	120	240	360	600	960	1560	2520

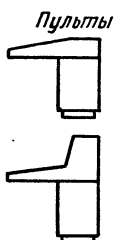
ГОСТ ГОСТ ГОСТ
12863-67; 14849-69; 20504-75

Блок
частичный 1,74...30,1; 1,74...30,1; 0,58...59,1

Блок
комплектный 22,3...99,6; 17,7...100,2...64,5



— — 274...935



— — 97,5...507

— — 386...1083

Рис. 5.11. Объемы блоков частичных, блоков комплектных, шкафов и стоек:

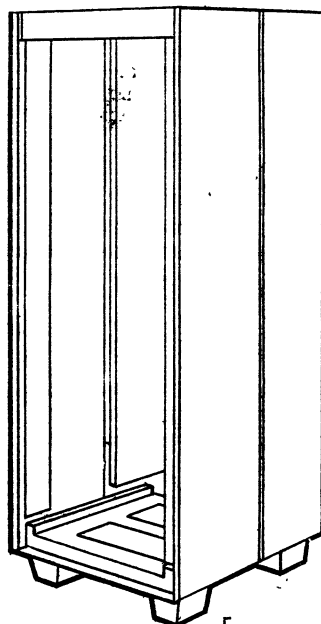
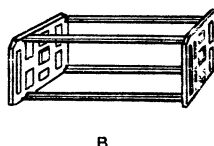
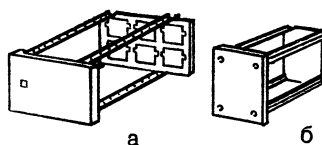
1 — ГОСТ 12863-67, 2 — ГОСТ 14847-69, 3 — ГОСТ 20504-75

сии с разностями 10, 15, 25, ... что способствует достижению соразмерности и целостности формы на единой размерной основе. Эти системы пока мало используются в практике проектирования ТК, так как (особенно первая) расходятся по номиналу модуля с принятым в практике проектирования РЭА размером 20 мм, хотя обладают эстетическими достоинствами.

Сведения по геометрии ТК и их элементам, приводимые в нормативных документах, имеют вид, неудоб-

ный для конструктора, так как не дают определяющего компоновочного параметра — объема. На рис. 5.11 даны пределы объемов (дм³) характерных компонентов ТК.

Рис. 5.12. Каркас частичного блока из листовых штампованных элементов (а) и из алюминиевых профилей (б), каркас настольного прибора из алюминиевых профилей и литых стенок (в), бескаркасная стойка из листовой стали и литого основания (г)



Конструктивно-технологическое исполнение

Для изготовления несущих элементов ТК используют листовую сталь, штампованные стальные профили, алюминиевые листы, прессованные профили и литые детали

При выборе материалов и конструкции несущего элемента ТК сле-

дует тщательно проанализировать их преимущества и недостатки, а также учесть производственные и технологические возможности предприятия-изготовителя. Основные характеристики несущих конструкций, применяемых в различного вида РЭА, приведены в табл. 5.5. На рис. 5.12 даны примеры конкретных конструкций.

Таблица 5.5

Основные характеристики несущих элементов ТК РЭА

Конструктивно-технологическое решение	Характеристика, эффективность	Недостатки	Применение
Каркас и корпус из листов стали, гнутый профиль, сварка. Бескаркасные конструкции	Высокая жесткость и прочность конструкции, точность размеров, хорошее качество поверхностей, хорошая экранировка электрических цепей и надежное заземление металлических частей, низкий удельный вес сборочных работ	Необходимость специального оборудования (гибочные прессы, сварочные агрегаты)	Крупногабаритные стойки, встраиваемые блоки, настольные приборы (мелкосерийное производство)
Каркас из алюминиевых профилей, стенки и крышки из листовой стали или листового алюминия	Высокие эстетические характеристики, простота конструкции, достаточная прочность для небольших и средних размеров конструкций, отсутствие необходимости в специальном оборудовании при изготовлении конструкций	Недостаточная жесткость больших конструкций (стоек, шкафов), большая доля сборочных работ (винтовые соединения), плохое заземление металлических частей, ненадежность соединений при транспортировке	Преимущественно настольные приборы, встраиваемые блоки (мелкосерийное и серийное производство)
Корпус из литых алюминиевых частей и алюминиевых профилей	Высокие эстетические характеристики, точность размеров, достаточная жесткость, экономичность конструкции	Плохое заземление металлических частей, необходимость специального литейного оборудования	Настольные приборы, основания стоек, вставные блоки (серийное производство)

Зарубежные типовые конструкции РЭА

В социалистических странах типовые конструкции РЭА разрабатываются, как правило, на основе рекомендаций СЭВ. В странах — членах СЭВ — реализована Международная универсальная система автоматического контроля, регулирования и управления (УРС). Наиболее полное отражение она нашла в ГДР в системе типовых конструкций Ursamat и в стандартах «Единой системы типовых конструкций EGS». В основе проектирования корпусов электронных блоков системы Ursamat лежит модуль 20 мм. Ursamat включает 16 типов конструкций, которые позволяют благодаря большому числу типоразмеров образовывать различные конструкции, от простых вставных блоков до больших стоек и пультов управления (рис. 5.13). Система EGS позволяет создавать сложные устройства путем сочетания типовых конструкций: от печатных плат до стоек и пультов.

В НРБ разработана система вставных блоков (180 разновидностей) и блочных каркасов для различной электронной аппаратуры — нормаль 016.0000 завода «Электроника».

В ВНР на типовые конструкции блочно-модульной системы существует отраслевой стандарт KG MSZ 841.101/1-5. Этот стандарт разработан на основе рекомендаций МЭК ТК 45, особенностью его является то, что за основной размер принята ширина лицевой панели, а размеры блоков по высоте и глубине изменяются по модулю 44,45 мм ($1\frac{3}{4}$ "), все размеры в дюймах. На основе этого стандарта в ВНР разработана система ТК KONTASET, включающая частичные блоки, блочные каркасы, комплектные блоки, кожухи настольных приборов, стойки, рамы, пульты. Все конструкции выполнены из алюминиевых профилей.

В ПНР разработаны единые размеры на вставные и настольные блоки РЭА (инструкция 1-04-060 завода «ЭЛПО»). Основной размер (ширина лицевой панели) — 480 мм.

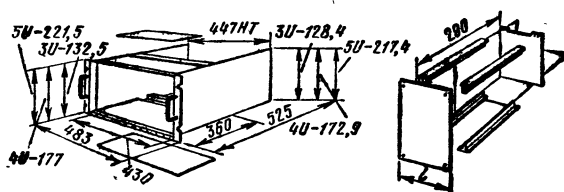
В СССР применяется отраслевая нормаль завода Тесла, в которой за

основу взята ширина лицевой панели 480 мм, размерный ряд построен на модуле 15 мм. Система ТК включает частичный блок, комплектный блок, стойку

В капиталистических странах существует множество фирменных стандартов на ТК РЭА, например, система конструкций фирмы Маркони, система конструкций RETMA (США), ELMASET (Швейцария) и др. Все размеры выражены в дюймах. Как правило, эти конструкции выполняются из алюминиевых профилей, литых элементов и штампованных из листового металла стенок. Наибольшее распространение получили системы ТК SAMAC (США — Франция — Канада) и Intermas (ФРГ). Модульный комплекс аппаратуры SAMAC (Computer Applications for Measurements and Control) предназначен для создания информационных систем с цифровой обработкой информации. Система SAMAC регламентирует способы механического и электрического соединения отдельных модулей, установленных в каркасе и блоках управления. Электрические схемы монтируют на платах с двухсторонним печатным монтажом. Платы крепят внутри металлических каркасов стандартных блоков. Минимальная ширина блока 17,2 мм, высота 221,5 мм, глубина 306 мм, высота и глубина постоянны, а ширина передней панели меняется по модулю 17,2 мм, система включает в себя девять типоразмеров. Блоки, выполняющие различные функции, устанавливаются в отсеки общего стандартного механического каркаса (крейта), внутренняя ширина которого 430 мм, высота 200 мм, глубина 360...525 мм.

Система типовых конструкций Intermas разработана фирмами AEG, Telefunken и Hartman Braun в 1970 г. С помощью системы Intermas могут быть изготовлены как отдельные функциональные блоки, так и сложные устройства путем составления наборных конструкций из элементов. Размеры элементов Intermas, определяющие систему,

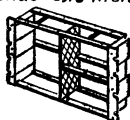
Рис. 5.13. Элементы ТК Samac (а), Intermas (б), Ursamat (в)



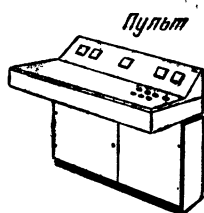
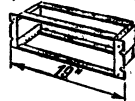
	1/25	2	3	4	5
17	17	20,5	24,4	28,6	32,8
8	8	8	10	12	
103	103	132,4	171,8	206,2	

а

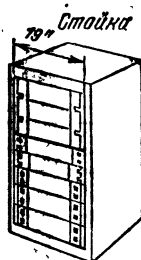
Каркас блочный „6”



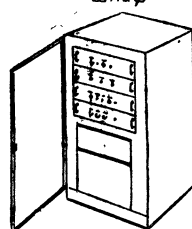
Блок частичный Каркас блочный „3”



Пульт



Стойка



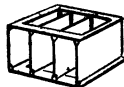
Шкаф

б

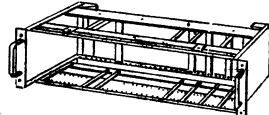
Блок частичный



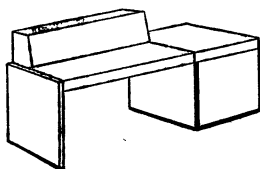
Каркас блочный



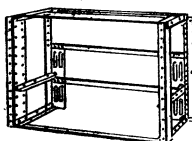
Каркас блочный (комплектный)



Пульт (для работы сидя)



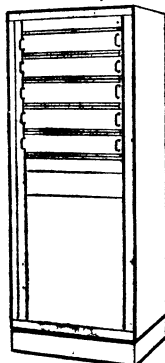
Каркас



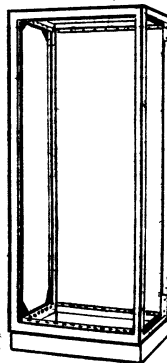
Корпус навесной



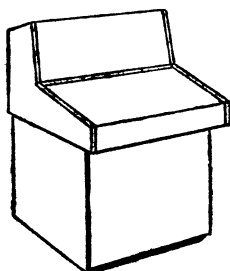
Стойка закрытая



Стойка открытая



Пульт (для работы стоя)



в

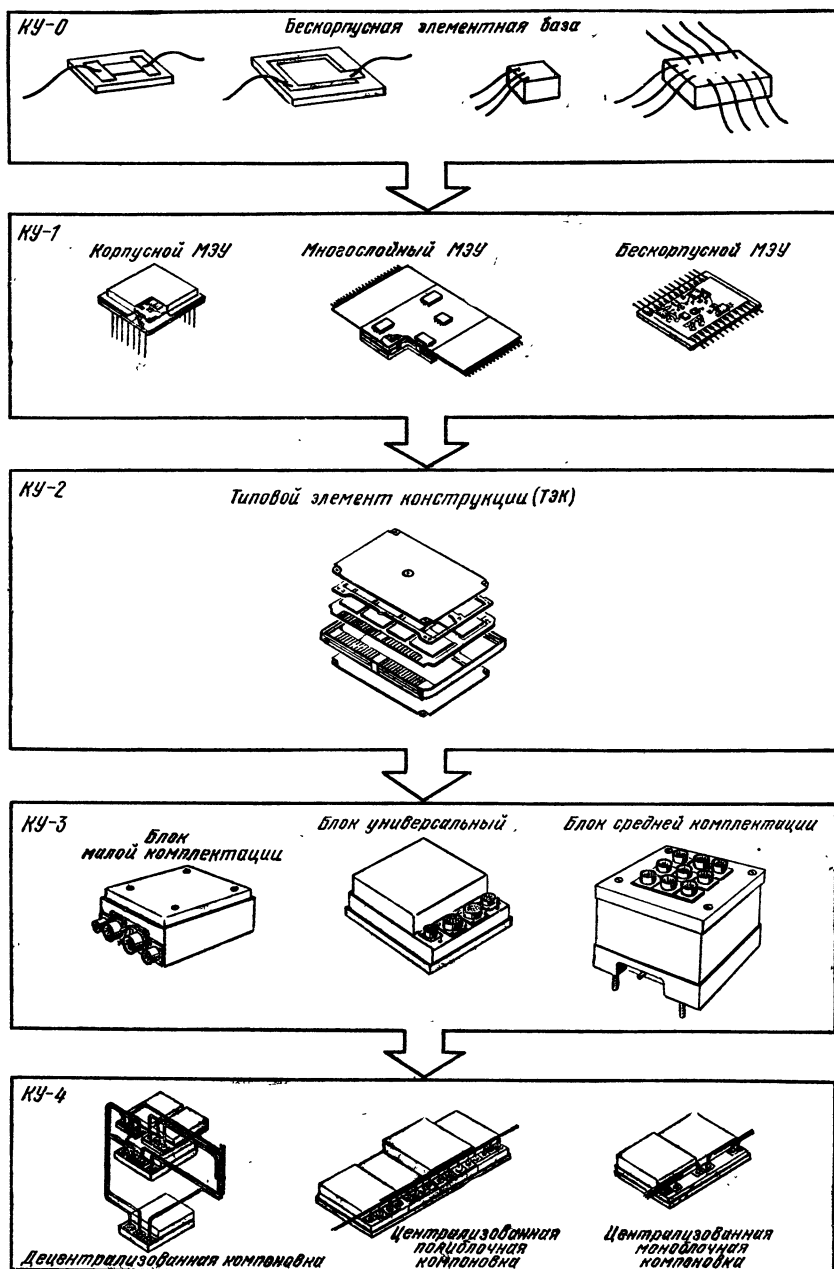


Рис. 5.14. Структура УТК-III:

бескорпусная элементная база КУ-0, корпусные, бескорпусные и многослойные МЭУ КУ-1, типовые элементы конструкции ТЭК КУ-2, блоки универсальные, малой и средней комплектации КУ-3 и РЭА из них с децентрализованной и централизованной (поли- и моноблочной) компоновкой КУ-4

соответствуют принятым национальным нормам и международным рекомендациям по конструированию электронных устройств, благодаря этому можно использовать приборы стандартных размеров других изготовителей. В основу всех размеров конструкций Interma положены размеры 44,45 мм (разграничение панелей по высоте) и 19" (482,6 мм) — ширина лицевой панели. Последняя может быть набрана из отдельных вставных блоков, шаг которых по ширине $n \times 5,08$ мм ($10 < n < 81$). Вставные блоки устанавливаются в комплектные шасси размеров «3» и «6» (в один и два этажа), а шасси с блоками — в настольные кожухи, стойки, пульта. На всех уровнях конструкций предусмотрена коммутация электрических сигналов через разъемные контактные соединения. Система Interma позволяет составлять электронные устройства любой сложности при высоких конструктивно-технологических и эстетических характеристиках. Известные системы других фирм близки системам Interma и САМАС, поэтому в настоящем справочнике они не рассматриваются.

5.4. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ РЭА*

Стандартизация конструкций РЭА, развитие модульной техники, ограничение рядов типоразмеров компонентов конструкций, ориентация на современные методы конструирования, достижения микроэлектроники и прогрессивные технологические процессы позволили создать единую конструктивную базу РЭА — комплекс УТК, совместимый с автоматизированными методами проектирования и изготовления РЭА.

Комплекс УТК в зависимости от условий эксплуатации и конструктивно-технологических особенностей РЭА, в которой применяются эти конструкции, можно подразделить на следующие три класса:

— УТК-I — стационарная РЭА, предназначенная для работы в ота-

пливаемых и неотапливаемых помещениях (категории 3 и 4 по ГОСТ 15150—69),

— УТК-II — стационарная, полустационарная и подвижная РЭА, работающая на открытом воздухе, во временных помещениях и укрытиях, палатках, на колесном и гусеничном транспорте (категории 1 и 2 по ГОСТ 15150—69 и 4 и 6 по ГОСТ 16019—78),

— УТК-III — РЭА на ИС и МС, устанавливаемая на подвижных объектах в труднодоступных местах и работающая на ходу в жестких условиях эксплуатации. Таким образом, каждый класс УТК предназначен для РЭА, работающей в одинаковых или сходных условиях эксплуатации.

Состав комплекса УТК

Комплекс УТК построен по иерархическому принципу и включает компоненты пяти конструктивных уровней (рис. 5.14; 5.15);

— КУ-0: бескорпусные активные и пассивные микрэлементы в виде полупроводниковых транзисторов, диодов, диодных матриц, интегральных схем различной степени интеграции, пленочных резисторов и конденсаторов (табл. 5.6),

— КУ-1: корпусные резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы, ИС широкого применения, реле, элементы сигнализации и индикации, гибридные ИС частного применения, МУ средней и большой степени интеграции,

— КУ-2: унифицированные печатные платы для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-I, и УТК-II, ТЭК для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-III,

— КУ-3: частичные вставные блоки, комплектные блоки, блочные каркасы для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-I и УТК-II, и несущие конструкции малогабаритных блоков для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-III,

— КУ-4: несущие конструкции стоек, шкафов, пультов управления, распределительных щитов, приборных корпусов для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-I и УТК-II, и несущие конструкции агрегатированных систем и подсистем малогабарит-

* Составители Н. Г. Одинцов, Ю. В. Киселев, А. С. Калакин, А. Н. Фролов

Бескорпусная элементная база

Тип элемента	Размеры кристалла $l \times b \times h$	Монтажная площадь, мм ²	Выводы
Интегральные микросхемы			
Серия 129	$1,7 \times 1,2 \times 0,8$	5,3	6-П
Серия 703	$1,8 \times 1,8 \times 0,8$	3,24	14-Ш
Серия 734	$1,8 \times 1,8 \times 0,8$	13,8	14-П
Серия 739	$1,45 \times 1,45 \times 0,8$	2,25	8-Ш
Серия 740	$1,55 \times 1,55 \times 0,8$	11,7	8-П
Серия 756	$1,6 \times 1,6 \times 0,8$	2,56	14-Ш
Серия 775	$1,5 \times 1,5 \times 0,8$	2,25	8-Ш
Транзисторы			
2Т202	$1 \times 1 \times 0,8$	3,3	3-П
2Т307	$0,75 \times 0,75 \times 0,8$	2,5	3-П
2Т317	$1 \times 1 \times 0,8$	2,8	3-П
2Т377	$2 \times 2 \times 0,8$	11,3	3-П
2Т381	$1 \times 1 \times 0,8$	2,8	3-П
2П201	$1,2 \times 1,2 \times 0,8$	4,8	3-П
Диоды и диодные матрицы			
2Д901	$1,2 \times 1,2 \times 0,8$	4,8	3-П
2Д907	$1 \times 1 \times 0,8$	7,4	4-П
2Д917	$1 \times 1 \times 0,8$	7,4	4-П
Конденсаторы			
КТП-1	$2,2 \times 2,2 \times 0,6$	9,7	2-П
КТП-2	$3,5 \times 3,5 \times 0,6$	20,2	2-П
Резисторы			
РТП	$1 \times 2 \times 0,6$	4,3	2-П

Примечание Цифры обозначают число выводов, буквы — конструкцию: П — проволочные, Ш — шариковые.

ной и микроминиатюрной РЭА; разрабатываемой на базе УТК-III.

Каждый уровень объединяет конструкции одинаковой сложности, причем компоненты высших КУ включают в себя сочетания компонентов низших КУ. Границы раздела между КУ — КС01; КС12; КС23; КС34 являются «конструктивными сечениями», по которым обеспечивается электрическая и механическая стыковка компонентов смежных КУ.

Классы УТК-I и УТК-II имеют единую номенклатуру и общее конструктивное исполнение компонентов 1-, 2-, 3-КУ, что обеспечивает преемственность и взаимозаменяемость конструкций на уровне пе-

чатного узла и частичного блока (рис. 5.15).

Структура и состав УТК-III отличаются от УТК-I и УТК-II широким применением бескорпусной элементной базы (микроминиатюризация и надежность), т. е. введением нулевого КУ.

Разделение комплекса. УТК на пять конструктивных уровней вместо трех обусловлено необходимостью выделить ряд компонентов в самостоятельные группы, что не противоречит общепринятому в Справочнике подходу, так как нулевой и первый уровни представляют первый уровень конструкций РЭА, второй и третий уровни УТК — компоненты вто-

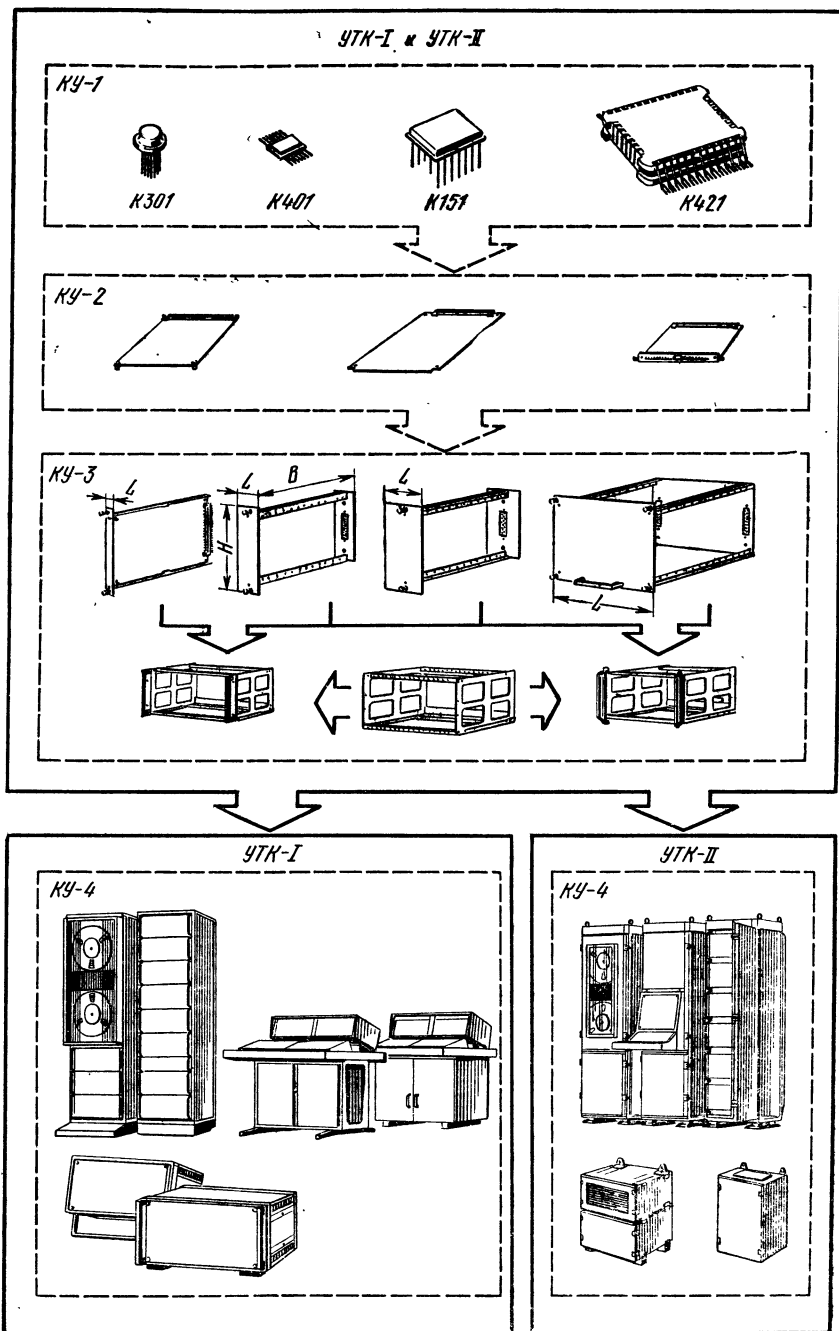


Рис. 5.15. Структура УТК-I и УТК-II

рого общепринятого уровня, а компоненты четвертого уровня УТК являются одновременно компонентами третьего уровня конструкции РЭА

Конструкция и размеры компонентов УТК-I и УТК-II

Основными конструкционными компонентами УТК-I и УТК-II являются четыре унифицированные ПП трех типоразмеров (рис. 5.16): 140×150 , 160×220 , 160×280 . ПП 140×150 и МПП 140×150 мм предназначены для «кассетной» компоновки блоков комплекса и являются конструктивным эквивалентом ТЭЗ ЕС ЭВМ, что обеспечивает конструктивную совместимость комплекса с единой конструктивной базой, разработанной для ЕС ЭВМ, ПП 160×220 предназначены для «книжной» компоновки блоков комплекса, а ПП 160×280 — для установки в частичный блок.

Размеры ПП выбраны по ГОСТ 10317—72 и определены типоразмерами частичных вставных блоков комплекса УТК.

ПП в зависимости от типа корпуса и количества устанавливаемых ИС имеют несколько вариантов топологии печатного поля верхнего слоя платы (рис. 5.17). Варианты 1, 2, 3 предназначены для установки и коммутации соответственно 30, 54, 48 ИС в корпусе типа К401.14.

Вариант 4 — для установки 36 ИС в корпусе типа К151.15, вариант 5 — для установки 10 ИС в корпусе К151.15 и 25 ИС в корпусе К401.14, вариант 6 — для установки 40 ИС в корпусе К402.16.

Двухслойные ПП изготавливаются из фольгированного диэлектрика, марки которого регламентированы соответствующими ГОСТ и ОСТ. МПП 140×150 изготавливаются по методу сквозной металлизации из травящихся фольгированных электроизоляционных материалов и содержат 4...8 печатных слоев.

ПП 140×150 , МПП 140×150 , ПП 160×280 , предназначенные для «кассетной» компоновки блоков, имеют стандартный выходной разъем типа ГРПМ-1 на 60 или 90 контактов. ПП 160×220 , предназначенная для «книжной» компоновки частичных

блоков, имеет систему выходных контактов для подсоединения внутриблочного жгутового монтажа или плоского кабеля (рис. 5.18)

Плоские ленточные кабели марок ЛФ и ЛФЭ ТУ16-505, 682—74 работоспособны после воздействия на них солевого тумана, бензина, керосина и масел, работоспособны при температуре $\vartheta = -60 \dots +200^\circ \text{C}$, влажности 98% (при $\vartheta 35^\circ \text{C}$), вибрации с частотой $1 \dots 2000$ Гц и ускорением до 200 м/с^2 ($\sim 20 \text{ g}$), линейных перегрузках 250 м/с^2 ($\sim 25 \text{ g}$) и ударах с $t_{\text{и}} 1 \dots 3 \text{ мс}$ и ускорением 1500 м/с^2 ($\sim 150 \text{ g}$). Число жил в кабеле ЛФ: 4, 7, 10, 14, 19, 24 и 32, сечения проводов, 0,03, 0,05, 0,08, 0,12, 0,2, 0,35, 0,5 мм^2 . У кабеля ЛФЭ (экранированного) число жил 4, 7, 10, 14, 19, 32 сечением 0,08, 0,12 и 0,2 мм^2 .

Кабели на основе дублированных пленок работоспособны в пределах следующих норм: влажность 98% при $\vartheta 35^\circ \text{C}$, частота вибрации $1 \dots 5000$ Гц с ускорением до 30 g , линейные перегрузки до 500 g , удары с $t_{\text{и}} 1 \dots 3 \text{ мс}$ и ускорением 150 g при $U_{\text{исп}} \approx 500 \text{ В}$. Рабочая температура кабелей с лавсаном-полиэтиленом ПЭТФ + ПЭ $\Delta \vartheta = -60 \dots +85^\circ \text{C}$, с полиимид-фторопластом — $90 \dots +200^\circ \text{C}$. Число жил в этих кабелях 2, 5, 10, 20, 32 и 50 при сечениях 0,03, 0,05, 0,08; 0,12, 0,2 и 0,35 мм^2 . Ширина одной жилы 0,5, 0,6 при шаге укладки 1,25 мм и толщине 0,21...0,26 мм. При ширине 1 мм соответственно 2,5 и 0,24...0,28 мм.

В конструкциях компонентов КУ-3 и КУ-4 для УТК-I и УТК-II применены стандартные алюминиевые профили (рис. 5.19), детали, выполненные литьем под давлением из алюминиевого сплава АЛ-9, профилированные штампованные детали из листового алюминиевого сплава АМЦ, клеевинтовые соединения на основе клея К-400. Это обеспечивает высокую технологичность конструкций комплекса, минимальную трудоемкость на сборочных операциях.

Номенклатура частичных блоков охватывает 59 типоразмеров (рис. 5.20). Блоки типа 1,4 предназначены для размещения ИС и корпусных ЭРЭ. Основные элементы конструкции блоков: ПП 160×280 , передняя панель, направляющие.

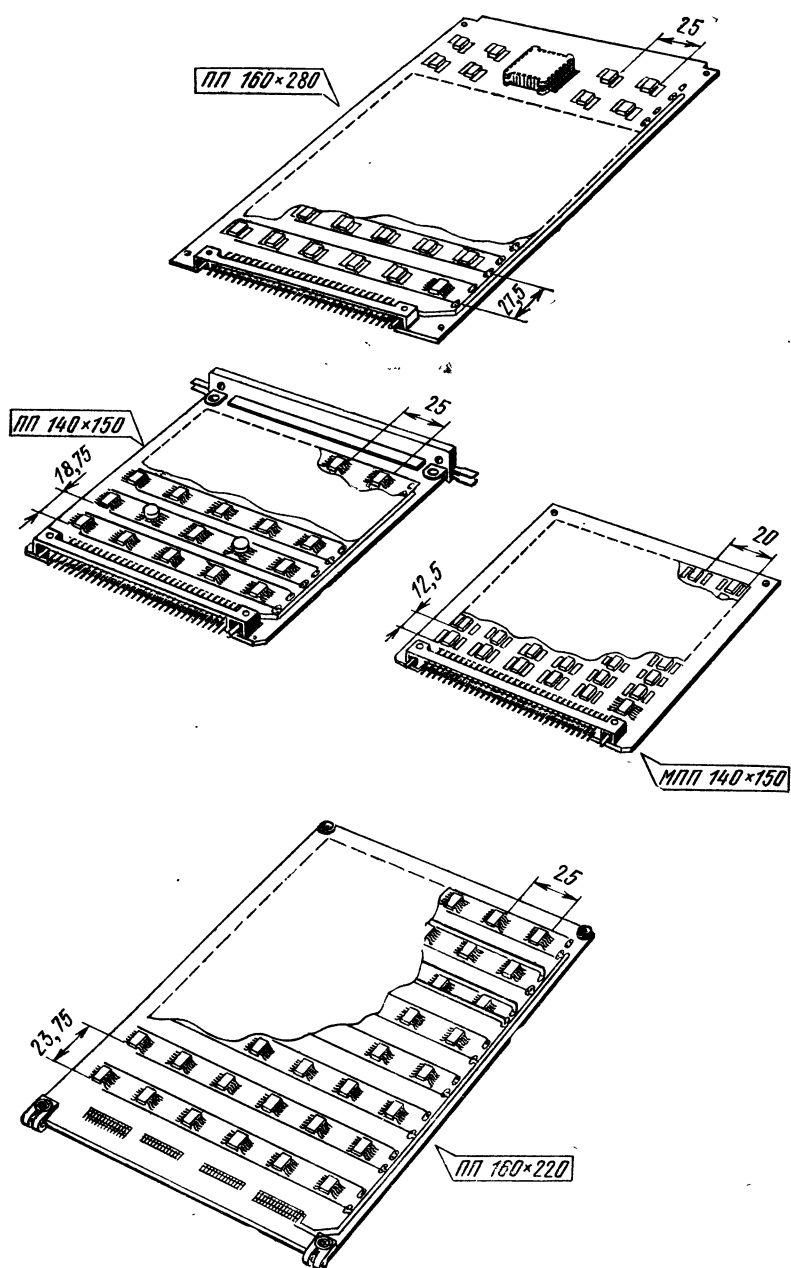


Рис. 5.16. Унифицированные ПП для УТК-I и УТК-II

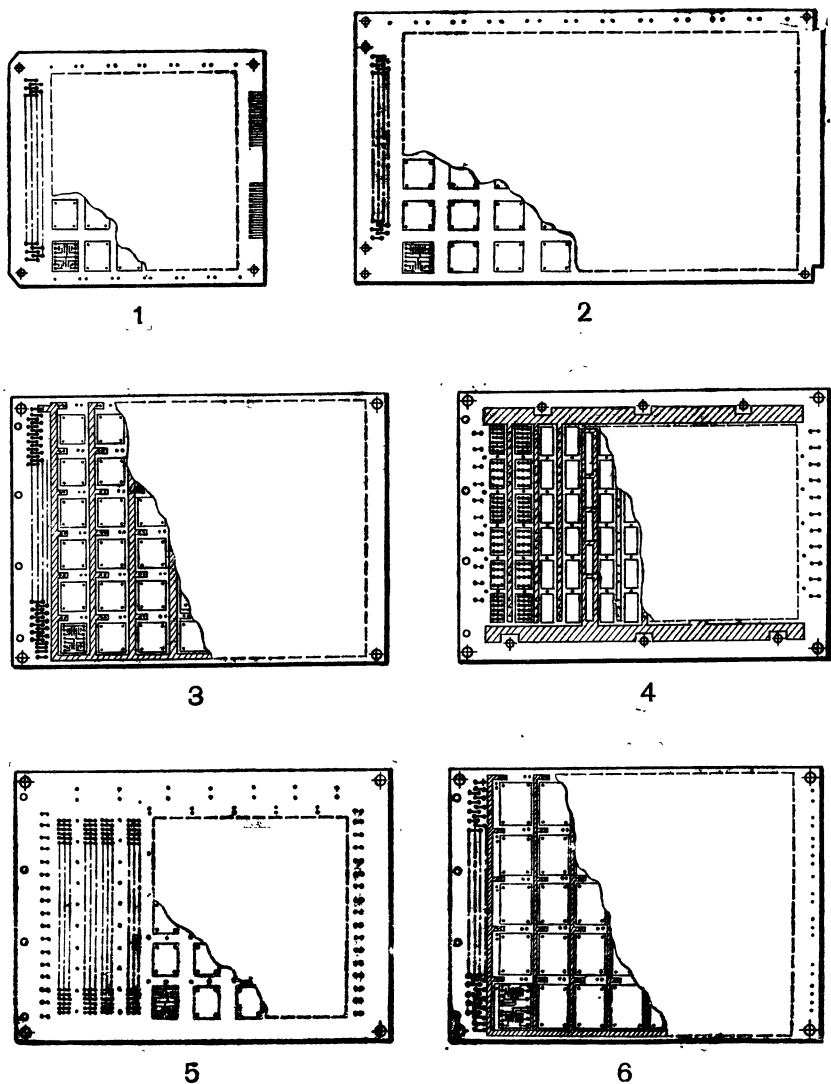


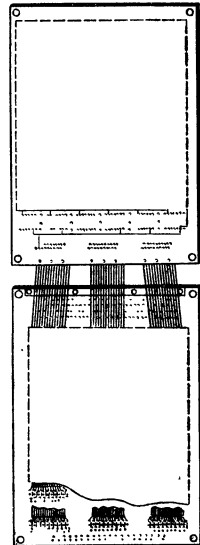
Рис. 5.17. Варианты (1...6) топологии верхнего слоя унифицированных ППА

Типы и параметры плоских кабелей

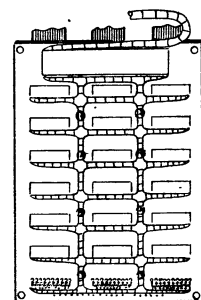
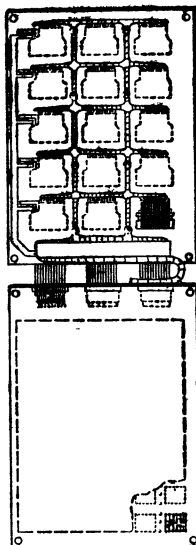
Плоские ленточные кабелы

Марка машины	Число драйвлов в коробке	Скорость пробег, км/ч	Рабочая температура двигателя, °C	Относительная влажность, %	Выработка, г/ч	Масса-выработка, г/г
ЛФ	4, 7; 10; 16	0,03; 0,05	- 60... - 20	98	1, 2000 г/ч с сж. воз. 2,09 г/ч	с сж. воз. 2,09 г/г
	19; 24; 32	0,08; 0,12; 0,16			2, 2000 г/ч с сж. воз. 2,09 г/ч	с сж. воз. 2,09 г/г
ЛФ-3	14; 19; 32	0,10; 0,20	- 30... - 10	—	—	—

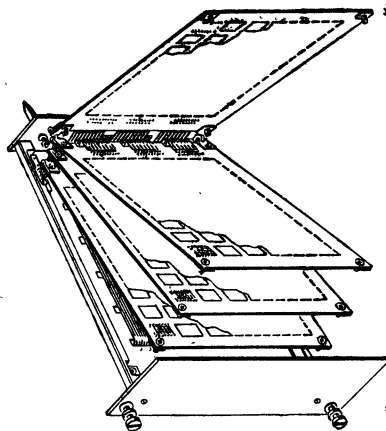
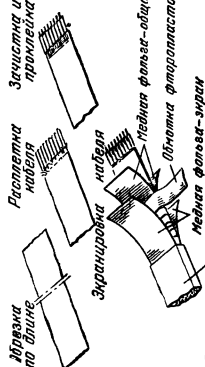
Надбела дф а лфз вьдържуват вгзг. солетого туманц, бьгзину, неросина, мьса

[illegible]

Кабелл на основе дублцированных пленок



Подготовка ленточных кабелей к монтажу



Производство пленочных камер и монтажу

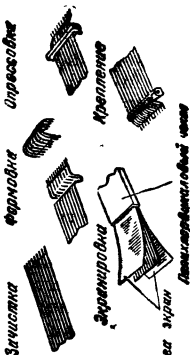


Рис. 1.8. Вариант «книжной» компоновки блока с ПП 160×220 мм в плоских кабелях

Блок типа 7 предназначен для «книжной» компоновки ПП 160×220 , блок типа 8, с шириной передней панели $L = 200$ мм — для «кассетной» компоновки ПП 140×150 и МПП 140×150 . Блоки типа 3, 5, 6 рассчитаны для установки объемных функциональных узлов, крупногабаритных ЭРЭ, электромеханических устройств и элементов питания.

В блоках типов 2, 3 основными несущими элементами являются литые алюминиевые рамки, в блоках типа 4...8 — детали из стандартного алюминиевого профиля ПС 885-800 (при $L = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160$) и ПС 885-798 (при $L = 200, 240, 320, 400$). Блоки типов 2, 3, 5, 6, 7, 8 имеют передние и задние панели, выполненные штамповкой из листового алюминия, детали технической фиксации блока. На задней панели находятся стандартные разъемы типа ГРПМ-2 на 60, 90 или 120 контактов. На перед-

ние панели блоков вынесены органы управления, регулировки, индикации, контроля и т. п.

Основным несущим элементом комплектных блоков (рис. 5.21) являются литые рамы, к которым крепятся передняя и задняя панели. Блок укомплектован съемными боковыми, верхней и нижней крышками, выполненными штамповкой из листового алюминия. На задней панели блока имеются разъемы типа ШР и 2РМД.

В комплектных блоках размещают крупногабаритные блоки питания, электромеханические и индикаторные устройства. Блоки имеют одно конструктивное исполнение (только для УТК-I).

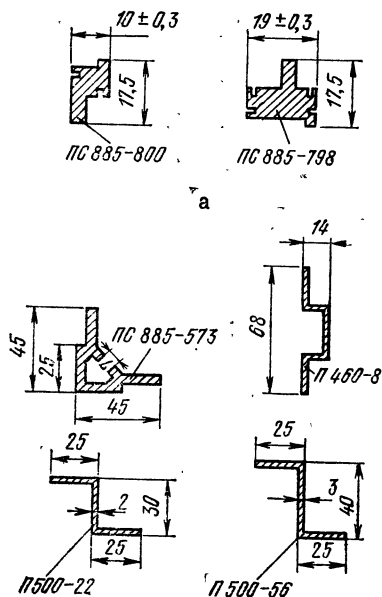
На рис. 5.21 изображены блочные каркасы комплекса УТК, промежуточные конструктивные компоненты, служащие для объединения частичных вставных блоков в субблоки. Они представляют самостоятельные технологические единицы, собираемые и монтируемые независимо от остальных конструктивных компонентов РЭА. Блочные каркасы комплекса УТК выполняются в двух конструктивных вариантах (для УТК-I и УТК-II).

Несущим элементом блочного каркаса служит базовый каркас, основными элементами которого являются стяжки из стандартного профиля и штампованные из листового алюминия боковины. Конструктивные варианты блочного каркаса отличаются только устанавливаемой на базовый каркас арматурой (ручки, кронштейны под разъемы, элементы фиксации и закрепления). Электрические соединения между частичными блоками в блочных каркасах выполняются либо объемным монтажом, либо с помощью коммутационной МПП.

На рис. 5.22 показаны конструкции стоек различного назначения, предназначенные для РЭА, разрабатываемой на базе УТК-I и УТК-II соответственно. Стойки УТК подразделяются на открытые (тип I) и закрытые, или шкафы (тип II) (рис. 5.23).

Конструкцию стоек образуют базовый каркас из стандартных алюминиевых профилей и набор элементов различного назначения: щиты,

Рис. 5.19. Профили для шасси частичных блоков (а) и для каркасов стоек (б)



основания, дверцы, панели для разъемов, направляющие, электроэлементы, шины питания, детали установки и фиксации различных устройств (например, лентопротяжных механизмов и графопостроителей) и т. п.

Базовый каркас стойки выполняется в двух вариантах, в зависимости от того, на какой основе (УТК-I или УТК-II) разрабатывается РЭА. Каркасы отличаются размерами (для УТК-II ограничением являются размеры объекта, стандартные люки и проемы, через которые транспортируются стойки) и конструкцией узлового соединения профилей, что обусловлено более высокими требованиями к жесткости каркаса для стоек УТК-II.

Для разработки быстродействующих цифровых устройств РЭА в комплект конструктивных элементов стоек включены: блок-панели (взамен блочных каркасов), рамы, специальная монтажная и крепежная арматура. Использование этих элементов позволяет производить рамную компоновку РЭА на базе стойки для УТК-I, при этом в стойке размещаются две подвижные рамы (рис. 5.24). На рамах устанавливается по 3—4 блок-панели, в каждой из которых можно разместить до 40 ПП 140×150 , или МПП 140×150 , или ТЭЗ ЕС ЭВМ. Рамная конструкция стойки обеспечивает совместимость комплекса УТК с единой конструктивной базой ЕС ЭВМ на уровне стойки, максимальную плотность компоновки РЭА на всех КУ, минимальную длину электрических связей в объеме одного или нескольких функциональных блоков.

Для реализации устройств специального назначения — магнитных и графических регистраторов, пультов УТК-II — имеется номенклатура специальных конструктивных элементов (рамы, кронштейны, двери специальной формы, поворотные и запирающие механизмы, фиксаторы) (рис. 5.25).

Конструкции стоек всех типов позволяют применять в них как индивидуальную (в виде автономного блока), так и централизованную приточно-вытяжную вентиляцию. Для приточно-вытяжной вентиляции в стойках предусмотрены воз-

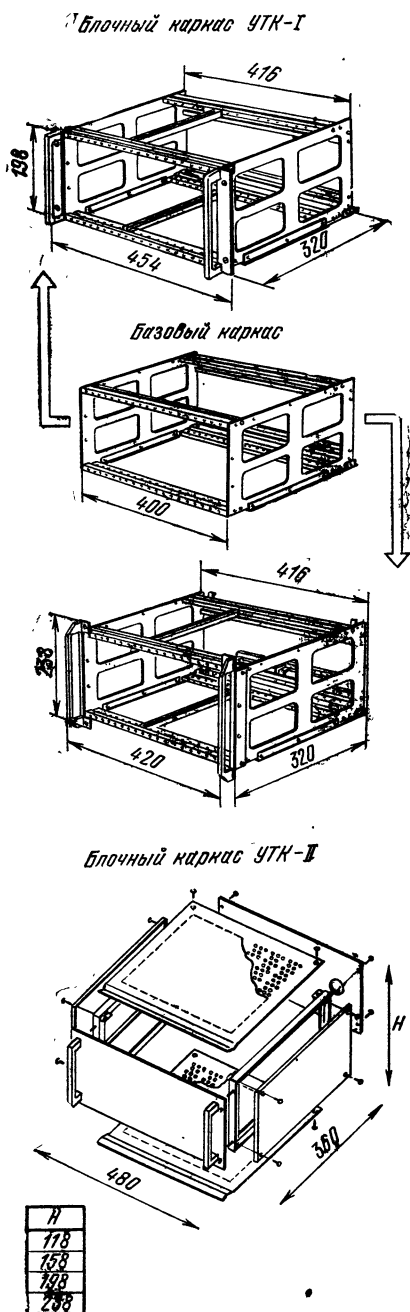
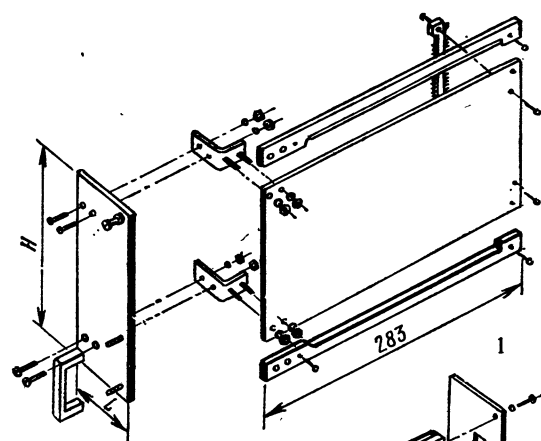
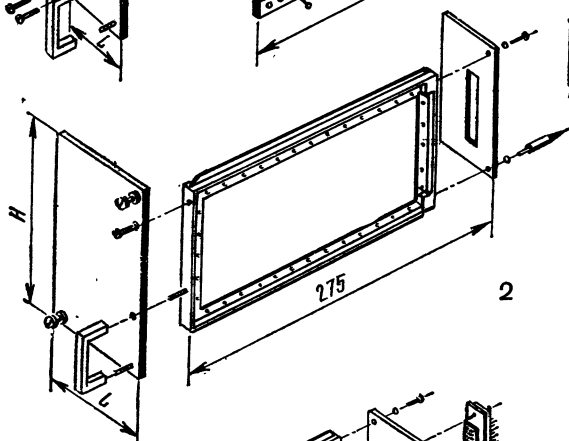


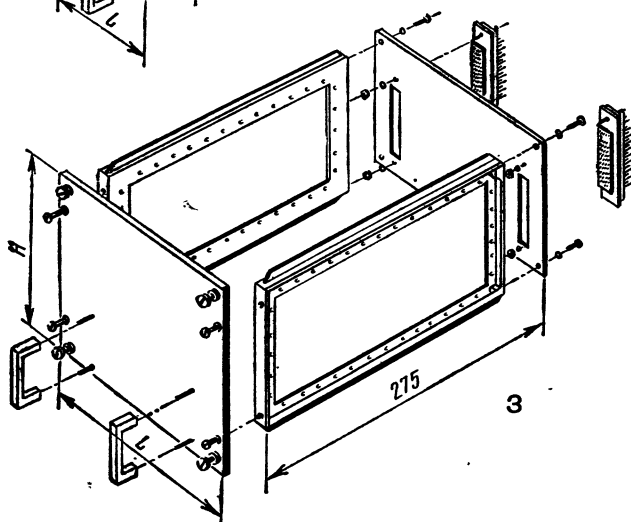
Рис. 5.21. Схема конструкций блочных каркасов и комплектный блок УТК (внизу)



H	L
158	40
198	60
238	



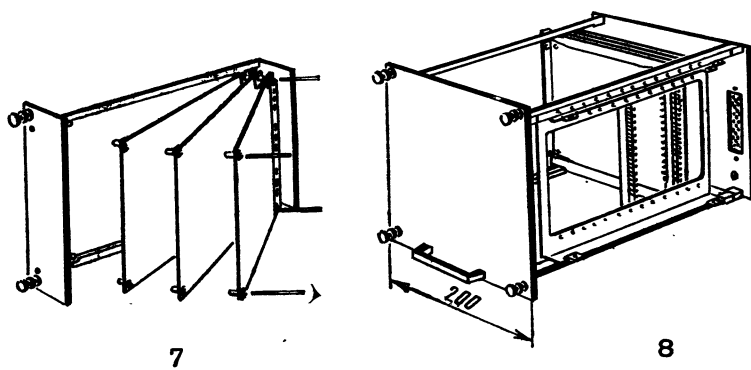
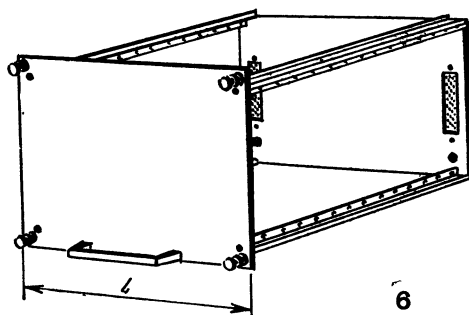
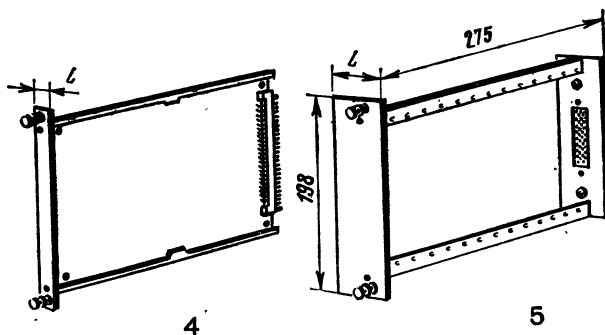
H	L
	40
158	60
198	80
	100
238	120



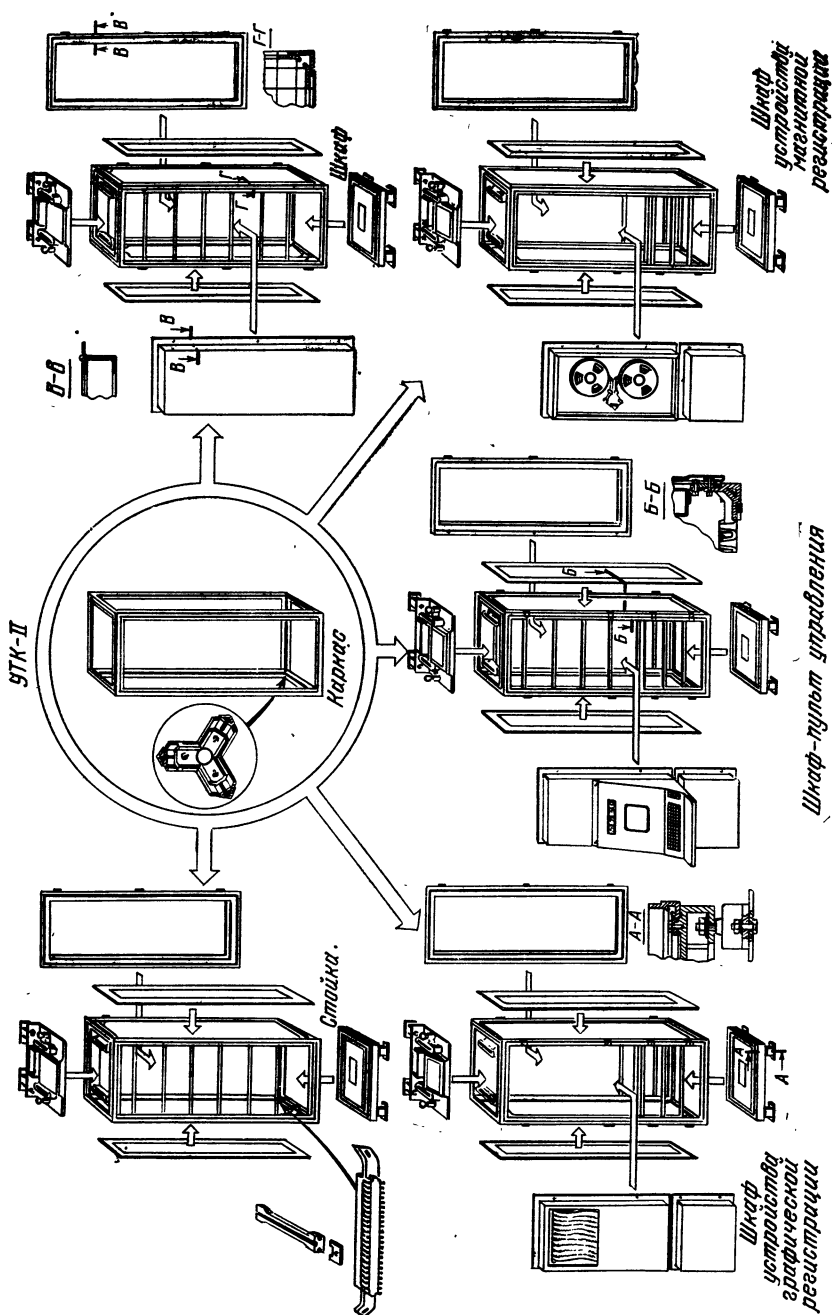
H	L
158	80
198	100
238	120
	160
	200
	240
	320
	400
	480

Рис. 3.29. Схема конструкций частичных блоков УТК

5.4. Универсальные типовые конструкции РЭА



L	20	40	60	80	100	120	160	200	240	320	400
-----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



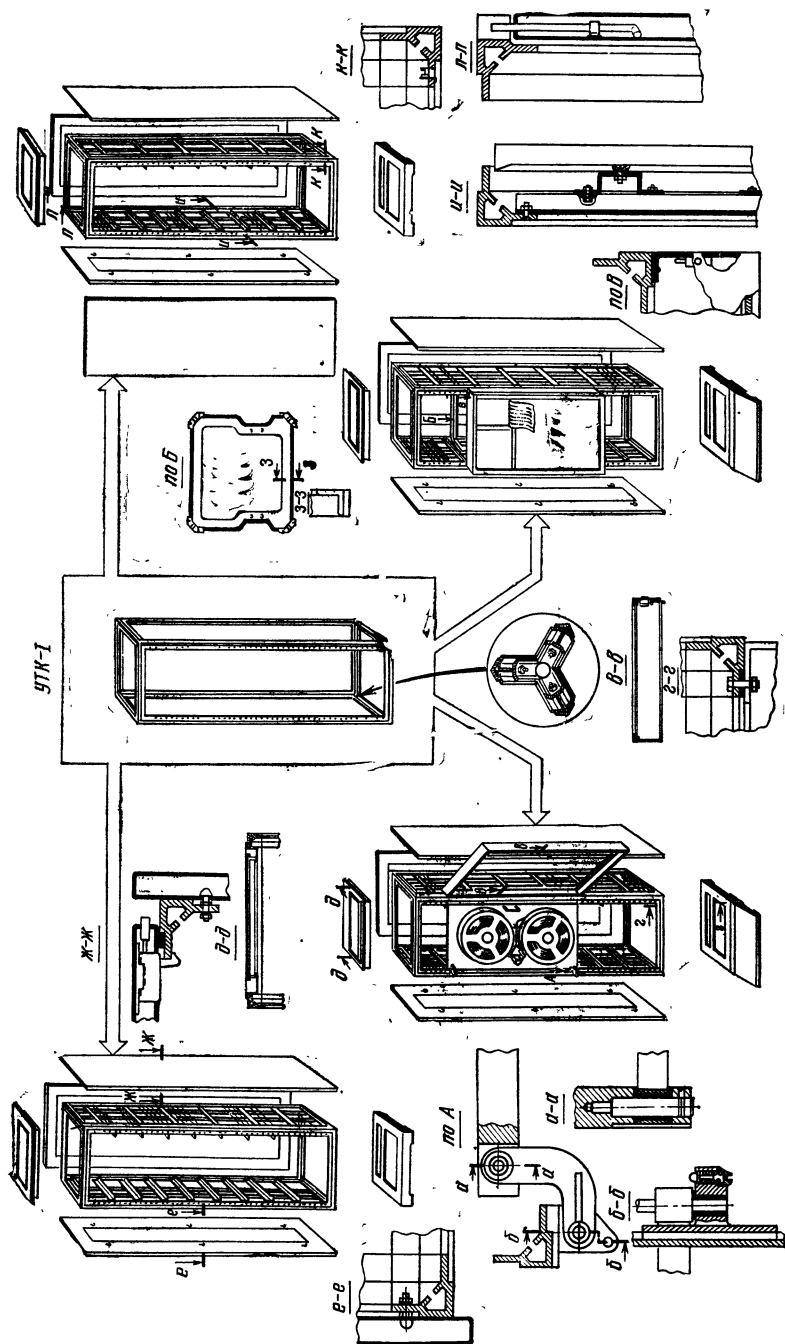


Рис. 5.22. Схема конструкций стоек УТК

духоводы с каналами входа и выхода

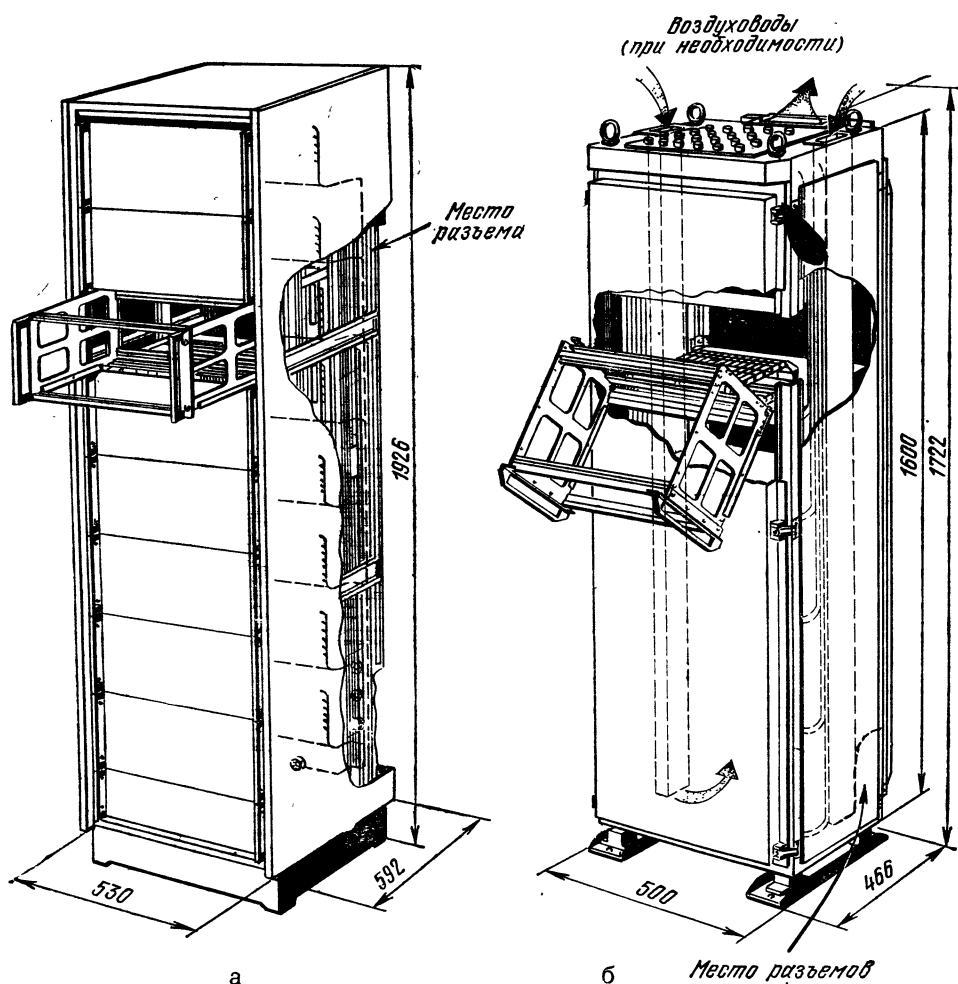
Следующей группой компонентов КУ-4 УТК-I и УТК-II являются приборные корпуса различной конструкции.

Приборные корпуса УТК-I (рис. 5.26) комплектуются частичными вставными блоками непосредственно или через блочный каркас и комплектными блоками. Они могут быть выполнены в виде настольной и переносной конструкции. Ос-

новными конструктивными элементами настольных корпусов являются передняя и задняя литые рамки, стяжки из стандартного алюминиевого профиля, быстросъемные боковые щиты и крышки из листового алюминия. Переносные корпуса имеют переднюю литую рамку с обечайкой и штампованные крышки.

Кроме основных конструктивных элементов, корпуса комплектуются широкой номенклатурой установочных, крепящих и фиксирую-

Рис. 5.23. Схема конструкции стойки открытого (а) и закрытого (б) исполнения



щих деталей (ручки, замки, кронштейны, опоры и т. д.).

Электрические разъемы устанавливаются на специальных кронштейнах и панелях на задней стороне корпуса. Откидывающаяся ручка у переносных корпусов позволяет устанавливать корпус наклонно к плоскости опоры.

Приборные корпуса УТК-II (рис. 5.27) предназначены для размещения частичных блоков или блочных каркасов, а также специальных устройств индикации и контроля. Основными элементами приборных корпусов являются литые (верхнее и нижнее) основания, боковины из специального профиля, передняя (отрывающаяся) и задняя (неподвижная) крышки, арматура крепления и фиксации, влагозащитные уплотнения.

На задней крышке или сбоку устанавливаются разъемы электрического входа — выхода непосредственно или через переходной элемент. Конструкции приборных корпусов УТК-II обеспечивают возможность агрегатирования их в стойки.

Одной из конструктивных разновидностей приборных корпусов УТК-II являются настенные щиты (рис. 5.28) для размещения специальных распределительных и коммутационных устройств.

Относительно самостоятельную группу компонентов КУ-4 УТК-I составляют конструкции пультов, которые предназначены для построения устройств оперативного управления радиоэлектронными системами, отображения получаемой в системах информации, контроля режимов работы и оперативного обнаружения неисправностей в системах. Это компоненты УТК, которые находятся в непосредственном контакте с человеком, что обусловило специфику их конструктивного исполнения и соотношения между размерами отдельных конструктивных элементов.

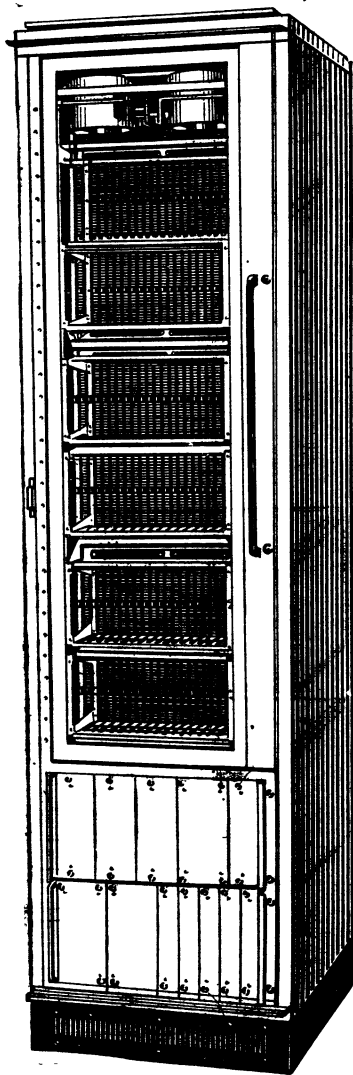
Конструкции пультов (рис. 5.29) построены по модульному принципу, что обеспечивает гибкость и преемственность при построении различных устройств и систем управления и отображения информации.

Основные модули пультов — панели, корпуса, основания, крышки,

рамы. Сочетания конструктивных модулей позволяют получить множество модификаций. Так, пульта могут быть одно-, двух- и трехсекционными, с тумбами и без них (облегченными), с приборными отсеками и панелями управления и без них.

Частные и общие конструктивные решения, используемые в конструк-

Рис. 5.24. Схема конструкции стойки с ТЭЗ ЕС ЭВМ



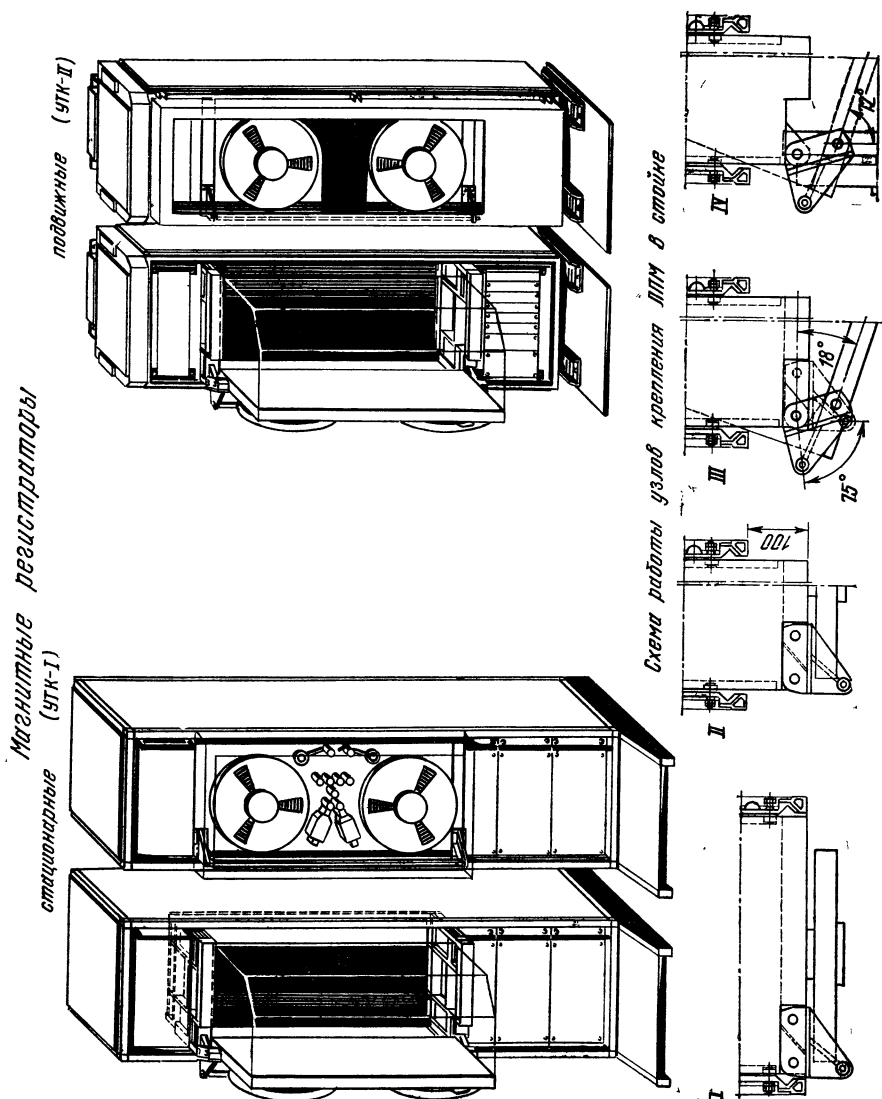


Рис. 5.25. Схема конструкций стоек для магнитных и графических регистраторов

5.4. Универсальные типовые конструкции Р9А

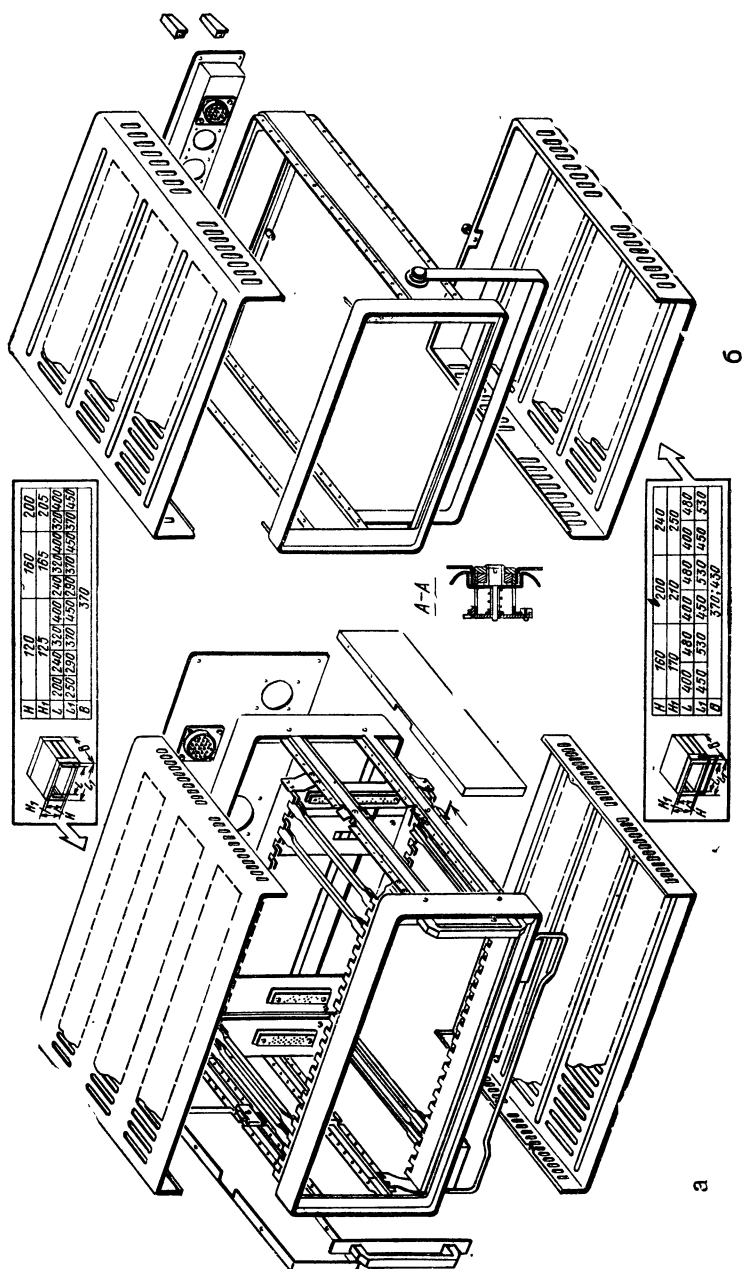


Рис. 5.26. Схема конструкций настольного (а) и переносного (б) приборных корпусов

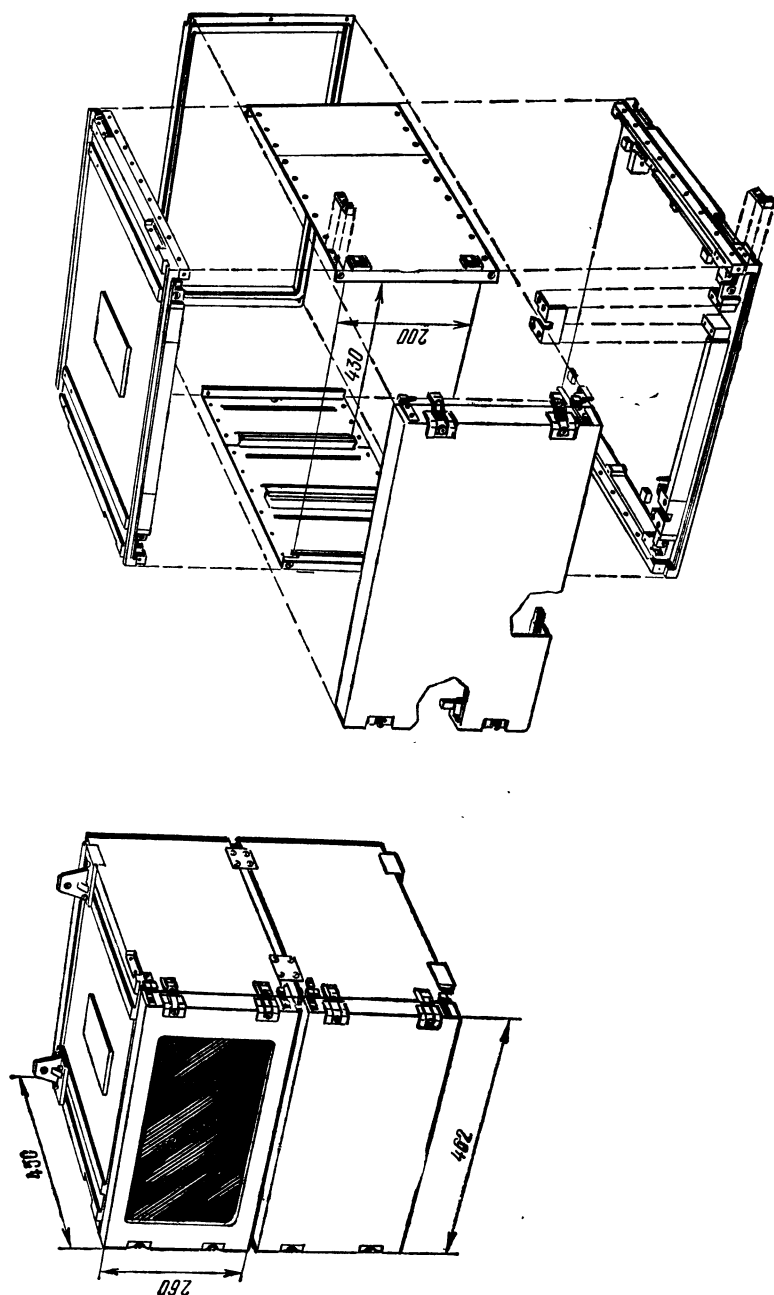


Рис. 5.27. Схема конструкции приборных корпусов ВТК-11

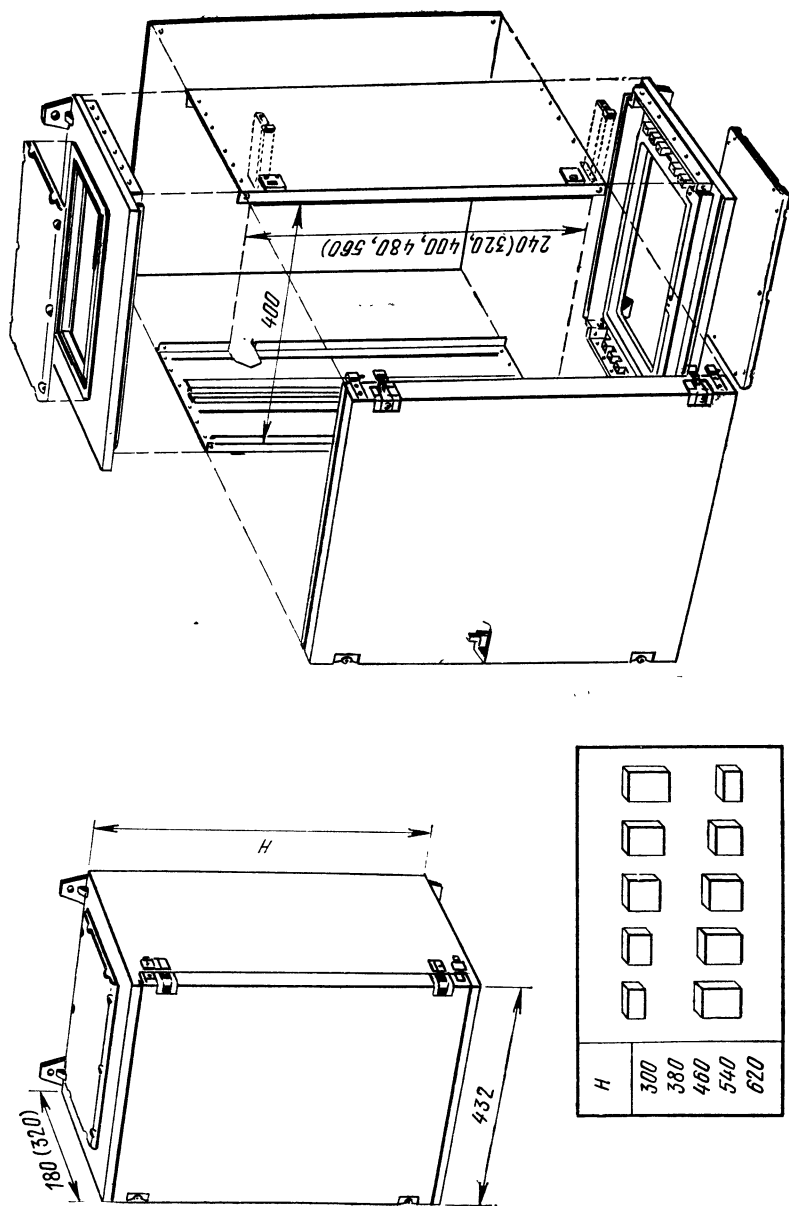


Рис. 5.28. Схема конструкции приборных корпусов для распределительных и коммутационных устройств

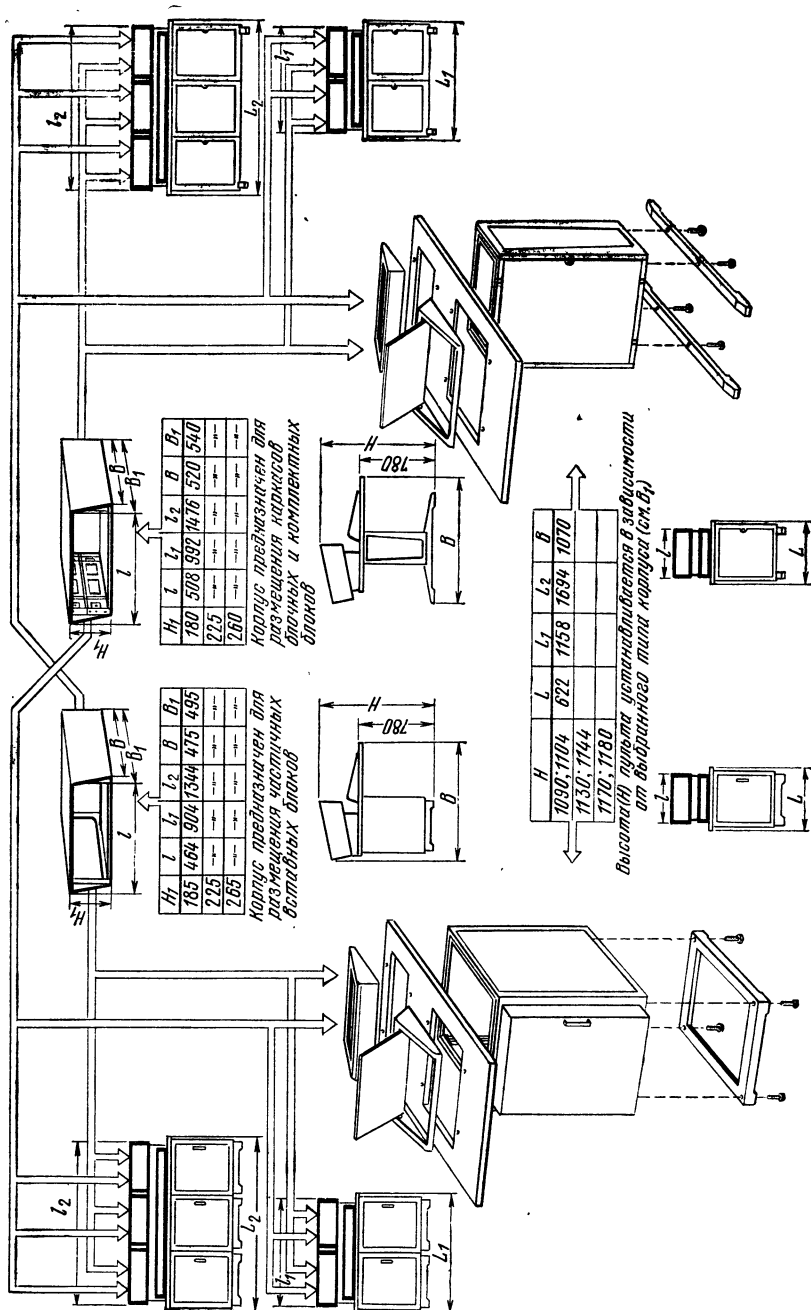


Рис. 5.29. Схема конструкции пультов с использованием частичных вставных блоков, «блочных» каркасов и комплектных блоков

циях основных модулей, заимствованы из конструкций стоек приборов, блочных каркасов УТК-I.

Конструкция тумбы является одним из типоразмеров (наименьшим) стойки УТК-I. Несущие каркасы секций бестумбового варианта выполнены из того же набора стандартных профилей, что и каркасы стоек, и имеют те же элементы и технологические приемы стыковки профилей.

Кроме основных конструктивных модулей, в конструкциях пультов применена широкая номенклатура несущих, установочных, фиксирующих и направляющих элементов, заимствованных из конструкций других компонентов УТК-I. Пульты управления, стойки и приборные корпуса komponуются единой номенклатурой ПП и частичных блоков, что обеспечивает преемственность и взаимозаменяемость в разрабатываемой на основе УТК-I и УТК-II РЭА по всем компонентам КУ-4.

Для защиты компонентов КУ-4 УТК-II от влаги применяют резиновые уплотнители и специальные прижимные замки, а для защиты от механических воздействий — переходные конструктивные элементы, позволяющие устанавливать компоненты на амортизаторах типа АКСС.

Электрические соединения КУ-4 УТК-I и УТК-II обеспечиваются разъемами типа ШР, СШР и 2РМД. В устройствах СВЧ применяются стандартные ВЧ разъемные соединения.

Конструкция и размеры компонентов УТК-III

Универсальные типовые конструкции III конструктивного уровня отличаются от УТК-I и УТК-II составом компонентов, элементной базой, технологическими методами изготовления компонентов конструкций, требованиями, предъявляемыми к малогабаритной РЭА на ИС, и условиями ее эксплуатации.

Основными компонентами УТК-III являются микросистемные узлы, изготовленные по гибридно-пленочной интегральной технологии корпусного, бескорпусного однослой-

ного и многослойного типов. (КУ-1, рис. 5.14).

Основным несущим элементом МУ является плата, представляющая собой подложку из вакуумплотного материала (ситалл, стекло, «поликор», сапфир) с сформированными на ней методом фотолитографии пассивными функциональными элементами схемы (резисторами, проводниками, контактными площадками) и защитным слоем. На ней устанавливают бескорпусные активные и пассивные элементы (см. табл. 5.6).

Корпусные МУ предназначены для применения в негерметизированной малогабаритной аппаратуре. Для защиты от внешних воздействий подложки с элементами заключают в металлические корпуса типов 252МС15-1 (подложка 15×8 мм) и 253МС15-1 (подложка 15×16 мм), имеющие 15 выводов (один корпусной). Выводы (кроме корпусного) расположены с шагом 2,5 мм. Плотность компоновки элементов 10 см^{-2} . Подложка с навесными элементами приклеивается к основанию корпуса клеем ВК-9. Выходные контактные площадки и выводы корпуса соединяются перемычками из золотой проволоки диаметром 0,05 мм. Герметизация осуществляется электронно-лучевой (вакуум в корпусе около 133 мкПа (10^{-6} мм рт. ст.)) или конденсаторной (заполнение корпуса сухим азотом или гелием) сваркой.

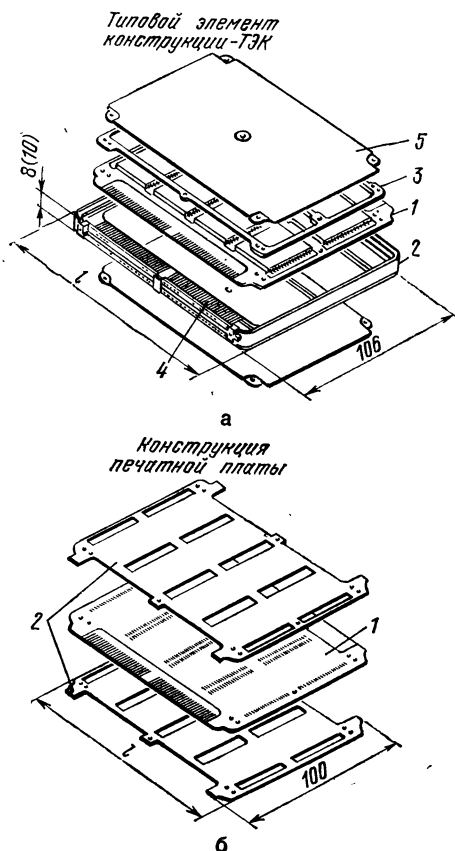
Положительным качеством корпусных МУ является то, что их можно применять в негерметизированной РЭА, а корпус служит дополнительным экраном. МУ допускают автоматизацию монтажно-сборочных работ, имеют большой срок хранения. К недостаткам корпусных МУ можно отнести низкую степень интеграции, неремонтопригодность, малое число выходов.

Бескорпусные МУ применяют в герметизированной РЭА на ИС. Конструкция МУ представляет собой однослойную плату — подложку (30×12 , 30×16 , 30×24) с напыленными резисторами и навесными активными и пассивными элементами, 44 выходные контактные площадки с шагом 1,25 мм расположены вдоль двух сторон платы (по 22 на каждой стороне). Электрические соединения между МУ и ПП выпол-

няются контактной сваркой (термокомпрессией или расщепленным электродом) с помощью перемычек из золотой проволоки $\varnothing 0,05$ мм. Плотность компоновки 100 см^{-2} .

Основные преимущества бескорпусных МУ перед корпусными: высокая степень интеграции, ремонтпригодность, низкая себестоимость; большое число выходов; недостатки: небольшой допустимый срок хранения, невозможность экранировки каждого МУ, сложность автоматизации монтажно-сборочных работ. Бескорпусные многослойные МУ предназначены для работы в герметизированной малогабаритной РЭА, размеры их такие же, как и однослойных.

Рис. 5.30. Схема конструкции ТЭК (а) и печатной платы (б)



На подложке формируется первый слой коммутации, резисторы малой точности, резисторы с повышенной мощностью рассеивания. Второй и третий коммутационные слои наносятся напылением на полиимидную пленку ПМФ-351. На втором слое формируются контактные площадки для электрических переходов между первым и вторым коммутационными слоями и стандартная система выводов МУ. Электрический контакт между первым и вторым слоями осуществляется через гальванически выращенные столбики на проводниках полиимидной пленки (второй слой), а между вторым и третьим — через переходные металлизированные отверстия, получаемые одновременно с коммутацией.

На третьем слое создаются контактные площадки для подсоединения бескорпусных полупроводниковых активных элементов и пассивной «мозаики». Коммутация, контактные площадки и межслойные переходы покрыты оловянно-висмутовым припоем. Между подложкой и полиимидной пленкой с коммутационными слоями помещается перфорированная изоляционная прокладка с клеевым слоем толщиной $0,05$ мм. Перфорация осуществляется в местах формирования электрических переходов с первого на второй коммутационный слой. Полиимидная пленка, изоляционная прокладка и ПП собираются в пакет, который под давлением нагревается до температуры плавления сплава олово-висмут, благодаря чему получается монолитная многослойная структура с межслойными переходами. Плотность компоновки элементов 200 см^{-2} .

Бескорпусные многослойные МУ обладают повышенной степенью интеграции, позволяют автоматизировать процесс разработки топологии, при изготовлении МУ не применяется дорогостоящее золотое покрытие, отсутствуют навесные перемычки, стандартная система выводов обеспечивает групповую пайку при установке МУ на печатную плату. Недостатком таких МУ является то, что они требуют большого объема КД, специализированного технологического оборудования, кроме того, у них нельзя ремонтировать внутренние слои.

Таблица 5.7

Параметры ПП ТЭК при односторонней компоновке

Типоразмер	l, мм	S _{общ.} , см ²	S _{монт.} , см ²	S _{арр.} , см ²	S _{вых.} , см ²	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N _{вых}
I	65	65	44	4,4	5,8	4	4	6	18	20	37
II	95	95	65	9	9,8	6	8	10	30	33	59
III	120	120	82	12	13	8	10	12	42	45	74
IV	150	150	103	15,6	14,5	10	12	16	54	57	98

Примечания: 1. N₁, N₂ и N₃ — максимальное число бескорпусных компонентов на подложках размеров 30×24, 30×16, 30×12 мм. 2. N₄ — максимальное число ИС в корпусе 101.СТ14-1, N₅ — в корпусе типа «Посол». 3. N_{вых} — максимальное число выходных контактов.

Унифицированной основой, определяющей типоразмеры компонентов КУ-3 УТК-III, являются ТЭК. Основными элементами ТЭК являются печатная плата 1 (рис. 5.30, а), несущая рамка-основание 2, рамка-вкладыш 3, колодка монтажная 4, крышка-экран 5. При необходимости применяют дополнительные теплоотводы 2 для платы 1 (рис. 5.30, б). Конструктивно-компоновочные характеристики ТЭК даны в табл. 5.7.

Способ изготовления МПП — электрохимический со сквозной металлизацией отверстий. Внешние слои МПП являются опорными для компонентов и выполняют функции несущей основы, теплоотвода, заземляемой шины. МПП изготавливаются из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 0,5 мм и имеют окна в местах электрических соединений компонентов с контактными площадками платы.

Применение в качестве клеящей основы для внешних слоев демпфирующих материалов типа специального клея КВК-68 или мастики ИКЛ-60 обеспечивает защиту от механических воздействий.

Монтажная плата крепится клеем типа ВК-9 в несущей рамке-осно-

вании, которая изготавливается из алюминиевого сплава АЛ-2 методом литья под давлением и имеет фиксирующие элементы, обеспечивающие жесткость конструкции ТЭК и их фиксацию относительно друг друга при сборке в блоке.

Монтажные колодки из АГ-4В обеспечивают электрические соединения ПП и являются дополнительными конструктивными элементами системы монтажа блока. Их линейные размеры и число контактов унифицированы. Шаг между контактами 1,25 мм.

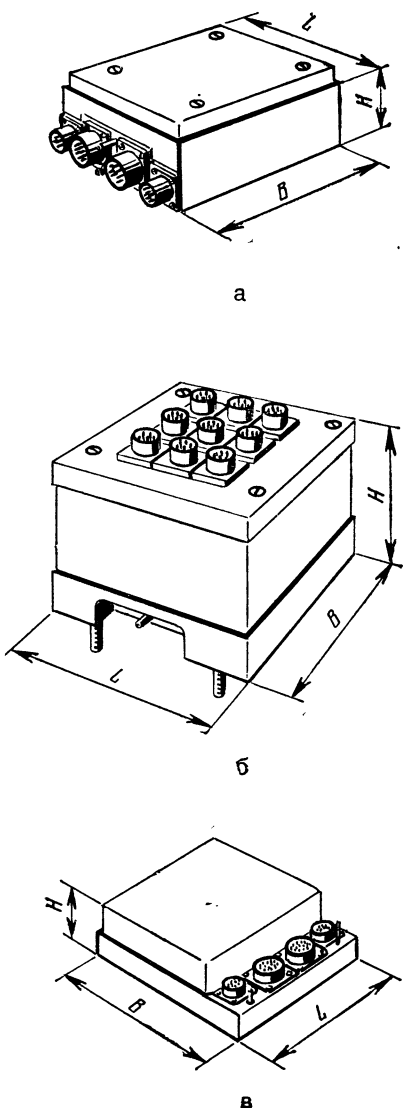
Для создания в РЭА на ИС единой системы заземления внешние слои ПП имеют электрические соединения электропроводным клеем с несущей рамкой и с общей заземляемой шиной ПП, выходящей на крайние контакты монтажных колодок.

Для защиты бескорпусных МУ от световых, электрических и механических воздействий в процессе изготовления применяются штампованные из листового алюминия АМЦ крышки-экраны.

ТЭК устанавливаются в компоненты КУ-3 УТК-III: корпуса блоков малогабаритной РЭА.

Блоки УТК-III подразделяются на автономные блоки малой комплектации (тип I), средней комплектации (тип II) и блоки универсальные (тип III) (рис. 5.31, 5.32, табл. 5.8, 5.9). Основными элемен-

Рис. 5.31. Блоки УТК-III: тип I (а), тип II (б) и тип III (в).



тами блоков УТК-III являются литые корпуса-основания, штампованные кожухи, литые верхние крышки (для блоков типа II). Все элементы имеют четырехслойное покрытие (медь—никель—олово—свинец). ТЭК одного типоразмера собирают в вертикальные пакеты и крепят винтами к корпусу-основанию, при этом ТЭК с блоком питания располагают первым от основания.

На корпусе-основании устанавливают межблочные электрические разъемы типа МР-1, штыри заземления и штенгель для заполнения блока инертным газом (например, азотом), амортизаторы типа МР или элементы закрепления блоков на объекте и в компонентах КУ-4.

В зависимости от типа блока разъемы могут находиться на боковой поверхности (тип I), на верхней (тип II) и на специальном выступе (тип III). Штыри заземления и штенгель впаиваются в корпус-основание.

Монтаж выполняется проводом марки ФД-100 сечением $0,03 \text{ мм}^2$ (сигнальные цепи) и $0,07 \text{ мм}^2$ (цепи питания).

Провода с помощью резиновой пластины образуют специальную плоскую монтажную матрицу, которая в корпусе-основании блока собирается в общий жгут, который разветвляется на разъемы.

Заземляемая цепь блока объединяет крайние контакты монтажных колодок ТЭК с общим штырем основания и через выходные разъемы блока соединяется с общей цепью системы.

После настройки и регулировки блок герметизируют, т. е. заключают в кожух и заливают места механических соединений герметиками типа виксинта «Победа», силпена, ВГО-1 и т. п. Допускается герметизация путем запайки легкоплавкими припоями либо полиэтиленом. Способ герметизации выбирается конструктором.

Газонаполнение (последняя операция сборки блока) производится через штенгель, который затем откусывается и запаивается. Вакуумная герметизация блока и заполнение сухим газом—необходимые условия работоспособности РЭА с бескорпусными МУ.

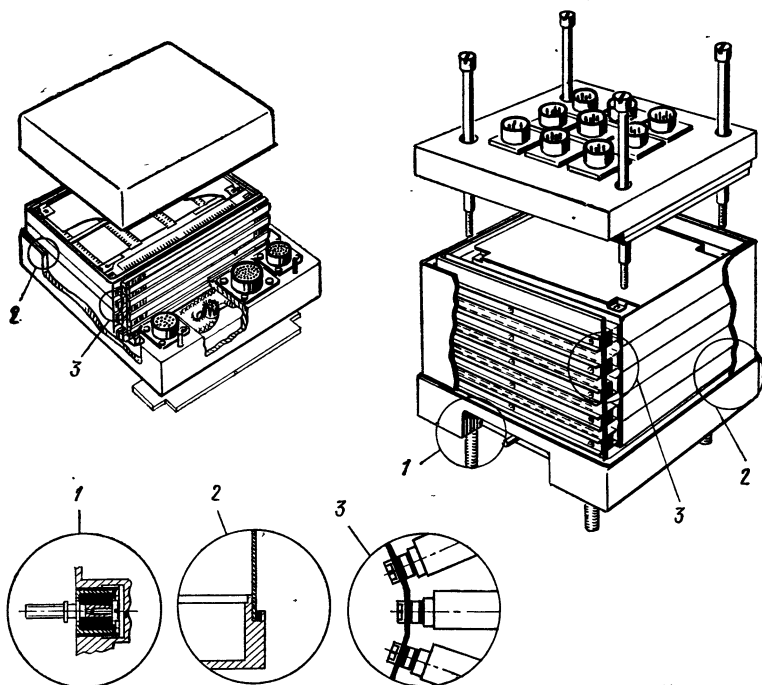


Рис. 5.32. Схема конструкции блоков УТК-III:

1 — амортизатор из МР, 2 — схема герметизации, 3 — схема раскрытия ТЭКов

Компонентами КУ-4 УТК-III являются агрегатированные миниатюрные радиоэлектронные системы различного функционального назначения. Предусмотрены три схемы компоновки агрегатированных систем: децентрализованная, централи-

зованная полиблочная и централизованная моноблочная. Характерные признаки децентрализованной схемы компоновки: пространственная гибкость системы, возможность размещения ее отдельных блоков-компонентов КУ-3 в различных местах

Таблица 5.8

Параметры ТЭК

Типоразмер	l , мм	V , см ³	$N_{\text{кол}}$	$N_{\text{конкт}}$	$N_{\text{общ}}$
I (II)	69	58(73)	1(2)	37	37(74)
III (IV)	99	84(105)	1(2)	59	59(118)
V (VI)	124	105(131)	2(4)	37	74(158)
VII (VIII)	154	130(163)	2(4)	49	98(196)

Примечания: 1. Данные в скобках относятся к двусторонней компоновке. 2. $N_{\text{кол}}$ — число монтажных колодок. $N_{\text{конкт}}$ — число контактов в одной монтажной колодке. $N_{\text{общ}}$ — число выходных контактов.

Характеристики корпусов блоков

Тип и типоразмер	Число ТЭК	V , см ³	m , г	$N_{вых}$
I	2	600	660	200
	3	900	1 000	200
	4	1200	1 300	200
II	4	1000	1100	600
	6	1500	1 650	600
	8	2000	2 130	600
III—I	2...6	370...840	400...900	200
III—II		520...1160	560...1250	202
III—III		530...1420	680...1530	304
III—IV		770...1880	830...1880	406

Примечания: 1. Объем электронной части блоков 0,23...0,48, питания — 0,15...0,43, механической — 0,02...0,9, амортизации 0,09...0,11, монтажа и разъемов — 0,08...0,17 и 0,04...0,11 общего объема ($V_{общ}$). 2. $N_{вых}$ — максимальное число выходных контактов. 3. III—I...III—IV—I...4-й типоразмеры ячеек.

на объекте с последующим объединением их в систему кабельной сети, индивидуальная защита каждого блока от механических воздействий.

Централизованные полиблочные схемы построения отличаются от децентрализованных однозначной пространственной фиксацией блоков относительно друг друга, возможностью применения единой системы защиты от механических воздействий на уровне системы, уменьшением объема и массы системы за счет сокращения длины кабельных соединений. Объем и масса систем, устанавливаемых по децентрализованной (дцк) или централизованной (цк) схеме, связаны следующими соотношениями: $V_{дцк} = 1,25 V_{цк}$; $m_{дцк} = 1,5 m_{цк}$.

Централизованная моноблочная компоновка сохраняет основные преимущества полиблочной, не имеет компонентов III уровня (собирается

сразу из компонентов КУ-2), не имеет кабельной сети (монтаж в системе выполняется так же, как в типовом блоке) и потому дает максимальный выигрыш в объеме и весе РЭА на ИС.

Проведенная классификация универсальных типовых конструкций УТК, иерархический принцип построения комплекса, использование элементной базы всех трех типов: 1Д — дискретных элементов, 1М — интегральных микросхем различной степени интеграции, 1С — интегральных бескорпусных микросборок и бескорпусных ИС, ограничение до минимума типоразмеров основных функциональных и конструктивно-технологических компонентов в виде МУ и ПП, оптимальная полнота номенклатуры компонентов на уровнях КУ-3 и КУ-4, общность конструктивных решений внутри каждого класса и их максимальное заимствование в конструкциях других

классов УТК обеспечивают комплексу универсальность, гибкость и эффективность, особенно при автоматизированных методах проектирования и изготовления РЭА на базе системы автоматизации проектирования и современной технологии.

(применительно к изделиям машиностроения): Дис. канд. искусств. наук/ЛВХПУ. — М., 1973.

7. Пахомов В. А. Модульная координация в художественном конструировании (к проблеме создания антропоструктурной модульной системы): Дис. канд. искусств. наук/ЛВХПУ. — М., 1971.

8. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах /Под ред. С. Я. Шаца. — М.: Сов. радио, 1976.

9. Bohnenberger W. und Hesse D. Intermas das mechanische Aufbausystem. — Techn. Mitteilung AEG — Telefunken, 1972, №4/5, S. 148—162.

10. CAMAC 1972—1973. SAIP SCHLUMBERGER, Paris, 1973. (Каталог научно-исследовательского центра).

11. Electrotechnik, Elektronik. Einheitliches Gefäßsystem EGS. DDR Institut für Nachrichtentechnik. Berlin, 1974.

12. Hewlett Packard. Electronic Instruments and System. Каталог, 1978.

13. Ursamat Handbuch. VEB. Verlag Technik, Berlin, 1969.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б. В., Савельев А. Я. Основы конструирования и производства ЭВМ. — М.: Высшая школа, 1972.
2. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1975.
3. Комплекс типовых конструкций операторского оборудования АСУТП. — Л.: Каталог /Мин-во приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР, 1971.
4. Композиция и стандарт. Под ред. Г. Б. Минервина, М. В. Федорова/ВНИИТЭ. — М., 1971.
5. Конструирование микроэлектронной аппаратуры (Под ред. Б. Ф. Высоцкого. — М.: Сов. радио, 1975.
6. Мельников А. П. Принципы построения соразмерности на основе стандартных элементов

6. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ РЭА И КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ *

Основные аббревиатуры

ВД — ведомость ссылочных документов
 ВП — ведомость покупных изделий
 ВС — ведомость спецификаций
 ГКД — групповые КД
 ГЧ — габаритный чертеж
 Д — документ (ы)
 ЗИ — ведомость ЗИП
 ЗИП — запасное имущество и приборы
 И — изделие (я)
 ИМ — инструкция по монтажу
 ИО — инструкция по техническому обслуживанию

ИЭ — инструкция по эксплуатации
 КД — конструкторская документация
 МС — микросборка
 МЧ — монтажный чертеж
 ООП — опытный образец (партия)
 ОТ — общие требования
 ПЗ — пояснительная записка
 ПМ — программа и методика испытаний
 ПР — рабочий проект
 ПС — паспорт
 ПТ — техническое предложение
 ПФ — патентный формуляр
 РР — расчеты
 СИУ — уровень стандартизации и унификации

* Составитель В. Н. Квасницкий.

СМП — серийное или массовое производство

ТЗ — техническое задание

ТП — технический проект

ТТ — технические требования

ТО — техническое описание

УГО — условные графические обозначения

УС — установочная серия

ФО — формуляр

ВЧ — функциональная часть

ЭМЧ — электромонтажный чертеж

ЭП — эскизный проект

ЭТ — этикетка

В связи с тем, что система ЕСКД уже включает около 150 стандартов, в которые все время вводятся уточнения и изменения, а специалист-конструктор ведет разработку КД только по стандартам ЕСКД, в настоящей главе даются лишь общие положения по стадиям разработки КД, которые помогут (при необходимости) конструктору оценить общие принципы и направление поиска соответствующих стандартов ЕСКД по ежегодникам «Государственные стандарты СССР. Указатель». Поэтому использовать материал главы как рекомендации стандартов ЕСКД нельзя.

6.1. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ РЭА

В соответствии с ЕСКД и РЭА и ее части классифицируются как изделия. И — предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. При создании РЭА устанавливаются следующие стадии разработки и их этапы (ГОСТ 2.103—68):

Техническое задание ТЗ. Разработка ТЗ.

Техническое предложение ПТ. Подбор материалов, разработка ПТ с присвоением Д литеры «П». Рассмотрение и утверждение ПТ.

Эскизный проект ЭП. Разработка ЭП с присвоением Д литеры «Э». Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение ЭП.

Технический проект ТП. Разработка ТП с присвоением Д литеры «Т». Изготовление и испытание макетов. Рассмотрение и утверждение ТП.

Рабочий проект РР. Разработка рабочей документации для опытного

образца (опытной партии) ООП (а), установочной серии УС (б) и серийного или массового производства СМП (в).

а) Разработка КД и испытания ООП. Изготовление и заводские испытания ООП. Корректировка КД по результатам изготовления и заводских испытаний ООП с присвоением КД литеры «О». Государственные и другие подобные испытания ООП. Корректировка КД по результатам испытаний с присвоением КД литеры «О₁». При последующих (повторных) изготовлении и испытаниях ООП и соответствующей корректировки КД им присваивают соответственно литеры «О₂», «О₃» и т. д. Изготовление и испытание установочной серии.

б) Разработка рабочей КД установочной серии У. Корректировка КД по результатам изготовления, испытания и оснащения технологического процесса ведущих составных частей изделия УС с присвоением КД литеры «А». Изготовление и испытание головной (контрольной) серии.

в) Разработка рабочей КД установившегося серийного или массового производства СМП. Корректировка КД по результатам изготовления и испытаний головной (контрольной) серии с присвоением КД литеры «Б». Серийное или массовое производство.

В зависимости от сроков разработки, наличия прототипов и т. п. стадии разработки И могут объединяться и изменяться, что определяется ТЗ.

КД для индивидуального производства (разовое изготовление одного или нескольких изделий) присваивают литеру «И».

Разработке рабочей КД «И» могут предшествовать стадии ТЗ, ПТ, ЭП и т. д. и соответствующие им этапы работ.

Техническое задание

ТЗ — основание для проектирования РЭА. В нем определяются: назначение И (основные области применения, характер выполняемых работ, перечень задач и т. п.); состав И (перечисляются разрабатыва-

емые устройства, сервисная и (или) техническая аппаратура, комплект запасных инструментов и приспособлений ЗИП, установочных или укладных средств), состав КД на И и документация программного обеспечения (для средств вычислительной техники).

На основе общего ТЗ разрабатываются ТЗ на конкретные устройства и входящие в них блоки с уточнением технических требований к каждому устройству. В качестве общих ТТ указываются условия эксплуатации и транспортирования, требования к электрической прочности, помехозащищенности, сопротивлению изоляции, условия хранения, обеспечение удобства обслуживания и безопасности эксплуатации, использование комплектующих электрорадиоэлементов, требования к укладке, упаковке, транспортированию. К частным ТТ относятся основные структурные, программные и другие технические требования.

При наличии требований по надежности дают количественные значения параметров, методику оценки результатов испытаний, место и порядок проведения испытаний, меры повышения надежности и др. В конструктивных требованиях излагают требования по элементной базе, сокращению марок материалов, типов размеров блоков, узлов, крепежа и т. п., модульности конструкции; эргономике и технической эстетике; обеспечению технологичности конструкции; удобству, простоте и безопасности обслуживания, уровню унификации; сигнализации неисправностей, составу пультов управления и индикации; органам управления; массе РЭА и ее частей; габаритам и размещению центров тяжести; окраске и т. п.

В заключение указывают ориентировочную номенклатуру КД на каждой стадии проектирования И и порядок испытаний и приемки опытных образцов.

Техническое предложение (ГОСТ 2.118—73)

ПТ — совокупность КД, содержащих технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки И на основании

анализа ТЗ заказчика и различных вариантов возможных решений, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов. Эта стадия вводится с целью выявления дополнительных или уточненных требований к И, которые не могли быть указаны в ТЗ без предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов.

При разработке ПТ:

выявляют варианты возможных решений, устанавливают особенности вариантов, их конструктивную проработку. Глубина такой проработки должна быть достаточной для сравнительной оценки рассматриваемых вариантов;

проверяют варианты на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформляют заявки на изобретения;

проверяют соответствие вариантов требованиям техники безопасности и производственной санитарии;

выполняют сравнительную оценку рассматриваемых вариантов, в том числе по показателям качества И, по показателям технологичности, стандартизации и унификации. Если для сравнительной оценки необходимо проверить принцип работы различных вариантов И, а также сравнить их по эргономическим и эстетическим показателям, то могут быть изготовлены макеты. КД для изготовления макетов в комплект документов ПТ не включают;

выбирают оптимальный вариант (варианты) И; устанавливают требования к И и к последующей стадии разработки И (необходимые работы, варианты возможных решений, которые следует рассмотреть на последующей стадии и др.).

В ведомость ПТ записывают все включенные в комплект КД независимо от того, к какому варианту относится документ.

В ПТ помещают выявленные в процессе разработки ПТ дополнительные требования к разработке И. Необходимые Д и сведения приводятся в приложении к ПЗ (копия ТЗ; перечень работ, которые следует провести на последующей стадии разработки И (при необходимости);

материалы художественно-конструкторской проработки, не являющиеся КД; перечень использованной литературы и т. п.).

Это положение распространяется и на последующие стадии. После согласования и утверждения в установленном порядке ПТ является основанием для разработки ЭП.

Эскизный проект (ГОСТ 2.119—73)

ЭП — совокупность КД, содержащих принципиальные конструктивные решения, общие представления об устройстве и принципе работы И, а также данные по назначению, основным параметрам и габаритным размерам разрабатываемого И. Эта стадия вводится с целью проверки принципиальных конструктивных, схемных и других решений, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта И или рабочей КД.

При разработке ЭП:

выполняют варианты возможных решений и их конструктивную проработку с глубиной, достаточной для сопоставления рассматриваемых вариантов;

решают предварительные вопросы упаковки и транспортирования И; изготавливают и испытывают макеты с целью проверки принципов работы И и (или) его составных частей;

разрабатывают и обосновывают технические решения по обеспечению показателей надежности, установленных ТЗ и ПТ;

оценивают И на технологичность, по показателям стандартизации и унификации СИУ, по эргономическим и эстетическим характеристикам;

проверяют варианты на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформляют заявки на изобретения; проверяют соответствие вариантов требованиям техники безопасности и производственной санитарии;

выполняют сравнительную оценку рассматриваемых вариантов;

выбирают оптимальный вариант (варианты) И с обоснованием выбора; принимают принципиальные решения; подтверждают (или уточняют) предъявляемые к И требования (технические характеристики, показатели качества и др.), установлен-

ные ТЗ и ПТ, и определяют технико-экономические характеристики и показатели, не установленные ТЗ и ПТ; выявляют на основе принятых принципиальных решений новые И и материалы, которые должны быть разработаны другими предприятиями (организациями), составляют ТТ к этим И и материалам;

составляют перечень работ, которые следует провести в дополнение или для уточнения работ, предусмотренных ТЗ и ПТ;

прорабатывают основные вопросы технологии изготовления (при необходимости).

В комплект документов ЭП включают КД, предусмотренные ТЗ и протоколом рассмотрения ПТ. После согласования и утверждения в установленном порядке ЭП служит основанием для разработки ТП или рабочей КД.

Технический проект (ГОСТ 2.120—73)

ТП — совокупность КД, содержащих окончательные технические решения и дающих полное представление об устройстве разрабатываемого И и исходные данные для разработки рабочей КД. ТП вводится для выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции И (когда это целесообразно сделать до разработки рабочей КД).

При разработке ТП:

принимают конструктивные решения по И и его основным частям; выполняют необходимые расчеты (в том числе подтверждающие технико-экономические показатели, установленные ТЗ), принципиальные схемы, схемы соединений и др.;

обосновывают принятые технические решения по обеспечению показателей надежности установленных ТЗ и предшествующими стадиями разработки;

проводят анализ конструкции И на технологичность в условиях данного конкретного производства и выявление необходимого для производства И нового оборудования (обоснование разработки или приобретения);

разрабатывают, изготавливают и испытывают макеты и оценивают И

по эргономическим и эстетическим показателям;

— оценивают возможности транспортирования, хранения, а также монтажа И на месте его применения и его эксплуатационных данных; проводят окончательное оформление заявок на разработку и изготовление новых И и материалов, применяемых в разрабатываемом И, а также мероприятий по обеспечению заданного в ТЗ уровня СИУ изделия;

проверяют изделие на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформляют заявки на изобретения, выявляют номенклатуры покупных И и согласовывают их применение, согласовывают габаритные, установочные и присоединительные размеры с заказчиком или основным потребителем;

оценивают технический уровень, качество И и разрабатывают чертежи сборочных единиц и деталей (при необходимости ускорения выдачи задания на разработку специализированного оборудования для их изготовления);

проверяют соответствие принимаемых решений требованиям техники безопасности и производственной санитарии и составляют перечень работ, которые следует провести на стадии разработки рабочей документации, в дополнение и (или) уточнения работ, предусмотренных ТЗ, ПТ и ЭП.

В ТП включаются КД, предусмотренные ТЗ и протоколом рассмотрения ПТ и ЭП. После согласования и утверждения в установленном порядке ТП служит основанием для разработки рабочей КД.

Рабочий проект

На стадии ПР происходит создание и отработка полного комплекта КД на РЭА.

Ранее разработанная КД применяется при разработке новых или модернизации изготавливаемых И в следующих случаях:

в проектной документации ПТ, ЭП и ТП и рабочей документации ООП — независимо от литерности применяемых И;

в КД ООП с литерами «О», «О₁» и «О₂» и др., установочной серии УС

с литерой «А» и установившегося серийного или массового производства с литерой «Б», если литерность применяемых И та же или «высшая». Литерность полного комплекта КД И определяют «низшей» литерой, которая указана на одном из КД, входящих в комплект.

КД, держателями подлинников которых являются другие предприятия, могут применяться только при наличии учтенных копий или дубликатов.

Пояснительная записка

ПЗ составляется по окончании работ на стадиях ПТ, ЭП и ТП по единой схеме, включающей в себя следующие основные разделы:

Введение. Содержит наименование, номер и дату утверждения ТЗ и (при необходимости) ссылки на номера и даты протоколов рассмотрения ПТ или ЭП.

Назначение и область применения. Содержит сведения из ТЗ и конкретизирующие и дополняющие их сведения по области и условиям применения И, характеристике объекта (при необходимости) и основные данные по обеспечению стабильности показателей качества в условиях эксплуатации (обычно в ПЗ ТП).

Техническая характеристика. Содержит основные (из ТЗ) и дополнительные к ТЗ технические характеристики, сведения о соответствии или обоснованных отклонениях от требований ТЗ, данные сравнения характеристик отечественных и зарубежных аналогов, результаты анализа карты технического уровня и качества.

Описание и обоснование выбранной конструкции. Содержит описание и анализ рассмотренных вариантов, в том числе на патентную чистоту и конкурентоспособность И, сведения об использованных изобретениях и заявках, сведения о назначении макетов и результатах их испытаний, справочные сведения по основным КД, по результатам испытаний и по соответствию рассмотренных вариантов требованиям техники безопасности и производственной санитарии. В ПЗ ЭП дополнительно рассматриваются соответствие макетов требованиям эргономики и

технической эстетики, соображения о технологичности, упаковке и транспортировке (при необходимости), ТТ к применяемым новым материалам и И других организаций, сведения о соответствии применяемых или ранее разработанных частей, покупных И и материалов требованиям ТЗ на данное новое И. В ПЗ ТП вышеперечисленные сведения приводятся как результаты соответствующих исследований с представлением обоснований (например, по необходимости разработки или применения нового технологического оборудования, применения дефицитных изделий и материалов и т. п.).

Расчеты. Содержит ориентировочные (ПЗ ПТ и ЭП) и окончательные (ПЗ ТП) расчеты работоспособности (кинематические, электрические, тепловые, гидравлические, компоновочные и т. п.) и надежности (показатели долговечности, ремонтопригодности, сохранности и т. п.).

Описание организации работ. Содержит предварительные сведения об организации работ с применением разрабатываемого И, о квалификации и количестве обслуживающего персонала (ПЗ ПТ), о режимах и условиях работы, порядке и способах транспортирования, монтажа и ввода И в эксплуатацию (ПЗ ЭП), описание специфических приемов и способов работы с И, оценку взаимозаменяемости, удобства обслуживания, ремонтопригодности и устойчивости против воздействий внешней среды (ПЗ ТП).

Ожидаемые технико-экономические показатели. Содержит предварительные (ПЗ ПТ и ЭП) и окончательные (ПЗ ТП) расчеты экономичности, эффективности от внедрения в народное хозяйство, расчеты (ПЗ ТП) цены опытного и серийного И, затраты на организацию производства и эксплуатацию.

Уровень стандартизации и унификации. Содержит (ПЗ ЭП) предварительные сведения о применяемых в разрабатываемом И стандартных, унифицированных и заимствованных сборочных единицах, материалов и деталей, сведения (ПЗ ТП) о стандартных, унифицированных и заимствованных сборочных единицах и деталях, о показателях уровня унификации и стандартизации, обос-

нования разработки государственных и отраслевых стандартов на объекты стандартизации данного И, его составных частей и новых материалов.

Приложение к ПЗ. Содержит (ЭП и ТП) дополнительные сведения (при необходимости) по ГОСТ 2.119—73 и ГОСТ 2.120—73.

6.2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО ЕСКД

Группы стандартов ЕСКД и виды И

ЕСКД — комплекс государственных стандартов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения КД.

Распределение стандартов ЕСКД по классификационным группам следующее: общие положения (ГОСТ 2.001...2.099), основные положения (2.101...2.199), общие правила выполнения чертежей (2.301...2.399), правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения (2.401...2.499), правила обращения КД (2.501...2.599), правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации (2.601...2.699), правила выполнения схем и условные графические обозначения, используемые в схемах (2.701...2.799).

К изделиям основного производства относятся И, предназначенные для поставки (реализации), к И вспомогательного производства — предназначенные только для собственных нужд предприятия. Устанавливаются следующие виды И: детали, сборочные единицы, комплексы, комплекты.

Изделия делятся на неспецифицированные (детали) — не имеющие составных частей, и специфицированные (сборочные единицы, комплексы, комплекты) — состоящие из двух и более составных частей.

Деталь — И, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций, либо подвергнутое защитным или декоративным покрытиям независимо от их вида, толщины и назначения, либо изготовленное с применением местной свар-

ки, пайки, склейки, сшивки и т. п. операций.

Сборочная единица — И, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием, сшивкой, укладкой и т. п.). К сборочным единицам также относятся:

И, для которых конструкцией для удобства упаковки, транспортирования и т. п. предусмотрена разборка на составные части предприятием-изготовителем;

совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение и совместно устанавливаемых на предприятии-изготовителе в другой сборочной единице;

совокупность сборочных единиц и (или) деталей, имеющих общее функциональное назначение, совместно уложенных на предприятии-изготовителе в укладочные средства (футляр, коробку и т. п.), которые предусмотрено использовать вместе с уложенными в них изделиями.

Комплекс — два и более специфицированных И, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

В комплекс, кроме И, выполняющих основные функции, могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, предназначенные для выполнения вспомогательных функций.

Комплект — два и более И, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

Основные виды текстовой и графической КД

Текстовые Д выполняются на формах, установленных стандартами ЕСКД следующего вида: машинописные (на одной стороне листа, через два интервала, лента — черная), рукописные (шрифт по ГОСТ 2.304—68, высота знаков не менее 2,5 мм, черной тушью), типо-

графские (по нормам и правилам выполнения типографских изданий). Общие требования к текстовым документам изложены в ГОСТ 2.105—68.

Построение текстовых документов определяется их содержанием и объемом. Наивысшая степень деления — часть (она комплектуется отдельно), затем следуют разделы, подразделы, пункты и подпункты. В начале документов большого объема рекомендуется помещать содержание, а в конце — список используемых документов или литературы. Иллюстрации, таблицы или вспомогательный материал можно давать либо прямо в тексте (как можно ближе к ссылке), либо в виде Приложений, которые (при большом объеме) могут быть оформлены в виде самостоятельного документа.

Формы текстовых документов должны соответствовать ГОСТ 2.106—68. В ведомости спецификаций (ВС) записывают спецификации И, его составных частей и комплектов, в ведомости ссылочных документов (ВД) перечисляют документы, на которые есть ссылки в КД, в ведомости покупных изделий (ВП) перечисляются все покупные И, в ведомостях технического предложения (ПТ), эскизного (ЭП) и технического проектов (ТП) записывают всю КД, разработанную для данного этапа и заимствованную из других разработок. В пояснительной записке (ПЗ) излагаются: основание для разработки проекта, назначение и область применения, техническая характеристика, описание конструкции и расчеты, в программе и методике испытаний (ИМ) и в расчетах (РР) формулируются правила и характер проверки изделия и правила изложения расчетов, в патентном формуляре (ПФ) дается оценка патентоспособности и чистоты И.

На изделия (детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты), обладающие общими конструктивными признаками и имеющие некоторые отличия друг от друга, создаются групповые КД (чертежи, схемы, спецификации). Оформление ГКД должно соответствовать ГОСТ 2.113—75.

ТУ являются той неотъемлемой частью комплекта технической документации на И, на которую она рас-

пространяется. В ТУ должны быть изложены технические требования, правила приемки, методы контроля, транспортирования и хранения, указания по эксплуатации и гарантии поставщика. Правила выполнения ТУ устанавливаются ГОСТ 2.114—70.

Разработка рабочих чертежей должна обеспечивать оптимальное применение стандартных, покупных и освоенных ранее И, рационально ограниченную номенклатуру материалов, покрытий, размеров, резьб, допусков и т. п., необходимую степень взаимозаменяемости, наимыгоднейшие способы изготовления и ремонта И, а также максимальное удобство их обслуживания при эксплуатации. Данные на рабочих чертежах должны содержать все сведения, необходимые для изготовления, контроля и испытания И. Различают чертежи деталей; сборочные (сведения о составе, расположении и взаимной связи деталей), общего вида (И в целом с проекциями, разрезами и текстом, достаточными для уяснения конструктивного устройства изделия), габаритные ГЧ (сведения о габаритах И с учетом крайних положений перемещающихся частей, об установочных и посадочных размерах), монтажные (упрощенное изображение изделия и сведения по его установке на месте эксплуатации или при транспортировке).

Схемы в КД различаются по видам: электрическая Э, гидравлическая Г, пневматическая П, кинематическая К и типам: структурная (1), функциональная (2), принципиальная (3), соединений (4), подключения (5), общая (6), расположения (7).

Структурная схема определяет основные функциональные части И, их назначение и взаимосвязи. Функциональная—необходима для разъяснения процессов в функциональных цепях или изделия в целом. Принципиальная—определяет полный состав элементов И и связей между ними и дает, как правило, детальное представление о принципах работы изделия. В схеме соединений даются соединения всех составных частей И проводами, жгутами, кабелями, трубопроводами и т. п. В схеме подключений даются сведения о внешних подключениях изделия. Общая схема

определяет составные части комплекса и соединения их на месте эксплуатации. Схема расположения устанавливает относительное расположение составных частей изделия, а также (при необходимости) расположение соединений.

Схемы выполняют без соблюдения масштаба, однако размеры однотипных условных изображений элементов на одной схеме должны быть одинаковы, а их взаимное расположение должно приближенно соответствовать реальному расположению, что существенно упрощает решение задач компоновки реальных механических, гидравлических, электрических и т. п. элементов.

Правила выполнения электрических схем установлены ГОСТ 2.702—75. На структурной схеме в виде прямоугольников или условных графических обозначений УГО изображают все основные функциональные части ФЧ и основные связи между ними. На функциональной схеме изображают ФЧ и связи между ними (допускается показывать конкретные соединения в виде проводов, кабелей и т. п.).

На принципиальной электрической схеме (ЭЗ) показывают все электрические элементы, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, и все электрические связи между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, установленных ГОСТ 2.721... ГОСТ 2.752. Каждому элементу, изображенному на принципиальной схеме, присваивается буквенно-цифровое позиционное обозначение, состоящее из сокращенного наименования элемента, его порядкового номера и характера работы. Элементы, изображаемые на других документах комплекта, например на чертежах, должны сопровождаться позиционными обозначениями по принципиальной схеме. Данные обо всех элементах, входящих в состав изделия, помещаются в перечень элементов, а связь перечня с УГО на принципиальной схеме также осуществляется через позиционные обозначения.

В схемах соединений указывают все внешние и внутренние соединения с их входными и выходными элементами, их наименования, типы или обозначения и т. п. При большом числе соединений все данные о проводах и кабелях, а также об адресах их присоединений сводят в специальную таблицу соединений.

На общей схеме изображают устройства и элементы, которые непосредственно входят в данное И с их соединениями.

На схеме расположения в виде внешних очертаний или УГО изображают составные части И и связи между ними с учетом (при необходимости) конструкции изделия.

Эксплуатационная и ремонтная КД

Эксплуатационные документы (ГОСТ 2.601—68) должны разрабатываться с учетом уровня подготовки специалистов по эксплуатации данного И. В техническом описании ТО дается описание устройства и принципа действия И, достаточные для обеспечения полного использования возможностей И при эксплуатации. В инструкции по эксплуатации ИЭ излагается минимум сведений по правильной эксплуатации, транспортировке, хранению и обслуживанию И. В инструкции по техническому обслуживанию ИО излагаются сведения по порядку и проведению обслуживания (регламентных работ) на различных стадиях и в различных условиях эксплуатации. Инструкция по монтажу, пуску, регулировке и обкатке И на месте его применения ИМ должна содержать сведения по монтажу и демонтажу изделия, необходимые для технически правильно проведенных операций изделий (их пуск, регулировка и обкатка должны производиться только на месте применения).

В формуляре ФО и паспорте ПС приводятся гарантированные параметры изделия, а также состояние И в процессе эксплуатации (в ФО). Ведомость запасных частей, инструмента и принадлежностей (ЗИ) устанавливает номенклатуру, назначение и количество запасных частей, инструментов и материалов ЗИП, необходимых при эксплуатации и ремонте И.

Ремонтные документы разового РИ, опытного РО, установочного РА или серийно выпускаемого изделия РБ предусматривают технически возможное и экономически целесообразное восстановление технических параметров И при эксплуатации на различных стадиях.

КД на ИС *

КД на ИС выполняются в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и дополнительными требованиями ОСТ 11.000.028—73 «Микросхемы интегральные. Правила выполнения конструкторской документации», которые распространяются на все виды ИС, кроме микросхем СВЧ диапазона.

Обязательными документами являются: сборочный чертеж, габаритный чертеж, чертежи деталей (при наличии деталей), электрическая принципиальная схема, спецификация, частные технические условия, справочный лист, этикетка.

На ИС, не подлежащие поставке другим предприятиям, а изготавливаемые изготовителем РЭА, ГЧ, ТУ, справочный лист и ЭТ допускается не составлять.

Обозначение сборочных чертежей (топологических) для гибридных ИС следует производить по видам АБ 7.100 или 7.107 (наименование изделия «Плата»). Рекомендуются следующие масштабы топологических чертежей 5 : 1, 10 : 1, 20 : 1 и 50 : 1. Топологические чертежи, как правило, следует выполнять на нескольких листах, при этом на первом листе должна быть изображена подложка со всеми нанесенными на нее слоями элементов с указанием позиционных обозначений элементов в соответствии с электрической принципиальной схемой. На последующих листах помещают послойное изображение элементов, а также соединительных проводников и контактных площадок, отдельно для каждого слоя. При расположении элементов с двух сторон положки вид на одну из сторон допускается помещать на втором листе топологического чертежа.

* Составитель Н. А. Барканов.

Технические требования помещают на поле первого листа топологического чертежа и излагают в следующей последовательности:

специальные требования к изготовлению подложки, указания о материалах-заменителях;

требования к выполнению размеров элементов, в том числе ссылка на соответствующие таблицы координат, шаг координатной сетки, указание точности выполнения размеров элементов и т. п.;

требования к внешнему виду; характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев или элементов;

данные и указания по проверке параметров элементов.

Предпочтительным является способ задания размеров прямоугольных координат с указанием их числовых величин в таблицах. Координатная сетка, применяемая в топологических чертежах, должна иметь шаг 0,01; 0,05; 0,1 или 0,2 мм. Вершины фигур элементов следует располагать в точках пересечения линий координатной сетки.

Элементы каждого слоя на первых листах топологических чертежей следует, как правило, штриховать (условное обозначение слоя). При штриховке нижней обкладки конденсатора допускается заштриховывать только те ее участки, которые выступают за край верхней обкладки (при этом направление штриховки обкладок должно быть разным).

Диэлектрик конденсаторов следует обозначать штрих-пунктирной линией без штриховки площади диэлектрика. Защитный слой обозначают штриховой линией без штриховки площади защищенных участков.

Вид штриховки (условное обозначение) характеристики и данные по изготовлению отдельных слоев заносят в таблицу:

Условное обозначение слоя	Наименование слоя	Материал слоя		Электрические характеристики	Номер листа чертежа в таблице координат
		наименование, марка	ГОСТ, ТУ		
1	2	3	4	5	6

Величины электрических параметров записывают в следующую таблицу:

Точки измерения	Проверяемая величина и предельные отклонения
1	2

На топологических чертежах с наибольшим числом элементов допускается совмещать в одном виде не более трех слоев, выделяя каждый слой с помощью штриховки. При этом совмещенный вид должен иметь достаточную наглядность.

На принципиальной электрической схеме должны быть изображены все элементы, компоненты и связи между ними, в том числе обозначены внешние выводы. Все элементы и компоненты должны быть записаны в перечень по форме ГОСТ 2.702—75. На поле схемы допускается помещать функциональную схему в виде условных графических обозначений в соответствии с ЕСКД.

Разработку конструкции узлов и блоков на ИС выполняют в соответствии с ОСТ 4 ГО.010.036—74. «Узлы и блоки РЭА на микросхемах. Методика обоснования и выбора типовых конструктивно-технологических решений». Стандарт устанавливает методику обоснования и выбора типовых конструктивно-технологических решений при проектировании цифровых узлов и блоков РЭА с применением микросхем различного уровня интеграции на стадии эскизного проекта.

Исходными данными для разработки являются: назначение аппаратуры; ориентировочное количество эквивалентных вентилей, необходимое для построения аппаратуры, конструктивные параметры выбранной серии ИС широкого применения (тип корпуса, габаритно-присоединительные размеры и уровни интеграции ИС); конструктивные параметры бескорпусных ИС; вид выбранной технологии изготовления ИС; выбранный вариант конструкции РЭА (кассетная, книжная и др.); характеристики окружающей среды; заданный срок службы РЭА; необходимость резервирования; серийность РЭА.

В результате разработки получают обоснования следующих решений: выбора оптимального уровня интеграции ИС широкого применения и МС; выбора технологии изготовления МС; выбора варианта конструкции РЭА; возможности реализации РЭА при условиях ограниченного объема, массы и затрат, заданных в ТТ на разрабатываемую РЭА.

Обозначение, учет и обращение КД

Каждый конструкторский документ должен иметь определенное обозначение. Для всей КД устанавливается обезличенная классификационная система обозначений изделий и документов. Обозначение И и его основного КД (спецификации и чертежа детали) имеет следующую структуру: индекс организации разработчика; классификационная характеристика; порядковый регистрационный номер. К обозначениям всех остальных документов добавляются шифры (например СБ, ЭБ, БД, ТУ и др.). До утверждения классификатора ЕСКД (ГОСТ 2.201) можно использовать классификатор МН СЧХ № 0.000.005.

При разработке макетов И для упрощения оформления КД используют различные варианты предметных систем обозначения КД. В этих системах применяются упрощенные шифры классификатора, обязательно с индексом Э. Предметная система обычно строится как замкнутая, развитие обозначений в которой идет по нисходящей (например: Э-42 ОВ — общий вид изделия, Э-42-01

СБ — первый сборочный узел изделия, Э-42-01-01 — первая деталь изделия Э-42 и т. п.). Используя такие системы обозначения КД, можно существенно упростить процесс обращения КД на стадии выполнения лабораторных макетов, так как КД не проходят нормоконтроль и другие службы учета и обращения КД по ЕСКД. Однако во всех этих случаях необходимо соблюдать определенную осторожность, так как в конце концов КД будет перевыпускаться по ЕСКД и наличие упрощений, противоречащих нормам ЕСКД может стать причиной полной переработки ранее выпущенной КД.

В соответствии с ГОСТ 2.501—68 все подлинники, дубликаты и копии КД подлежат учету и хранению в отделе (бюро) технической документации (ОТД или БТД). Подлинник для сдачи в ОТД должен иметь необходимые подписи, подтверждающие его соответствие нормам, и предусмотренные согласования со всеми заинтересованными службами. Вносить изменения в КД и аннулировать ее имеет право только предприятие-держатель подлинников. Основой для этого служит «Извещение об изменении» или (если обнаружена ошибка, которая может вызвать брак изделия, требуется проверка предлагаемых изменений в производстве или необходимо предварительно подготовить производство) «Предварительное извещение». Изменяемые размеры, слова, знаки, надписи и т. п., как правило, зачеркивают так, чтобы можно было легко прочитать зачеркнутое, и рядом с зачеркнутым проставляют новые данные.

7. МЕТОДОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО ТРУДА

Основные аббревиатуры

АРМ — автоматизированное рабочее место
АЦПУ — алфавитно-цифровое печатающее устройство
ВУ — видеосигнализатор
И — изделие
ИС — интегральная микросхема

КД — конструкторский документ
КО — конструкторский отдел
КС — конструкторский сектор
МОИ — мысленный образ изделия
МПП — многослойная печатная плата
МЧ — монтажный чертеж

ОГМ — обобщенная геометрическая модель
 ОТД — отдел (бюро) технической документации
 ПП — печатная плата
 ППГ — плано-производственная группа
 СП — спецификация
 ТП — технический проект
 ТР — трудоемкость
 ТЭЗ — типовой элемент замены (субблок)
 УПП — универсальная печатная плата
 ФУ — функциональный узел
 ЦТ — центр тяжести
 ЦТА — центральный технический архив
 ЧГ — чертежная головка
 ЧД — чертежная доска
 ЧП — чертежный прибор
 ЧПУ — числовое программное управление (станком)
 ЧС — чертежный станок
 ЭЛ — элемент (общее обозначение)
 ЭЛИ — электронно-люминесцентный индикатор
 ЭП — эскизный проект
 ЭРЭ — электрорадиоэлемент

7.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ [1, 4, 9]

Характер и виды конструкторских работ

Характер и вид конструкторских работ разнообразны, так как зависят от характера деятельности предприятия (НИИ или заводское КБ), степени унификации конструкторских решений (высокая или низкая), соотношения лаборант : конструктор (чем больше лаборантов, тем труднее вести разработку конструкции), уровня их знаний по данной разработке, технической оснащенности КБ, его структуры, требуемой сложности и оригинальности конструкторской разработки и от существующих в КБ традиций.

Общим в конструкторских работах является их разделение на творческую, техническую, организационную, производственную и корректировочную деятельность. Относительная доля трудоемкости для ха-

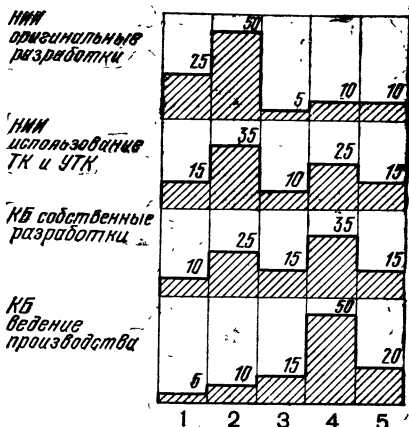


Рис. 7.1. Примерные соотношения по трудоемкости работы конструктора:

1 — творческая работа (изучение ТЭЗ, сбор исходных данных, оценочные расчеты, компоновочные эскизы, разработка и согласование чертежа общего вида И с заказчиком); 2 — техническая работа (выпуск комплекта КД с разработкой узловых и сборочных чертежей и их детализацией, выполнение габаритных и монтажных чертежей и текстовых документов); 3 — организационная работа (руководство исполнителями, проверка, корректировка и согласование КД, передача КД в ЦТА); 4 — производственная работа (сопровождение И в производстве, отработка конструкций и технологического процесса); 5 — корректировочная работа (коррекция и доработка КД, завершение разработки КД, передача КД в цеха опытного производства или на заводы-изготовители)

рактерных случаев показана на рис. 7.1.

Для успешного решения задачи конструирования РЭА специалист (от конструктора, дающего задание на детализацию узла, до руководителя конструкторских служб) должен работать по определенной и ясной системе. Это обеспечивается соблюдением норм должностных инструкций и «Положений» о существовании работы каждого подразделения. За выполнение одной функции должен полностью отвечать один работник. При этом не следует делать работу, которую может и должен выполнять подчиненный. При планировании надо четко продумывать место данной работы в общем плане, обеспечивая в первую очередь выполнение работ для смежников с приоритетом тех работ, задержка выполнения которых

* Составители В. И. Семернев, Р. Г. Варламов.

может быть причиной задержки всей работы. Частые реформы не улучшают, а затрудняют выполнение работы из-за разрыва старых и введения новых связей, различных пере-согласований и потери чувства ответственности у специалистов и целых подразделений.

Каждое подразделение и каждый конструктор должны иметь текущий и перспективный план с четкой формулировкой конечного результата работы. Решение вопросов одного иерархического уровня не должно переноситься на другой, ибо это вызывает безответственность в работе. Решение, не удовлетворяющее смежников, должно быть немедленно доведено до руководства с кратким и четким обоснованием причин.

Последовательность разработки конструкций

На рис. 7.2 представлена схема последовательности процесса конструирования РЭА без использования ЭВМ. Различные специалисты решают при этом следующие задачи.

Ведущий инженер-радиотехник. Составление, предварительное и окончательное согласование с начальниками КС и КО технического задания на конструирование РЭА; утверждение его у Главного инженера и передача в ППГ конструкторского от-

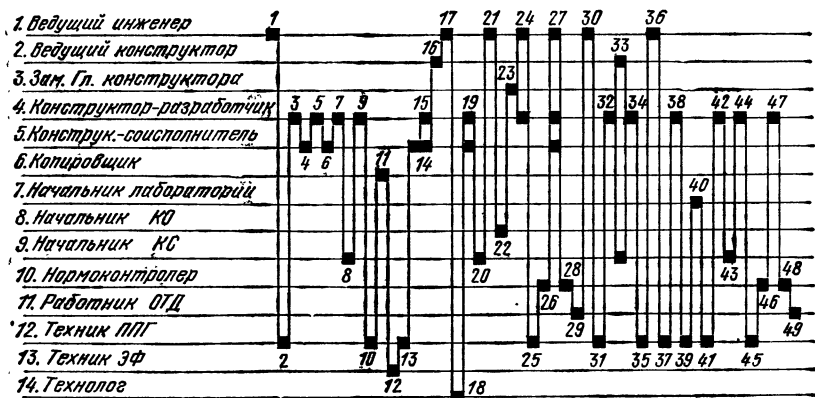
деления (отдела, бюро) 1. Подписание калек и копий КД 17. Визирование калек и копий КД 21. Передача совместно с конструктором-разработчиком калек и копий КД в ППГ 24. Исправление калек и копий КД по замечаниям нормоконтролера совместно с конструкторами 27. Разработка, согласование и выдача ТЗ на выпуск МЧ в ППГ 30. Проверка оригиналов МЧ и передача их в ППГ 36.

Ведущий инженер-конструктор. Подписание калек и копий в графе «Проверил» 16. Проверка оригиналов МЧ (совместно с начальником проектного КС) и передача их конструктору-разработчику 33.

Заместитель Главного конструктора. Согласование или утверждение калек и копий КД 23.

Конструктор-разработчик. Изучение ТЗ, уточнение и анализ ТТ, подбор необходимых информационных материалов и чертежей-прототипов, выдача заданий на разработку входящих узлов 3. Компоновка и предварительные расчеты (совместно с конструктором-соисполнителем), согласование предварительной компоновки с начальниками КС, КО и отделом (лабораторией)-заказчиком, необходимая доработка компоновки, выполнение окончательных расчетов и разработка общего вида РЭА, его согласование с технологами, с на-

Рис. 7.2. Последовательность участия различных специалистов в разработке конструкции РЭА



чальниками КС, КО и отделом (лабораторией)-заказчиком, передача общего вида на детальную разработку и разработку ПП конструкторам-соисполнителям 5. Проверка оригиналов рабочих чертежей узлов и деталей; разработка и увязка оригиналов комплекта рабочих чертежей И с выпуском СП и передача их на согласование начальнику КС 7. Исправление и доработка оригиналов КД по замечаниям начальника КС, получение разрешения на применение остродефицитных материалов и ЭЛ, согласование с технологами используемых технологических приемов, согласование и визирирование оригиналов КД у заместителя Главного конструктора И по конструированию, у ответственного представителя отдела (лаборатории)-заказчика и утверждение оригиналов комплекта КД у начальника КО с передачей их в ППГ 9. Подписание (совместно с конструктором-соисполнителем) калек и копий в графе «Разработал» 15. Исправление (совместно с ведущим инженером-радиостом) калек и копий по замечаниям технологов 19.

Передача калек и копий КД и ТУ (совместно с конструктором-соисполнителем) в ППГ 24. Исправление калек и копий по замечаниям нормоконтроля (совместно с ведущим инженером-радиостом и конструктором-соисполнителем) и передача их в нормоконтроль 27. Изучение ТЗ, конструкции и необходимого для выпуска МЧ комплекта копий КД из ЦТА; вычерчивание чертежей-заготовок основных видов И и согласование с разработчиком трассировки жгутов, марок и расцветки проводов; разводка концов на заготовках, присвоение номеров и составление таблицы проводов, согласование мест установки скоб крепления и перемещения жгутов с конструктором-соисполнителем, составление СП МЧ и передача оригиналов МЧ и СП на проверку ведущему конструктору или начальнику КС 32. Исправление и доработка оригиналов МЧ по замечаниям проверяющего и передача их в ППГ 34. Исправление оригиналов МЧ по замечаниям разработчика-лаборанта с получением подписи и передача оригиналов МЧ в ППГ 38. Сличение калек или ко-

пий с СП и проведение предварительных изменений, выпуск извещений на введение МЧ и корректировку чертежей 42. Передача калек или копий МЧ и извещений на СП в ППГ 44. Исправление калек или копий МЧ и сдача в нормоконтроль 47.

Конструктор-соисполнитель. Компоновка узлов и проведение предварительных расчетов, конструирование ЭЛ конструкции узлов и передача чертежей конструктору-разработчику 4. Компоновка дискретных ЭРЭ и ИС на ПП, трассировка проводников и согласование компоновки (с учетом замечаний лаборанта-разработчика); разработка оригиналов рабочих чертежей ПП; разработка оригиналов рабочих чертежей деталей и узлов и передача их конструктору-разработчику 6. Сличение калек или копий с оригиналом и устранение (при необходимости) дефектов или ошибок 14. Подписание (совместно с конструктором-разработчиком) калек и копий в графе «Разработал» 15. Исправление (совместно с конструктором-разработчиком) калек и копий по замечаниям технологов 19. Исправление калек и копий по замечаниям нормоконтроля (совместно с ведущим инженером-радиостом и конструктором-разработчиком) и передача их в нормоконтроль 27.

Копировщик. Выполнение (при необходимости) копировальных работ нестандартных чертежей И и передача их в ППГ 11.

Начальник радиолaborатории. Подписание калек или копий в графе «Утвердил» и передача их в ППГ 40.

Начальник КО. Согласование или утверждение калек (копий) 22.

Начальник КС. Проверка оригиналов комплекта КД и передача конструктору 8. Подписание калек или копий чертежей деталей, узлов и СП в графе «Утвердил» и визирирование сборочного чертежа 20. Проверка оригиналов МЧ (совместно с ведущим инженером-конструктором) и передача их конструктору-разработчику 33. Проверка вынесенных изменений и утверждение извещений 43.

Нормоконтролер. Проверка калек или копий КД (без МЧ) на соответствие ГОСТам, ОСТам, СТП и другим нормативно-техническим документам с передачей разработчикам

КД для внесения уточнений и исправлений 26. Подписание проверенных и исправленных КД (без МЧ) и передача их в ОТД 28. Проверка калек или копий МЧ аналогично 26, проверка извещений 46. Подписание проверенных и исправленных МЧ и передача их вместе с извещениями в ОТД 48.

Работник ОТД. Проверка подлинников КД на комплектность, составление сдаточной накладной и передача ее в группу планирования, регистрация КД в книге учета с присвоением им инвентарных номеров, заведение карточки учета на каждый КД, составление накладной и передача КД в архив подлинников, составление заявки на светокопировальные работы и передача КД в светокопию, подбор и передача необходимых подлинников КД из архива в светокопию, проверка комплектности КД и регистрации подлинников, поступивших в светокопию, снятие светокопий с подлинников КД, обрезка, фальцевание и подбор светокопий, подбор и передача подлинников КД в архив, прием, регистрация и раскладка подлинников КД в архиве, передача комплекта светокопий в группу комплектации, проверка комплектности светокопий и их штамповка, передача комплектов светокопий КД в ЦТА 29, 49.

Техник ППГ. Регистрация, учет и передача ТЗ на конструирование конструктору-разработчику 2. Регистрация оригиналов комплекта рабочих чертежей И и передача их в копировальное бюро или лабораторию электрографии 10. Получение калек или копий и оригиналов комплекта рабочих чертежей, регистрация и передача их конструктору-разработчику 13. Регистрация, учет и передача калек или копий комплекта рабочих чертежей И в нормоконтроль 25. Регистрация, учет и передача ТЗ на выпуск МЧ конструктору-разработчику 31. Регистрация, учет и передача оригиналов МЧ на проверку лаборанту-разработчику 35. Регистрация, учет и передача оригиналов МЧ конструктору 37. Регистрация и передача оригиналов МЧ в копировальное бюро или лабораторию электрографии 39. Регистрация, учет и передача калек или копий МЧ дан-

ного И для введения их в СП 41. Передача калек или копий МЧ и извещений с комплектом СП в нормоконтроль 45.

Техник ЭФ. Определение пригодности оригиналов КД к электрофотографированию, регистрация в книге учета, снятие копий, их обрезка и окантовка, подбор комплекта копий и оригиналов КД и передача их в ППГ 12.

Технолог. Проверка технологичности конструкций по использованию операций литья, сварки, склеивания и т. п. и подписание калек или копий (после необходимых исправлений) в графе «Технолог» 18.

Характерные структуры и подразделения конструкторских служб

Конкретная структура той или иной конструкторской службы определяется в основном характером организации (конструкторские службы НИИ проводят разработку новых конструкций, в заводских СКБ главное — ведение производства), особенностью и числом заказчиков (однородные или разнородные требования к конструкции), особенностью схемных решений РЭА (РЭА узкого или широкого профиля по назначению), объемом конструкторских разработок и степенью унификации конструкторских решений.

В результате получается многообразие структур от чисто последовательных или чисто параллельных до смешанных. В них в явной или скрытой форме, кроме чисто конструкторских, присутствуют подразделения: 1) планово-производственные (экономист, группа или отдел), цель которых — учет, контроль и планирование работ; 2) надежности, в которых разрабатываются необходимые рекомендации по повышению надежности И; 3) художественного конструирования (оптимизация взаимосвязей «человек + РЭА», единство стилового и художественного решения групп И данного предприятия); 4) патентоведения (определение патентной чистоты И и рекомендаций по ее достижению); 5) научной организации труда (создание условий комфортной зоны, психологической совместимости, повышение качества

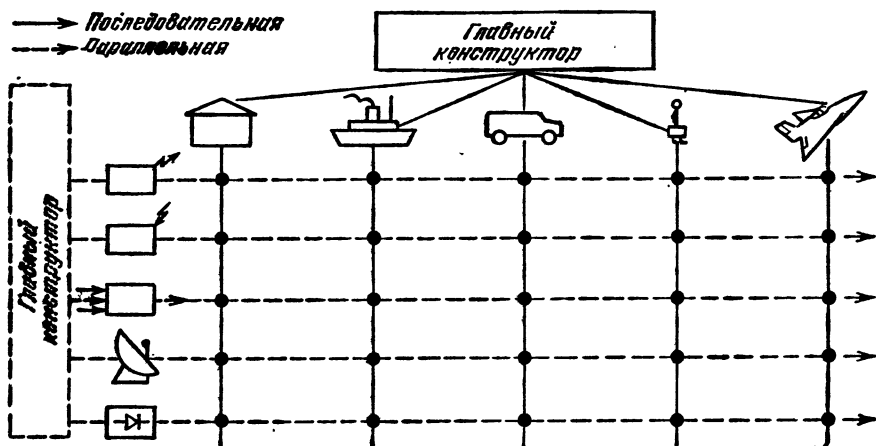


Рис. 7.3. Последовательная и параллельная структуры конструкторских служб, предельными случаями которых являются разработки по схемам: от объекта к функциональным блокам РЭА или от функциональных блоков к конструкциям РЭА для объекта

и производительности труда); 6) технической информации (необходимые в работе монографии, справочники, ГОСТы, ОСТы, СТП, РТМ и другие нормативно-технические документы); 7) технической документации (копирование, размножение и хранение КД); 8) чертежно-конструкторское бюро (выполнение чертежей по эскизам); 9) нормоконтроля (проверка выполнения КД в соответствии с действующими ГОСТами, ОСТами, СТП и подобными документами); 10) технологичности (проверка возможности выполнения деталей и узлов на технологической базе предприятия).

При последовательной структуре разработка конструкции РЭА ведется для конкретных объектов-носителей (наземная, морская, возимая, носимая, самолетная), при параллельной — по схемотехническим особенностям (передающая, приемная, обработки данных, антенных устройств и устройств питания) (рис. 7.3).

Наиболее оптимальными будут структуры, в которых учтены: перспектива развития характерных типов конструкций, деловые и профессиональные качества всех руководителей и ведущих специалистов, характер существующих и перспектив-

ных разработок. Этим требованиям лучше всего отвечают гибридные структуры, в которых характерные типы РЭА по сменным признакам разрабатываются по параллельной схеме, характерные конструкторские комплексы — по последовательной и имеется «гибкий» резерв специалистов из аппарата Главного конструктора и отдельных специалистов (групп, бюро, отделов и т. п.) во вопросам плано-производственным, художественного конструирования и т. п.

7.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ТВОРЧЕСКОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКТОРА [2, 7, 12]*

Общие положения

Новая конструкция вначале формируется в сознании конструктора в виде мысленного образа изделия МОИ, который отображается затем в графической форме как чертеж общего вида И. Изображение на чертеже — аналоговая модель И, допол-

* Составители В. И. Семернев, Р. Г. Варламов.

няемая текстовыми пояснениями и расчетами.

Так как создание МОИ является частью процесса мышления, который никогда не прерывается, то эту часть творческой работы конструктора регламентировать очень трудно.

Правильные организация работ, подбор и расстановка кадров создают нормальную творческую и рабочую обстановку, дают удовлетворение от работы, обеспечивают сведение к минимуму стрессовых ситуаций и способствуют, как минимум, повышению качества и производительности труда на 25...30%.

Наиболее характерными причинами нарушения нормального течения творческого процесса являются: ненормальные взаимоотношения, неупорядоченность деловых отношений между руководителями и подчиненными, незнание должностных инструкций и положений, чрезмерное число и продолжительность совещаний с привлечением тех сотрудников, чье присутствие вовсе не обязательно, отвлечение специалистов на неквалифицированные работы, отклонение от норм трудовой дисциплины, недостаточная подготовленность к данной конкретной работе.

В творческой работе конструктора можно выделить семь характерных стадий: аналитическую, поисковую, формулировочную, повторного анализа, оперативного анализа, вариационную и итоговую.

Аналитическая стадия. Выполнение расчетов определяющих параметров идеализированной конструкции в целом и по характерным частям и проверка их соответствия требованиям ТЗ, проработка эскизных вариантов конструкции, оценка факторов, мешающих созданию идеального И или его частей, выявление причин, определяющих возможность ликвидации мешающих факторов. Результат: формулировка путей решения задачи.

Поисковая стадия. Выбор наиболее целесообразных путей решения, уточнение конечной задачи конструирования, определение возможности решения данной задачи конструирования другим путем (где заданный эффект может быть получен простыми способами), оценка эффективности

выбираемых решений и формулировка требований к ним, оценка ожидаемой эффективности конструкции И, учет дополнительных требований. Результат: уточнение или замена исходной задачи на задачу с более четкой формулировкой ее внутреннего технического противоречия.

Формулировочная стадия. Уточнение условий задачи, анализ патентной и другой литературы, оценка возможности решения при пренебрежении к затратам, изменение задачи при уменьшении требуемого показателя почти до нуля, изменение задачи при увеличении требуемого показателя во много раз, формулировка сути задачи без специальных терминов. Результат: четкая формулировка задачи конструирования И.

Стадия повторного анализа. По результатам проведенных уточнений предыдущих стадий выполняется построение идеальной конструкции И на базе реальных конструктивных материалов и условий с учетом реальных помех в решении задачи, оценки их непосредственных причин и возможностей устранения помех решению. Результат: четкая формулировка технических противоречий и путей их преодоления.

Стадия оперативного анализа. Оценка возможности устранения технического противоречия по методике АРИЗ, проверка возможности изменений в окружающей среде при работе И, оценка решения задачи при изменении окружающих факторов или смене объектов, проверка возможных изменений во времени, бионические и другие прототипы решения подобной задачи. Результат: нахождение основного варианта решения задачи конструирования И.

Стадия вариационного анализа. Вариация параметров отдельных частей И, вариации свойств окружающей среды и объектов, изменение методов использования И, оценка полученных вариаций. Результат: формулировка уточнений для окончательного решения задачи.

Итоговая стадия. Конструкторские расчеты и разработка общего вида И с последующей детализацией и описанием. Результат: комплект КД на И.

Использование методики АРИЗ [2]

Обобщение практики творческой работы дает возможность быстрее выбрать правильное направление решения задачи. В методике АРИЗ рекомендуются основные правила разрешения технических противоречий. Применительно к разработкам конструкций РЭА они следующие:

1. Дробление И на независимые друг от друга части (функционально-узловой метод конструирования РЭА).

2. Вынесение либо выделение единственно нужного или ненужного свойства (например, экранирование одного источника наводок, влияющего на многие приемники наводок).

3. Проявление местного качества для того, чтобы каждая часть хорошо выполняла свою частную функцию (например, изоляционная подложка и медная фольга в ПП).

4. Асимметричность конструкции (расположение регуляторов и индикаторов в соответствии со способностями левой и правой руки и рекомендуемыми областями расположения индикаторов).

5. Объединение разных функций в одном элементе конструкции (свойства экрана, радиатора и корпуса РЭА).

6. Универсальность (светящаяся кнопка используется для включения и индикации).

7. Принцип «матрешки», когда элементы конструкции последовательно располагаются друг в друге (кристалл ИС в корпусе, корпус в ячейке, ячейка в блоке, блок в стойке).

8. Антивес — компенсация веса элемента конструкции подъемной силой (лопасты вентилятора «поднимают» ротор электродвигателя, уменьшая нагрузку на опорный подшипник при работе).

9. Предварительное напряжение элемента конструкции обратного знака (запрессовка втулочных подшипников механизмов, работающих, при значительных перепадах температур).

10. Предварительное исполнение (встроенный разрядник высоковольтных цепей конструкции РЭА, рымболты для такелажных работ).

11. Принцип «заранее положенной подушки» в конструкции (повышение надежности слабого звена, его резервирование).

12. Принцип эквипотенциальности конструкции (принцип эквипотенциальных ОГМ ЭЛ при компоновке).

13. Действие наоборот (для стабильности работы РЭА нагревать ее до определенной температуры, которую легче поддерживать стабильной; менять местами движущиеся и неподвижные элементы конструкции — ротор с обмотками неподвижен, а безобмоточный статор вращается; конструкция переворачивается «вверх ногами»).

14. Использование эффектов сферичности и плоскости (отношение объема к поверхности у шара максимально, а у диска — минимально, что важно при выборе форм элементов конструкции, предназначенных для накопления энергии или ее эффективной отдачи).

15. Динамичность свойств конструкции или ее элементов (нелинейность жесткости амортизаторов, позволяющая достаточно эффективно защищать РЭА от вибраций и ударов).

16. Замена одного общего сложного решения несколькими простыми (разделение амортизатора на две части: пружину сжатия, обеспечивающую жесткость, резиновый мешок с отверстием — демпфирование).

17. Перевод конструкции РЭА или ее элементов в другое измерение (замена двухмерной проволочной спирали резистора плоским слоем в пленочном и штабиком — в объемном исполнении).

18. Изменение свойств среды, окружающей РЭА (замена воздуха на жидкость в системах охлаждения, замена стального экрана пермаллово-медным с повышенной эффективностью действия).

19. Импульсность действия (накопление энергии от маломощного источника длительное время и быстрый разряд в импульсных модуляторах и подобных устройствах).

20. Непрерывность полезного действия (блок питания микрокалькулятора при выключении работает как зарядное устройство аккумуляторов).

21. Проскок на большой скорости (быстрое изменение скорости вращения двигателя, чтобы не успели возникнуть резонансные явления в конструкции).

22. Обращение вреда на пользу (тепло, выделяемое РЭА, использовать для обогрева помещения).

23. «Клин — клином», когда два вредных фактора действуют в разные стороны (различные системы термокомпенсации).

24. Принцип «перегибания палки», когда усиление вредного фактора превращает его в союзника (повышенная температура среды в нувисторах позволяет отказаться от цепей накала).

25. Самообслуживание РЭА (современные адаптивные системы, которые сами проводят диагностику и саморемонт).

26. Принцип копирования сложного и совмещения с ним масштаба (индикатор РЛС с условным изображением объекта и метками расстояний).

27. Использование дешевой недолговечности взамен дорогой долговечности или наоборот (сменные электронные лампы или гальванические батареи).

28. Замена силы одной природы на другую: механическую на электрическую, акустическую, магнитную и т. п. (замена механических систем настройки на электронные, использование импульсных пьезотрансформаторов).

29. Замена твердых элементов конструкции на пневмо- и гидроконструкции (надувные обтекатели или отражатели антенны).

30. Использование гибких и тонких элементов (гибкие ПП, тонкие и толстопленочные ИС).

31. Использование магнитов и электромагнитов (магнитные муфты, магнитные компоновочные доски, дистанционное управление с помощью электромагнитов, электромагнитные контакты).

32. Изменение окраски или прозрачности объекта (изооптические компоновочные модели, изопирометрические краски для измерения температуры).

33. Однородность объекта (одинаковость свойств материалов для заливки и заливочной капсулы ЭЛ).

34. Отброс или видоизменение ненужных частей (использование тары в виде подставок, отстреливание разъемов ракетной РЭА).

35. Изменение структуры ЭЛ или конструкции РЭА в целом (испарительные системы охлаждения, антенна из металлических катушек, натягиваемых тросом).

Интенсификация творческой работы

На интенсификацию творческой работы влияют: психологические навыки, повышение наглядности, коллективность разработки, преодоление психологической инерции и синектика (генерирование случайных идей).

Психологические навыки. Решая разнообразные конструкторские задачи, человек вырабатывает ряды ассоциаций в виде быстро воспроизводимых стереотипов мышления, которые позволяют ускорить выполнение творческих работ. Чем больше и разнообразнее ряды ассоциаций, тем больше стереотипов и выше вероятность решения новых задач.

Повышение наглядности. Базирруется на множественности сенсорных входов человека, которая позволяет анализировать многомерные стимулы быстрее и точнее одномерных. Увеличение «мерности» графического изображения можно достичь за счет использования цвета (эскизы ПП), объема (художественно-конструкторские макеты) и подобных приемов.

Коллективность разработки. Позволяет избежать традиционных для одного человека решений и ошибок, так как при обсуждении идеи разработки идет непрерывный обмен мнениями и коррекция принимаемых решений.

Преодоление психологической инерции. Инерция развивается при многократном применении одних и тех же привычных методик, которые вырабатывают косность конструкторского мышления и создают познавательно-психологический барьер для нестандартных решений. Для преодоления инерции необходимо развивать интуицию, используя разные методики разработок конструкций: инверсию («переворачивание» функций ЭЛ конструкции), аналогии (заимствование аналогичных решений

из других областей техники), фантазию (рассмотрение заведомо нереальных или идеализированных решений для нахождения новых идей).

Генерирование случайных идей. Вид совещания, на котором рассматриваются идеи, хотя бы частично относящиеся к делу, которые не высмеиваются и не критикуются, ибо 10...20% из них, как правило, дают интересные и плодотворные решения. Разновидностью такого приема (его иногда называют «штурмом мозга») является синектика, при которой последовательно рассматривают символические аналогии до тех пор, пока не будет найдена какая-либо плодотворная идея.

Механизация и рационализация конструкторских работ

Механизация — совокупность приемов, позволяющих сокращать время вычерчивания графических ЭЛ чертежа. К ней относят использование трафаретов из прозрачного или полупрозрачного материала с окнами, размеры и форма которых соответствуют ЭЛ; деколей — сухих переводных картинок схемных или конструктивных ЭЛ на прозрачной пленке; специальных печатных машинок с чертежным шрифтом, цифрами, знаками обработки, обозначениями ЭЛ схем и чертежей; лежал, эллипсографов, электрорезинок и тисилок, наборов чертежных инструментов со штриховальными и пунктирными приборами, чертежных приборов.

Рационализация — уменьшение объема чертежных работ. К ней относят: упрощение графики ЭЛ чертежа; выклеивание ЭЛ чертежа темной-красной или черной лентой на прозрачной пленке из винипрозы или остролона, которые потом используются в качестве оригиналов ПП; использование наклеиваемых или примагничиваемых аппликаций (последние часто называют темплетами) на чертежи-заготовки; чертежи-заготовки каркасов, шасси, ПП, на которых выполнены только общие для группы И ЭЛ, частные же ЭЛ дорисовываются, вклеиваются или «примагничиваются»; выполнение оригиналов КД на миллиметровке с желтой сеткой, которая за-

тем смывается в ацетоне; использование миллиметровых и чертежных бумаг с синей сеткой, которая не пропечатывается на электрофотографических копиях.

Практика использования ряда этих методов изложена в § 7.3. Степень их эффективности при постоянной работе специального сектора или группы следующая: рационализация выпуска КД за счет упрощения графики, использования чертежей-заготовок и табличных чертежей обеспечивает сокращение трудоемкости на 25...30%; использование аппликаций, темплетов и выклеивание чертежей — 16...20%; использование различных приемов механизации — 10...15%. Выполнение конструктором-разработчиком эскизов деталей с последующим их выполнением по стандартам ЕСКД в специальном чертежно-конструкторском бюро позволяет ему в 1,5...2 раза сократить время на детализовочные работы.

7.3. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРАКТИКИ КОМПОНОВКИ [4]*

Компоновка РЭА (лат. *componere* — складывать) — размещение в пространстве или на плоскости ЭЛ, имеющих электрические соединения в соответствии с принципиальной схемой, и обеспечение допустимого минимума паразитных взаимодействий, которые не нарушают значения расчетных выходных параметров РЭА.

Энергетическое несовершенство РЭА по преобразованию энергии источников питания в энергию выходного сигнала (чаще всего $K_{\text{пл}} = 10^{-3}...10^{-10}$) — причина больших тепловыделений, для отвода которых требуется развитие поверхности конструкций и высокая эффективность теплоносителя.

Емкостные и индуктивные ЭЛ РЭА требуют для нормальной работы определенного объема пространства, в котором при их работе возникают электрические и магнитные поля. Их локализация требует увеличения объема конструкции РЭА

* Составитель Р. Г. Варламов.

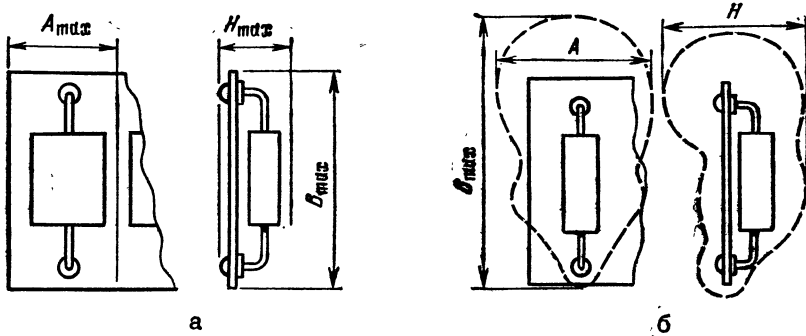


Рис. 7.4. Схема определения установочного объема $V_{уст}$ (а) и объема обобщенной геометрической модели ОГМ (б)

либо использования специальных экранов.

Сложные условия эксплуатации, энергетическое несовершенство РЭА, необходимость учета при компоновке «объемов» электрических и магнитных полей — причина усложнения проблем компоновки ЭЛ РЭА, которая может быть определяющим фактором при выборе того или иного компоновочного решения РЭА. Поэтому компоновочными моделями ЭЛ или РЭА в целом являются не геометрически адекватные им модели, а модели, геометрически обобщающие всю совокупность их свойств. Такая модель называется обобщенной геометрической моделью ОГМ (см. гл. 8).

Сложность расчета и формы ОГМ — причина использования в практике компоновочных работ упрощенных компоновочных моделей в виде установочных объемов $V_{уст}$ или площади $S_{уст}$ ЭЛ. $V_{уст}$ ($S_{уст}$) — прямоугольный параллелепипед (или прямоугольник), описанный вокруг ЭЛ с учетом его максимальных установочных размеров, требований по монтажу и регулировке и дополнительных объемов или пространства, обеспечивающих его нормальную работу при данном тепловыделении, электрических и магнитных взаимодействиях.

Размеры ОГМ ($V_{уст}$ и $S_{уст}$) — функция геометрии ЭЛ и его режима работы. При малых $K_{нгр}$ по мощности (0,1...0,3) можно использовать упрощенные соотношения для

вычислений $V_{уст}$ и $S_{уст}$ по нормализованным установочным размерам (рис. 7.4, а):

$$\begin{aligned} V_{уст} &\approx 1,5 A_{\max} B_{\max} H_{\max}; \\ S_{уст} &\approx 1,3 A_{\max} B_{\max}. \end{aligned} \quad (7.1)$$

При значениях $K_{нгр} > 0,3 \dots 0,5$ вычисление $V_{уст}$ и $S_{уст}$ затрудняется, так как необходимо вычисление объемной или плоской ОГМ со сложными образующими (рис. 7.4, б), что требует знания начальных и граничных условий.

Аналитическая компоновка

В ее основе лежат выражения

$$\begin{aligned} V_{\Sigma} &= K_{ув}^v \Sigma V_{уст i} = (1/K_{зап}^v) \Sigma V_{уст i}; \\ S_{\Sigma} &= K_{исп}^s \Sigma S_{уст i} = (1/K_{исп}^s) \Sigma S_{уст i}, \end{aligned} \quad (7.2)$$

где V_{Σ} (S_{Σ}) — суммарный объем (площадь) РЭА; $K_{ув}^v$ ($K_{исп}^s$) — коэффициенты увеличения объема (площади) РЭА, зависящие от назначения и условий эксплуатации и равные 5...1 (3...1); $V_{уст i}$ ($S_{уст i}$) — установочный объем (площадь) i -го элемента; $K_{зап}^v$ — коэффициент заполнения РЭА по объему (0,2 ... 1); $K_{исп}^s$ — коэффициент использования площади платы, шасси и т. п. (0,33...1).

Объемная масса РЭА обычно лежит в пределах 0,4...1,6 г/см³.

При малом разнообразии форм ЭЛ можно (в частности, при компоновке ЭЛ топологических структур пленочных и гибридных ИС) использовать единичный геометрический компоновочный параметр в виде квадрата или куба, сводя площади (объемы) ЭЛ к исходному нормированному значению и вычисляя общую площадь (объем) в нормированных значениях. Для ЭВМ и устройств обработки данных часто используют простые соотношения вида: число функций/(объем, число ЭЛ, площадь) и им подобные.

Аналитическими методами пользуются при ограниченном количестве типоразмеров ЭЛ РЭА на стадиях ЭП и ТП.

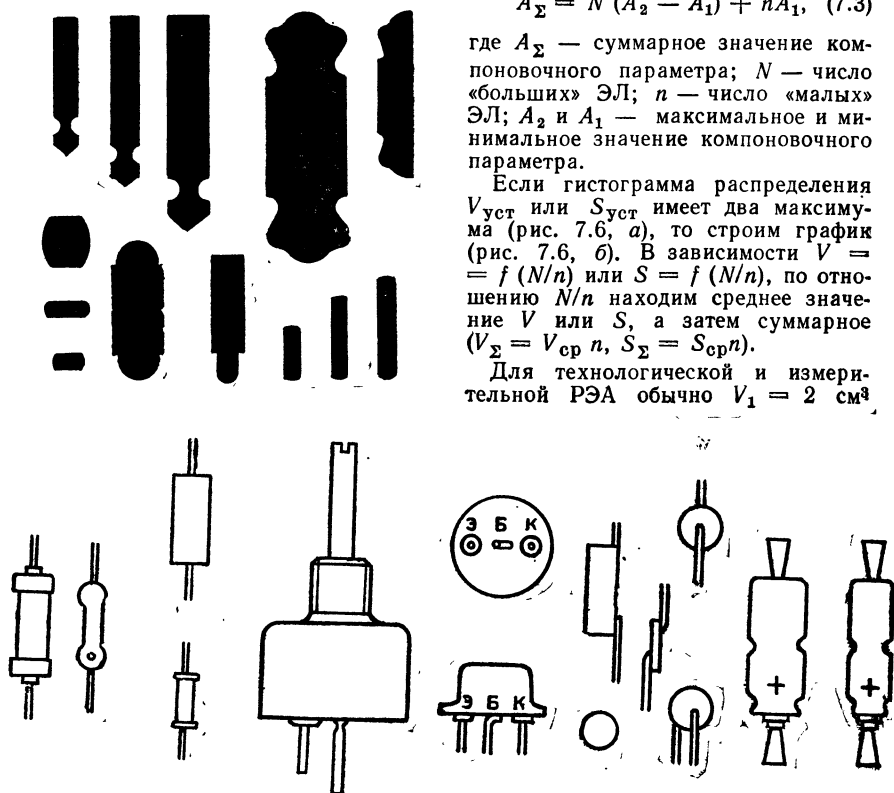
Графическая компоновка

Основана на упрощении графики и ускорении процесса вычерчивания ЭЛ. Используется при выполнении компоновочных эскизов и монтажных чертежей.

По современным стандартам ЕСКД допускается весьма значительное упрощение начертаний ЭЛ РЭА. Для ускорения выполнения графических работ используют деколи (сухие переводные изображения на прозрачной пленке), трафареты (рис. 7.5), специальные штампы и т. п.

Графическими методами пользуются на стадиях ЭП и ТП при разработке эскизов и монтажной КД.

Рис. 7.5. Часть трафарета для выполнения графической компоновки и виды упрощенных начертаний ЭЛ



Графоаналитическая компоновка

В ее основу положено выражение

$$A_{\Sigma} = N(A_2 - A_1) + nA_1, \quad (7.3)$$

где A_{Σ} — суммарное значение компоновочного параметра; N — число «больших» ЭЛ; n — число «малых» ЭЛ; A_2 и A_1 — максимальное и минимальное значение компоновочного параметра.

Если гистограмма распределения $V_{уст}$ или $S_{уст}$ имеет два максимума (рис. 7.6, а), то строим график (рис. 7.6, б). В зависимости $V = f(N/n)$ или $S = f(N/n)$, по отношению N/n находим среднее значение V или S , а затем суммарное ($V_{\Sigma} = V_{ср} n$, $S_{\Sigma} = S_{ср} n$).

Для технологической и измерительной РЭА обычно $V_1 = 2 \text{ см}^2$.

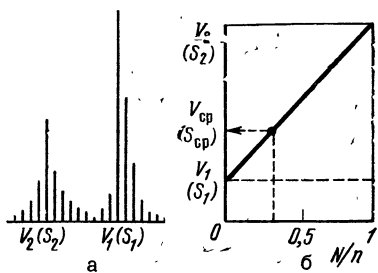


Рис. 7.6. Характер распределения компоновочных параметров и их связь с отношением N/n для графоаналитической компоновки

и $V_2 = 10 \text{ см}^3$. В этом случае проще использовать формулу $V_\Sigma = 8N + 2n$, которая получается после подстановки численных значений V_1 и V_2 в (7.3).

Графоаналитический метод целесообразно использовать для быстрой приближенной оценки компоновочных параметров на стадиях ПТ и ЭП и при достаточной однородности компоновочных параметров и анализируемых И.

Машинная компоновка

Предназначена для замены ручного труда конструктора работой ЭВМ, в которой используются принципы перебора возможных вариантов расположения ЭЛ и возможных мест трассировки соединений с помощью ЭВМ. Так как используются несвойственные цифровой ЭВМ логические алгоритмы, то эффективность таких методов оказывается значительно ниже методов решения цифровых задач (см. гл. 8). Практика выполнения машинной компоновки и оборудование для нее описаны в § 7.5.

Эффективность методов машинной компоновки тем выше, чем выше жесткость иерархических конструкторских уровней РЭА (стойка, рама, панель, субпанель, типовой элемент замены ТЭЗ с «гнездами» для ИС или дискретных ЭЛ. Чем ограниченной их номенклатура, тем больше степень унификации схемных и технологических решений. Наиболее целесообразно использование комплексного подхода и решение

не частных задач машинной компоновки, а машинного проектирования РЭА в целом. В противном случае эффективность применения машинной компоновки позволяет повысить производительность конструкторского труда всего на 8 ... 10%.

Машинные методы целесообразно использовать на стадии ТП при разработке КД для комплексных (совместно с технологическими системами) систем автоматизации проектирования РЭА.

Натурная компоновка

В ее основе разработка лабораторных макетов из реальных ЭЛ, соединенных в полном соответствии с принципиальной схемой И. Эта компоновка эффективна, когда компоновка ЭЛ на макете, форма и размеры макета соответствуют ТЗ на разработку конструкции И. В противном случае (особенно при высокой плотности компоновки) неизбежна длительная доводка образца до требуемых параметров.

Если выполнить ЭЛ в виде «магнитных кубиков» (залить их в прозрачную пластмассу, армировать контактами и магнитными держателями), которые имеют $V \cong V_{уст}$, то возможно быстрое моделирование достаточно сложных И (широкополосных ВУ, измерительных приборов и т. п.).

Натурные методы целесообразны на стадии отработки принципиальной схемы и формулировки ТЗ на конструкцию И.

Номографическая компоновка

Используются нормированные значения компоновочных параметров по ряду предпочтительных чисел R20 (обеспечивающих при 140 значениях с точностью $\pm 6\%$ любое значение компоновочного параметра в диапазоне значений 10^7 раз), специальных таблиц с рассчитанными значениями $V_{уст}$, $S_{уст}$ и m , номограмм и таблиц со значениями $K(K_{зап}^v, K_{исп}^s)$.

Номограммы строятся по формулам:

$$nA_i = f(n; A_i); A_1 + A_2 = f(A_1; A_2); A_{\Sigma k} = f(A_{\Sigma}; k; K); A_0 = (A_1; A_2)$$

где A — частные и общие значения компоновочных параметров, а n — число элементов (компонентов).

Точность и достоверность получаемых результатов, а также быстрота расчета (5...10 мин) делают целесообразным использование метода как на стадиях ПТ, ЭП, так и ТП.

Объемная компоновка

Основана на представлении упрощенных объемных моделей. Степень наглядности очень высокая. Используется для моделирования печатных плат с дискретными ЭРЭ в виде условных моделей (рис. 7.7, а) и отработки трассировки в виде моделей ЭРЭ, близких к оригиналу (рис. 7.7, б), для простых топологических задач ИС (рис. 7.7, в), для компоновки элементов модулей (рис. 7.8).

На практике объемное моделирование чаще всего используют не для компоновочных моделей ФУ, а для компоновочных моделей более крупных И, для посадочных и художественно-конструкторских макетов (последние часто выполняют в цвете). Применяют магнитные компоновочные модели, имитирующие РЭА в целом.

Объемные компоновочные модели используют на стадиях ЭП и ТП в виде весовых (габариты, форма, масса и координаты ЦТ макета соответствуют И), тепловых (габариты, форма, мощность тепловыделения и пространственное расположение теплонагруженных ЭЛ макета соответствуют И) и художественно-конструкторских (форма и цвет макета соответствуют И) макетов.

Плоскостная компоновка

Основана на представлении упрощенных плоскостных моделей. Используются вычерченные в масштабе чертежи-аппликации на чертежной бумаге, тонком картоне, или пергаменте (рис. 7.9), их komponуют на модели платы и, добившись нужного результата, перерисовывают полученную компоновку на пергамент (чертежную бумагу марок «Д» и «Ч») или белую чертежную бумагу или делают на электрофотографи-

ческой машине копию. Контур чертежей аппликаций следует выполнять с учетом размеров ОГМ (в виде проекции $V_{уст}$ или $S_{уст}$ элемента).

Возможно выполнение магнитных аппликаций (их часто называют темплатами) на окрашенной жести или бумаге с ферромагнитным покрытием. В этом случае основой компоновочной модели является магнитная доска (стол или матрица в виде ящика со шнурами магнитной резины или с плоскими магнитами), на которую накладывается чертеж-заготовка ПП или ТЭЗ. Моделирование соединений выполняют темно-красной липкой лентой.

Плоские компоновочные модели используют при разработке КД на подготовительной стадии ТП. Разновидностью плоских компоновочных моделей являются видимые изоптические.

Изооптическая компоновка [5, 6, 11]*

В ее основе — использование двухкомпонентных оптически неоднородных термочувствительных структур, которые позволяют сделать видимым тепловое поле нагретых тел в виде моделей или реальных ЭЛ РЭА. Цвета наблюдаемых участков ОГМ с определенными значениями температуры определяются параметрами изоптической структуры.

Изооптическая структура включает в себя две фазы: мелкодисперсную (порошок оптического стекла, кристаллы) и непрерывную (органические жидкости, полимеры). Если зависимость показателя от температуры у мелкодисперсной фазы n , а у непрерывной при температуре θ_1, θ_2 и θ_3 соответственно n_1, n_2 и n_3 , то в точках пересечения 1, 2 и 3 (на частотах ν_1, ν_2 и ν_3) изоптическая структура прозрачна. Если ν_1, ν_2 и ν_3 лежат в видимом спектре, то при прохождении белого света через изоптическую структуру видны цветные участки, соответствующие температурам θ_1, θ_2 и θ_3 (рис. 7.10, а).

Используя модель компоновочной платы в виде изоптического термо-

* Составитель М. М. Чернякова.

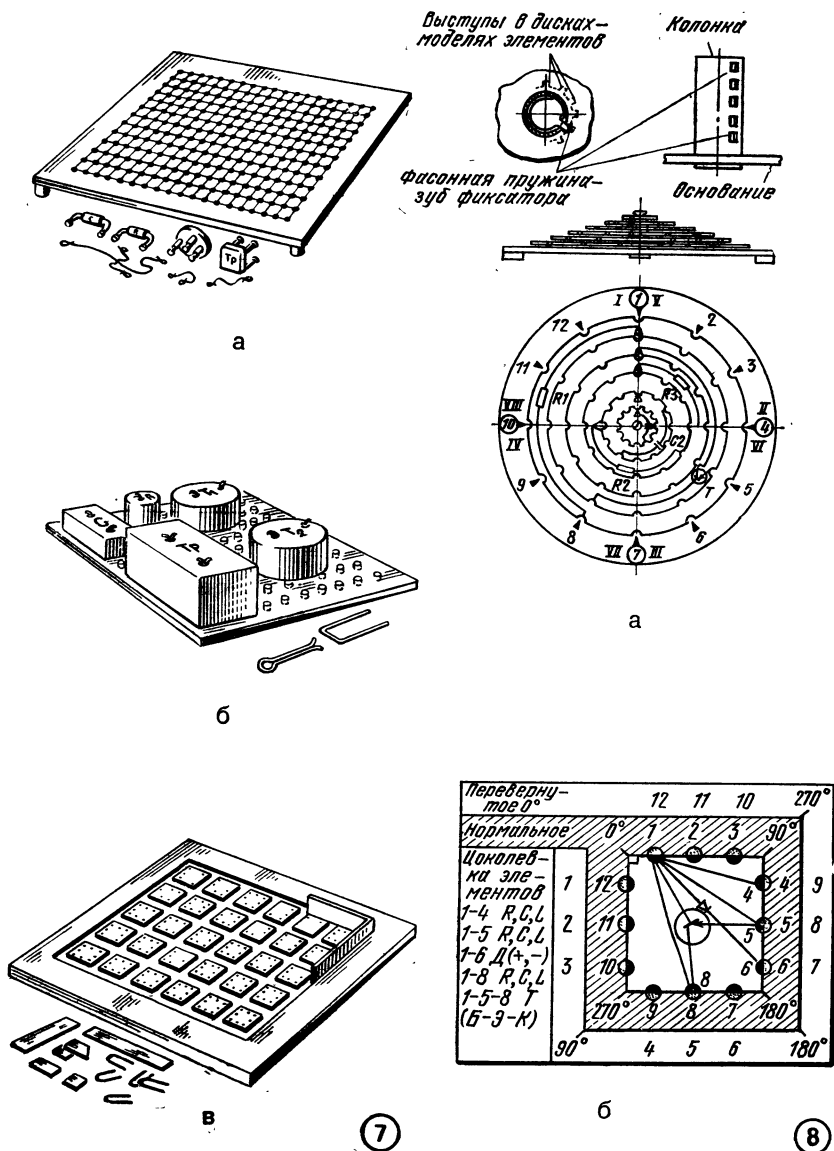


Рис. 7.7. Компоновочные модели: условные (а), объемные (б) и топологические (в) с модулями плат (подложек)

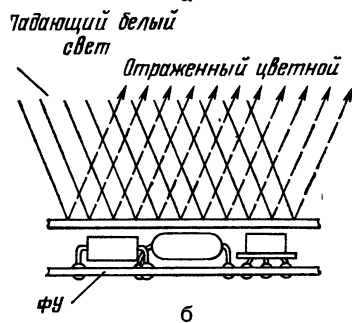
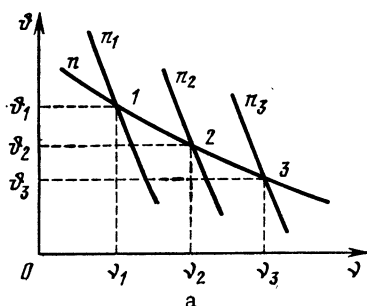
Рис. 7.8. Модель для компоновки элементов этажерочных микромодулей

датчика, работающего на отражение (рис. 7.10, б) и наложенного на реально работающий ФУ или его тепловую модель, мы получаем видимую разноцветную компоновочную модель (рис. 7.10, в). Возможна работа термодатчика на просвет. Набор изоптических датчиков на основе органических жидкостей и оптических стекол позволяет наблюдать разноцветные изотермические области с температурой $-20...150^{\circ}\text{C}$ и с разрешающей способностью от единиц до долей $^{\circ}\text{C}$.

Термодатчики обратимы (т. е. возможно их многократное использование), просты, обеспечивают непрерывность наблюдения (и измерение температуры) при изменении компоновки ЭЛ, дистанционны, обладают высокой временной стабильностью и достаточно точны. Кроме компоновочных моделей, изопти-

ческие термодатчики могут быть использованы при измерении температуры ЭЛ с высоким электрическим потенциалом, ЭЛ в полях СВЧ, в глубоком вакууме и у вращающихся объектов. Для повышения точности измерения используют вторичные измерительные приборы.

Рис. 7.10. Принципы построения изоптической структуры (а), изоптического отражательного датчика (б), компоновочная модель с изотермическими изображениями (в)



Разноцветные полупрозрачные изоптические изображения

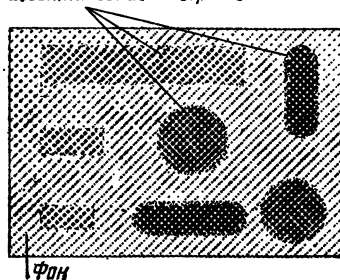
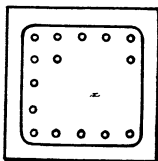
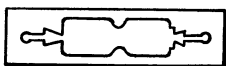
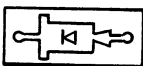
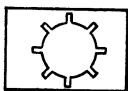
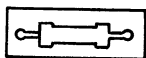
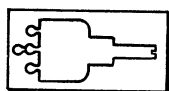


Рис. 7.9. Компоновочные аппликации



7.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ КОМПОНОВКИ ЭРЭ [4, 7]*

Общие правила

Сложность компоновки зависит от особенностей работы схемы и условий ее эксплуатации. Оценка сложности — величина относительная.

Общими факторами, определяющими усложнение компоновки за счет функциональных особенностей, являются: повышение требований к стабильности, увеличение числа входов и выходов, уровня дестабилизирующих факторов, разницы между формой и размерами лабораторного макета и проектируемого И, увеличение точности работы. Конкретные требования зависят от особенностей работы схемы.

Компоновка ЭЛ бортовой РЭА, работающей в условиях значительных по величине разнообразных дестабилизирующих факторов, наиболее трудоемка, легче — компоновка ЭЛ носимой или возимой, еще легче — стационарной РЭА. Наиболее сложны по компоновке различные усиленные устройства, проще — генераторные, еще проще — логические и устройства питания.

Компоновка элементов усилителей тем сложнее, чем выше коэффициент усиления, чем шире или уже полоса частот, чем выше или ниже резонансная частота, чем меньше длительность импульса (для ВУ). Увеличение коэффициента усиления приводит к повышению вероятности паразитных связей между входными и выходными ЭЛ. Расширение полосы частот — причина роста верхней граничной частоты, на которой резко проявляют себя паразитные параметры, особенно индуктивных ЭЛ. Уменьшение нижней граничной частоты — причина значительных затруднений в экранировании магнитных полей.

Рост резонансной частоты при уменьшении полосы частот — причина использования высокодобротных контуров, очень сложных в конструировании и чувствительных к наводкам. Понижение резонансной частоты (особенно в область

0,1...10 Гц) — причина усложнения структуры контуров, в которых часто приходится использовать электромеханические системы и им подобные решения. Сокращение длительности импульса — причина появления весьма высокочастотных компонентов разложения, которые очень чувствительны к влиянию различных конструктивных ЭЛ.

Компоновка ЭЛ генераторов тем сложнее, чем выше или ниже уровень выходной мощности, выше или ниже рабочая частота, больше число рабочих каналов, меньше плотность воздуха (наиболее опасна зона 1...3 мм рт. ст. или 133...400 Па), выше рабочее напряжение и требуемая эффективность экранирования.

Повышение выходной мощности связано с увеличением рабочих напряжения и тока, что требует увеличения расстояний между ЭЛ, увеличения сечений токопроводов, применения специальных систем охлаждения и мер по защите от ионизирующих излучений, возникающих при рабочих напряжениях выше 10 кВ. Понижение выходной мощности резко увеличивает влияние вспомогательных конструктивных ЭЛ на стабильность параметров и уровень мощности. Повышение рабочего напряжения предъявляет повышенные требования к компоновке как электрических, так и механических ЭЛ конструкции РЭА и к конструкции самих колебательных контуров (в том числе переходного типа).

Увеличение числа рабочих каналов (на каждом из которых имеется как минимум две настройки в колебательном и контуре связи) требует специальных мер по развязке контуров каналов (экраны) и сложных коммутационных устройств. Понижение плотности воздуха до 1...3 мм рт. ст. (133...400 Па) — причина тихого коронного разряда даже при напряжениях 100...200 В, что уменьшает выходную мощность, уменьшает стабильность работы и увеличивает уровень шумов (что очень нежелательно в гетеродинах приемников и измерительных генераторах). Весьма сложно решать задачу по получению высокой степени эффективности экранирования в измерительных генераторах и мощных генераторах СВЧ.

* Составитель Р. Ф. Варламов.

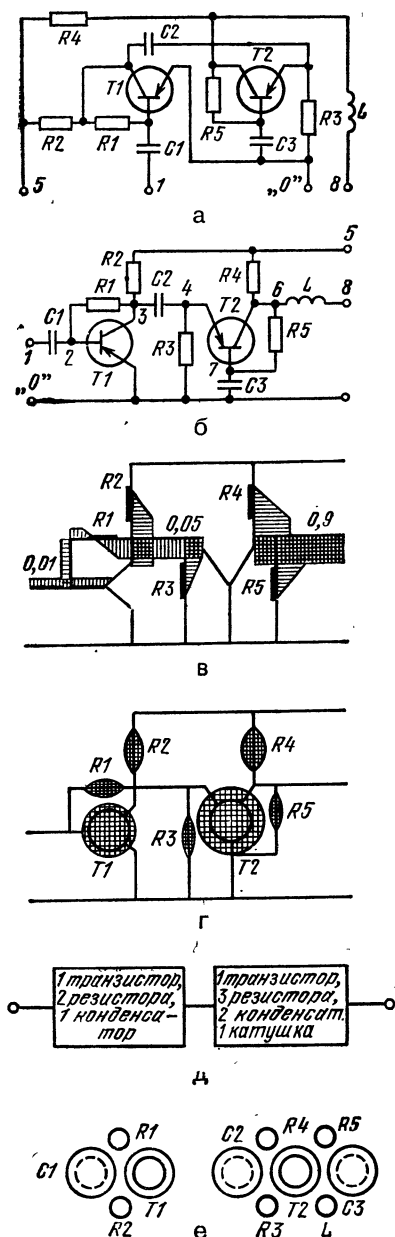


Рис. 7.11. Последовательность преобразования запутанного графического изображения принципиальной схемы (а) в более удобочитаемое (б), построение на базе удобочитаемой схемы потенциальной (в) и тепловой (г) эппюр, схемы группировки элементов (д) и компоновки (е)

Компоновка ЭЛ логических устройств (ЭВМ, системы обработки данных) тем сложнее, чем больше разница между входными и выходными напряжениями или токами, чем короче длительность импульса, выше быстродействие и точность, больше количество функций и сложнее монтажные структуры.

Чем больше разница между входными и выходными напряжениями или токами, тем выше коэффициент усиления устройства. Сокращение длительности импульса, товышение быстродействия и точности — причина появления ВЧ составляющих; рост количества функций — причина увеличения числа входов и выходов, усложнения монтажных структур и роста паразитных связей (в первую очередь емкостного характера).

Компоновка ЭЛ устройств питания тем сложнее, чем выше или ниже выходное напряжение (больше или меньше выходной ток), чем больше выходов и чем выше стабильность их параметров. Увеличение выходного напряжения или тока требует увеличения зазоров, применения прочных в электрическом отношении материалов, увеличения сечения токопроводов, применения систем охлаждения (от простейших радиаторов до сложных водовоздушных систем). Высокие стабильности выходных напряжений и токов требуют применения усилителей постоянного тока со значительными коэффициентами усиления, что при большем числе выходов заставляет рассматривать устройство питания в виде совокупности усилителей.

Дополнительными факторами общего характера будут: количество информации, перерабатываемое в И; тип активных ЭЛ (электронные, ионные, диэлектрические, магнитные, полупроводниковые); требуемая форма и размеры; вид электромонтажных соединений; технология изготовления, сборки и регулировки; заданная компоновочная схема.

После выяснения степени сложности компоновки с учетом функционального назначения и общих дополнительных факторов необходимо проанализировать ТЗ последовательно:

1. Выяснить назначение ЭЛ схемы и определить их электрические и тепловые режимы.

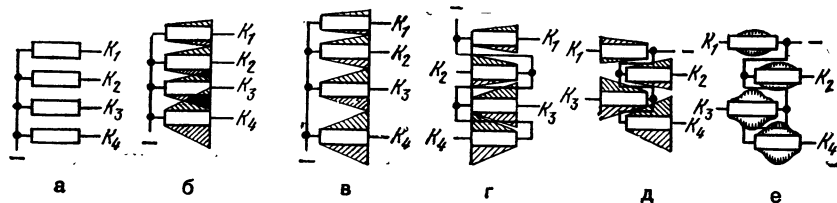


Рис. 7.12. Часть электрической схемы (а) и варианты построения потенциальных (б, в, г, д) и термальных (е) эпюр при различной компоновке элементов

2. Проанализировать условия эксплуатации и степень влияния дестабилизирующих факторов на работу ЭЛ и схемы в целом.

3. Выявить наиболее важные внутренние источники неустойчивости схемы (ее ЭЛ) и их чувствительность к внешним электрическим, магнитным, тепловым, механическим и другим видам воздействия.

4. Определить пути возможных внутренних паразитных наводок между ЭЛ схемы за счет гальванической паразитной связи, электрических, магнитных и электромагнитных полей.

5. Оценить величину, характер и особенности входных и выходных сигналов и напряжений питания (особенно в чувствительных и высоковольтных цепях).

6. Предусмотреть наличие дополнительных, не указанных на принципиальной схеме, ЭЛ в виде контрольных точек, экранов и развязывающих цепей, повышающих качество работы И.

7. Вычислить координаты ЦТ (при необходимости), проанализировать варианты координат точек крепления и характерных схемных (вход, выход, контроль, питание) точек.

8. Учесть характер смены ЭЛ, критичность расположения подборных, построечных, регулировочных и индикаторных устройств и определить на основе проведенного анализа генеральную линию компоновки И.

Функциональные узлы с дискретными элементами

Последовательность компоновки ФУ с дискретными элементами

1. Анализируем начертание принципиальной схемы и при ее запутан-

ном выполнении (например, как на рис. 7.11, а) перечерчиваем так, чтобы обеспечить простоту рисунка и легкость анализа (рис. 7.11, б).

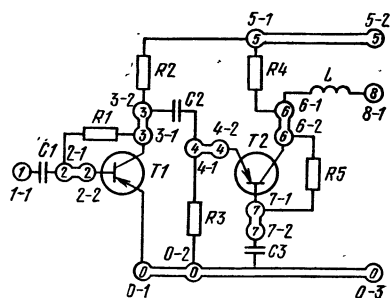
2. Составляем окончательный вариант принципиальной схемы с уточненными типоразмерами элементов и их вариаций.

3. Вычисляем потенциал сигналов и U_{\min} в характерных точках схемы для максимальных значений входных сигналов или их вариаций (для схем, имеющих различные устойчивые состояния, вычисления проводим для всех режимов), и на основе полученных данных с учетом полярности строим потенциальные эпюры схемы (на рис. 7.11, в показана только односторонняя сигнальная эпюра для положительной полярности, откладываемая вверх или вправо, а для отрицательной — вниз и влево).

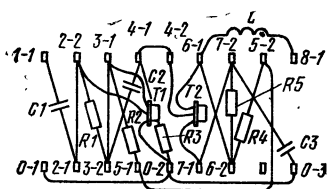
4. Рассчитываем мощности тепловых потерь схемных элементов и строим термальные эпюры (изотермы с заданной температурой на контуре), позволяющие оценить требуемую «тепловую площадь» элемента (рис. 7.11, г).

5. Группируем пассивные ЭЛ рядом с активными в виде таблицы (рис. 7.11, д), а затем в виде компоновочного эскиза (рис. 7.11, е), трансформируя полученную схему компоновки с учетом потенциальных и термальных эпюр ЭЛ и различных вариантов их взаимного расположения (рис. 7.12).

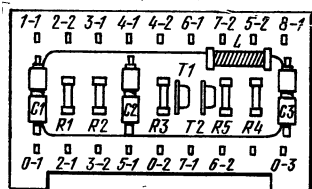
Пример последовательности составления монтажного эскиза ФУ с дискретными элементами при проволочном монтаже приведен на рис. 7.13. Принципиальная схема перерисовывается с учетом допустимых двух паяк на один лепе-



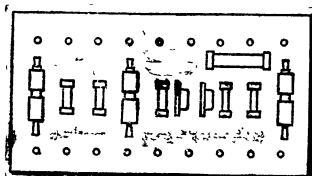
а



б



в



г

Рис. 7.13. Схема построения монтажного эскиза при проволочном монтаже

сток (рис. 7.13, а), составляется принципиально-монтажный эскиз (рис. 7.13, б), на основе которого выполняются монтажные чертежи для монтажной пластмассовой платы с окном (рис. 7.13, в) или для платы из гетинакса (рис. 7.13, г).

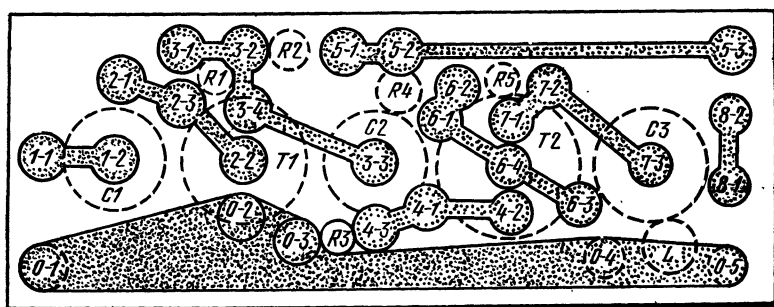
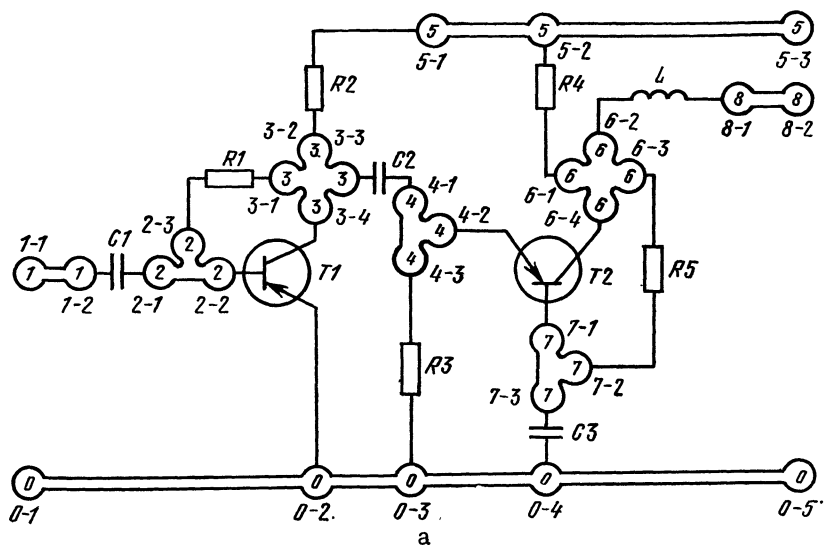
При составлении монтажных эскизов ФУ на ПП принципиальная схема перечерчивается с учетом только одной пайки в пистон (рис. 7.14, а), что позволяет получить как бы «заготовки» соответствующих печатных проводников, которые трансформируются с учетом реальных размеров ЭЛ (рис. 7.14, б) и позволяют получить окончательный вариант МЧ в виде рис. 7.14, в.

Использование методов комбинаторики позволяет создавать универсальные монтажные структуры в виде трех- и двухмерных образований. Пример УПП показан на рис. 7.15. Принцип ее построения следующий. Нумеруются точки схемы с различными потенциалами 1. Этой схеме может быть поставлен в соответствие частичный граф 2, являющийся частью полного монтажного графа 3. Используя двухмерную комбинаторную систему координат в виде двух треугольных сеток (сплошные линии — проводники на лицевой, а штриховые — на оборотной стороне УПП), мы можем (в зависимости от выполненной нумерации) получить варианты компоновки 4 и 5. Выполняя эти сетки на квадратных платах и меняя нумерацию, мы получим варианты компоновки 6...9. Практические варианты рисунков УПП — 10...13.

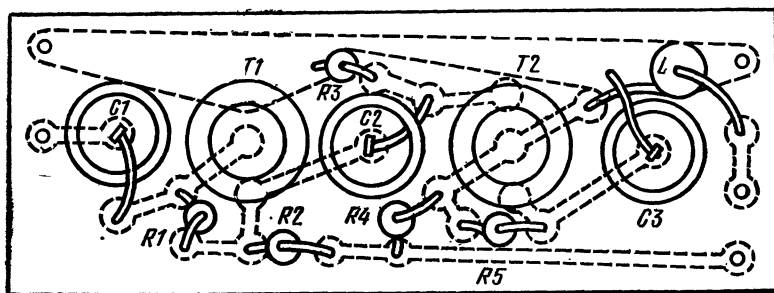
Функциональные узлы с модульными элементами

К этим ФУ относятся такие приспособления для компоновки ЭЛ, которые были показаны на рис. 7.8. Возможны и другие приемы выполнения компоновочных работ ЭЛ модульных ФУ, когда используют графоаналитические методы, специальные таблицы и варианты полных или частичных графов схемы.

Стремление к унификации типовых размеров ПП и сложность монтажных структур послужили причиной раз-



б



в

Рис. 7.14. Схема построения монтажного эскиза при печатном монтаже

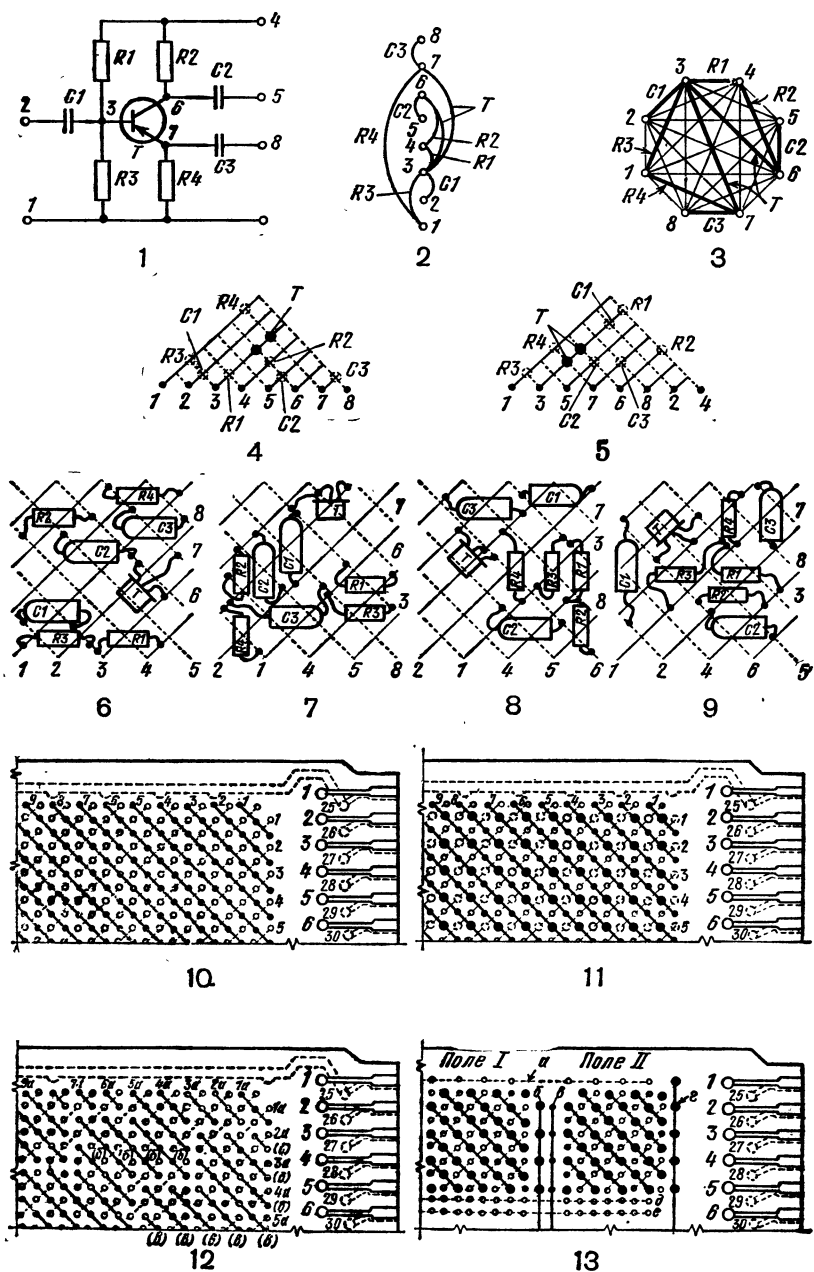


Рис. 7.15. Схема построения универсальных печатных плат

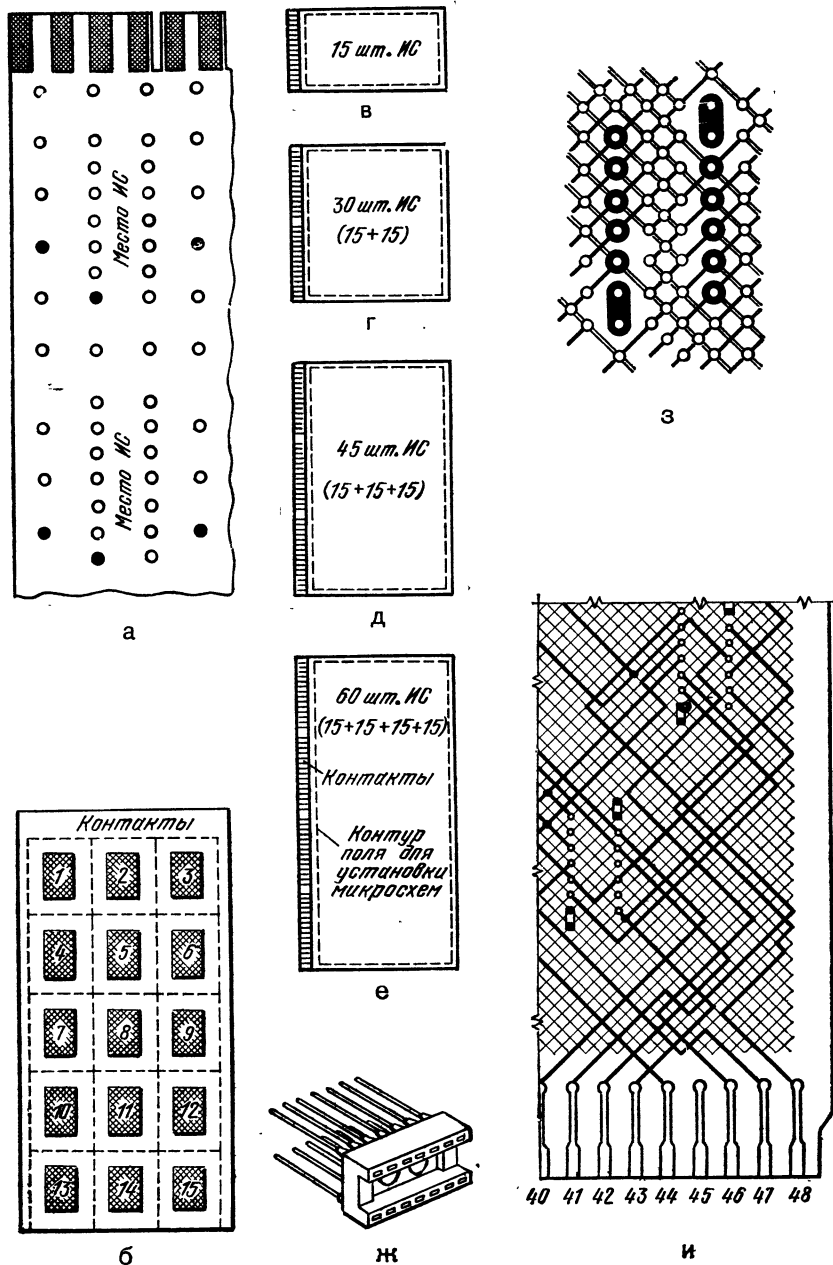
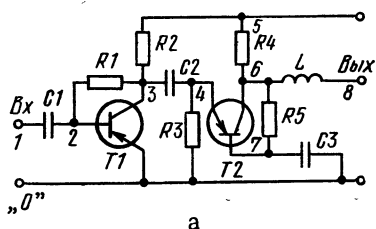
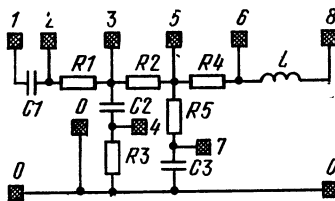


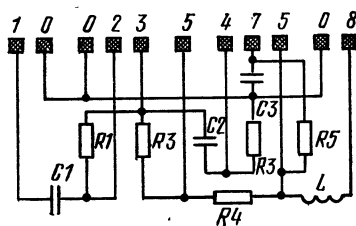
Рис. 7.16. Унифицированные УПП для ИС



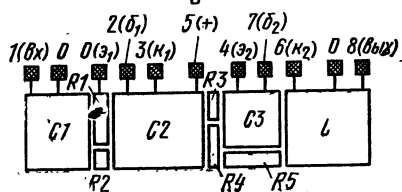
а



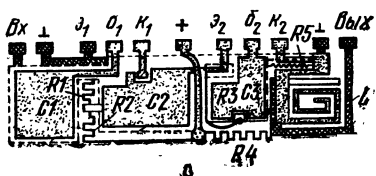
б



в



г



д

работки полууниверсальных рисунков печатных проводников на ПП (рис. 7.16).

В этом случае жестко фиксируется местоположение ФУ в виде ИС, координаты их выводов и прокладываемые общие проводники (вход, выход, питание и т. п.). При разработке МЧ делают только доработку ПП, выполняя на наружных сторонах платы промежуточные соединения (рис. 7.16, а). Фиксация месторасположения ИС облегчает решение задач компоновки (рис. 7.16, б) и позволяет получать УПП с кратным числом ИС (15 — рис. 7.16, в, 30 — рис. 7.16, г, 45 — рис. 7.16, д, 60 — рис. 7.16, е), для соединения которых можно использовать собирающийся разъем (рис. 7.16, ж).

Фиксация местоположения ИС дает возможность использовать комбинаторные двухсторонние УПП, на которых выполнены контактные площадки для выводов ИС (рис. 7.16, з), а сама УПП делится на зоны расположения ИС и их монтажных полей. При разработке МЧ определяют только точки перехода (соединения) на лицевой и оборотной сторонах и участки проводников, подлежащих снятию (рис. 7.16, и).

Топологические структуры сложных ИС выполняются машинными методами. Для разработки простых топологических структур (например, ИС частного применения) используют ручные методы со следующей последовательностью. Нумеруются характерные монтажные точки схемы (рис. 7.17, а), схема перерисовывается так, чтобы по ее контуру были контактные площадки для внешних соединений и соединений с выводами активных элементов, расположенными вне контура платы (для расположенных внутри контура контактные площадки также будут внутри контура) (рис. 7.17, б). Если требуется линейное расположение контактов, то оно может иметь вид, аналогичный рис. 7.17, в. Оценивая площадь схемных ЭЛ (для резисторов она определяется $r_{\text{ном}}$, $R_{\text{пот}}$, δ и геометрией; для конденсаторов — ϵ и используемыми материалами), получаем промежуточный эскиз топологической структуры (рис. 7.17, г), на базе которого выполняется топологический чертеж (рис. 7.17, д).

Рис. 7.17. Построение простой топологической структуры ИС

7.5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МАШИННОЙ КОМПОНОВКИ, ЧЕРЧЕНИЯ И ВЫПУСКА ТЕКСТОВОЙ КД НА ЭВМ [3, 8, 9, 10, 13] *

Возможности и стадии машинной компоновки

Развитие ЭВМ позволило в настоящее время различными способами машинного конструирования выполнять: компоновку дискретных ЭРЭ и ИС на ПП, трассировку одно-, двух- и многослойных ППП, топологию ИС, таблицы цепей МПП и жгутового монтажа, сборочные чертежи и их детализовку, текстовые документы в виде различных ведомостей и спецификаций, а также комплекты фотошаблонов слоев МПП.

Эффективность машинных способов конструирования РЭА (являющихся частью системы автоматизации проектирования) повышается с увеличением возможностей для формального (в виде уравнений) описания конструкции, с ростом степени стандартизации схемных и конструкторских решений, при четкой иерархической структуре И в целом и частых повторах аналогичных разработок. Большая сложность и трудоемкость программного обеспечения, значительные затраты на аппаратуру, используемую в системах автоматизации проектирования, делают нецелесообразным ее использование для нестандартных решений или в сравнительно простых случаях.

Для эффективной работы конструктора и ЭВМ необходимо рационально разделить их функции и обеспечить работу в диалоговом режиме.

В системах автоматизации конструирования процесс имеет обычно четыре характерные стадии: предварительный анализ, ввод данных в ЭВМ, проработка промежуточных решений, разработка окончательного варианта конструкции.

На стадии предварительного анализа происходит ознакомление с ТЗ и составление плана решения, например по методике § 7.2. Здесь же следует учесть возможности конкрет-

ной системы автоматизации конструирования, используемой в ней ЭВМ, вспомогательного оборудования и программного обеспечения. На этой стадии ЭВМ не используется.

При вводе данных в ЭВМ конструктор должен с максимальной эффективностью использовать возможности конкретной системы автоматизации конструирования, сформировав исходные данные для промежуточных (поисковых) анализов на соответствующем машинном языке или с помощью специальных устройств ввода. На этой стадии ЭВМ выполняет перевод, систематизацию, запись и хранение исходной информации для решения задачи.

На стадии проработки промежуточных решений конструктор и ЭВМ работают совместно, выполняя переработку исходной информации. При этом конструктор выполняет качественный синтез И, анализ промежуточных оценок ЭВМ, принимает решения по принципиальным вопросам и выбирает соответствующую стратегию их реализации. ЭВМ выполняет элементы алгоритмического синтеза, анализ синтезируемой конструкции, контролирует действия конструктора и выявляет ошибки, которые обнаруживаются алгоритмически, ведет выдачей результатов, графических и текстовых документов, некоторыми видами обработки данных и т. п. Наиболее эффективна совместная работа конструктора и ЭВМ на этой стадии в диалоговом режиме и реальном масштабе времени.

При разработке окончательного варианта конструкции, обобщая результаты работы на предыдущих стадиях, конструктор завершает разработку общего вида И и «порукает» ЭВМ выполнение работ по выпуску графической и текстовой документации, перфолент, фотооригиналов и т. п.

Автоматизированное рабочее место конструктора (рис. 7. 18)

Исходная информация в ЭВМ вводится с перфокарт, перфолент, магнитных дисков или лент, на которых она была предварительно записана. Оперативная информация вводится с помощью клавишного пульта, све-

* Составители В. И. Семернев, Р. Г. Варламов

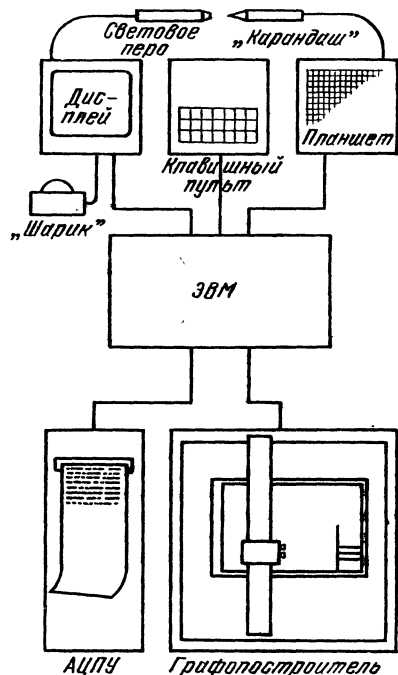


Рис. 7.18. Схема автоматизированного рабочего места АРМ конструктора

тового пера дисплея, двухкоординатных потенциометра или тумблера, планшета или координатного считывающего устройства.

Устройства подготовки данных на перфокартах УПДК-32, ЕС-9010, ЕС-9011, ЕС-9015 позволяют с первичных документов вручную с помощью электрической пишущей машинки «Консул» наносить на перфокарты алфавитно-цифровую информацию, контролировать ее правильность на бумажной ленте, размножать перфокарты.

Аналогичные устройства подготовки данных на перфолентах «Брест-1»,

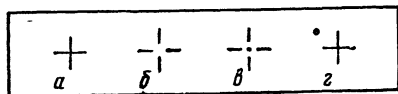
ЕС-9020, ЕС-9021, ЕС-9022 позволяют наносить на перфоленту алфавитно-цифровую информацию, контролировать ее правильность, сравнивать две или три перфоленты и размножать их. Для подготовки данных на магнитной ленте используют устройства ЕС-9001 и ЕС-9002.

С помощью клавишного пульта (отдельного, в виде части электрической печатной машинки или части дисплея) можно вводить знаки, буквы, цифры, графики, прямые линии или окружности и их части; стирать знак, часть или целую строку или весь экран; вставлять строки или знаки, сдвигать часть строки влево — вправо, создавать защищенные области, выполнять табуляцию.

Световое перо (по сути правильное говорить «световой глаз») выполнено в виде жгута световодов, с помощью которых световой сигнал с экрана дисплея подается на фотумножитель (фототриод), а с него — на схему управления. Может работать в двух режимах: «Следящего перекрестия» и «Функции указания». Режим «Следящего перекрестия» характеризуется тем, что на экране дисплея высвечивается простое перекрестие (рис. 7.19, а), перекрестие с разрывом, диаметр которого равен диаметру поля зрения светового пера (рис. 7.19, б), перекрестия с точкой в центре (рис. 7.19, в) или со смещенной точкой слежения (рис. 7.19, г). Это перекрестие с помощью светового пера можно «вводить» по экрану и по чертежу, показанному на экране. В режиме «Функции указания» световым пером можно отмечать начало или конец линии, центр окружности и т. п. операции, формировать команды «Стирания» или «Черчения» линии.

Двухкоординатный потенциометр выполняется обычно в виде небольшого механизма полусферической формы, в основании которого вмонтированы под углом 90° два потенциометра с роликами. Катая один или два ролика по поверхности, мы формируем соответствующие электрические сигналы и «рисуем» на экране чертеж. Возможно использование тумблера в пяти положениях: нейтральное, включено «вверх» или «вниз», «влево» или «вправо». При включении тумблера на экране на-

Рис. 7.19. Виды следящего перекрестия: простое, с разрывом, с точкой в центре, со смещенной точкой слежения



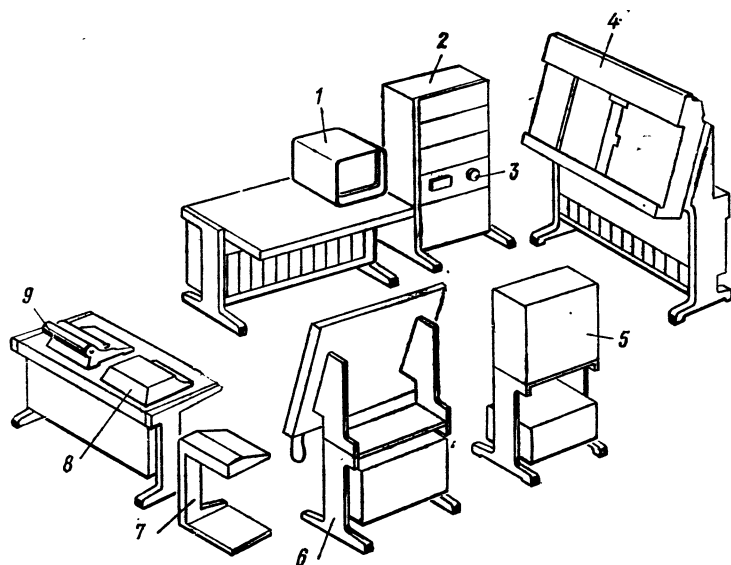


Рис. 7.20. Элементы АРМ конструктора:

1 — устройство преобразования графической информации; 2 — лентотека; 3 — фотоснимающее устройство; 4 — чертежно-графический автомат; 5 — лентотека и перфоратор; 6 — полуавтомат кодирования графической информации; 7 — клавиатура символов; 8 — клавишная ЭВМ; 9 — электрическая пишущая машинка

чинается вычерчивание линии от начальной точки.

Планшет выполнен в виде матрицы двух групп пересекающихся проводников, к которым в определенной последовательности подаются импульсные сигналы. Касаясь той или иной точки чертежа (лежащего на планшете) специальным щупом, за счет емкостной связи мы считываем импульсы и определяем точку, указанную щупом. Эта информация вводится в ЭВМ (при необходимости с определенной коррекцией).

Координатное считывающее устройство представляет собой двухкоординатную механическую систему, оптический или механический визир которой может быть совмещен с заданной точкой. При этом может формироваться сигнал координат точки и вводиться в ЭВМ.

Вывод информации из ЭВМ может быть осуществлен на экран дисплея, графопроектор или координатограф и алфавитно-цифровое печатающее устройство АЦПУ, а также на устройства подготовки данных на перфоленгу.

Основным элементом дисплея является электронно-лучевая трубка с рабочим полем 250×250 мм (1024×1024 знаков) или 400×400 мм (4096×4096 знаков) и блок буферной памяти на $1024 \dots 8000$ байт. Экран может быть одно- или многоцветным.

Основными режимами работы дисплея являются точечный или векторный. Точечный режим удобен при изображении множества отдельных точек (в частности, знаков, букв или цифр) или простых отрезков кривых. На экране может размещаться 12, 16 или более строк по $64 \dots 80$ знаков двух (основного или увеличенного) размеров. Вывод на экран дисплея знаков, букв или цифр выполняется с помощью клавиатуры клавишного пульта. Векторный режим требует меньшего объема памяти, так как для вычерчивания непрерывных прямых или кривых линий достаточно записи в памяти соответствующих уравнений, а не координат многих точек, как в точечном режиме.

Графопостроитель представляет собой двухкоординатный самописец с приводом от шаговых двигателей, управляемых ЭВМ. Рабочее поле может быть от 380×600 до 1200×1600 мм с масштабами чертежа 1:2, 1:1, 2:1 с 64...253 символами, сплошными линиями, штриховыми или штрихпунктирными 1...3 толщин. Скорость черчения 50...200 мм/с, элементарный шаг (разрешающая способность) 0,025 или 0,05 мм. В качестве рабочего инструмента используются рапидографы, карандашные графиты, стержни для фломастеров, шариковые пишущие узлы (одно- или многоцветные). Графопостроители, «пишущие» световым лучом или гравировальным прибором фотошаблоны — заготовки ПП, обычно называют координатографами (типы М-2001, М-2005, ЕС-7051, ЕС-7052, ЕС-7053, ЕС-7054).

В качестве носителя информации используют рулонную или плоскую бумагу (барabanный или планшетный типы графопостроителей), фотопластинки или пластины с фоторезистом, стеклянные пластины с лаковой пленкой (срезается гравировальным прибором).

АЦПУ — электромеханическое устройство, печатающее буквы, цифры и знаки на рулонной бумаге, что позволяет получать текстовую КД, а также ряд КД для ПП и МПП (монтажные и послойные чертежи). В составе ЕС ЭВМ используются АЦПУ типов ЕС-7030, ЕС-7031, ЕС-7032, ЕС-7033, ЕС-7034, ЕС-7039. Элементы АРМ конструктора показаны на рис. 7.20.

Практика машинного конструирования

При оценке эффективности машинного конструирования (являющегося частью системы автоматизации проектирования) чаще всего говорят только об одной его стадии, когда ЭВМ по заранее подготовленной и составленной программе (на что уходят месяцы и годы) и по частным данным конкретной задачи (их подготовка также требует 6...12 человеко-дней) быстро решает задачу.

Для правильной и объективной оценки машинного конструирования следует рассматривать весь цикл от момента получения задания до

момента выполнения всего комплекта КД.

Современные системы автоматизации проектирования позволяют решать задачи системного проектирования (например, разработки структуры новой ЭВМ), функционального (разработка и анализ схемных структур) и технического (компоновка ИС и ЭРЭ на ПП или МПП, выпуск текстовых КД, создание исходных технологических документов, например, в виде фотошаблонов МПП или топологических структур ИС и управление станками с числовым программным управлением). Разнообразие технических средств современных систем делает целесообразным рассмотрение только общих принципов, а не конкретных устройств.

Рассмотрим характерные этапы разработки комплекта КД на ПП с выводом данных на АЦПУ, по которым выполняются фотооригиналы. Общая трудоемкость на одну 4-слойную МПП ~ 70 человеко-дней, распределение трудоемкости этапов следующее:

1. Получение из лаборатории предварительно согласованного ТЗ и принципиальной схемы. Составление и согласование на их основе требований на компоновку ИС или ЭРЭ — 2%.

2. Набивка перфокарт для ввода частных данных (общая программа уже есть) по компоновке ИС или ЭРЭ и сама компоновка на ЭВМ — 2,8% (1,4+1,4).

3. Согласование с лабораторией и (если нет возражений) составление задания на трассировку — 6,9%.

4. Набивка перфокарт для ввода частных данных (общая программа уже есть) по трассировке проводников и сама трассировка — 4,2% (1,4+2,8).

5. Проверка на соответствие ТЗ полученных результатов, черновая и чистовая разводка, вычерчивание оригиналов, их проверка конструктором, проверка и согласование с лабораторией и технологами, выполнение подлинников КД, их проверка в лаборатории и технологами, утверждение, нормоконтроль, размножение — 54,9%.

6. Изготовление фотооригиналов, их проверка, фотографирование, сдача на хранение — 29,2%.

В этом случае подготовительные работы для ввода частных данных в ЭВМ — 2,8%, работа ЭВМ — 4,2%, т. е. только 7% трудоемкости выпуска КД падают на ЭВМ, а 93% — на ручную работу и различные согласования. Сравним рассмотренную трудоемкость с разработкой аналогичной КД с выполнением фотооригиналов на координатографе (общая трудоемкость ~ 50 человеко-дней).

1. Этап тот же, трудоемкость 2,9%.
2. Этап тот же, трудоемкость 3,9% (1,95+1,95).
3. Этап тот же, трудоемкость 5,9%.
4. Этап тот же с трассировкой на координатографе, трудоемкость 5,9% (1,9+4).
5. Проверка рисунка трассировки на соответствие ТЗ, ручная доразводка проводников, проверка — 12,7%.
6. Набивка перфолент и выполнение рисунка доразводки на графопроектировщике — 3,9%.
7. Окончательная проверка — 5,9%.
8. Выполнение фотооригиналов на координатографе — 2%.
9. Ручная доразводка, проверка, исправление, выпуск комплекта оригиналов КД, их проверка, исправление замечаний, выполнение и проверка подлинников, их утверждение и передача в ОТД, размножение — 56,9%.

В этом случае подготовительные работы для ввода частных данных в ЭВМ и работа ЭВМ составляют 15,7%, а 84,3% — ручная работа и различные согласования.

Для различных работ в системах автоматизации проектирования целесообразно использовать различные по мощности ЭВМ: для анализа схем и проектирования монтажных и топологических структур — большие ЭВМ (БЭСМ-6 ЕС-1060), для разработки библиотек программ, выпуска КД и управляющих перфолент — средние (М-220, ЕС-1030), для выполнения графических КД — малые («Мир», ЕС-1010). При этом круг решаемых вопросов следующий: компоновка ИС или ЭРЭ на поле ПП или МПП, распределение выходных контактов разъемов и контрольных гнезд с распечаткой на АЦПУ сборочного

чертежа и спецификации на МПП и ячейки, трассировка печатного монтажа и распечатка таблицы цепей, выполнение сборочного чертежа ФУ, спецификации МПП, ячейки в целом, ведомости машинных носителей, перфолент слоев МПП для координатографа с фотоголовкой, проектирование и изготовление управляющих перфолент для сверления сквозных отверстий на сверлильных автоматах и проверка электрических соединений на установке УКПМ-1.

При необходимости можно вручную фиксировать расположение отдельных ЭЛ и контактов на МПП, менять ее размеры (это сложно), механически на координатографе выполнять фотошаблоны двухсторонних ПП по эскизу.

Для 9-слойной МПП с размерами платы ячейки 250×150 мм (96 шт ИС типа 101 СТ 14—1) и объединительной платы с 18-слойной МПП и 34 ячейками решение задач компоновки (в чистом виде) возможно за 20...30 мин машинного времени, трассировки соединений за 40—50 мин, выпуск текстовой документации и управляющих перфолент за 1,5...2 ч, вычерчивание одного слоя МПП за 10...15 мин.

При этом в качестве выходных документов на АЦПУ могут быть получены спецификации ячеек, МПП, таблиц цепей МПП, сборочных чертежей ячеек, ведомостей машинных носителей и комплектов фотошаблонов МПП в масштабе 1:1. Кроме этого, могут быть получены перфоленты контроля МПП, перфоленты для сверления отверстий в МПП, перфоленты контроля цифровых ячеек.

Характерные виды машинного конструирования РЭА

1. В памяти большой ЭВМ хранится информация об одном или нескольких типоразмерах ПП в виде координатной сетки и о «гнездах» установки ИС. Частная информация об особенностях конкретной ПП (конкретная схемная структура с ИС или дискретными ЭРЭ) вводится со специальных перфокарт или перфолент. ЭВМ последовательно решает задачу компоновки ИС и трассировки их соединений, используя алгорит-

мы направленного частичного перебора вариантов.

Работа ЭВМ ведется в автономном автоматизированном режиме без возможности контроля в процессе решения задачи. Необходимую коррекцию можно осуществить только по окончании работы после ручной проверки фотооригиналов. Отсутствует возможность выполнения чертежно-графических работ и текстовых КД; не исключаются случаи неполной трассировки, когда выполняется разводка 80...95% всех проводников. Машинное время на МПП с 10...15 слоями 5...7 ч.

2. Используется большая ЭВМ (аналогично предыдущему виду). Входная информация вводится с перфолент, ручных эскизов или экрана дисплея с коррекцией с помощью светового пера, поэтому возможен оперативный контроль работы ЭВМ как на экране дисплея, так и с помощью АЦПУ. Это позволяет работать в диалоговом режиме и вводить оперативную коррекцию в программу ЭВМ. Выходная информация представляется в виде фотооригиналов и чертежей.

Возможна 100%-ная трассировка соединений, выпуск текстовой КД. Машинное время на одну ПП 0,5...1 ч. Выполнение машиностроительных чертежей не предусмотрено.

3. В память средней или малой ЭВМ вводится с двухцветного эскиза или перфоленты необходимая для работы информация. Эскиз чертежа ПП выполняется от руки на специальной или обычной миллиметровой бумаге в два цвета (одна сторона — красные проводники, другая — синие). С помощью координатного считывающего устройства конструктор вводит в память ЭВМ информацию о координатах проводников и контактов (с нужной точкой проводника совмещается перекрестие оптического визира и нажатием кнопки формируется необходимый сигнал). После ввода всей необходимой информации о ПП (она записывается в память ЭВМ или на перфоленту) можно включить графопостроитель или АЦПУ и получить чертежи трассировки сторон ПП. Если проверка полученной информации указывает на отсутствие ошибок, то перфолента

передается в работу. Данные с перфоленты используются в координатографе для выполнения фотооригиналов.

Возможна 100%-ная трассировка соединений. Машинное время на одну двухстороннюю ПП 10...30 мин. Выполнение машиностроительных чертежей не предусмотрено.

4. В память большой или средней ЭВМ вводится необходимая информация с перфоленты, с эскиза от руки, световым пером с экрана дисплея, с растрового планшета или с помощью «шарика» (датчика с двумя линейными потенциометрами).

Возможны следующие режимы работы. По альбому типовых деталей выбираем требуемую, вводим в ЭВМ ее зашифрованное обозначение, размеры и знаки обработки и получаем на графопостроителе необходимый чертеж. Выполненный от руки эскиз общего вида И (например, механизма настройки) накладываем на растровый планшет и последовательно обводим контуры отдельных деталей и весь эскиз и получаем на графопостроителе комплект детальных чертежей и чертеж общего вида. Необходимая информация может быть оставлена в памяти ЭВМ или выведена на перфоленту с дальнейшего использования ее станком с ЧПУ.

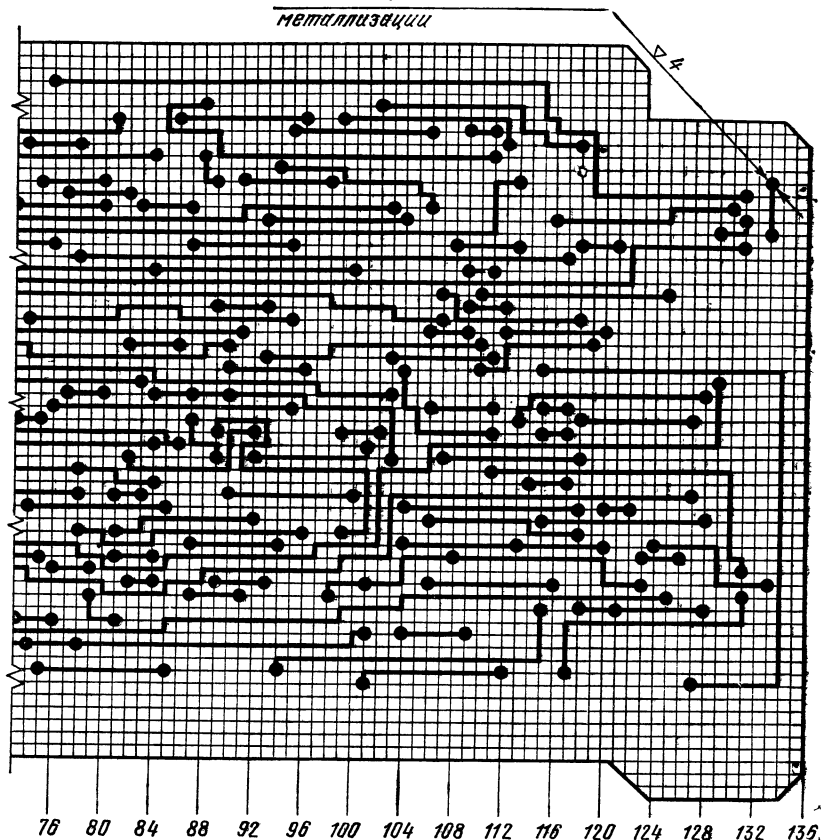
Создаем на экране дисплея с помощью «шарика» и светового пера чертеж нужного ЭЛ, меняем его форму и размеры. При необходимости можно ввести информацию о нем в память ЭВМ, на перфоленту, либо вычертить с помощью графопостроителя. Чаще всего этим способом ведут разработку чертежей ФУ на ПП.

В этом случае возможна 100%-ная трассировка соединений при машинном времени на одну двухстороннюю ПП 10...20 мин. Возможно выполнение машиностроительных чертежей и при необходимости текстовой КД.

Первые три вида дают возможность разрабатывать комплекты КД на общие виды ФУ на ПП и чертежи слоев МПП, а также выпускать текстовую КД, а последний дает возможность выполнять разработку машиностроительных конструкций.

Примеры КД, выполненные на ЭВМ, показаны на рис. 7.21.

397 отв. $\phi 0,6^{+0,1}$ после
металлизации



N	ТОЧКИ ЦЕПИ			
ЦЕПИ				
055	У007-В07-12	У007-В07-13	У011-Г05-13	
065	У002-Б05-08	У011-Г05-10		
066	У009-А06-09	У009-А06-10	У012-А07-04	У007-В07-08
ИЗМ.	ЛИСТ	N ДОКУМ.	ПОДП.	ДАТА
			АБ 7.105.001 ТБ	
			ЛИСТ 6	
ФОРМАТ 11				

Рис. 7.31. Часть печатной платы и распечатка точек цепи, выполненные с помощью ЭВМ

7.6. РАБОЧЕЕ МЕСТО КОНСТРУКТОРА [1]*

Рабочее место конструктора — часть помещения предприятия, имеющая площадь и объем, достаточные для размещения конструктора и чертежного оборудования в виде чертежной доски ЧД, со станком ЧС, чертежным прибором ЧП и чертежной головкой, комбинированного чертежного стола, стула, чертежного инструмента. Кроме этого, в состав рабочего места входят пишущие и стирающие приспособления, вспомогательные столы, справочные, информационные и рабочие материалы и чертежи, средства вычислительной и оргтехники, обеспечивающие конструктору выполнение творческих, чертежно-графических и расчетно-письменных работ в комфортной среде (зоне).

Чертежная доска

В практике конструкторских работ используются разнообразные по назначению и материалу ЧД. Их размеры превышают размеры чертежа на 50...200 мм и лежат в пределах от 380×500 мм (портативные доски на Ф22 — А3) до 1000×1350 мм (нормальный размер для Ф44—А0) и до 1700×6000 мм (для крупных плазовых чертежей).

Портативные ЧД часто выполняются в виде прецизионных пластмассовых коробчатых конструкций с направляющими канавками для чертежных приспособлений. ЧД нормальных размеров выполняют клееными из липовых реек с дубовыми или буковыми рейками-обвязками. В настоящее время основой ЧД чаще всего является прессованная древесностружечная плита с высокой степенью плоскостности, оклеенная тонким (0,3...0,6 мм) белым поливинилхлоридным пластиком, создающим белый фон для чертежей на пергаменте и чертежных бумагах типа «Д» и «Ч» и подобных материалах и допускающая применение кнопок. Крепление чертежа к такой ЧД чаще всего делается с помощью клей-

кой ленты типа КЛТ или магнитных держателей.

ЧД больших размеров могут быть выполнены целыми (реже) или составными из двух-трех ЧД нормальных размеров. Для выполнения чертежно-конструкторских и чертежно-копировальных работ используют комбинированные ЧД с подсветом. В этом случае одна сторона ЧД непрозрачная (для черчения), а другая — с подсветкой (регулируются две степени яркости) и (при необходимости) со специальной координатной сеткой. Возможно выполнение ЧД с подсветкой только для чертежно-копировальных работ.

ЧД по ГОСТ 6671—70 выполняются в виде деревянного щита, собранного из продольных или поперечных дощечек, скрепленных клеем и торцовыми планками, или щита, собранного в рамку с различными заполнителями и облицованного с двух сторон шпоном. Крепление чертежей на таких ЧД осуществляется, как правило, кнопками.

Рост производства древесных плит предопределил развитие производства плит с декоративным покрытием. Особенностью метода облицовки древесностружечных плит декоративными бумажно-смоляными пленками, так называемого метода ламинирования, является то, что он позволяет заменить дефицитный строганый шпон на бумажно-слоистый пластик и сократить расход материалов. Крепление чертежей к такой ЧД осуществляется с помощью клейкой ленты.

Чертежный станок

ЧС является подвижной системой, обеспечивающей наиболее удобное положение туловища человека при выполнении чертежно-графических работ чертежными приборами на ЧД. В зависимости от назначения и конструкции ЧС могут быть настольными, напольными и складными, с регулировкой или без нее положения ЧД в пространстве и различными системами управления и уравнивания.

Настольные ЧС укрепляются к столешнице стола, имеют возможность изменения угла наклона доски и ее высоты. Механизмов уравни-

* Составители А. С. Бегинин, Р. Г. Варламов.

новешивания, как правило, не имеют или используют упрощенные системы.

Напольные ЧС выполняются параллелограммного (двухстоечные) и колончатого (одностоечные) типов. Параллелограммный ЧС обеспечивает большую жесткость конструкции и устойчивость ЧД. Колончатый ЧС компактнее, цельнее по форме, обеспечивает большое число планировочных вариантов, легко блокируется с дополнительными столами. Преимущество одностоечных ЧС — возможность несимметричной установки стойки и поворота ЧД вокруг вертикальной оси на 360° , что создает ряд удобств и позволяет получить более плотную компоновку рабочих мест. Обязательным ЭЛ напольных ЧС является механизм уравнивания, обеспечивающий легкость подъема, опускания и поворота ЧД. Механизмы уравнивания бывают грузового, пружинного или гидropневматического типа.

Складные малогабаритные ЧС выполняют из деревянных реек или металлических конструкций. Они могут иметь грузовой или пружинный механизм уравнивания.

Чертежный прибор

ЧП — прецизионный инструмент для измерения и изображения углов и расстояний на плоскости ЧД. Предназначен для упрощения и ускорения выполнения графических и технических изображений.

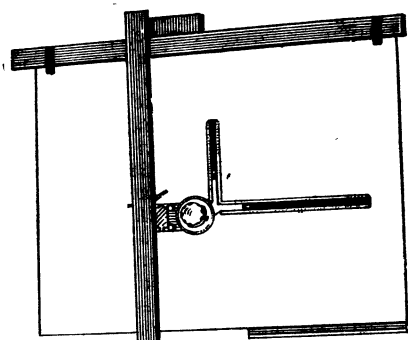
Современные ЧП выполняются линейной, пантографной и координатной систем. ЧП линейной системы являются наиболее простыми приспособлениями для проведения параллельных линий. Выполняются в виде плавающих рейшин и горизонтальных линейек, предназначенных для проведения горизонтальных, вертикальных и наклонных линий. На них устанавливаются приставки в виде каретки, передвигающейся по рейшине, транспортной головки (или шкалы в градусах), одной или двух взаимоперпендикулярных масштабных линейек.

Наиболее совершенными являются ЧП пантографной или координатной

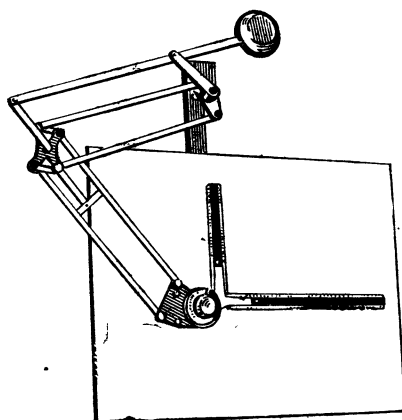
систем. Такие приборы, снабженные чертежной головкой ЧГ, заменяют рейшину, угольник, измерительную линейку и транспортир вместе взятые. ЧП пантографного типа применяются при разработке чертежей с преобладанием коротких, расположенных под разными углами линий (например, в машиностроении, приборостроении, автоматике и пр.). Эти ЧП представляют собой рычажные механические устройства, действие которых основано на свойстве двоярного шарнирного параллелограмма сохранять взаимно параллельное положение противоположных сторон. Короткая сторона верхнего параллелограмма закрепляется на ЧД неподвижно, а короткая сторона нижнего параллелограмма является держателем ЧГ и не претерпевает угловых перемещений при движении по всему полю чертежа. ЧП пантографной системы выпускаются для работы на вертикальных и горизонтальных досках. Первые из них, кроме рычажной системы из двоярных параллелограммов и ЧГ, имеют дополнительное уравнивающее устройство, компенсирующее вес рычагов и ЧГ так, чтобы она могла оставаться в любом месте на ЧД и в том случае, когда ее не придерживают рукой. Уравнивающие устройства могут быть с грузом или с уравнивающей пружиной (пружинами). ЧП для работы на горизонтальных досках не имеют уравнивающих устройств и поэтому портативнее.

ЧП координатной системы имеют две взаимно перпендикулярные шины: неподвижную — горизонтальную и перемещающуюся по ней с помощью каретки — вертикальную. Благодаря этому обеспечивается точность работы в любом месте ЧД, в том числе у краев. Вертикальные и горизонтальные линии могут быть проведены по всей плоскости ЧД без разрыва. Наклон ЧД не требует дополнительной площади, поэтому ЧП координатного типа занимают примерно на 20% площади меньше, чем пантографные. ЧП координатного типа удобны при разработке чертежей с преобладанием длинных горизонтальных, вертикальных или расположенных под разными углами линий.

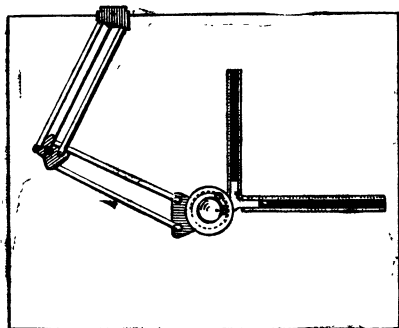
Чертежная головка



1



2



3

Рис. 7.22. Отечественные чертежные приборы:

1 — ПЧК-44-01, 2 — ПЧП-44-02; 3 — ПЧП-44-24

Чертежные головки всех ЧП по своей конструкции принципиально одинаковы. Они несут на себе две взаимно перпендикулярные линейки и, будучи установлены в своем основном положении, обеспечивают горизонтальное положение одной линейки и вертикальное — другой, независимо от места расположения ЧГ на ЧД.

На рабочие кромки линеек наносятся шкалы (в мм). ЧГ имеют устройства поворота и фиксации защелкой от нуля через каждые 15° (иногда через 5°) или фрикционным зажимом на любых углах. Угол поворота в зависимости от конструкции изменяется от 0 до 180° .

Более совершенные ЧГ могут поворачиваться на 360° со ступенчатой фиксацией через 15° по всему кругу, имеют на делительном диске две угловые шкалы (прямую и обратную) и нониусное отсчетное устройство с ценой деления $6'$. Основание ЧГ соединено с движущейся частью ЧП с помощью юстировочного винта, поворачивающего основание на $\pm 5...2^\circ$. Сами линейки выполняются из прозрачной армированной металлом пластмассы, тонкостенного алюминиевого или стального профиля или (реже) из дерева с пластмассовой шкалой. Для точной фиксации линеек замок изготавливают в виде двойного ласточкиного хвоста, так как винтовая затяжка предварительно точно установленных линеек смещает их.

Отечественные ЧП по ГОСТ 18864—73 типа ПЧК-44-01 координатной и ПЧП-44 пантографной систем имеют следующие данные: поворот ЧГ из нулевого положения на 360° , цена деления лимба 1° , цена деления нонинуса $0,1^\circ$ ($6'$), фиксация головки защелкой через 15° , фрикционным механизмом — в любом положении, угловая погрешность перемещения линеек в пределах Ф44— $0,1^\circ$, масса $8...9$ кг, усилие перемещения головки меньше 5 Н, поворота — $0,5$ Н, фрикционного зажима — $0,15$ Н.

Внешний вид ЧП показан на рис. 7.22.

Носители графической информации

В качестве носителей графической информации используются: белая чертежная бумага (редко), полупрозрачная чертежная бумага марок «Д» и «Ч» типа пергамин (бумажной кальки), на которых выполняется подавляющее число чертежей, и миллиметровая бумага с желтой (с последующей смывкой сетки в ацетоне) или синей сеткой для выполнения принципиальных схем, монтажных чертежей и графиков. Чертежная бумага марок «Д» и «Ч» выпускается в рулонах длиной 40 м, шириной 878, 640 и 440 мм и листами 878×640, 640×440 и 440×320. Бумага марки «Д» рекомендуется для выполнения машиностроительных чертежей и проектов при многократном копировании и длительном хранении. Бумага марки «Ч» более прозрачна, на ней легче работать, но ее прочность ниже (можно изготовить до 50 светокopies) и поэтому используется для промежуточных чертежей.

Пишущие и стирающие приспособления

В качестве пишущих приспособлений используются обычные и кантовые карандаши, рейсфедеры, рапидографы и шариковые пишущие узлы с черной пастой.

Отличием карандашей для конструкторских работ являются жесткие требования к качеству пишущего стержня, для которого используют специальные типы графита. По твердости различают мягкие М (В), средние МТ (ВНВ, НВ, F) и твердые Т (Н) графиты. Чем больше число, стоящее у букв твердости, тем мягче или тверже графит. В конструкторских наборах фабрика «Союз» выпускает карандаши от 3М до 5Т, чаще всего используются для работы на бумагах марок «Д» и «Ч» карандаши «Люмограф» М, МТ, Т и 2Т и «Светокопия» М, МТ, СТ, Т, 2Т, 3Т.

Для удобства чертежно-конструкторских работ используют кантовые карандаши со сменными графитами (которые могут иметь заданную твердость от 8В до 10Н. Их преимущество в постоянной длине каран-

даша и возможности использования одного держателя для графитов разной твердости. Разновидностью кантовых карандашей являются карандаши с калиброванным полимерным графитом в защитной металлической трубочке, которые позволяют чертить линии постоянной ширины (0,2; 0,3; 0,5; 0,7 и 0,9 мм) высокой степени черноты без заточки и без опасения запачкать линейки или трафареты графитом. Их твердость от 2 В до 4 Н.

Рейсфедеры представляют собой двухпластинчатую стальную систему с жестким закреплением со стороны ручки и регулируемым винтом с противоположной стороны. Между пластинами вводится тушь. Различают рейсфедеры линейные (трех) и радиусные (двух) размеров.

Рейсфедеры линейные большие с широкими щечками используют для вычерчивания линий шириной 0,15...1,2 мм; линейные малые — линей шириной 0,1...1 мм; линейные двойные — шириной 0,1...1 мм при расстоянии между линиями 0,5...6 мм.

Рейсфедеры радиусные являются составной частью циркуля или кронциркуля и выпускаются средних и малых размеров. Для вычерчивания от руки кривых линий постоянной ширины используют кривоножки одинарные (ширина линий 0,08...0,8 мм) и двойные (ширина линий 0,1...1 мм при расстоянии между ними 0,5...6 мм).

Все более широкое распространение получают рапидографы, представляющие собой пишущий узел в виде калиброванной трубочки и соединенного с нею баллончика с тушью. Для регулировки подачи туши в трубочке ходит игла с грузом. Преимущество рапидографа в том, что тушь в нем практически не сохнет (но быстро высыхает на носителе), а ширина линий строго калибрована. Качество линий очень сильно зависит от качества туши. Отечественные рапидографы Харьковского завода имеют ширину линий 0,3; 0,5 и 0,8 мм.

В ряде случаев используют шариковые пишущие узлы с черной пастой, обеспечивающие две ширины линий: узкую на жестком основании и широкую на мягком (1...2 слоя мягкой бумаги под чертежом).

В качестве стирающих приспособлений используют специальные резины, растворители (для туши), быстровращающиеся фрезы. При ручном стирании линий используют пластинчатые резиновые ластики (обычно трех градаций твердости), при этом для снятия линий от твердых карандашей, туши или пасты используют ластики с абразивным наполнителем, либо цилиндрические, вставляемые в специальные цанговые зажимы. Используются электро-резинки с приводом от быстрогоходного двигателя. Ластик выполняется в виде диска или конуса.

Для удаления только требуемой части линий используют металлические или пластмассовые трафареты. Для механического удаления слоя туши с кальки используют тушеотделители с быстровращающейся дисковой фрезой и специальными ограничителями.

Использование специальной туши в рапинографрах для бумажных калек (она слабо впитывается) позволяет применять растворители. Такие ластики содержат растворитель в порах специальной микропористой резины. При трении поры лопаются, растворитель поступает на чертеж, растворяет и как бы стирает тушь резинкой.

Стирание линий, выполненных черной пастой с помощью шариковых пишущих узлов, выполняют зачерчиванием ненужного элемента чертежа специальной белой пастой, 3...4 слоя которой делают невидимым зачерченный элемент.

Для ручной или механизированной заточки карандашей используют специальные машинки, в современных образцах которых предусмотрена возможность заточки стержней цанговых карандашей.

Столы и стул

Кроме чертежного стола (ЧД + ЧС + ЧП) и стула в состав рабочего места конструктора могут дополнительно входить письменный стол, рабочий стол и тумбы.

Рабочий стол используется для выполнения расчетов, эскизов, составления различных текстовых документов, для временного хранения и подготовки рабочей документации.

Материал крышки стола не должен быть блестящим и должен обеспечивать возможность вносить исправления в чертежи (в том числе и на пергаменте). Его часто выполняют с регулируемой высотой ножек, позволяющих иметь уровень столешницы в 650...750 мм от пола (столешница стола для ЭКВМ или пишущей машинки имеет высоту 590...690 мм). Размеры столешницы обычно 1800×800, 1600×800; 1200×600; 1400×50; 800×500, что позволяет компоновать различные виды рабочих мест. Рекомендуемая высота столешницы при этом следующая: при росте человека 190 см высота столешницы — 75 см; 190...186—74; 186...182—73 см; 182...178—72; 178...174—71; 174...170—70; 170...166—69; 166...162—68; 162...158—67; 158...154—66; 154—65 см.

При необходимости столешница стола заготовок и письменного стола может подниматься на углы 15, 30, 45, 55, 65°.

Столы могут быть выполнены как с неподвижными встроенными тумбами, так и с выкатными на четырех колесах. Ящики выдвигаются на роликовых или пластиковых малопыляющих направляющих, могут иметь разную глубину и высоту и специальные ложементы для инструмента и приспособлений.

Использование ящиков или отсеков половинной глубины позволяет использовать один стол для двух человек.

Рабочий стул конструктора выполняется, как правило, на четырех-пяти опорах с колесиками с регулируемой по глубине, высоте и углу наклона спинкой, с масляно-пневматической системой регулировки высоты сидения и подножкой. Форма сидения и спинки стула выполняется такой, чтобы исключить онемение тела из-за нарушения кровообращения и давать возможность частой перемены положения тела.

Для хранения инструментов, установки средних и малых ЭКВМ, телефона, рулонов бумаги и других предметов используются так называемые откатки — тумбочками на четырех колесиках.

Комплекты чертежных инструментов

Для удобства работы чертежные инструменты выполняют в виде наборов чертежных НЧ, копировальных НЧ и чертежно-копировальных НЧК, в которые входят вставки, кзрандаши механические, кронциркули, пеналы, резинки стиральные, рейсфедеры, отвертки, ручки, удлинители, центрики, циркули и штангенциркули.

Вставки являются частью циркулей и выполняются в виде игольных, карандашных, циркульных рейсфедеров (нормальных и малых размеров). В зависимости от набора в нем могут быть 1, 2 или 3 цанговых карандаша, которые заряжаются графитами разной степени твердости.

Кронциркули выполняются в виде комбинированных (с использованием малых вставок игольной, карандашной и рейсфедерной циркульной) разметочных, с падающей иглой (для вычерчивания дуг и ок-

ружностей малых радиусов карандашом или тушью) и чертежных.

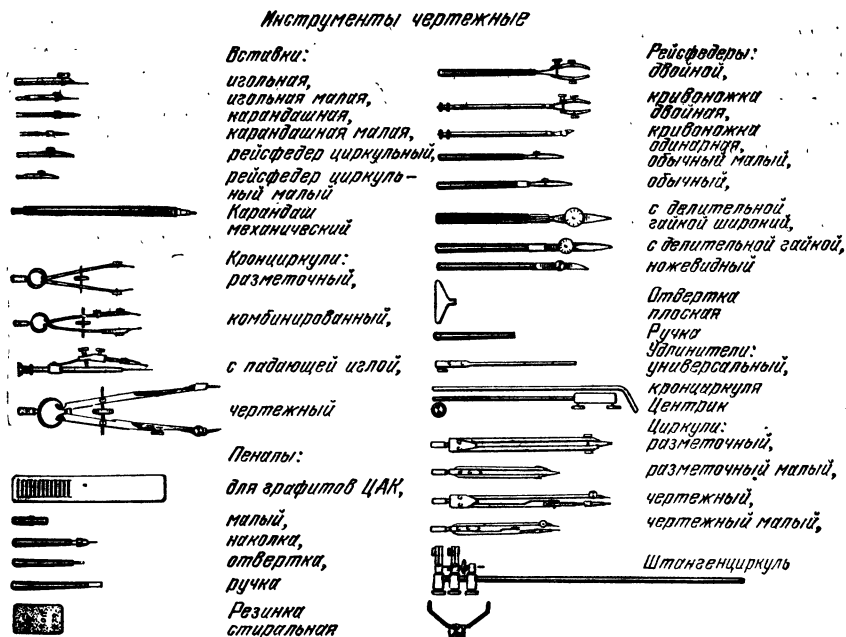
Пеналы выпускаются в виде плоских ящичков для графитов, малых пеналов для запасных игл и графитов циркулей и комбинированных в виде пенала-наколки, пенала-отвертки и пенала-ручки, во внутренних полостях которых хранятся запасные иглы и графиты.

Рейсфедеры (двойной, кривоножка, кривоножка двойная, ножевидный, обычный, обычный малый, с делительной гайкой, широкий) входят в комплект НЧ и НЧК.

Удлинители двух видов (для кронциркуля и универсальный) используются при выполнении обычными циркулями окружностей и дуг больших радиусов. Для сохранения concentричности окружностей используются центриком: латунной кнопкой со стальной иглой и строго аксиальным ей углублением для опорной ножки циркуля с иглой.

Циркули выполняются разметочными (нормального и малого разме-

Рис. 7.23. Инструменты чертежные для чертежных, копировальных и чертежно-копировальных наборов



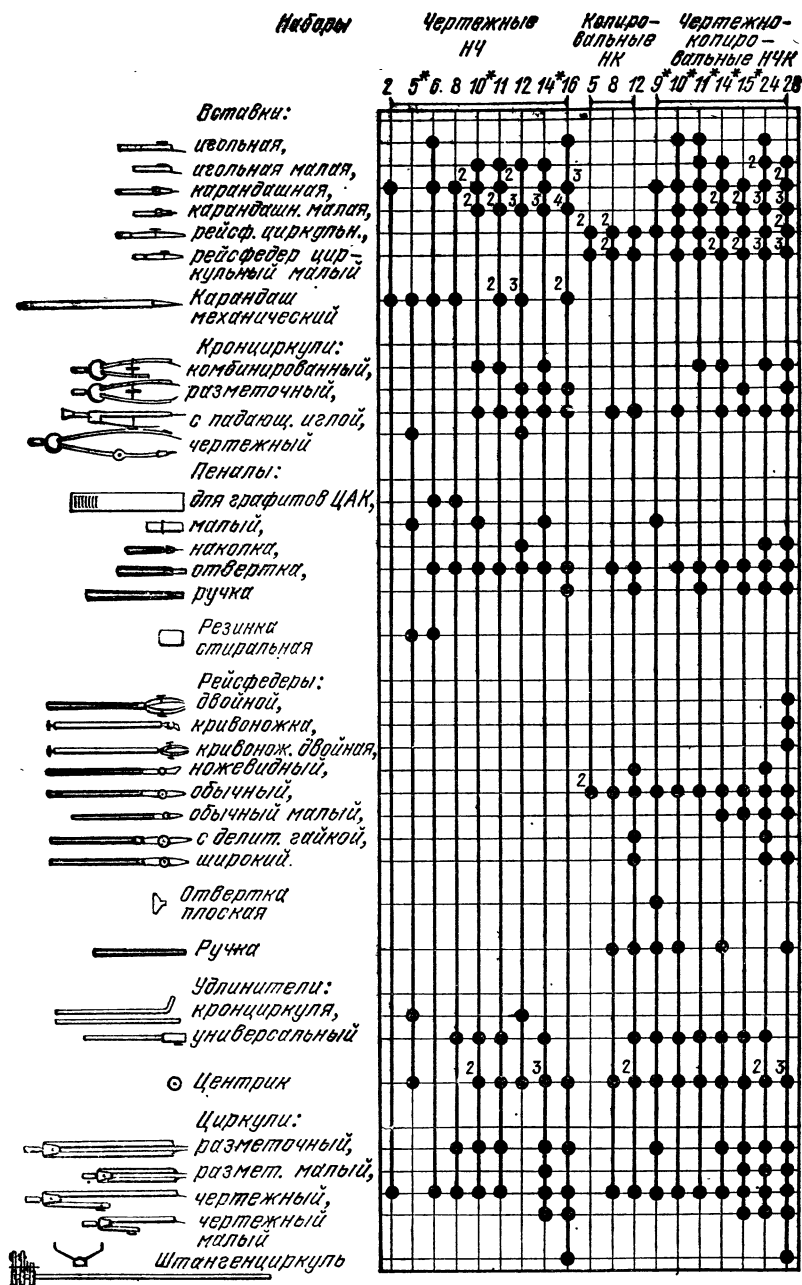


Рис. 7.24. Состав чертежных (НЧ), копировальных (НК) и чертежно-копировальных (НЧК) наборов инструментов.

Цифры обозначают количество инструментов в данном наборе; звездочкой отмечены наборы, выпускаемые до 1980 г.

7.6. Рабочее место конструктора

193

Рис. 7.25. Отечественные комплектные рабочие места конструктора:

1 — СЧП-44-02 с прибором чертежным;
ПЧП-44-01; 2 — МТК-2 с ПЧП-12; 3 —
МПК-1 с ПЧК-44-01; 4 — МКК-2 с
ПЧК-44-01

ров), чертежными (нормального и малого размеров с возможностью использования игольных, карандашных и рейсфедерных циркульных вставок). Для вычерчивания дуг и окружностей больших радиусов используют специальные штангенциркули.

Внешний вид чертежных инструментов и их комплектация в отечественных наборах НЧ, НК и НЧК показаны на рис. 7.23 и 7.24.

Комплектные рабочие места

Комплектные рабочие места могут быть выполнены в виде малогабаритных наборов чемоданного типа, оснащенных упрощенными чертежными механизмами. В пластмассовом футляре такого набора укладывается рабочая пластмассовая «доска» с калиброванными направляющими канавками по двум или четырем сторонам, в которые входят выступы упрощенного ЧП. Одна или две линейки с делениями могут поворачиваться и использоваться для вычерчивания различных линий (в том числе и для штриховки с заданным шагом). К ним выпускается большой комплект дополнительных приспособлений в виде различных трафаретов, универсальных лекал, передвижных планок и т. п.

Кроме собственно ЧП, в состав набора входят: логарифмическая линейка с устройством для сложения и вычитания, масштабная линейка, набор карандашей, циркуль, флакон с тушью и набор рапидографов, а также угольники-трафареты и лекала и специальные стиральные резинки.

Простейшим типом портативного ЧП является упрощенный пантографный с комбинированной линейкой-трафаретом, используемый для эскизирования.

В зависимости от круга решаемых задач и размеров чертежей используют различные размеры ЧД, столов

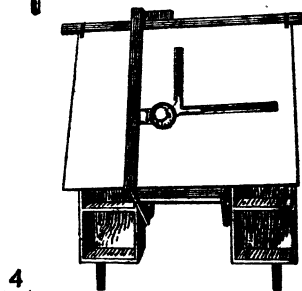
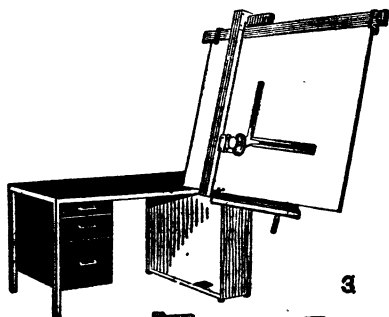
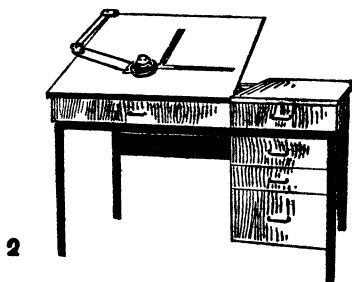
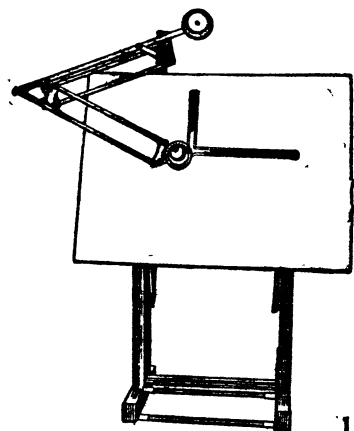


Рис. 7.26. Планировка рабочих мест

и их количество. Стандартной конструкцией столов в настоящее время является каркасная из квадратного стального профиля, комплектуемая неподвижными или выкатными тумбами и тележками для хранения чертежного инструмента, справочных материалов и т. п. Основой их построения является использование модульных конструкций. Размеры столешниц при этом берут 1800×800 ; 1600×800 ; 1200×600 ; 800×500 и 1400×500 мм с высотой от уровня пола 650...750 мм для основного стола и 590...690 мм для стола с ЭКВМ и пишущей машинкой. Размеры выкатной тумбы при этом $433 \times 610 \times 708$. Так как в основу конструкций комплектных мест конструкторов закладывается принцип конструктивно-самостоятельных изделий, то это позволяет проводить удобную для конструктора планировку конкретного рабочего места, с учетом требуемых параметров (табл. 7.1).

Приборы этих рабочих мест работоспособны при 10...35 °С и Вл

30...90%, имеют общую массу 80...130 кг (200 для СЧК), усилие перемещения 60...250 Н при условиях фиксации и расфиксации 60...140 Н. В СЧПК-44 имеется ЧД с подсветкой (освещенность 500 лк при $P_{\text{мин}} = 250$ Вт от сети 220 В, 50 Гц). Внешний вид этих приборов и рабочих мест показан на рис. 7.25

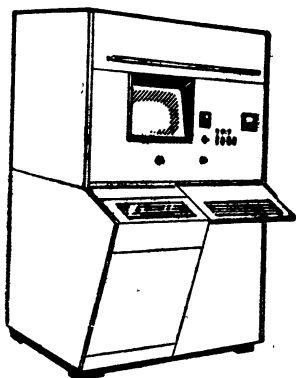
В качестве исходных расчетных величин для определения площади помещения КБ рекомендуется исходить из общей площади (с учетом проходов между рабочими местами, коридорами и т. п.) на одного конструктора в 12 м² и объема 36 м³ (высота помещения 3 м), хотя площадь отдельного конкретного рабочего места будет колебаться в пределах 3...6 м².

В зависимости от требований возможны различные варианты планировки частей рабочего места. Некоторые характерные схемы планировки показаны на рис. 7.26 с указанием площади одного рабочего места для ведущего конструктора (руководителя группы или бригады $S_{\text{рук}}$) и конструктора-исполнителя ($S_{\text{исп}}$). В планировке рабочих мест конструктора возможно использова-

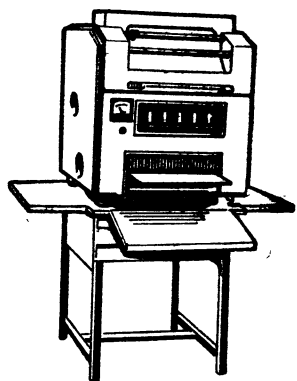
Таблица 7.1

Основные параметры отечественных комплектных рабочих мест

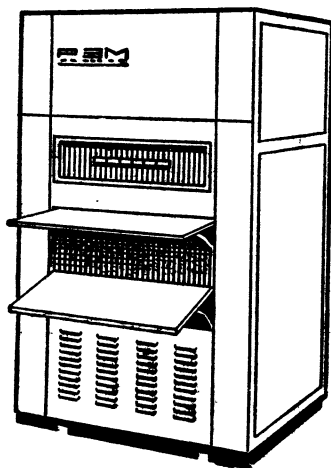
Тип	МКК-1	МКК-24	МПК-1	МТК-2	СЧК-44	СЧК	СЧПК-44	СЧПР-24	СЧПР-44-02
Система ЧП (К — координатная, П — пантографическая)	К	П	К	П	П	К	К	К	К или П
Установка (на столе или полу)	Стол		Пол (1 стойка)	Стол	Пол (1 стойка)	Пол (2 стойки)			
Формат чертежа	44	24	44	22	44	3×44	44	24	44
Размер ЧД, мм	1350× ×1000	1000× ×750	1350× ×1000	750× ×500	1350× ×1000	1350× ×5000	1350× ×1000	1000× ×750	1350× ×1000 или 1250× ×2000



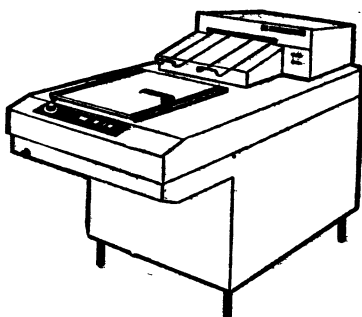
3P-300M-1



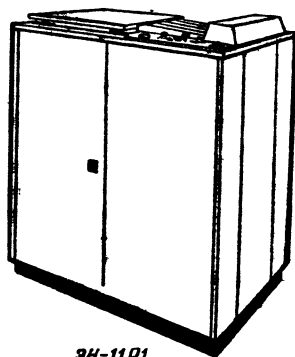
3P-300K2



3P-420/600



3H-12K2



3H-11P1

Рис. 7.29. Отечественные электрофотографические машины

Основные параметры современных электрофотографических аппаратов

Тип	ЭР-620К3	ЭР-620М	ЭР-300К2	ЭР-300М — I*	ЭП-22Р**	ЭН-12К2	ЭН-11Р1**	ЭН-11М1
Ширина рулона, мм	620	620	300	300	—	—	—	—
Размер копии, мм	—	—	—	210× ×297	594× ×841	297× ×420	297× ×420	210× ×297
Масштаб копии	1 : 1	19 : 1; 14 : 1; 10 : 1	1 : 1	12 : 1; 9,4 : 1	1 : 1; 1 : 1,42	1 : 1	1 : 1; 1 : 1,42	12 : 1; 7 : 1,5; 1
Скорость печати, м/мин	1,7; 2,7	6	2,5	—	—	—	—	—
Производительность, копий/мин	—	—	—	6	0,75	10	20	9
Потребляемая мощ- ность, кВт	6,5	6,5	2	—	2,8	2,5	2	—
Габариты, см	127× ×116× ×208 900	120× ×160× ×182 —	125× ×102× ×176 200	104× ×91× ×180 600	250× ×180× ×180, 270	120× ×68× ×99 190	104× ×55× ×92 200	79× ×53× ×56 100
Масса, кг	—	—	—	—	—	—	—	—
Размер оригинала (кадра) мм	—	32×45; 60×90	—	24×18; 24×36; 32×45	—	—	—	14×20 32×45

* Кратность при просмотре 6,5.

** Возможно выполнение офсетных форм.

качестве оригинала может использоваться микрофильм, листовой или сброшюванный материал или кодограмма ЭВМ штрихового, тонового или цветного характера. Изображение на копии может быть без изменения или с изменением масштаба.

По ГОСТ 15099—75 электрофотографические копировально-множительные аппаратуры выпускаются для репродукционного копирования и получения увеличенных копий микроизображения при небольшом объеме работ и для изготовления офсетных форм типа ЭП (старое обозначение ЭРА). Носитель изображения — промежуточный, аппарат — плоскостный. При большом объеме работ используют аппараты ти-

па ЭР (РЭМ). Носитель изображения — промежуточный, аппарат — ротационный. При среднем объеме используют аппараты типа ЭН (ЭФА) с непосредственным копированием на электрофотографическую бумагу.

В условном обозначении аппаратов указываются: тип, наибольший формат или ширина копии и группа (К — репродукционное копирование без изменения масштаба, Р — репродукционное копирование с возможностью изменения масштаба, М — получение увеличенных копий с позитивных и негативных микрофильмов и диамикрoкарт).

Внешний вид некоторых отечественных машин показан на рис. 7.29, а их данные приведены в табл. 7.2.

7.7. ПЛАНИРОВАНИЕ И НОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ [9] *

Общие положения

На планирование (прогнозирование ожидаемой трудоемкости разработки конструкции И) и нормирование (оценку трудоемкости чертежно-конструкторских работ) влияет большое число факторов, учет которых требует не только знания нормативов, формул и коэффициентов, но и технических особенностей конструируемого И и научно-практических навыков работников.

Труднее прогнозировать разработку новой конструкции, особенно творческой ее части — создание МОИ и разработку общего вида. Оценка трудоемкости чертежно-конструкторских работ при наличии разработанного чертежа общего вида выполняется достаточно просто и точно.

В основе всех существующих методов планирования и нормирования лежит использование принципа аналогов (новая разработка в какой-то мере аналогична предыдущим), принципа корреляции между параметрами и трудоемкостью разработки И (число ЭРЭ, ТЭЗ, число контактов ПП, число деталей механизма и т. п.) и принципов аналитической связи ряда условий с производительностью конструкторского труда (использование различных коэффициентов сложности, новизны и квалификации, влияющих на трудоемкость работы). Поэтому рассматриваемые далее рекомендации следует применять не как обязательные нормативы, а как исходные данные для их разработки с учетом конкретных условий предприятия или организации.

Характерные приемы планирования и нормирования конструкторских работ

Оценка трудоемкости ТР по числу N характерных ЭЛ конструкции ос-

нована на накоплении и изучении зависимостей $ТР = f(N)$ для характерных И или их узлов. Для этого необходимо знать N , особенности ЭЛ и конструкции в целом. В качестве характерных ЭЛ используют: ЭРЭ дискретного типа или ИС для оценки ТР ПП, детали и узлы для оценки ТР различных механизмов или конструкций, плотность линий для оценки ТР чертежно-копировальных работ.

Для оценки ТР узлов на ПП в качестве исходного параметра чаще всего используется число ЭРЭ $N_{эл}$ или выводов $N_{выв}$. Характерная зависимость $ТР = f(N)$ имеет параболический характер и достаточно точно аппроксимируется зависимостью $y = kx^n$ в виде $ТР = 4,2 (N^{0,56})$, по которой построен график рис. 7.30 с полем допуска $\Delta ТР \pm 15\%$.

Определив по принципиальной схеме или перечню ЭЛ в ТЗ значение $N_{эл}$ или $N_{выв}$ из графика, можно сразу получить ожидаемую ТР.

Оценка $ТР_{\Sigma}$ и N_{Σ} по назначению И, квалификации исполнителя, степени сложности и новизны разработки основана на определении исходной ТР и влиянии на нее (с помощью специальных коэффициентов) определяющих факторов:

$$ТР_{\Sigma} = ТРПК_i \text{ или } N_{\Sigma} = NПК_i. \quad (7.4)$$

Знаменатель прогрессии в рядах K_i целесообразнее выбирать из ряда предпочтительных чисел R_{20} .

Для коэффициента квалификации $K_{квл}$ рекомендуются значения: 1 (ведущий или старший инженер-конструктор), 1,12 (инженер-конструктор), 1,25 (старший техник) и 1,4 (техник); для коэффициента сложности $K_{слж} = 1$ (простые радиотехнические и электромеханические узлы и блоки на базе типовых унифицированных решений); 1,4 (радиотехнические и электромеханические узлы и блоки средней сложности с уплотненной компоновкой и сложными механическими конструкциями); 2 (сложные радиотехнические и электромеханические узлы, блоки и приборы с высокой плотностью компоновки и механическими конструкциями высокой сложности). Для коэффициента новизны $K_{нв}$ рекомендуются четыре градации: 1 —

* Составители В. И. Семернев, Р. Г. Варламов.

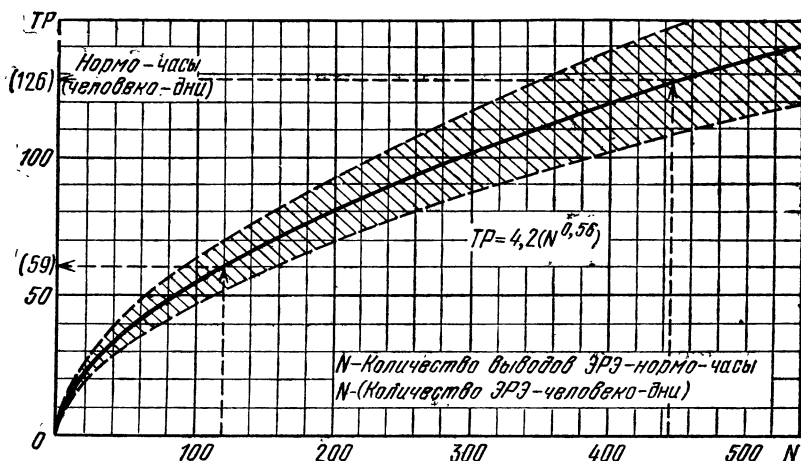


Рис. 7.30. Трудоемкость конструкторских работ (Если N дано как $N_{\text{выв}}$, то ТР в нормо-часах, если как $N_{\text{эд}}$ — то ТР в человеко-днях).

воспроизведение существующих конструктивных принципов и размерных структур с заимствованием; 1,25 — модификация существующих конструктивных принципов и размерных структур; 1,6 — заимствование конструктивного принципа с конструктивной и размерной переработкой прототипа; 2 — новая конструктивная разработка, не имеющая прототипов с нестандартными расчетами (для текстовых КД $K_{\text{нв}} = 1$ для типовых расчетов или описаний с заменой численных значений параметров; 1,25 — при незначительной переработке методики расчета или описания; 1,6 — для КД, не имеющих прототипов, с разработкой методики расчетов).

Для определения $ТР_{\Sigma}$ и N_{Σ} из табл. 7.3 берут исходное значение ТР или N ; по особенностям изделия выбирают коэффициенты K_i и по формуле (7.4) выполняют расчет.

Примеры расчетов

Пример 1. На ПП расположено 32 ИС, с 14 выводами каждая. Определить ТР ее выполнения.

Общее число выводов $N_{\text{выв}} = 32 \cdot 14 = 448$. По графику рис. 7.30 $ТР \approx 126$ нормо-часов (или 15,75 чел.-дней).

Пример 2. На ПП ячейки расположено 120 дискретных ЭРЭ. Определить ТР разработки и выпуска полного комплекта КД.

По графику рис. 7.30 для 120 ЭЛ получаем полную ТР 59 человеко-дней.

Пример 3. Определить полную ТР разработки КД на И, включающее в себя плату усилителя с 40 ЭЛ, измерительный генератор на 3 диапазона, сложную кодовую матрицу типовой блок питания, сложный редуктор из 20 деталей и кнопочный механизм на 12 кнопок, знаковое табло с электролюминесцентным индикатором и блок, выполненный в виде типовой конструкции. Разработка проводится старшим инженером-конструктором, имеет среднюю сложность, конструктивный принцип заимствуется с конструктивной и размерной переработкой прототипа.

Расчет ведем по формуле (7.4) и данным табл. 7.3. Полная ТР равна: $ТР_{\Sigma} = ТР \cdot K_{\text{нвл}} \cdot K_{\text{слж}} \cdot K_{\text{нв}} = ТР \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 1,6 = (40 \cdot 0,4 + 10 \cdot 3 + 60 + 24 + 20 \cdot 0,75 + 12 \cdot 0,85 + 20 + 15) \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 1,6 \approx 426$ чел.-дн.

Ожидаемое число КД в Ф11 равно $N_{\Sigma} = N \cdot K_{\text{слж}} \cdot K_{\text{нв}} = N \cdot 1,4 \cdot 1,6 = (30 + 20 + 200 + 120 +$

Таблица 7.3

Ориентировочная ТР конструкторских работ

Наименование изделий	ТР, чел.-день	Ф11, коли- чество
1. Усилители, маломощные генераторы и импульсные устройства обработки данных, собранные на отдельных ПП*	0,4	30...40
2. Генераторы средней мощности измерительные, задающие, для устройств обработки данных**	10	20
3. Устройства обработки данных:		
модульные типовые блоки	4	30
кассеты (ячейки)	10	50
блоки памяти и матриц	50...60	160...200
4. Устройства и ЭЛ питания:		
типовые блоки питания	24	120
трансформаторы типовые	7	24
трансформаторы специальные и многофазные	12	40
коробки соединительные	7	35
щиты распределительные	20	100
5. Механизмы***:		
редукторы	0,75	3
электромеханические генераторы и датчики (клавиатура)	0,85	3,5
приводы антенн	1	4
6. Устройства ввода и вывода:		
пульта управления и стенды простые	20	90
генераторы и ЭЛИ миниатюрные	20	40
пульта средней сложности с числом ЭРЭ до 250 шт.	60	130
сложное информационное табло на 100...500 знаков	120	300
7. РЭА в шкафах (стойках):		
рабочее место оператора	150	400
типовая конструкция	15	70
специальная конструкция	40	200
набор типовых секций	40	70

* ПП имеет $S=100..500 \text{ см}^2$; значение ТР дано на один ЭЛ; количество Ф11 от сложности компоновки зависит мало;

** ТР на один канал (диапазон), одно знакоместо устройств отображения с электролюминесцентными индикаторами или электронно-лучевыми трубками;

*** ТР на одну деталь механизма

$$+20 \cdot 3 + 12 \cdot 3,5 + 40 + 70) \cdot 1,4 \cdot 1,6 = 1304 \text{ шт.}$$

При оценке выполненной работы в нормо-часах по детализовке и вычерчиванию, а также конструкторской разработки пользуются выражениями (или построенными по ним графиками) вида

$$ТР_{\Sigma} = PK_i \Sigma K_j \cdot N_i, \quad (7.5)$$

где K_i — коэффициенты относительной сложности и ТР; K_j — коэф-

фициенты влияния параметра N_i ; N_i — численная характеристика КД в виде числа основных проекций и разрезов, вспомогательных и местных разрезов и т. п.

При расчете ТР чертежных работ выражение (7.5) преобразуется так:

$$ТР_{\Sigma} = 25 K_i (\Sigma K_j \cdot N_i) K_{\text{слж}}, \quad (7.6)$$

где $K_{\text{слж}} = 1$ для инженера и 1,12 для техника.

При разработке общего вида

$$TP_{\Sigma} = 75K_{\text{квл}} (\Sigma K_j \cdot N_i) K_{\text{слж}}, \quad (7.7)$$

где $K_{\text{слж}} = 1$ для ведущего (старшего) инженера-конструктора, 1,12 — для инженера-конструктора, 1,25 — для старшего техника-конструктора и 1,4 — для техника-конструктора.

Произведение $\Sigma K_j N_i$ определяется так:

$$(\Sigma K_j N_i) K_{\text{слж}} = K_{\text{слж}} (N_1 + 0,5N_2 + 0,33N_3 + 0,25N_4 + 0,1N_5 + 0,04N_6 + 0,02N_7),$$

где $K_{\text{слж}}$ выбирается следующим образом:

Разработка жгутового монтажа по таблице проводов . . .	0,28
Детали с развертками простого профиля, чертежи упаковок, трубо- и воздухопроводов с минимальной механической обработкой . . .	0,63
Монтажные чертежи и чертежи печатных плат. Сварочные и сборочные узлы средней сложности . . .	0,8
Сварочные и сборочные узлы и блоки повышенной сложности сборки и обработки . . .	1
Пружины (с расчетом), литье, ПП повышенной сложности и с высокой плотностью компоновки . . .	1,6
Разработка конструкции оригинальных блоков, приборов и установок . . .	2

Значения N_i см. в табл. 7.4.

Для быстрой приближенной оценки ТР работ пользуются таблицами типа табл. 7.5, в которых даются усредненные нормативы в человеко-днях на условную форматку Ф11.

Пример 4. Оценить ТР чертежных работ, выполненных техником, если $N_1 = 2$, $N_2 = 0$, $N_3 = 0$, $N_4 = 2$, $N_5 = 1$, $N_6 = 8$, $N_7 = 18$

$$\begin{aligned} TP_{\Sigma} &= 25 K_{\text{слж}} (N_1 + 0,25N_2 + 0,1N_3 + 0,04N_4 + 0,02N_5) = \\ &= 25 \cdot 1,12 (2 + 0,25 \cdot 2 + 0,1 \cdot 1 + 0,04 \cdot 8 + 0,02 \cdot 18) = 91,84 \text{ ч} \approx 11,5 \text{ раб. дней.} \end{aligned}$$

Пример 5. Оценить ТР конструкторской разработки старшим инже-

Таблица 7.4

Параметры для расчета ТР

N_i	Число параметров
1	Основные проекции и разрезы вместе с развертками. Стенки узла с ЭЛ в МЧ
2	Группы ЭЛ и отдельно расположенные ЭЛ на МЧ
3	Типы дискретных ЭРЭ на монтажные (печатные) платы
4	Оригинальные (с самостоятельной разработкой) узлы
5	Вспомогательные и местные проекции разрезов и сечений; оригинальные (с самостоятельной разработкой) детали; заимствованные узлы; строки таблиц и примечаний на чертежах
6	Заимствованные детали: предоставленные размеры: знаки обработки, пайки, сварки; гальванические и лакокрасочные покрытия
7	Позиции спецификации сборочных чертежей; провода и перемычки на МЧ и чертежах жгутов; общее количество ЭЛ монтажных (печатных) плат, пунктов ТТ и размеров

Таблица 7.5

Средняя ТР выпуска КД в условных форматах Ф11 в день

Виды работ по выпуску КД	ТР, чел.-дни/Ф11
1. Белки	0,5
2. Ведомости (ВСП, ВП, ЗИП и т. п.)	0,25
3. Документация текстовая	0,224
4. Документация техническая	0,315
5. Дроссели	0,28
6. Запоминающие устройства	0,355
7. Индикаторы	0,355
8. Извещения об изменении	0,25
9. Исправления КД	0,0355
10. Инструкции по эксплуатации и обслуживанию	0,8

Продолжение табл. 7.5

Продолжение табл. 7.5

Виды работ по выпуску КД	ТР, чел.- дни/Ф11
11. Каркасы	0,355
12. Кассеты	0,224
13. Кабели	0,224
14. Коммутационные устройства	0,45
15. Коробки соединительные	0,224
16. Матрицы памяти (кодовые)	0,355
17. Место рабочее	0,315
18. Модули	0,355
19. Модульные блоки	0,16
20. Описание техническое	1,2
21. Приборы с ПП	0,28
22. Проверка КД	0,028
23. Проводов таблица	0,16
24. Питания блоки	0,28
25. ПП простые	0,6
26. ПП сложные	1,2
27. ПП модульные	0,28
28. Пульты	0,224
29. Паспорт	0,355
30. Программа испытаний	0,355
31. Печатание СП и приказов	0,025
32. Расчеты простые	0,56
33. Расчеты сложные	1
34. Радиотехнические устройства	0,6
35. Расчетно-пояснительная записка	0,8
36. Редукторы	0,315
37. Стенд	0,224
38. СП	0,224
39. Стойка	0,355
40. Сдача калек	0,0315
41. Сличение калек	0,0315
42. Схемы монтажные	0,224
43. Субблоки	0,6
44. Табло	0,315
45. Трансформаторы	0,315
46. Тара транспортная	0,28
47. Узлы унифицированные и заимствованные	0,16
48. Укладка	0,28
49. Упаковка	0,28
50. Усилитель	0,45
51. Условия технические	0,56
52. Черчение	0,125
53. Шкафы	0,224
54. Щиты распределительные	0,224
55. Экраны	0,315

Виды работ по выпуску КД	ТР, чел.- дни/Ф11
56. Электромеханические устройства	0,6
57. Эскизы	0,25
58. Ячейки	0,6

нером, если $N_1 = 1$, $N_2 = 4$, $N_3 = 9$,
 $N_4 = 0$, $N_5 = 4$, $N_6 = 0$, $N_7 = 26$.
 $ТР_{\Sigma} = 75 \cdot K_{\text{квл}} \cdot K_{\text{слиж}} (N_1 + 0,5N_2 +$
 $+ 0,33 N_3 + 0,1N_5 + 0,02N_7) =$
 $= 75 \cdot 1 \cdot 1 (1 + 0,5 \cdot 4 + 0,33 \cdot 9 + 0,1 \times$
 $\times 4 + 0,02 \cdot 26) = 516,75 \text{ часа} \approx 64,6 \text{ раб.}$
 дней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов А. В. Механизация и автоматизация проектно-конструкторских работ. — М.: Энергия, 1973.
2. Альтшуллер Г. С. Алгоритм изобретения. — М.: Московский рабочий, 1973.
3. Бронин Е. И., Вермишев Ю. Х. и др. Основные технические характеристики комплекса автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры. — Обмен опытом в радио-промышленности, 1975, вып. 6.
4. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Сов. радио, 1975.
5. Войцехов Ю. Р., Чернякова М. М. Изоптический метод дистанционного измерения температуры. — Вопросы радио-электроники. Сер. ТРТО, 1974, вып. 2.
6. Войцехов Ю. Р., Чернякова М. М. А. с. 415515. — Опул. в БИ, 1974, № 6.
7. Кувыров П. П., Темников Ф. Е. Комбинаторные системы. — М. Энергия, 1975.
8. Принс М. Д. Машинная графика и автоматизация проектирования: Пер. с англ. Ю. Л. Зимана. — М.: Сов. радио, 1975.
9. Семернев В. И. Элементы рационализации процесса разработки и выпуска конструкторской

- документации. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ, 1969, вып. 13.
10. Тихомиров Б. П.; Семернев В. И. и др. Опыт разработки и внедрения машинного конструирования ячеек РЭА. — Обмен опытом в радиопромышленности, 1975, вып. 6.
 11. Чернякова М. М. А. с. 253408. — Оpubл. в БИ, 1968, № 7.
 12. Хилл П. Наука и искусство проектирования: Пер. с англ. — Мир, 1973.
 13. Юрин. О. Н. Единая система автоматизации проектирования ЭВМ. — М.; Сов. радио, 1976.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аксентьев В. С., Винник И. С., Воднев А. Е., Кандауров И. И. Механизация инженерно-технического и управленческого труда. — Л.: Лениздат, 1973.
2. Алферов А. В., Бренев В. С., Качалина Л. Н., Мамонина Н. А. Оргтехника в управлении. — М.: Экономика, 1975.
3. Джонс Дж. К. Инженерное и художественное конструирование: Современные методы проектного анализа: Пер. с англ./Под ред. В. Ф. Венды, В. М. Мунипова. — М.: Мир, 1976.
4. Душков Б. А., Ломов Б. Ф., Рубахин В. Ф., Смирнов Б. А. Основы инженерной психологии. — М.: Высшая школа, 1977.
5. Зозулевич Д. М. Машинная графика в автоматизированном проектировании. — М.: Машиностроение, 1976.
6. Кацман С. А. Механизация конструирования в морском приборостроении и радиоэлектронике. — Л.: Судостроение, 1976.
7. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Сов. радио, 1977.
8. Семернев В. И. и др. Автоматизированная система получения конструкторской и технологической документации КТПП БЭСМ-6. — В кн.: Проектирование вычислительных устройств и систем с помощью ЭВМ/изд-во Саратовского у-та. — Саратов, 1978.
9. Семернев В. И. и др. Опыт разработки и внедрения машинного конструирования ячеек РЭА. — Обмен опытом в радиопромышленности, 1975, вып. 6.

8. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭА

Список аббревиатур

АЛУ — арифметико-логическое устройство
БИС — большая интегральная микросхема
ИС — интегральная микросхема
ОП — оперативная память
ПА — преобразователь активный
ПП — преобразователь пассивный
САПР — система автоматизации проектирования
ТПМ — теория подобия и моделирования
Увв — устройство ввода
Увыв — устройство вывода
УУ — устройство управления
ЦВК — центральный вычислительный комплекс

8.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ *

При анализе и синтезе конструкций РЭА чаще всего приходится представлять исходные материалы в виде графических или знаковых моделей (графики, уравнения, формулы, таблицы). В более сложных случаях приходится прибегать к использованию методологии теории подобия и физическому моделированию.

График — двух- иногда трехмерное изображение связи двух (трех) групп параметров в виде одной или семейства линий или поверхностей. Обладает наивысшей степенью наглядности, имеет ограниченные точность и область отображения. Значения параметров могут иметь как численную, так и качественную характеристику.

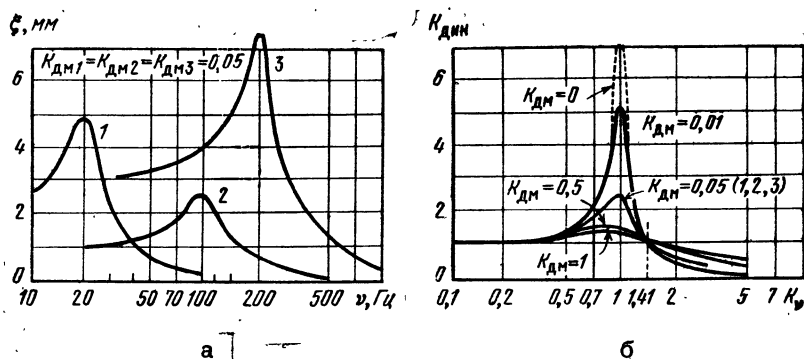
* Составитель § 8.1...8.3 Р. Г. Варламов.

Уравнение — символическая запись связи многих групп параметров (минимум — двух параметров). Обладает наивысшей степенью компактности записи, но и высокой неопределенностью использования, так как дополнительно нужно знать область существования данной функции. Инвариантно (не зависимо) от носителя систем единиц.

Формула — символическая запись связи ограниченного числа параметров для конкретной конструкции и конкретной системы единиц, часто включающая в себя числовые коэффициенты. Обладает наивысшей степенью определенности, но пригодна только в узкой области изменения параметров данной функции. Вид формулы зависит от используемой системы единиц и их конкретных численных значений.

Таблица — одно- или многорядная форма записи числовых значений взаимосвязанных параметров. Составляется либо по результатам эксперимента, либо по уравнению или формуле. Дает высокую точность, но весьма громоздка. Численные значения зависят от используемой системы единиц.

Характер этих графических и знаковых моделей зависит не только от их сущности и системы единиц, но и от пространства отображения или соотношения в виде системы координат. Графически наиболее наглядными и широко используемыми в инженерной практике являются три системы координат: прямоугольная (декартова), цилиндрическая и сферическая и их частные (дву- и одномерные) случаи. В номограммах и сложных графиках используют косоугольные и криволинейные си-



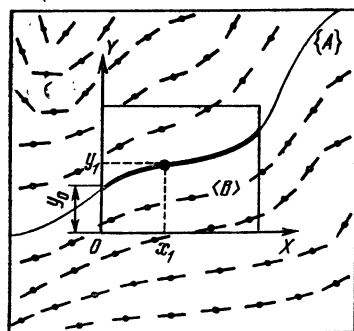
$$K_{\text{дин}} = \sqrt{\frac{1 + 4K_v^2 K_{\text{DM}}}{(1 + K_v^2) + 4K_v^2 K_{\text{DM}}^2}}, \quad K_{\text{дин}} = \sqrt{\frac{1 + K_{\text{DM}}^2}{0.53 + K_{\text{DM}}^2}}$$

$$m\ddot{\xi} + \beta\dot{\xi} + k\xi = F_0 \sin \omega t;$$

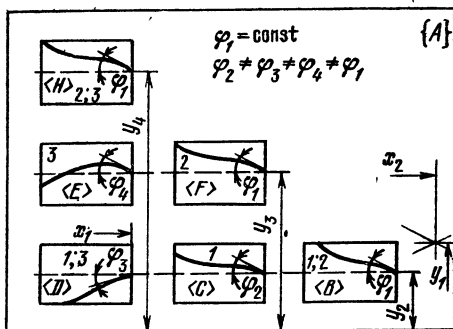
в

K_{DM}	1	0.7	0.5	0.2	0.1	0.07	0.05	0.02	0.001
$K_{\text{дин}}$	1.132	1.191	1.242	1.317	1.331	1.334	1.335	1.336	1.336
ξ , мм	47.54	50.02	52.16	55.31	55.90	56.03	56.07	56.11	56.11

г



д



е

Рис. 8.1. Частные (а) и обобщенные (б) резонансные характеристики и их представление в виде уравнений (в) и таблицы (г). Область существования функций (д) и ее граничные условия в месте перехода от к {A} (е)

8.1. Общие положения

стемы координат (параболические, эллиптические, биглиндрические, софокусные и т. п.). Если по ходу решения задачи приходится иметь дело с большим; чем три, числом групп независимых параметров, то прибегают к формальным представлениям о многомерном пространстве.

Оптимальный выбор графических или знаковых моделей и их пространства отображения позволяет дать наиболее компактное и наглядное представление о конструкции.

Общие правила построения и использования графических и знаковых моделей.

На рис. 8.1, а построены графики функции $\xi = f(v)$ для трех динамических систем (1, 2, 3). Из рисунка следует, что частоты собственных колебаний систем v_0 равны соответственно 20, 100 и 200 Гц, виден также характер изменения функции и то, что значения коэффициента $K_{\text{дм}} = \text{const} = 0,05$. Если ввести относительные (безразмерные) параметры демпфирования $K_{\text{дин}} = \xi/\xi_0$ и $K_v = v/v_0$ (рис. 8.1, б), то информативность и наглядность графика возрастут. Три кривые рис. 8.1, а сольются в одну, так как каждая кривая теперь отражает целое семейство кривых в относительных единицах. Из этого графика видно, что максимальные значения функции при $K_{\text{дм}} > 0,05$ лежат в дорезонансной области, что при $K_{\text{дм}} \rightarrow 0$ $\xi \rightarrow \infty$, а при $K_v = 1,41$ $\xi = 1$ (т. е. только для $K_v > 1,41$ возможно уменьшение колебаний амортизируемого блока), что чем больше функция ξ при $K_v = 1$, тем она меньше при $K_v > 1,41$. Однако для получения численных значений функции ξ и аргумента v надо знать их начальные значения (например при $K_v = 1$).

Наивысшей общностью формы записи поведения динамической системы, возбуждаемой силой $F_0 \sin \omega t$, обладает уравнение $m\ddot{\xi} + \beta\dot{\xi} + k\xi = F_0 \sin \omega t$, в котором m — масса, β — параметр, пропорциональный коэффициенту демпфирования $K_{\text{дм}}$, k — жесткость. Это уравнение справедливо для любой системы единиц.

Частные решения уравнений в виде формул (рис. 8.1, в) пригодны для решения узкого класса задач, например, вычисления $K_{\text{дин}}$ при $K_{\text{дм}}$ и $K_v = \text{var}$ или только $K_{\text{дм}} = \text{var}$, а $K_v = \text{const}$ и т. п. в определенной системе единиц. Таблица рис. 8.1, г дает наиболее точные значения как для относительных, так и для абсолютных значений параметров, но весьма громоздка.

В общем случае уравнение представляет собой формальную запись взаимосвязи множества пар значений аргумента и функции, для выделения из которых конкретных областей значений требуется наложение дополнительных условий. Рассмотрим область существования некоторой функции $y = f(x)$ (рис. 8.1, д). В любой точке множества $\{A\}$, ограниченного рамками рисунка, существует искомая функция, которую можно представить в виде точки с отрезком прямой — производной $y' = f'(x)$. Если на этом множестве выделить область $\langle B \rangle$ и частичное значение $y = f(x)$ в виде интегральной кривой (сплошная линия), проходящей через данную точку x_1, y_1 , то для ее задания необходимо иметь систему координат XOY , в которой можно задать начальное значение $y = f(x)$ в виде $(0, y_0)$. Это и дает возможность перейти от уравнения общего характера к инженерной формуле, позволяющей дать численное описание.

Если предположить, что подмножество (область) $\langle B \rangle$ имеет физические свойства, отличные от свойств множества (окружающей среды) $\{A\}$, то возможны три характерных режима (граничных условий) в месте перехода от $\langle B \rangle$ к $\{A\}$ (рис. 8.1, е). Выделим на множестве $\{A\}$ шесть подмножеств $\langle B \rangle$, $\langle C \rangle$, $\langle D \rangle$, $\langle E \rangle$, $\langle F \rangle$ и $\langle H \rangle$ и рассмотрим характер задания $y = f(x)$ на границах раздела подмножества и множества. Для подмножеств $\langle B \rangle$, $\langle C \rangle$ и $\langle D \rangle$ будем иметь на границе раздела $y = y_2$, но разные значения производных (разные φ). Это граничная задача I рода, требующая соответствия значения функции условию Дирихле {однозначность, конечность, кусочная непрерыв-

ность, $u(x) = \psi(x)$. При одинаковых производных (одинаковых углах наклона φ), но разных значениях $y(y_2, y_3, y_4)$ условия на границе раздела подмножеств $\langle B \rangle$, $\langle F \rangle$ и $\langle H \rangle$ должны соответствовать граничной задаче Неймана — условиям II рода ($du/dn = \varphi(x)$). Для подмножеств $\langle D \rangle$, $\langle E \rangle$ и $\langle H \rangle$ будем иметь граничную задачу III рода (смешанные граничные условия), в которых определяющим параметром является обобщенная проводимость, имеющая геометрический смысл отношения $(x_2 - x_1)/y_1$.

Таким образом, рассматривая исходную физическую модель конструкции РЭА и ее графические или знаковые отображения, следует помнить о сущности этих моделей, их возможностях и целесообразных областях использования.

8.2. МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Конструкции современной РЭА — сложные системы, состоящие из взаимосвязанных элементов. Поэтому приложении к их анализу и синтезу классических математических методов наталкивается на ряд ограничений методического и принципиального характера, в основе которых лежат: отсутствие общей теории конструирования РЭА, обилие разнообразных физических эффектов, используемых в РЭА и требующих специфических подходов, большое число параметров, с помощью которых необходимо описывать конструкцию РЭА.

Методы теории подобия и моделирования ТПМ (как и методы планирования эксперимента или многофакторного анализа) по существу решают одну и ту же задачу: обобщение результатов ограниченного числа опытов с получением на их основе достоверной (в пределах разумных требований) математической модели системы.

Изучение системы начинается с качественных исследований, позволяющих ответить на вопрос: лучше или хуже, больше или меньше. Затем, обобщая разрозненные данные опыта, переходят к нахождению закономерностей и созданию матема-

тической модели явления, т. е. переносу полученной информации на другие подобные системы.

Так как конструкция РЭА изучается в условиях неполной исходной информации, то для конструктора очень важно знание основных положений теории подобия и моделирования. Эти методы позволяют проводить анализ конструкций по ограниченному числу параметров, заменять ее упрощенной физической или математической моделью, сокращать число анализируемых параметров без потери полноты описания.

Основными наиболее доступными методами ТПМ являются: анализ размерностей, π -теорема, метод подобия, физическое моделирование. Более подробно с методами моделирования можно познакомиться в [7, 8, 14, 27].

Анализ размерностей

В практике анализа и синтеза конструкций приходится иметь дело с параметрами, характеризуемыми числом (отношением количества данного свойства к базовой величине) и физической характеристикой или размерностью (отображающей конкретное качество). Поэтому запись результата измерения, например, диаметра валика $\varnothing 6$ мм рассматривается как отношение диаметра к базисному значению, имеющему физический смысл длины в 1 мм. Для измерения можно воспользоваться, например, калибром на 6 мм. Тогда результат измерения — отношение $6 \text{ мм}/6 \text{ мм} = 1$ называют безразмерным. Следует помнить, что безразмерные величины — отношение комбинаций одинаковых по размерностям исходных величин или их комплексов.

В общем виде результат измерения можно представить как совмещение пространства размерностей с данной системой (явлением, конструкцией). Если свойства конструкции совпадают с соответствующими осями координат (размерностями), то получим безразмерное описание, если нет — придется ввести дополнительные производные величины. Поэтому вопрос о числе и характере основных единиц решается обычно на основе целесообразности или удобства пользо-

вания соответствующей системой единиц, включающей основные и производные величины.

При этом следует помнить, что перевод группы величин из одной системы в другую всегда связан с введением различных коэффициентов пропорциональности, которые могут быть как размерными с определенным численным значением, так и безразмерными, численное значение которых может быть равно единице, что часто является причиной ошибок при переходе от одной системы единиц к другой.

В международной системе единиц (СИ), используемой в Справочнике, основными единицами являются: масса (обозначение размерности $[M]$), длина $[L]$, время $[T]$, термодинамическая температура $[\Theta]$, сила электрического тока $[I]$ и сила света $[J]$. Их наименования: метр, килограмм, секунда, кельвин, ампер и кандела.

Зная размерность основных и производных величин, входящих в то или иное равенство или формулу, можно проверить их правильность, определив размерности правой и левой частей (принцип однородности по размерностям Фурье). Проверим, например, правильность равенства: $s = vt + 0,5 at^2$; $[s] = L$; $[v] = LT^{-1}$; $[t] = T$; $[a] = LT^{-2}$.

После подстановки имеем

$$[s] = L; [vt] = LT^{-1} T = L; [at^2] = LT^{-2} T^2 = L.$$

Размерности одинаковы, равенство справедливо (размерность числового коэффициента равна 1).

Пользуясь анализом размерностей, можно определить вид функциональной связи параметров. Исследуем, например, зависимость собственной частоты ν_0 колебаний элемента конструкции, выведенного из состояния равновесия, отпущенного из этой точки без начальной скорости и эквивалентного математическому маятнику. Из опыта известно, что частота ν_0 зависит от длины l элемента, его меры инерции m и веса G , т. е.

$$\nu_0 = f(l, m, G) \text{ и } [\nu_0] = [l^\alpha m^\beta G^\gamma].$$

Тогда $T^{-1} = L^\alpha M^\beta (LMT^{-2})^\gamma$ и показатель степени у $G-2 \gamma = -1$,

у $l - \alpha + \gamma = 0$ и у $m - \beta + \gamma = 0$. Отсюда $\gamma = 1/2$, $\alpha = \beta = -1/2$ и искомая зависимость будет иметь вид:

$$\nu_0 = C \sqrt{G/lm}, \text{ а так как } G = mg, \text{ то } \nu_0 = C \sqrt{g/l},$$

т. е. получена искомая зависимость с точностью до функции C , которая при малых углах отклонения равна примерно $1/2\pi$.

Последовательность решения подобных задач следующая: записывают функциональную зависимость, составляют уравнение размерностей, решают систему уравнений для показателей степени и составляют требуемую зависимость, вводя в нее константу или функцию C .

Анализ размерностей, оперируя понятиями высокого уровня абстракции, позволяет синтезировать формулы размерностей физических величин на базе строгих математических доказательств.

П-теорема

Эта теорема лежит в основе анализа размерностей. Суть ее в следующем.

Если имеется функциональная зависимость (исходная информация) n размерных параметров

$$f(q_1, q_2, \dots, q_n) = 0.$$

то ей всегда соответствует эквивалентное соотношение m безразмерных параметров:

$$\psi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$$

и при этом всегда $n > m$. Обычно $m + q = n$, где q — число независимых размерностей.

Таким образом, п-теорема дает возможность описать* конструкцию не только в пространстве первичных параметров, но и вторичных (в виде обобщенных характеристик безразмерного вида).

Условия применения п-теоремы. В исходный список параметров должны быть включены все определяющие конструкцию величины, так как на промежуточных этапах анализа п-теорема не позволяет этого делать. При составлении физически корректного исходного списка следует исклю-

чать параметры, влияние которых не существенно. Число основных размерностей выбирается самым тщательным образом. Для упрощения анализа желательно, чтобы в каждой обобщенной характеристике была только одна зависящая величина.

Рассмотрим элемент конструкции РЭА в виде заземленной балки в системе размерностей MLT . Из опыта известна зависимость

$$f(v_0, E, \mu, \rho, F, a, g) = 0, \quad (8.1)$$

где v_0 — частота собственных колебаний $[T^{-1}]$; E — модуль упругости $[LM^{-1}T^2]$; μ — коэффициент Пуассона $[L^{-1}MT^{-1}]$; ρ — плотность $[L^{-3}M]$; F — сила $[LMT^{-2}]$; a — размеры, определяющие геометрию изучаемой системы $[L]$; g — ускорение силы тяжести $[LT^{-2}]$.

Условия подобия модели (индекс m) и реальной системы (индекс s) позволяют сформулировать два критерия подобия в виде отношений длин и сил. [27]:

$$\pi_1 = a_m/a_s \text{ и } \pi_2 = F_m/F_s.$$

Исходя из анализа размерностей параметров, оставшихся в (8.1), можно получить еще два критерия:

$$\pi_3 = v^2 a/g \text{ и } \pi_4 = \rho g a/E.$$

Откуда имеем:

$$\pi_3 = \psi(\pi_1, \pi_2, \pi_4, \mu) \text{ — условия, достаточные для подобия частот колебаний в модели и реальной системе} \\ (\rho g a/E)_m = (\rho g a/E)_s; \pi_{1m} = \pi_{1s}; \pi_{2m} = \pi_{2s}; \mu_m = \mu_s \text{ и } v_s = \sqrt{\pi_{1m} g/a_s}$$

— закон моделирования рассматриваемой сравнительно простой механической системы.

Таким образом решается задача, условия которой сформулированы только в виде системы физических характеристик, без задания их функциональных связей.

Метод подобия

Метод включает в себя две теоремы, устанавливающие условия подобия и закон моделирования систем, принадлежащих заданному классу исследования (часто в качестве второй теоремы рассматривают π -теорему).

Первая теорема подобия. У подобных явлений определенные сочетания параметров, в виде критериев подобия, численно одинаковы.

Сопоставим два физически однородных процесса, принадлежащих одному классу, имеющих одинаковое математическое описание

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_m = 0, \quad (8.2)$$

которому соответствует уравнение размерностей

$$[\varphi_1] = [\varphi_2] = \dots = [\varphi_m] = \text{const.}$$

Так как $[\varphi_1] = q_1^{\alpha_1} q_2^{\beta_1}, \dots, q_i^{\varepsilon_1}, \dots$

$[\varphi_m] = q_1^{\alpha_m} q_2^{\beta_m}, \dots, q_i^{\varepsilon_m}, \dots$, то обобщенные параметры из (8.2) можно получить путем последовательного деления всех членов этого уравнения на какой-либо один из них: $\pi_1 = \varphi_1/\varphi_n, \pi_2 = \varphi_2/\varphi_n, \dots$ Получим

$$\sum_{i=1}^{m-1} \pi_i = 0$$

$$\text{и } \pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{m-1}).$$

Третья теорема подобия. Необходимым и достаточным условием подобия реальной системы и ее модели является пропорциональность всех сходственных характеристик, входящих в условия однозначности. Это означает, что если в совокупность первичных характеристик включаются граничные условия, то они также должны быть подобны. Отсюда следует необходимость соблюдения геометрического и физического подобия всех основных характеристик системы, допустимость (при некоторых заранее известных и количественно оцененных упрощающих допущениях) использования приближенного подобия.

В соответствии с первой теоремой признаками подобия физических систем, кроме геометрического подобия, являются подобие отношений свойств материалов, сил и энергий.

Если исходная информация о конструкции неполна, недостаточно изучено физическое содержание процессов, неизвестно математическое описание или метод его решения, то одним из эффективных способов ее исследования является модельный (физический) эксперимент. В этом случае последовательно определяют: основные процессы, подлежащие мо-

делированию, законы и масштабы моделирования, требования к установке для моделирования и оценки точности физического моделирования. При этом учитывают условия моделирования сложных систем в виде дополнений В. А. Веникова [14].

Первое дополнение. Сложные системы подобны, если подобны все составляющие их подсистемы.

Второе дополнение. Основные теоремы подобия оказываются справедливыми для нелинейных систем, если их безразмерные нелинейные характеристики совпадают.

Третье дополнение. Условия подобия однородных (изотропных) систем могут быть распространены на неоднородные (анизотропные) системы, если неоднородность в сравниваемых системах одинакова.

Четвертое дополнение. Процессы, протекающие в геометрически неподобных системах, подобны аффинно. При этом в геометрически сходственных точках сходственные характеристики процессов пропорциональны.

Подробно эти вопросы изложены в [7, 8, 14, 27].

8.3. ОБОБЩАЮЩИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИЙ РЭА

Преобразование — определяющий физический эффект работы и конструкции РЭА

РЭА и ее элементы можно представить в виде преобразователей, соединенных в сложные структуры с

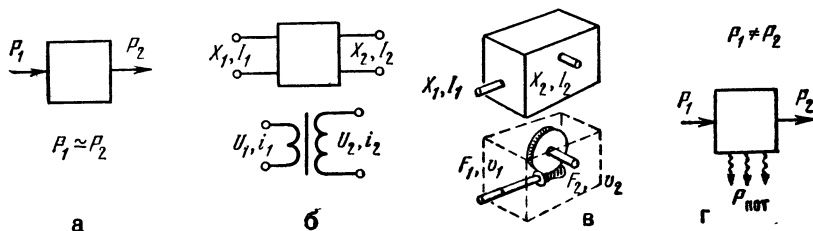
помощью динамических и статических электрических магнитных, механических, тепловых и других связей. Поэтому в основу обобщающих физических моделей РЭА можно положить эффект преобразования.

Простейшим является идеализированный двухсторонний преобразователь, на входе и выходе которого действуют силы одной и той же (или разной) физической природы, а эффекты преобразования происходят без потерь (рис. 8.2, а). Примерами таких преобразователей могут служить электрические трансформаторы и механические редукторы, к. п. д. которых 0,9...0,98 (рис. 8.2, б, в). При заметных потерях необходимо учитывать и эту сторону (рис. 8.2, г).

Для создания внутренней структуры конструкции (преобразователя) необходимо элементы соединить так, чтобы эффект преобразования был максимальным, а структура преобразователя (конструкции) сохраняла свои свойства в течение заданного времени эксплуатации.

Если внутренняя статическая структура конструкции обеспечивает заданные эффекты преобразования, то имеем дело с конструкцией в виде пассивного преобразователя (ПП), который для своей работы не требует отдельных источников энергии питания. В конструкции, представляющей собой активный преобразователь (ПА), эффекты преобразования возможны только при подключении к источникам питания, энергия которых превращается в энергию выходного сигнала. ПА — по существу комбинация как минимум двух ПП (рис. 8.3, а). Так как работа конструкции в виде ПП и ПА в общем случае без потерь невозможна, то их следует представлять в виде трех-

Рис. 8.2. Схема идеального ПП (а), идеализированные ПП в виде трансформатора (б), редуктора (в) и реальный ПП (г)



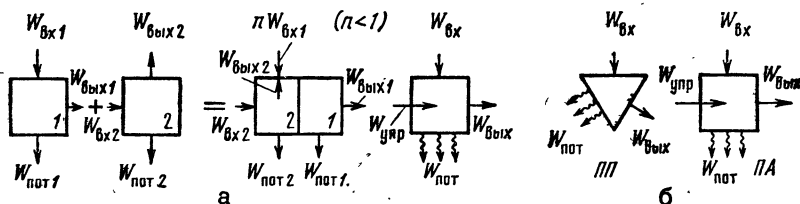


Рис. 8.3. Построение ПА из двух ПП (а) и условные изображения ПП и ПА (б)

и четырехстороннего преобразователя (рис. 8.3, б).

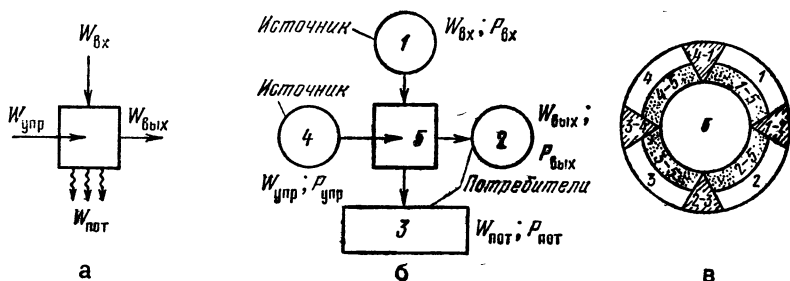
РЭА в целом — сложный ПА (рис. 8.4, а), который включает в себя (рис. 8.4, б): источник энергии питания $W_{вх}$ (например, гальванический элемент или аккумулятор) 1, потребитель энергии ПА $W_{вых}$ (ухо или глаз человека, измерительный прибор, самописец и т. п.) 2, потребитель энергии, бесполезно теряемой ПА $W_{пот}$ (среда, поглощающая, например, тепловую энергию) 3, источник энергии управления ПА $W_{упр}$ (магнитная лента, датчик и т. п.) 4 и собственно активный преобразователь 5. Сближая все эти элементы, получаем «закрытую» систему (рис. 8.4, б), не связанную с окружающей средой. Эта система имеет только внутренние связи с РЭА 1—5; 2—5; 3—5; 4—5 и между элементами 1, 2, 3, 4 (этих связей может и не быть) 1—2, 2—3, 3—4, 4—1.

Модель системы (рис. 8.4, в), включающая РЭА, ее связи, источники и потребители энергии, удоб-

на тем, что представляет собой закрытую термодинамическую систему, для которой просто составить энергетические уравнения существования конструкции. Из ее рассмотрения следует, в частности, что энергоёмкость источника 1 не может превышать энергоёмкость РЭА 5, энергоёмкости потребителей 2 и 3 не могут быть меньше $W_{вых}$ и $W_{пот}$, а источника 4 — больше энергоёмкости устройства управления радиоэлектронной аппаратурой.

Отсюда же вытекает и такое очевидное соотношение, что статическая энергоёмкость элементов $W_{ст}$ и РЭА в целом $W_{\Sigma ст}$ не должна быть меньше динамической энергоёмкости $W_{дин}$ и $W_{\Sigma дин}$, потому что в противном случае структура элементов и РЭА окажется разрушенной (превышение предельной мощности рассеяния резистора, когда $W_{дин} > W_{ст}$, — причина теплового разрушения). Таким образом, при работе РЭА происходит постепенный рас-

Рис. 8.4. ПА, связанный со средой (а), ПА с обозначенными элементами 1...4 (б), трансформация ПА в замкнутую термодинамическую систему (в)



ход потенциальной энергии конструкции вследствие воздействия кинетической энергии в процессах преобразования и дестабилизирующих факторов; это позволяет оценить срок «жизни» РЭА.

Обобщающая физическая модель РЭА

РЭА состоит из множества ПП и ПА, соединение которых можно представить и в виде, показанном на рис. 8.5, а. Двойная сумма $\sum p$ ПП и $\sum q$ ПА будет иметь число внешних связей (по их физической природе) $N_{\text{внш}} < 3p + 4q$, так как многие из связей ПП и ПА оказываются общими. В число $N_{\text{внш}}$ входят электрические, магнитные, электромагнитные, тепловые, химические, механические и другие связи, которыми определяется взаимодействие РЭА со средой. Для упрощения анализа часто принимают $N_{\text{внш}} = 1$ и исследуют порознь различные внешние связи. Это обычно допустимо, потому что корреляционные связи между внешними влияниями РЭА обычно малы, а dW и dm (в случаях, аналогичных рис. 8.4, в) можно считать равными нулю.

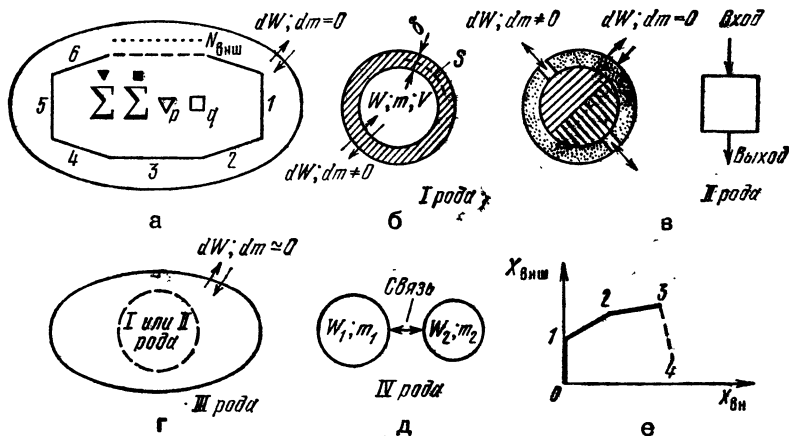
Выполним упрощения обобщающей физической модели РЭА (рис. 8.5, а). Если положить $N_{\text{внш}} =$

$= 1$, то многогранник $1...N_{\text{внш}}$ и контрольную поверхность можно представить в виде границ ядра, (собственно РЭА) и полупрозрачной для определенных воздействий оболочки (в виде или кожуха РЭА, или пристеночных областей окружающего пространства). Определяющими параметрами упрощенной модели (назовем ее моделью I рода) будут энергия W (или ее поток P) и масса m , содержащиеся в объеме ядра V , толщина оболочки δ и ее сечение (поверхность) S , а также физические характеристики материала ядра и оболочки, определяющие их обобщенную проводимость требуемой природы.

Модель I рода (рис. 8.5, б) — основа расчетов эффектов энерго-массопереноса при теплообмене, электромагнитном экранировании, защите от проникающей радиации, влагозащите и герметизации, движении электрического тока в проводниках и электролитах, защите от акустических и механических воздействий и т. п. Определяющим конструкторским параметром является обобщенная проводимость оболочки (в частном случае она имеет смысл теплопроводности, электропроводности и т. п.).

Модель II рода. Если в модели I рода полупрозрачную оболочку за-

Рис. 8.5. Обобщающая физическая модель (а), ее частные варианты (б... д) и характер связей или воздействий (е)



менить непрозрачной, ввести абсолютно прозрачные каналы и сложную структуру ядра из двух частей разной физической природы, то получим модель II рода (рис. 8.5, в) — основу для расчетов эффектов преобразования. Определяющие параметры упрощенной модели II рода: энергия W (или ее поток P), обобщенные координаты E (обобщенное перемещение) или I (обобщенная скорость) и сопряженные с ними обобщенные жесткость c_{ij} или сопротивление z_{ij} , а также V , S и (при необходимости) толщина δ . Простейший двухсторонний преобразователь в теории связей рассматривается как четырехполюсник (трехсторонний как шестиполюсник и т. д.). Модель II рода позволяет рассматривать конструкцию, элементы и РЭА в целом в виде преобразователей, определять условия получения максимального к. п. д. в функции конкретных конструкторских параметров и оценивать качество конструкции РЭА и ее частей.

Модель III рода. Если в модели I рода увеличивать толщину полупрозрачной оболочки, то можно добиться того, что по границе контрольной поверхности эффекты энерго-массопереноса будут столь незначительны, что в каких-либо конкретных задачах можно приравнять $dW \approx 0$ и $dm \approx 0$ и получить модель III рода (рис. 8.5, г). Эта модель в виде обобщенной геометрической модели (ОГМ) элемента или РЭА используется при решении компоновочных задач. Значение потенциала соответствующей физической природы выбирается на минимальном уровне, так как синтетические ОГМ элементов РЭА представляют собой плоские или объемные геометрические модели, гарантирующие отсутствие паразитных полевых взаимодействий и сводящих компоновку к чисто геометрической задаче размещения без взаимного наложения или проникновения друг в друга плоских или объемных фигур.

Определяющими параметрами ОГМ являются потенциал $\partial W/\partial x$ и геометрические размеры. В практике компоновочных работ чаще пользуются упрощенными обобщенными геометрическими моделями ($V_{уст}$ и $S_{уст}$, см. гл. 7).

Модель IV рода. Наличие связей между элементами конструкции требует рассмотрения простейшей модели связи двух элементов (рис. 8.5, д). Эта модель представляет собой совокупность моделей I, II или III рода и канала связи между ними. Такая модель используется при анализе и расчетах параметров взаимосвязей в системе «человек — машина», при кинематическом воздействии механических усилий и выборе амортизаторов. Связи могут иметь следующий характер (рис. 8.5, е): воздействие не вызывает ответной реакции (внутренние силы связи больше, чем воздействующие внешние) участок $0...1$; реакция связи линейно или нелинейно пропорциональна усилию воздействия, сопротивление большое — участок $1...2$; реакция связи линейно или нелинейно пропорциональна усилию воздействия, но сопротивление уменьшилось — участок $2...3$, воздействие уменьшается, но реакция возрастает — связь разрушается — участок $3...4$. Рабочими являются связи, при которых реакция либо превышает действующие усилия (статический режим, участок $0...1$), либо пропорциональна им (динамический режим, участок $1...2$).

РЭА — совокупность множества ПП и ПА, поэтому ее структуру можно рассматривать с позиций памяти и сложности. Структурная сложность конструкции РЭА оценивается числом элементов и их внутренними и внешними связями. Мерой структурной сложности элементов конструкции является отношение площади элемента к его периметру (для двухмерных структур) и объема к поверхности (для трехмерных структур), число элементов на единицу площади или объема и т. п. Чем больше это отношение, тем сложнее структура и тем легче ее повредить. Под памятью конструкции понимают зависимость данного макроскопического состояния от состояния в более ранние моменты времени.

Без памяти невозможно создание конструкций, например, при отсутствии памяти после изготовления угольника заготовка его возвращалась бы в исходное состояние, «забывая» воздействие.

Принципы описания конструкций в обобщенных параметрах

Все воздействия на элементы (заготовки) конструкции принято описывать как результат действия некоторых сил. При этом удобно оперировать с понятиями обобщенных координат, по которым в данной конструкции происходит изменение ее энергии (энергоемкости). Такими величинами в статических механических элементах конструкции берут длину (линейное перемещение), угол поворота, площадь, объем, характерными величинами в других случаях могут быть масса, термический заряд (в частном случае энтропия), электрический или магнитный заряд, векторы поляризации или намагничивания или (в динамических) скорости их изменения.

Рассмотрение обобщенных координат в виде обобщенных перемещений (зарядов) для статических элементов конструкций и обобщенных скоростей (потоков зарядов) для динамических элементов конструкций позволяет дать общее, простое и наглядное описание различных эффектов в системе обобщенных параметров.

Рассмотрим конструкцию в виде упрощенной модели I рода с однородной структурой, которая характеризуется внутренней энергией W и обобщенной координатой E . Тогда $W = f(E)$ и справедливо

$$dW = \frac{\partial W}{\partial E} dE, \quad dW = X dE, \quad W = XE, \quad (8.3)$$

где $\partial W / \partial E$ имеет смысл обобщенной силы.

При анализе зависимости $X = f(E)$ вместо (8.3) будем иметь

$$dX = \frac{\partial X}{\partial E} dE, \quad dX = c dE, \quad X = cE, \quad (8.4)$$

где c — обобщенная жесткость (упругость) системы.

Для конструкции, которая характеризуется мощностью P и обоб-

щенной скоростью I , получим аналогично (8.3):

$$dP = \frac{\partial P}{\partial I} dI, \quad dP = X dI, \quad P = XI, \quad (8.5)$$

где $\partial P / \partial I$ имеет смысл обобщенной силы, как и $\partial W / \partial E$, или

$$dX = \frac{\partial X}{\partial I} dI, \quad dX = z dI, \quad X = zI, \quad (8.6)$$

где z — обобщенное сопротивление системы.

При модели II рода соответственно получим:

$$W = f(E_1, E_2); \quad P = f(I_1, I_2);$$

$$dW = \frac{\partial W}{\partial E_1} dE_1 + \frac{\partial W}{\partial E_2} dE_2;$$

$$dP = \frac{\partial P}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial P}{\partial I_2} dI_2;$$

$$W = X_1 E_1 + X_2 E_2; \quad P = X_1 I_1 + X_2 I_2$$

$$\text{или} \quad (8.7)$$

$$X_1 = f(E_1, E_2); \quad X_2 = f(I_1, I_2);$$

$$dX_1 = \frac{\partial X_1}{\partial E_1} dE_1 + \frac{\partial X_1}{\partial E_2} dE_2, \quad dX_2 =$$

$$= \frac{\partial X_2}{\partial E_1} dE_1 + \frac{\partial X_2}{\partial E_2} dE_2;$$

$$dX_1 = \frac{\partial X_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial X_1}{\partial I_2} dI_2, \quad dX_2 =$$

$$= \frac{\partial X_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial X_2}{\partial I_2} dI_2;$$

$$X_1 = c_{11} E_1 + c_{12} E_2, \quad X_2 = c_{21} E_1 + c_{22} E_2;$$

$$X_1 = z_{11} I_1 + z_{12} I_2, \quad X_2 = z_{21} I_1 + z_{22} I_2.$$

Такой подход позволяет из (8.3)...(8.6) получить уравнения существования конструкций по моделям I, III и IV рода, а из (8.7) — по модели II рода в обобщенных параметрах и по единой методологии.

Законы энерго-массопереноса

Перепишем (8.2) в виде $I = \sigma X$, где $\sigma = 1/z$.

Так как X — обобщенная сила соответствующей физической природы, которая в общем случае имеет векторный характер и поэтому $\text{grad } X = \nabla \varphi$. Линейный оператор ∇ через орты (единичные векторы) соответствующих координат записывается в виде

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k,$$

градиент скалярной функции (потенциала)

$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} i + \frac{\partial \varphi}{\partial y} j + \frac{\partial \varphi}{\partial z} k.$$

Отсюда находим обобщенную форму законов переноса:

$$I = -\sigma \nabla \varphi = -\sigma \text{grad } \varphi, \quad (8.8)$$

в частных случаях она записывается следующим образом:

$$\Phi_{\text{тп}}^y = -\lambda \text{grad } \vartheta \quad (\text{закон Фурье}), \quad (8.9)$$

где $\Phi_{\text{тп}}^y$ — удельный поток тепловой энергии, λ — коэффициент теплопроводности, ϑ — температура,

$$i = -\sigma_e \text{grad } U \quad (\text{закон Ома}), \quad (8.10)$$

где i — поток электронов (электрический ток), σ_e — электропроводность проводника, U — электрический потенциал,

$$\Phi = -\sigma_m \text{grad } \theta \quad (\text{формула Гопкинсона}), \quad (8.11)$$

где Φ — магнитный поток, σ_m — магнитная проводимость; θ — магнитодвижущая сила,

$$m = -D \text{grad } C \quad (\text{второй закон Фика}), \quad (8.12)$$

где m — масса вещества; D — проницаемость стенки сосуда; C — концентрация раствора.

Физический смысл законов (8.9)...(8.12) и им подобных одинаков: величина потока энергии или массы вещества прямо пропорциональна градиенту потенциала соответствующей обобщенной силы и

обобщенной проводимости соответствующей физической природы (которая зависит от материала). Однако их непосредственное использование для конструкторских расчетов в ряде случаев невозможно, так как требует соблюдения и знания начальных и граничных условий и применения конкретных математических приемов [4...9,35].

8.4. МЕТОДИКА ОБОБЩЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ в РЭА *

Метод обобщенного исследования позволяет отказаться от концепции «черного ящика» и вместо формальной математической аналогии теории четырехполюсника [35] использовать физическую аналогию систем с потоками различных видов энергии. При этом возможно получение в общем виде решения обобщенной модели РЭА, представленной уравнениями в обобщенных координатах при любых заданных граничных условиях, а исследования процессов передачи и преобразования потоков энергии по законам механики, термодинамики и электродинамики не только не заменяют друг друга, но наоборот, становятся единой теоретико-методологической базой широкого класса практических задач.

Сопряженные с обобщенными координатами обобщенные силы измеряются количеством энергии в обобщенном силовом поле. Использование представлений об обобщенном силовом поле позволяет одним методом решать задачи теплового режима, вибрации и электромагнитных полей в РЭА. В качестве такого метода можно использовать вариационный принцип Остроградского — Гамильтона (принцип наименьшего действия)

Механические поля

Любая конструкция РЭА при расчетах вибраций может быть определена заданием обобщенных коор-

* Составитель § 8.4...8.9 А. С. Синиченков.

динат q_1, \dots, q_n (n — число степеней свободы) и производными от них \dot{q}_i — обобщенными скоростями. Задача заключается в отыскании уравнений движения, которые позволяют определить собственные частоты и амплитуды колебаний рассматриваемой конструкции.

Общая формулировка законов движения механических систем дается принципом наименьшего действия Гамильтона, по которому траектория движений механической системы в пространстве обобщенных координат q_i характеризуется функцией Лагранжа L , а интеграл

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt$$

называется действием (по Гамильтону) за промежуток времени $t_2 - t_1$ и принимает наименьшее возможное значение.

Из условия минимума вариации действия S

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt = 0 \quad (8.13)$$

получаем дифференциальные уравнения Лагранжа вида [21]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0. \quad (8.14)$$

Функция Лагранжа для замкнутой системы: $L = T - U$, где T и U — кинетическая и потенциальная энергия системы соответственно.

Например, для свободных одномерных колебаний имеем

$$U = \frac{kx^2}{2}; \quad T = \frac{m\dot{x}^2}{2}; \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}.$$

Функция Лагранжа системы, совершающей одномерные малые колебания, $L = m\dot{x}^2/2 + kx^2/2$, где k — жесткость системы; m — масса системы.

Уравнение Лагранжа, соответствующее этой функции, $m\ddot{x} + kx = 0$, или $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$, где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — собственная частота.

Решение уравнения (амплитуда) может быть записано в виде

$$x = \xi = a \cos(\omega_0 t + \alpha).$$

Таким образом, если функция Лагранжа механической системы известна, то уравнение (8.14) представляет собой уравнение движения системы, позволяющее вычислить характеризующие конструкцию параметры.

Электромагнитные поля

Вариационная задача в формулировке (8.13) приводит к уравнениям электродинамики Максвелла, широко используемым при расчетах электромагнитных явлений в РЭА.

Рассмотрим РЭА как некоторый объем V , содержащий электрические поля, токи и заряды, характеризующиеся векторным потенциалом A , вектором количества электричества j и скалярным потенциалом ϕ , которые на границе S этого объема принимают заданные значения. Тогда для истинного поля, токов и зарядов, которые будут в объеме V при заданных сторонних электродвижущих силах $E_{ст}$ и условиях на границе S этого объема, имеем

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (L + A) dt = 0, \quad (8.15)$$

где вариации δA , $\delta \phi$ и δj являются произвольными и независимыми внутри V , а также на границе S объема V . При этом виртуальная работа определяется выражением

$$\delta A = \int_V \left(E_{ст} - \frac{1}{\sigma} j \right) \delta j dV, \quad (8.16)$$

а функция Лагранжа равна

$$L = \int_V \left[\frac{1}{c} A \frac{\partial j}{\partial t} + \varphi j + \frac{e}{8\pi} \times \left(\frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \varphi \right)^2 - \frac{1}{8\pi c} (\text{rot } A)^2 \right] dV, \quad (8.17)$$

где j — плотность тока; σ — проводимость среды; $E_{ст}$ — сторонняя э. д. с.; ∇ — оператор Гамильтона.

Можно показать [25], что при подстановке в (8.15) функции Лагранжа (8.17) и выражения работы сто-

ронных сил (8.16) получим уравнения электродинамики в виде

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} - \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial}{\partial t} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi \right);$$

$$\operatorname{div} \varepsilon \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi \right) = -4\pi \rho;$$

$$\mathbf{j} = \sigma \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi + \mathbf{E}_{\text{ст}} \right).$$

Если учесть известные соотношения

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi$$

и условие Лоренца

$$\operatorname{div} \mathbf{A} + \frac{\varepsilon \mu}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0,$$

то приходим к стандартному выражению системы уравнений Максвелла в среде

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \quad (8.18)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (8.19)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad (8.20)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi \rho, \quad (8.21)$$

где \mathbf{D} — вектор электрической индукции; \mathbf{E} — вектор электрической напряженности; \mathbf{H} — вектор магнитной напряженности; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции; ε — диэлектрическая проницаемость; μ — магнитная проницаемость; ρ — плотность зарядов.

В системе уравнений (8.18)... (8.21) учтены соотношения, обусловленные средой, в которой протекают электромагнитные процессы, а именно:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{ст}}).$$

Тепловые поля

Основное уравнение теплопроводности также может быть получено из общего принципа наименьшего действия Гамильтона [24]. При теплофизических процессах часть энер-

гии необратимо переходит в теплоту, рассеивается (диссипируется). В этом случае необходимо ввести функцию потерь или диссипативную функцию Рэля в виде квадратичной формы:

$$R = \frac{1}{2} \sum_{k,l=1}^n b_{lk} \dot{q}_l \dot{q}_k.$$

В частном случае необратимые потери в виде обобщенных сил трения равны

$$Q_i = - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}.$$

С учетом диссипативных процессов уравнение Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = 0. \quad (8.22)$$

Для случая, когда система не обладает кинетической энергией, имеем

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = 0. \quad (8.23)$$

Если на систему действуют внешние силы F_i , уравнения (8.22), (8.23) приобретают вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = F_i;$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = F_i.$$

Используя термодинамику необратимых процессов, можно дать четкое толкование тепловых полей на основе вариационных принципов обобщенного силового поля.

Введем вектор теплового потока \mathbf{P} как функцию обобщенных координат

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(q_1, q_2, \dots, q_n, t).$$

Обозначая через ϑ избыточную по отношению к равновесной температуру из закона сохранения энергии, получим

$$c\rho\vartheta = -\operatorname{div} \mathbf{P},$$

где c и ρ — удельные теплоемкость и плотность. Следуя Био [24], введем термодинамические аналоги по

тенциальной энергии, диссипативной функции и внешней силы.

Аналогом потенциальной энергии, выраженной в виде квадратичной формы

$$U = \frac{1}{2} \sum_{k,l=1} k_{l,k} q_l q_k,$$

является тепловой потенциал

$$U = \frac{1}{2} \int_V c_p \vartheta^2 dV.$$

Диссипативной функции R ставится в соответствие интегральное выражение тепловой диссипации (тепловых потерь)

$$R = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)^2 dV,$$

где, λ — коэффициент теплопроводности.

В качестве обобщенной гермической силы понимается сила, равная

$$F_i = \int_S n \vartheta \frac{\partial P}{\partial q_i} dS,$$

где n — единичный вектор нормали к положительным направлением внутрь тела.

Таким образом, вариационный принцип решения задачи, по определению теплового поля, сводится к интегрированию дифференциальных уравнений в форме Лагранжа

$$\frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} = F_i; \quad q_i = \frac{dq_i}{dt} \quad (8.24)$$

обобщенных координат q_i и \dot{q}_i .

Это вытекает из условия эквивалентности уравнения Лагранжа (8.24) уравнению теплопроводности. Покажем это.

Функция действия для теплового поля

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt = \int_{t_1}^{t_2} (U + R) dt.$$

Вычисляя вариации для функций U и R и используя принцип Остроградского — Гамильтона

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} (\delta U + \delta R) dt = 0,$$

получим уравнение теплопроводности

$$c_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \text{div} (\lambda \text{ grad } \vartheta),$$

что и требовалось показать

8.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЭА

Общие положения

В общем случае физические эффекты, возникающие в конструкции РЭА в процессе ее функционирования, могут быть описаны совокупностью алгебраических, дифференциальных и разностных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

Математическое исследование конструкции РЭА может иметь целью ее анализ и синтез. Под анализом понимается исследование полей или характеристик элементов РЭА при заданной конструкции и параметрах РЭА. Под синтезом — определение оптимальных параметров, обеспечивающих заданное распределение полей или заданные конструктивные требования при определенных внешних воздействиях, условиях работы и ограничениях, накладываемых на РЭА.

Задачи анализа физических полей РЭА приводят к исследованию дифференциальных уравнений с частными производными второго и более порядка.

Уравнение, связывающее неизвестную функцию $U(x, y, z, t)$, независимые переменные x, y, z, t и частные производные от неизвестной функции, называется дифференциальным уравнением с частными производными

Оно имеет вид

$$F\left(x, y, z, U, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}, \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right) = 0,$$

где F — заданная функция своих аргументов.

Уравнение с частными производными называется квазилинейным, если оно линейно относительно всех старших производных от неизвестной функции. Так, например,

$$\begin{aligned} & A\left(x, y, z, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \\ & + B\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + \\ & + \dots + C\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + f\left(x, \dots, t, \frac{\partial U}{\partial x}, \dots, \frac{\partial U}{\partial t}\right) = 0 \end{aligned}$$

есть квазилинейное уравнение второго порядка.

Уравнение с частными производными второго порядка называется линейным, если оно линейно относительно неизвестной функции и ее частных производных.

Рассмотрим уравнение второго порядка с двумя независимыми переменными

$$\begin{aligned} & A \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \\ & + F\left(x, y, u, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}\right) = 0, \quad (8.25) \end{aligned}$$

где коэффициенты A , B и C одновременно не обращаются в нуль.

Уравнению (8.25) соответствует квадратичная форма

$$A \zeta_1^2 + 2B \zeta_1 \zeta_2 + C \zeta_2^2 = 0. \quad (8.26)$$

Тогда тип дифференциального уравнения (8.25) будет:

1) гиперболический, если $B^2 - AC > 0$ (квадратичная форма (8.26) знакопеременная);

2) параболический, если $B^2 - AC = 0$ (квадратичная форма (8.26) знакопостоянная);

3) эллиптический, если $B^2 - AC < 0$ (квадратичная форма (8.26) знакоопределенная).

Строго говоря, задачи расчета физических полей РЭА являются нелинейными. Однако в целях упрощения нахождения решений в первом приближении многие задачи теплового

режима, экранирования и др. могут считаться линейными. Поэтому здесь рассматриваются математические методы исследования линейных задач, для которых сравнительно просто построить регулярные решения.

Изучение различного вида электромагнитных, и механических колебаний в РЭА приводит к волновым уравнениям (уравнениям гиперболического типа)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + F,$$

где c — скорость распространения волны в данной среде, F — возмущающая сила.

Процессы распространения тепловой энергии в РЭА описываются уравнением теплопроводности (уравнением параболического типа)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \rho,$$

где $a^2 = \lambda / c\rho$ — коэффициент температуропроводности, ρ — плотность источников тепла.

Стационарные электрические поля и установившееся тепловое состояние РЭА описываются уравнениями эллиптического типа. При наличии источников тепла или электрических зарядов приходим к уравнению Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho. \quad (8.27)$$

При отсутствии источников тепла и зарядов справедливо уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0.$$

Введя в рассмотренные выше уравнения оператор Лапласа

$$\nabla^2 = \Delta \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

получим основные уравнения математической физики

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \Delta U + F, \quad \frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U + \rho,$$

$$\Delta U = -\rho, \quad \Delta U = 0,$$

изучение которых дает возможность решить ряд задач, возникающих при конструировании РЭА, в частности, теплового режима, экранирования, вибраций и т. д.

Постановка краевых задач

Постановка задач математической физики включает: а) основное уравнение (или систему уравнений), которому удовлетворяет искомая функция, описывающая исследуемое явление, б) дополнительные условия.

Дополнительными условиями являются так называемые граничные (краевые) условия, заданные на границе рассматриваемой области, и начальные условия, относящиеся к одному какому-нибудь моменту времени, с которого начинается изучение данного физического поля РЭА. Задачи в такой постановке называются краевыми или граничными. Краевые условия определяются физическим характером явления и могут иметь разнообразный (в том числе и нелинейный) характер. Приведем постановку краевых задач для уравнений гиперболического и параболического типов:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \Delta U + F(M, t); \quad (8.28)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U + P(M, t), \quad (8.29)$$

где

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

дифференциальный оператор, a^2 , c^2 , F и P — функции точки M .

Краевые задачи для уравнений параболического и гиперболического типов формулируются следующим образом: найти функцию $U(M, t)$, удовлетворяющую в области $G \equiv \{M \in D, t > 0\}$ уравнению (8.29) (соответственно (8.28)) и дополнительным условиям

$$\left\{ \gamma_1(M) \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2(M) U \right\}_S = \beta(M, t).$$

При $\gamma_1 \equiv 0$ получим краевое условие 1-го рода, при $\gamma_2 \equiv 0$ — второго рода, а при $\gamma_1 \neq 0$ и $\gamma_2 \neq 0$ — третьего рода.

Для уравнения эллиптического типа (8.27) краевые задачи формулируются так: найти функцию $U(M)$, удовлетворяющую в области D ($M \in D$) уравнению

$$\Delta U = -\rho(M),$$

а на границе S — аналогичному условию общего вида:

$$\left\{ \gamma_1(M) \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2(M) U \right\}_S = \beta(M).$$

Если $\gamma_1 \equiv 0$, то имеем первую краевую задачу, если $\gamma_2 \equiv 0$ — вторую, а при $\gamma_1 \neq 0$ и $\gamma_2 \neq 0$ — третью.

Замкнутая поверхность S физической модели (элемента) РЭА ограничивает две области: внутреннюю D и внешнюю D_1 . При постановке краевых задач надо оговаривать, для какой из двух областей (по координатам) требуется искать решение и различать внутренние и внешние задачи, что существенно прежде всего для уравнений эллиптического типа.

Краевые задачи, поставленные в целях аналитического исследования типовых конструкторских задач, должны удовлетворять следующим трем требованиям: 1) решение должно существовать, 2) оно должно быть единственным и 3) устойчивым. Задача, удовлетворяющая всем трем требованиям, называется корректно поставленной задачей.

В конструкторских расчетах для решения краевых задач нашли применение методы: 1) разделения переменных (метод Фурье) [33], 2) конечных интегральных преобразований [19, 34], 3) операционный [24], 4) функций Грина [19, 33], 5) конечных разностей [28, 29, 33].

Метод разделения переменных

Метод разделения переменных, или метод Фурье, является одним из наиболее распространенных методов решения уравнений с частными производными. Сущность его заключается в следующем. Искомую функцию выражают через произведение функций, каждая из которых зависит только от одной переменной (координат или времени). При подста-

новке этого произведения в исходное дифференциальное уравнение в частных производных получаем систему из двух или более обыкновенных дифференциальных уравнений, каждое из которых решается известными методами.

Метод разделения переменных применим, если выполнены следующие условия: а) основное дифференциальное уравнение — линейное; б) граничные условия — линейные; в) область интегрирования — простейшая.

Ввиду линейности исходного дифференциального уравнения полученные частные решения позволяют составить общее решение уравнения в виде сходящегося ряда, удовлетворяющее заданным начальным и граничным условиям.

Суть метода состоит в следующем. Пусть требуется найти функцию $U(M, t)$, удовлетворяющую линейному однородному уравнению с постоянными коэффициентами

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \Delta U \quad (8.30)$$

в области D , ограниченной замкнутой поверхностью S , непрерывную в замкнутой области $G \equiv \{M \in D, t > 0\}$ и удовлетворяющую дополнительным условиям:

краевому

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = 0 \quad (8.31)$$

и начальному

$$U(M, 0) = \varphi(M). \quad (8.32)$$

В областях, допускающих разделение переменных [линейность уравнения (8.30) и граничных условий (8.31), (8.32)], решение краевой задачи (8.30)... (8.32) может быть найдено методом Фурье по следующей схеме.

а) Находим частные решения уравнения (8.30), удовлетворяющие только краевым условиям (8.31), среди функций вида

$$U(M, t) = v(M) T(t).$$

Подставляя функцию $v(M) T(t)$ в уравнение (8.30) и деля обе части на $a^2 v(M) T(t)$, получаем:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{T'}{a^2 T}, \quad \Delta v = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \dots + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}; \quad T' = \frac{dT}{dt}.$$

Из требования тождественности этого равенства необходимо и достаточно, чтобы обе части $\Delta v/v$ и $T'/a^2 T$ были равны одной и той же константе: $\Delta v/v = -\lambda$, $T'/a^2 T = -\lambda$.

Следовательно, в качестве функций $T(t)$ и $v(M)$ надо брать нетривиальные решения уравнений

$$T' + \lambda T = 0, \quad (8.33)$$

$$\Delta v(M) + \lambda v(M) = 0, \quad (8.34)$$

причем функция $v(M)$ должна удовлетворять краевому условию

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial v}{\partial n} + \gamma_2 v \right)_S = 0. \quad (8.35)$$

Задачу (8.34), (8.35) называют задачей Штурма — Лиувилля.

б) Решаем задачу Штурма — Лиувилля. Пусть $v_1(M), \dots, v_n(M), \dots$ — суть собственные функции этой задачи, а $\lambda_1, \dots, \lambda_n, \dots$ — отвечающие им собственные значения.

в) Уравнение (8.33) решается для каждого собственного значения $\lambda = \lambda_n$. Общее решение его имеет вид

$$T_n(t) = C_n e^{-\lambda_n t}.$$

г) Произведения функций $v_n(M) T_n(t)$

$$U_n(M, t) = C_n e^{-\lambda_n t} v_n(M)$$

образуют частные решения уравнения (8.30). В силу линейности уравнения и однородности краевых условий линейная комбинация таких частных решений является решением краевой задачи (8.30)... (8.32). Запишем это решение

$$U(M, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\lambda_n t} v_n(M). \quad (8.36)$$

д) Подставляя решение (8.36) в начальное условие (8.32), определяем значения коэффициентов C_n , поль-

заясь разложением функции $\varphi(M)$ в ряд по системе собственных функций $\{v_n(M)\}$

$$U(M, 0) = \varphi(M) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n v_n(M),$$

где C_n — коэффициенты Фурье функции $\varphi(M)$ находятся по формуле

$$C_n = \frac{1}{\|v_n\|^2} \int_D \varphi(M) v_n(M) dM,$$

$$\|v_n\|^2 = \int_D v_n^2(M) dM.$$

Число $\|v_n\|$ называется нормой функции $v_n(M)$.

Метод интегральных преобразований

Методы интегральных преобразований возникли позднее «классического» метода разделения переменных, а метод конечных интегральных преобразований появился лишь несколько лет назад [19]. Для метода интегральных преобразований характерны те же ограничения, что и для метода разделения переменных: он применим только к линейным дифференциальным уравнениям с линейными граничными условиями для простейших областей изменения независимых переменных. Однако применение этих методов более целесообразно в связи с более простой техникой вычислений и возможностью представления решения в удобном для конкретной задачи виде. Кроме того, решение уравнений в области изображений проще, нежели в области оригиналов.

Преобразование Фурье. При бесконечном интервале переменной x используют интеграл Фурье, т. е. интегральное представление

$$U(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U(p) e^{ipx} dp,$$

обратным которому является преобразование Фурье

$$U(p) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ipx} U(x) dx.$$

При этом функция $U(x)$ называется оригиналом, а $U(p)$ — изображением или Фурье-спектром. Если функция $U(x)$ задана на промежутке $[0, +\infty]$ и удовлетворяет на нем условиям Дирихле, то применяются синус- и косинус-преобразования Фурье.

Прямое синус-преобразование Фурье имеет вид

$$U(p) = \int_0^{\infty} \sin px U(x) dx.$$

Обратное преобразование выражается интегралом

$$U(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \sin px U(p) dp.$$

Преобразование Лапласа. Условие абсолютной интегрируемости значительно сужает круг практических задач. С целью расширения класса решаемых задач вводят в рассмотрение преобразование Лапласа

$$U(p) = \int_0^{\infty} U(x) e^{-px} dx \quad (8.37)$$

(p — некоторое комплексное число) с обратным преобразованием

$$U(x) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{px} U(p) dp,$$

где интегрирование на плоскости p ведется по оси, параллельной мнимой оси и отстоящей от нее на величину c .

Конечные интегральные преобразования. Преобразования Фурье и Лапласа используются при решении конструкторских задач, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями и их системами. Однако методы интегральных преобразований можно применить для решения дифференциальных уравнений в частных производных, которыми описываются пространственные задачи теплового режима, элект-

ромагнитных явлений в РЭА и др. В этом случае необходимо выбрать такое интегральное преобразование, которое позволило бы дифференциальные операции по одной из переменных заменить алгебраическими выражениями.

Таким образом, задача сразу упрощается: теперь интегрируется уравнение в частных производных, которое содержит на единицу меньше независимых переменных, чем заданное уравнение. Найдя решение преобразованной задачи, с помощью обратного преобразования находят и решение исходной. Основным отличием от преобразований Фурье и Лапласа в применении интегральных преобразований к уравнениям с частными производными является то, что пределы интегрирования конечны, что соответствует реальным моделям радиоконструкций. Такие интегральные преобразования получили название конечных интегральных преобразований.

В этом случае искомой функции трех пространственных координат и времени $U(x, y, z, t)$ сопоставляется функция

$$\bar{U}(y, z, t, p) = \int_a^b U(x, y, z, t) \times \times K(x, p) \rho(x) dx \quad (8.38)$$

двух пространственных переменных y, z , времени t и переменной p . Интегральное преобразование (8.38) по переменной x определяется пределами преобразования a, b , ядром $K(x, p)$ и весовой функцией $\rho(x)$. В результате интегрального преобразования получается некоторая новая функция $\bar{U}(y, z, t, p)$, уже не зависящая от x ; она называется изображением, а исходная функция $U(x, y, z, t)$ — оригиналом. Таким образом, в области изображений исчезла дифференциальная операция по x и исходное уравнение упрощается.

Выбор функций $K(x, p)$ и $\rho(x)$ обуславливается не только типом основного дифференциального уравнения, но и характером начальных и краевых условий.

Конечные интегральные преобразования представляют наибольший интерес, поскольку они совместно

с преобразованием Лапласа по временной координате дают возможность решать ряд задач аналитических расчетов при конструировании РЭА.

Для практического использования конечных преобразований необходимо знать формулы обращения, которые находятся при помощи разложения искомой функции в ряд по собственным функциям соответствующей краевой задачи, т. е.

$$U(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{U}(y, z, t, p) \times \times K(x, p) \rho(x),$$

где $K(x, p)$ — система собственных функций краевой задачи (ядро преобразования).

Дифференциальное уравнение поставленной краевой задачи представляется в виде [19]:

$$L_x U + L' U = f, \quad (8.39)$$

где $L_x U = a_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$ — дифференциальный оператор с коэффициентами, зависящими только от переменной x ; L' — дифференциальный оператор с коэффициентами, не зависящими от x и не содержащий операций дифференцирования по x , причём $a_x > 0$.

Если по переменной преобразования x заданы граничные условия, то они должны быть представлены в форме:

$$\left[\gamma_{1a} \frac{\partial U}{\partial x} - \gamma_{2a} U \right]_{x=a} = \varphi_a, \quad (8.40)$$

$$\left[\gamma_{1b} \frac{\partial U}{\partial x} + \gamma_{2b} U \right]_{x=b} = \varphi_b, \quad (8.41)$$

где величины γ_{1a}, γ_{2a} , а также γ_{1b}, γ_{2b} не отрицательны и не равны нулю одновременно, а φ_a и φ_b — известные функции переменной x .

Ядро преобразования равно

$$K(x, p) = \frac{1}{C_p} \rho(x) K_p(x),$$

где $K_p(x)$ — решение однородного дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 K_p}{\partial x^2} + \lambda_p \rho(x) K_p = 0,$$

удовлетворяющее

а) однородным граничным условиям, если по переменной x заданы граничные условия вида (8.40), (8.41):

$$\left[\gamma_{1a} \frac{\partial K_p}{\partial x} - \gamma_{2a} K_p \right]_{x=a} = 0;$$

$$\left[\gamma_{1b} \frac{\partial K_p}{\partial x} + \gamma_{2b} K_p \right]_{x=b} = 0;$$

б) условиями периодичности, если по переменной x заданы эти условия.

Таким образом, уравнение задачи $L_x U + L' U = f$ при помощи интегрального преобразования с ядром

$$K(x, p) = \frac{1}{C_p} p(x) K_p(x),$$

где

$$C_p = \int_a^b p(x) [K_p(x)]^2 dx$$

— нормирующий множитель, может быть приведено к виду $L' - \bar{U} - \lambda_p \bar{U} = f + N_a - N_b$,

где \bar{U} и \bar{f} — интегральные преобразования функций U и f по переменной x ; λ_p — собственные числа с порядковым номером p граничной задачи (8.39)... (8.41).

Величины N_a и N_b определяются из граничных условий основной задачи [19].

Решение U исходной задачи выражается через решение преобразованной задачи с помощью ряда

$$U(x, y, z, t) = \sum_{p=1}^{\infty} \bar{U}(y, z, t, p) K_p(x).$$

Аналогичные преобразования проводятся и по остальным пространственным переменным до получения обыкновенного дифференциального уравнения, решение которого находится обычным образом [19].

Операционный метод

При исследовании нестационарных тепловых режимов РЭА для малых отрезков времени особенно широко пользуются преобразованием Лапласа, составляющим основу операционного исчисления.

Пусть искомая функция $U(x, y, z, t)$ непрерывна всюду, кроме, быть

может, конечного числа точек разрыва 1-го рода и, кроме того, существуют постоянные $M > 0$ и $\sigma > 0$ такие, что $|U(x, y, z, t)| < M \times \exp(\sigma t)$ для всех t , тогда существует интеграл

$$L\{U(x, y, z, t)\} \equiv \bar{U}(x, y, z, p) = \int_0^{\infty} U(x, y, z, t) e^{-pt} dt \quad (8.42)$$

для всех p с действительной частью $\text{Re } p > \sigma$, представляющий собой аналитическую функцию комплексного переменного p в полуплоскости $\text{Re } p > \sigma$.

Определенная по формуле (8.42) функция $\bar{U}(x, y, z, p)$ называется преобразованием Лапласа, изображением функции $U(x, y, z, t)$, а сама $\bar{U}(x, y, z, t)$ — функцией-оригиналом.

Оригинал $U(x, y, z, t)$ находится из изображения $\bar{U}(x, y, z, p)$ по теореме обращения

$$U(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \bar{U}(x, y, z, p) \exp(pt) dp, \quad (8.43)$$

где $c > \sigma$. Интегрирование ведется по прямой $\text{Re } p = c$ в пределах от $c - i\infty$ до $c + i\infty$, причем корни подынтегрального выражения (p_i, σ_i) лежат левее оси сходимости $\text{Re } p = \sigma$. Вычисление интеграла (8.43) обычно производится методами контурных интегралов или сводится к более простым операциям с применением теоремы вычетов [17].

В качестве переменной преобразования может быть принято не только время t , но и любая из пространственных координат.

Применение операционного метода возможно лишь для линейных задач с линейными граничными условиями.

Метод функции Грина

Этот метод решения граничных задач существенно отличается от метода разделения переменных и метода интегральных преобразований и позволяет существенно упростить решение задачи. Метод функции

Грина состоит в том, что сначала находят некоторое специальное решение (функцию Грина) задачи того же типа и через него в квадратурах выражают решения исходной задачи.

Функция Грина для уравнения параболического типа (задачи теплового режима РЭА) Пусть требуется найти решение однородной краевой задачи в области $B \equiv \{M \in D, t > 0\}$,

$$\text{ср } \frac{\partial U}{\partial t} = L[U],$$

$$L \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (8.44)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = 0, \quad (8.45)$$

$$U(M, 0) = \varphi(M), \quad M = M(x, y, z) \quad (8.46)$$

Функция Грина задачи (8.44)... (8.46) есть решение специальной однородной задачи

$$L[G] = \rho \frac{\partial G}{\partial t},$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial G}{\partial n} + \gamma_2 G \right)_S = 0,$$

$$G|_{t=0} = \delta(M, P),$$

непрерывное всюду в области $B = \{M \in D, t \geq 0\}$, кроме точки $(P, 0)$. Здесь $\delta(M, P)$ — функция с особенностью в точке P , $G = G(M, P, t)$ — функция Грина исходной задачи (8.44)... (8.46), решение которой выражается через функцию Грина в квадратурах

$$U(M, t) = \int_B G(M, P, t) \varphi(P) dt_P.$$

Функция Грина может быть найдена методом разделения переменных.

Функция Грина для уравнений эллиптического типа (электромагнитные явления в РЭА). Рассмотрим граничную задачу

$$L[U] = -f(M) \text{ в области } D; \quad (8.47)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial U}{\partial n} + \gamma_2 U \right)_S = \varphi(M). \quad (8.48)$$

Метод функций Грина решения таких задач состоит в следующем. Решаем задачу (8.47), (8.48) при специальных значениях $f(M)$ и $\varphi(M)$ в виде

$$L[G] = -\delta(M, P); \quad \left(\gamma_1 \frac{\partial G}{\partial n} + \gamma_2 G \right)_S = 0.$$

Это решение есть функция Грина задачи (8.47), (8.48). Определив функцию Грина и применяя известные интегральные формулы Грина, находим решение исходной задачи. Например, для первой краевой задачи ($\gamma_2 \equiv 1, \gamma_1 \equiv 0$)

$$U|_S = \varphi, \quad G|_S = 0.$$

Решение исходной задачи (8.47) и (8.48) имеет вид

$$U(P) = - \int_S \varphi(M) \frac{\partial G}{\partial n} dS - \\ - \int_V G(M, P) f(M) dV, \quad M \in V - S,$$

причем $\frac{\partial}{\partial n}$ берется по направлению внешней нормали к S .

Метод конечных разностей

Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений для конструкторских задач является метод конечных разностей (или метод сеток). В этом случае область непрерывного изменения аргументов (x, y, z, t) заменяется конечным (дискретным) множеством точек (узлов), называемым сеткой. Производные, входящие в дифференциальное уравнение, заменяются (аппроксимируются) сеточными функциями в нескольких узлах сетки; дифференциальное уравнение при этом заменяется системой алгебраических уравнений (разностным уравнением). Начальные и краевые условия тоже заменяются разностными начальными и краевыми условиями для сеточной функции.

Например, пусть требуется решить уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}.$$

где $U = U(x, t)$ — функция двух аргументов x и t , меняющихся в области $D = (0 \leq x \leq 1, 0 \leq t \leq T)$. Введем сетку

$$\omega_{ht} = \{x_i = ih, t_j = j\tau\},$$

$$i = 0, 1, \dots, N; j = 0; 1; \dots, N_0\}$$

с шагами $h = 1/N, \tau = T/N_0$.

Произведем замену (аппроксимацию)

$$\frac{\partial U}{\partial t} \sim \frac{U_{j+1,i} - U_{j,i}}{\tau} = U_t;$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sim \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{h^2} =$$

$$= U_{xx}.$$

Подставляя полученные разностные отношения вместо соответствующих производных в дифференциальное уравнение и заменяя значения функции $U(x, t)$ ее значениями в узлах сетки $U(x_i, t_j) = U(ih, j\tau) U_{i,j}$, запишем разностное уравнение, аппроксимирующее заданное дифференциальное

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{\tau} = a^2 \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j}}{h^2}$$

и являющееся одним из простейших сеточных уравнений.

8.6. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХАРАКТЕРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ

Задачи теплового режима РЭА, приводящиеся к уравнениям параболического и эллиптического типов. Постановка краевых задач

В цикл проектирования интегральных микросхем (ИС) в качестве основного этапа входит разработка топологии. При разработке топологической структуры ИС неизбежно встает вопрос о температурном поле кристалла или подложки в случае гибридных интегральных схем.

В теплофизическом отношении ИС представляет анизотропное неоднородное тело, нестационарное температурное поле которого описы-

вается уравнением теплопроводности (параболического типа), а стационарное температурное поле — уравнениями Лапласа и Пуассона (уравнениями эллиптического типа).

Теплообмен теплопроводностью (кондукцией) происходит согласно закону Фурье:

$$P = -\lambda \operatorname{grad} \vartheta = -\lambda \nabla \vartheta = -\lambda n \frac{\partial \vartheta}{\partial n}, \quad (8.49)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; ϑ — температура

С учетом закона сохранения энергии из (8.49) можно получить уравнение теплопроводности для неоднородного изотропного тела в виде [33]:

$$\rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + P, \quad (8.50)$$

где $\vartheta = \vartheta(M, t)$ — температура в точке $M(x, y, z)$ тела в момент времени t ; c — удельная теплоемкость тела; ρ — плотность; $P(M, t)$ — удельная мощность источников энергии, $\lambda = \lambda(M, t)$ — коэффициент теплопроводности тела.

Если тело однородно, то c, ρ и λ — постоянные и уравнение (8.50) принимает вид

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{P}{\rho c}, \quad (8.51)$$

где $a^2 = \lambda / \rho c$.

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет в общем случае бесконечное множество решений. Для однозначного решения поставленной задачи необходимо, как это следует из физических соображений, знать еще распределение температуры в начальный момент времени (начальные условия) и тепловой режим на границе S тела (граничные или краевые условия).

Поскольку дифференциальное уравнение теплопроводности — уравнение первого порядка по переменной t , достаточно задания в началь-

ный момент времени некоторой функции $\vartheta_0 = f(x, y, z, 0)$.

Граничные условия могут быть заданы различными способами

1) Граничное условие 1-го рода состоит в задании распределения температуры в каждой точке поверхности S

$$\vartheta|_S = \varphi(M, t), \quad (8.52)$$

где $\varphi(M, t)$ — известная функция точки поверхности S и времени t .

2) Граничное условие второго рода состоит в задании плотности теплового потока как функции времени

$$P(M, t) = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n},$$

откуда

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial n} \Big|_S = \psi(M, t), \quad (8.53)$$

где $\psi(M, t)$ — известная функция, выражающаяся через заданный тепловой поток по формуле

$$\psi(M, t) = -\frac{P(M, t)}{\lambda}.$$

3) Граничное условие третьего рода характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. По закону Ньютона количество тепла, передаваемое с единицы поверхности тела, равно $P = \alpha(\vartheta_w - \vartheta_c)$, где α — коэффициент теплообмена конвекцией; ϑ_w — температура поверхности; ϑ_c — температура среды. По закону сохранения энергии это тепло должно быть равно теплу, которое передается через единицу площади поверхности за счет теплопроводности, т. е. $\alpha(\vartheta_w - \vartheta_c) = -\lambda(\partial\vartheta/\partial n)$, где n — внешняя нормаль к поверхности S или, положив $h = \alpha/\lambda$, получим

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial n} + h(\vartheta_w - \vartheta_c)|_S = 0. \quad (8.54)$$

4) Граничное условие четвертого рода соответствует теплообмену соприкасающихся твердых тел, когда температура соприкасающихся поверхностей одинакова, т. е. $\vartheta_1(t) = \vartheta_2(t)$.

Помимо равенства температур, имеет место равенство тепловых потоков

$$\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1}{\partial n} \Big|_{S_1} = \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2}{\partial n} \Big|_{S_2}. \quad (8.55)$$

Таким образом, краевая задача для температурного поля в твердом теле ставится так:

Найти функцию $\vartheta(x, y, z, t)$, удовлетворяющую в области $G \equiv (M \in D, t > 0)$ уравнению теплопроводности (8.51) и дополнительным: а) начальному $\vartheta(M, 0) = \varphi(M)$ и б) одному из краевых условий (8.52), (8.53), (8.50) или (8.55).

К такой краевой задаче для уравнения теплопроводности приходим, если рассматривать интегральные микросхемы в виде n -мерного неоднородного параллелепипеда ($n = 1, 2, 3$) или в виде многослойной пластины.

Аналитическое исследование теплового режима в этом случае заключается в интегрировании параболического (или, в стационарном случае, эллиптического) уравнения с привлечением необходимых начальных и граничных условий.

Для решения поставленной краевой задачи можно применить метод разделения переменных, операционный метод, метод конечных интегральных преобразований и численные методы.

Метод разделения переменных в приложении к тепловым расчетам микросхем

Ряд практических задач теплового режима элементов РЭА в теплофизическом отношении сводится к исследованию температурного поля в однородных прямоугольных пластинках (термоэлектрические устройства, микросхемы и т. д.).

В частном случае для двумерной тепловой модели такая задача формулируется следующим образом.

Найти решение уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right), \quad 0 < x < b, \quad 0 < y < d, \quad (8.56)$$

при граничных условиях

$$\begin{aligned}\Phi(0, y) &= \Phi(b, y) = 0; \\ \Phi(x, 0) &= \Phi(x, d) = 0\end{aligned}\quad (8.57)$$

и при начальном условии

$$\Phi(x, y, 0) = \varphi(x, y) \quad (8.58)$$

Согласно методу Фурье, ищем частные решения уравнения (8.56) в виде произведения

$$\Phi = v(M) T(t) = X(x) Y(y) T(t). \quad (8.59)$$

Подставляя предполагаемую форму решения (8.59) в (8.56) и разделяя переменные, приходим к следующим уравнениям для функций $v(M)$ и $T(t)$:

$$\Delta v + \lambda v = 0; \quad (8.60)$$

$$|v_s| = 0; \quad (8.61)$$

$$T' + a^2 \lambda T = 0 \quad (8.62)$$

Для функции $v(M)$ получаем задачу на собственные значения (задачу Штурма—Лиувилля): найти собственные значения λ_i и соответствующие им нетривиальные решения — собственные функции задачи (8.60), (8.61)

Для определения функций $v(M) = X(x)Y(y)$ и $T(t)$ получим следующие уравнения:

$$X''(x) + \eta^2 X(x) = 0,$$

$$Y''(y) + \mu^2 Y(y) = 0,$$

$$T'(t) + a^2 (\eta^2 + \mu^2) T(t) = 0,$$

где $\lambda^2 = \eta^2 + \mu^2$.

Общие решения этих уравнений имеют вид:

$$X(x) = C_1 \cos \eta x + C_2 \sin \eta x;$$

$$Y(y) = C_3 \cos \mu y + C_4 \sin \mu y;$$

$$T(t) = A \exp[-a^2 (\eta^2 + \mu^2) t].$$

Для выполнения граничных условий (8.57) следует положить

$$C_1 = 0, C_3 = 0; \eta = m\pi/b; \mu = n\pi/d \quad (m, n = 1, 2, 3, \dots).$$

Частными решениями уравнения (8.56), удовлетворяющими граничным условиям, будут

$$\begin{aligned}\Phi_{m,n} &= A_{m,n} \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d} \times \\ &\times \exp \left\{ -a^2 \pi^2 \left(\frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{d^2} \right) t \right\}.\end{aligned}$$

Общее решение исходной задачи может быть представлено в виде

$$\begin{aligned}\Phi(x, y, t) &= \\ &= \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{m,n} \exp \left[-a^2 \pi^2 \left(\frac{m^2}{b^2} + \frac{n^2}{d^2} \right) t \right] \sin \frac{m\pi x}{b} \sin \frac{n\pi y}{d}. \quad (8.63)\end{aligned}$$

Удовлетворяя начальному условию (8.58) получаем

$$\begin{aligned}\Phi(x, y) &= \sum_{m,n=1}^{\infty} A_{m,n} \sin \frac{m\pi x}{b} \times \\ &\times \sin \frac{n\pi y}{d}. \quad (8.64)\end{aligned}$$

Ряд (8.64) представляет собой разложение функции $\varphi(x, y)$ в двойной ряд Фурье и коэффициенты A_{mn} определяются по формуле

$$\begin{aligned}A_{m,n} &= \frac{4}{bd} \int_0^b \int_0^d \varphi(x, y) \sin \frac{m\pi x}{b} \times \\ &\times \sin \frac{n\pi y}{d} dx dy.\end{aligned}$$

Внося эти значения коэффициентов $A_{m,n}$ в ряд (8.63), получим решение исходной задачи (8.56) ... (8.58)

Операционные методы для расчета нестационарных тепловых режимов РЭА

Для многих задач теплового режима РЭА и функциональных узлов использование классических методов оказывается неэффективным, например, применение метода разделения переменных для задач с внутренними источниками тепла. В результате требований специальной (бортовой) РЭА при

решении задач нестационарных тепловых режимов широкое применение нашли операционные методы.

Процесс применения интегрального преобразования Лапласа к решению дифференциального уравнения теплопроводности одностепен для различных форм радиоэлементов и микросхем при граничных условиях, первого, второго и третьего родов, без введения каких-либо новых допущений или преобразований.

Рассмотрим методику применения операционного метода Лапласа для нестационарного режима.

Пусть тепловой режим РЭА (интегральной микросхемы, например) описывается уравнением теплопроводности вида

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + f(x, y, z, t) \quad (8.65)$$

в области $G \equiv \{D \text{ с границей } S, 0 < t < T\}$.

На границе области заданы условия

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial n} + \gamma_2 \vartheta \right)_S = \varphi(x, y, z, t). \quad (8.66)$$

При $t = 0$ задана функция

$$\vartheta(x, y, z, t) = \vartheta_0(x, y, z). \quad (8.67)$$

Следуя операционному методу Лапласа, умножим исходное уравнение на $\exp(-pt)$ и проинтегрируем по t от 0 до ∞ . Предполагается также, что интегралы существуют и операция

$$\int_0^\infty \exp(-pt) \nabla^2 \vartheta dt =$$

$$= \nabla^2 \int_0^\infty \exp(-pt) \vartheta dt$$

правомерна, где

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

— оператор Лапласа.

Тогда вместо задачи (8.65) ... (8.67) будем иметь

$$p\bar{\vartheta} - \vartheta_0 = a^2 \nabla^2 \bar{\vartheta} + \bar{f}, \quad (8.68)$$

$$\left(\gamma_1 \frac{\partial \bar{\vartheta}}{\partial n} + \gamma_2 \bar{\vartheta} \right)_S = \bar{\varphi}, \quad (8.69)$$

где $\bar{\vartheta}$, \bar{f} и $\bar{\varphi}$ — изображения функций ϑ , t и φ соответственно, вычисленные по формуле (8.37).

Таким образом, получено дифференциальное уравнение относительно пространственных координат, решить которое значительно легче, чем (8.65).

После определения $\bar{\vartheta}$ из уравнений (8.68), (8.69) задача сведется к обратному преобразованию. Для простых случаев обратного преобразования используются весьма подробные таблицы изображений [17]. В более общем случае решение получается из теоремы обращения

$$\vartheta(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \exp(pt) \times \times \bar{\vartheta}(x, y, z, p) dp, \quad (8.70)$$

где $c > \sigma$ (σ — некоторое число, такое, что $\operatorname{Re} p > \sigma$). Интегрирование ведется по прямой $\operatorname{Re} p = \sigma$ в пределах от $c - i\infty$ до $c + i\infty$, причем корни подынтегрального выражения (p_i, σ_i) лежат левее оси сходимости $\operatorname{Re} p = \sigma$. Вычисление интеграла (8.70) обычно производится методами контурных интегралов или с применением теоремы вычетов [30].

Порядок операций при использовании операционного метода следующий:

1) исходное уравнение (для оригинала) заменяется преобразованным уравнением, записанным для изображения;

2) граничные условия для оригинала заменяются граничными условиями для изображения. Начальные условия войдут в основное уравнение для области изображения;

3) находится решение $\bar{\vartheta}$ для преобразованной задачи, при этом может оказаться целесообразным повторное применение интегрального преобразования;

4) совершается обратное преобразование, т. е. определяется исконая функция $\vartheta(x, y, z, t)$.

Интегральное преобразование Лапласа имеет свои недостатки. В частности, известные трудности возникают при решении задач, когда начальные условия заданы в виде функции пространственных координат или при решении некоторых многомерных задач. В этой связи был предложен ряд методов интегральных преобразований по пространственным координатам в соответствии с геометрической формой тела.

Метод конечных интегральных преобразований при расчетах температуры элементов ИС

При расчетах температуры элементов гибридных ИС требуется определить тепловое сопротивление R между источниками тепла (пленочные резисторы, микротранзисторы и т. д.) и корпусом или же подложкой ИС. В частном случае, подложке ИС ставится в соответствие теплофизическая модель в виде параллелепипеда, на верхней грани которого расположен источник энергии размерами l_1 и l_2 , удельный тепловой поток через поверхность которого равен p . Теплообмен на верхней грани подчиняется закону Ньютона, суммарный коэффициент теплоотдачи равен α . Так как расчетные формулы для тепловых сопротивлений включают только разности температур, то можно принять температуру поверхностей остальных граней равной нулю.

Для стационарного температурного поля в параллелепипеде без внутренних источников тепла уравнение теплопроводности (8.51) принимает вид

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0,$$

$$0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < c. \quad (8.71)$$

Запишем граничные условия:

$$\begin{aligned} \vartheta(0, y, z) &= \vartheta(a, y, z) = \vartheta(x, 0, z) = \\ &= \vartheta(x, b, z) = \vartheta(x, y, 0) = 0; \end{aligned} \quad (8.72)$$

$$\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \Big|_{z=c} + \alpha \vartheta =$$

$$= \begin{cases} p \text{ при } \varepsilon - 0,5l_1 \leq x \leq \varepsilon + 0,5l_1, \\ \quad \eta - 0,5l_2 \leq y \leq \eta + 0,5l_2, \\ 0 \text{ во всей остальной области,} \end{cases} \quad (8.73)$$

где ε, η — координаты центра источника на грани $z = c$; λ — коэффициент теплопроводности.

Применим метод конечных интегральных преобразований, позволяющий получить решение в виде ряда по собственным функциям задачи Штурма—Лиувилля [19]. Согласно общей теории метода представим искомую функцию в виде разложения в ряд по собственным функциям $\varphi_k(x)$

$$\vartheta(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \vartheta_k(y, z) \varphi_k(x). \quad (8.74)$$

Ядро преобразования, позволяющее исключить дифференциальные операции по x , будет

$$\varphi(x, k) = \frac{1}{C_k} \varphi_k(x),$$

где вспомогательная функция $\varphi_k(x)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi_k(x)}{\partial x^2} + \mu_k^2 \varphi_k(x) = 0, \quad (8.75)$$

$$\varphi_k(0) = \varphi_k(a) = 0.$$

Отсюда

$$\varphi_k(x) = \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad \mu_k = \frac{k\pi}{a},$$

$$k = 1, 2, \dots$$

Поскольку дифференциальное уравнение (8.75) самосопряженное, нормирующий делитель C_k равен

$$C_k = \int_0^a [\varphi_k(x)]^2 dx = \frac{a}{2}.$$

Осуществив интегральное преобразование в интервале $[0, a]$ с ядром

$$\varphi(x, k) = \frac{2}{a} \sin \frac{k\pi x}{a},$$

приведем задачу (8.71) ... (8.73) к виду

$$\frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_k}{\partial z^2} - \mu_k^2 \vartheta_k = 0,$$

$$\left[\lambda \frac{\partial \vartheta_k}{\partial z} + \alpha \vartheta_k \right]_{z=c} = \rho_k(y),$$

$$\vartheta_k(0, z) = \vartheta_k(b, z) = \vartheta_k(y, 0) = 0,$$

где

$$\vartheta_k(y, z) = \int_0^a \vartheta(x, y, z) \varphi(x, k) dx,$$

$$\rho_k(y) = \int_0^a \rho(x, y) \varphi(x, k) dx.$$

При отыскании преобразования, исключающего дифференциальные операции по y , повторяем вышеописанный прием, причем ядро прямого преобразования будет иметь вид

$$\begin{aligned} \psi(y, m) &= \frac{2}{b} \sin \frac{m\pi y}{b}, \quad v_m = \\ &= \frac{m\pi}{b}, \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Представив функцию $\vartheta_k(y, z)$ в виде разложения в ряд по собственным функциям $\psi_m(y) = \sin(m\pi y/b)$

$$\vartheta_k(y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \vartheta_{km}(z) \psi_m(y), \quad (8.76)$$

приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению 2-го порядка

$$\frac{d^2 \vartheta_{km}}{dz^2} - \omega_{km}^2 \vartheta_{km} = 0; \quad (8.77)$$

$$\vartheta_{km}(0) = 0; \quad (8.78)$$

$$\begin{aligned} \lambda \frac{d\vartheta_{km}}{dz} + \alpha \vartheta_{kmz} &= \rho_{km}; \quad \omega_{km}^2 = \\ &= \mu_k^2 + v_m^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{km} &= \int_0^a \int_0^b \rho(x, y) \varphi(k, x) \psi(y, m) \times \\ &\times dx dy. \end{aligned} \quad (8.79)$$

Решение полученной системы уравнений (8.77) ... (8.79) имеет вид

$$\begin{aligned} \vartheta_{km}(z) &= \frac{16\rho}{\lambda k m \pi^2} \times \\ &\times \frac{\sin(\mu_k c) \sin(v_m \eta) \sin \times}{\left[\omega_{km} \operatorname{ch}(\omega_{km} c) + \right.} \dots \\ &\left. \left(\mu_k \frac{l_1}{2} \right) \sin \left(v_m \frac{l_2}{2} \right) \right] \times} \\ &\dots \frac{\alpha}{\lambda} \operatorname{sh}(\omega_{km} c) \times \\ &\times \operatorname{sh} \omega_{km} z. \end{aligned} \quad (8.80)$$

Итак, соотношения (8.74), (8.76) и (8.80) позволяют получить выражение для температурного поля в подложке микросхемы

$$\begin{aligned} \vartheta(x, y, z) &= \frac{16ap}{\lambda \pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \times \\ &\times \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{k\pi l_1}{2a} \times \\ &\times \sin \frac{m\pi l_2}{2b} \sin \frac{k\pi c}{a} \sin \frac{m\pi \eta}{b} \times \\ &\times \operatorname{sh} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \frac{\pi z}{a} \right] \times \\ &\times km \left\{ \pi \sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \times \right. \\ &\times \operatorname{ch} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \pi c/a \right] + \\ &\left. + \operatorname{Bi} \operatorname{sh} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (a/b)^2} \pi c/a \right] \right\} \end{aligned}$$

где $\operatorname{Bi} = \alpha a / \lambda$ — критерий Био. Тепловое сопротивление между источником энергии и наружными поверхностями подложки микросхемы, по определению, равно

$$R = \frac{\bar{\vartheta}}{P_0}.$$

где

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{l_1 l_2} \int_{-\varepsilon - 0,5l_1}^{\varepsilon + 0,5l_1} \int_{-\eta - 0,5l_2}^{\eta + 0,5l_2} \Phi(x, y, z) \times \\ \times dx dy -$$

среднеповерхностная температура источника; $P_0 = \rho l_1 l_2$ — тепловой поток источника.

8.7. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ВИБРАЦИЙ И ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ РЭА

Общие положения

При проектировании конструкций блоков, панелей, рам и стоек РЭА возникает необходимость выполнения динамических расчетов для определения прочности конструкции, вычисления резонансных частот и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации РЭА. Подобные задачи приводят к дифференциальным уравнениям в частных производных теории колебаний и прикладной теории упругости [20].

Для составления расчетных уравнений необходимо, в первую очередь, выбрать динамическую модель РЭА (или составных частей), т. е. представить объект (РЭА) в виде некоторой совокупности инерционных, упругих и демпфирующих элементов. Выбирая физическую модель, необходимо учитывать также и ширину спектра динамического воздействия. Чем выше частоты, имеющиеся в воздействии, тем больше число степеней свободы должна иметь модель РЭА для того, чтобы можно было исследовать ее резонансные колебания. Поскольку РЭА имеет сложную нерегулярную структуру и в ее элементах возникают высокочастотные воздействия (до нескольких килогерц), адекватная модель может оказаться чрезвычайно сложной. Следующим этапом является разработка математического описания динамической модели. Математическая модель должна содержать замкнутую систему основных уравнений, а

также способы задания начальных и граничных условий.

Конструкция РЭА является сложной упругой механической системой. Для полного определения деформаций, возникающих в такой системе при колебаниях, необходимо знать перемещение всех ее точек, иначе говоря, требуется определить бесконечное число координат как функций времени и положения, определяющих эти перемещения в любой момент времени. Таким образом, упругие системы являются системами с бесконечным числом степеней свободы или системами с распределенными параметрами. Исследование и расчет таких систем проводится методами математической физики или вариационными методами.

Во многих случаях расчет колебаний упругих систем как систем с бесконечным числом степеней свободы становится возможным при введении в расчет решительных упрощений. Одним из таких приемов является замена сложной системы другой, более простой, с другим распределением масс и жесткостей, а именно: эквивалентной (приведенной) системой с одной или с конечным числом степеней свободы. Такие системы являются системами с сосредоточенными параметрами и могут быть исследованы на основании уравнений Лагранжа.

Задачи динамических воздействий, приводящиеся к уравнениям гиперболического типа и уравнениям теории упругости. Постановка граничных задач

В конструкциях РЭА (платы, стойки и т. д.) часто применяются стержневые каркасы и отдельные стержни и пластины в качестве деталей, несущих механические нагрузки. Таким образом, в качестве физической модели можно рассматривать колебания стержней и пластин.

Уравнение продольных колебаний стержней. Для однородного стержня уравнение одномерных малых колебаний имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + f(x, t), \\ a^2 = E/\rho, \quad (8.81)$$

где ξ — смещение (амплитуда) точки в момент t ; E — модуль упругости; ρ — плотность материала стержня; $f(x, t) = F(x, t)/\rho$ — плотность силы, отнесенная к единице массы; $F(x, t)$ — внешняя сила.

Так как процесс колебаний стержня зависит от начальной формы и распределения скоростей, то следует задать начальные условия:

$$\xi(x, 0) = \varphi(x); \quad (8.82)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}(x, 0) = \psi(x). \quad (8.83)$$

Если задан закон движения концов стержня ($x = 0$ и $x = l$)

$$\xi(0, t) = \mu_1(t), \quad \xi(l, t) = \mu_2(t),$$

то имеем граничные условия первого рода.

Если задан закон изменения силы, приложенной к концу стержня, то имеем граничные условия второго рода

$$E \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x=0} = F_1(t), \quad E \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x=l} = F_2(t) \quad (8.84)$$

или

$$\xi_x(0, t) = v_1(t), \quad \xi_x(l, t) = v_2(t),$$

($v = F/E$)

В случае упругого закрепления, скажем, для $x = l$

$$E \frac{\partial \xi}{\partial x}(l, t) = -k\xi(l, t),$$

или

$$\frac{\partial \xi}{\partial x}(l, t) = -h\xi(l, t), \quad h = k/E, \quad (8.85)$$

где k — коэффициент жесткости закрепления

Если точка упругого закрепления движется по закону $x = \beta(t)$, то граничный режим запишется для $x = l$ в виде:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x}(l, t) + h[\xi(l, t) - \beta(t)] = 0.$$

На другом конце ($x = 0$) имеем

$$\frac{\partial \xi}{\partial x}(0, t) - h[\xi(0, t) - \beta(t)] = 0. \quad (8.86)$$

Это граничные условия третьего рода.

Для двух- и трехмерного случаев рассмотренные типы граничных условий имеют следующий вид:

$$\xi|_S = \mu(M, t) \text{ (первый тип),}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial n} \Big|_S = v(M, t) \text{ (второй тип),}$$

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial n} + h\xi \right) \Big|_S = \beta(M, t) \text{ (третий тип).}$$

Если функции, задаваемые в правой части $\mu(t)$, $v(t)$ или $\beta(M, t)$, равны нулю, то граничные условия называются однородными.

Таким образом, можно сформулировать краевые задачи для уравнения колебаний (8.81).

Первая краевая задача: найти функцию $\xi(x, t)$, определенную в области $0 < x < l$, $t > 0$, удовлетворяющую уравнению гиперболического типа

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + f(x, t)$$

$$\text{для } 0 < x < l, \quad t > 0,$$

$$\text{граничным } \xi(0, t) = \mu_1(t), \quad \xi(l, t) = \mu_2(t) \text{ и начальным условиям}$$

$$\xi(x, 0) = \varphi(x), \quad \frac{\partial \xi}{\partial t}(x, 0) = \psi(x).$$

Аналогично ставятся вторая и третья краевые задачи для уравнения (8.81), с учетом граничных условий (8.84) ... (8.86).

Для пространственных задач первая краевая задача ставится совершенно сходным образом:

требуется найти функцию $\xi(M, t) = \xi(x, y, z, t)$, определенную при $t > 0$ внутри заданной области D с границей S , удовлетворяющую при $t > 0$ внутри D уравнению

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \Delta \xi + f(M, t),$$

$$M(x, y, z) \in D, \quad t > 0,$$

граничному условию на S

$$\xi|_S = \mu(P, t), \quad P(x, y, z) \in S, \quad t > 0$$

и начальным условиям

$$\xi(M, 0) = \varphi(M),$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}(M, 0) = \psi(M), \quad M(x, y, z) \in D.$$

Решение проводится методом разделения переменных.

Уравнение поперечных колебаний стержней. В предположении, что отклонения точек оси стержня при поперечных колебаниях происходят в одной плоскости и являются малыми отклонениями (в смысле сохранения пропорциональности восстанавливающих сил), уравнение поперечных колебаний имеет вид

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} = 0, \quad c^2 = \frac{EJ}{\rho S}, \quad (8.87)$$

где J — момент инерции поперечного сечения стержня относительно центральной оси; E — модуль упругости (модуль Юнга), S — площадь поперечного сечения.

В простейших случаях, когда конец стержня свободен или жестко закреплен, или шарнирно оперт, граничные условия выражаются следующими соотношениями:

а) конец стержня свободен, на таком конце равны нулю изгибающий момент и поперечная сила, следовательно

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} = 0; \quad (8.88)$$

б) конец стержня жестко закреплен, на таком конце равны нулю прогиб и угол поворота, т. е.

$$\xi = 0, \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0; \quad (8.89)$$

в) конец стержня свободно оперт (или закреплен шарниром), в этом случае равны нулю прогиб и изгибающий момент, т. е.

$$\xi = 0, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0. \quad (8.90)$$

Таким образом, задача сводится к решению уравнения (8.87) с граничными условиями (8.88) ... (8.90) и с начальными условиями (8.82), (8.83) и решается методом разделения переменных.

Уравнение поперечных колебаний пластин. Если в качестве динамической модели элементов конструкции РЭА принята свободно изгибающаяся однородная пластина (мембрана), то справедливо для математической модели уравнение гиперболического типа:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) + f(x, y, t),$$

$$\text{где } c^2 = \frac{T}{\rho}; \quad f(x, y, t) = \frac{F(x, y, t)}{\rho};$$

T — натяжение пластины, $F(x, y, t)$ — внешняя сила, $\xi(x, y, t)$ — перемещение (амплитуда) точек пластины.

Если динамическая модель представляет собой упругую пластину конечной толщины δ , то в качестве расчетного уравнения берется дифференциальное уравнение 4-го порядка изгибных колебаний в перемещениях

$$D \left(\frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \xi}{\partial y^4} \right) - \frac{\gamma \delta}{g} \omega_0^2 \xi = 0, \quad (8.91)$$

где $D = E\delta^3/12(1 - \sigma^2)$ — цилиндрическая жесткость пластины; σ — коэффициент Пуассона; γ — удельный вес пластины; ω_0 — собственные частоты пластины, подлежащие определению.

Граничные условия для прямоугольной пластины на краях, параллельных оси Oy , имеют вид:

1) если края свободно оперты, то

$$\xi = 0, \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = 0;$$

2) если края жестко закреплены, то

$$\xi = 0, \quad \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0;$$

3) если края свободны, то

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = 0; \\ \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} - (2 - \sigma) \frac{\partial^3 \xi}{\partial x \partial y^2} = 0.$$

Условия для краев, параллельных оси Ox , получаются из приведенных выше заменой x на y и наоборот.

Если на пластину действует внешняя гармоническая нагрузка интенсивности

$$F(x, y, t) = f(x, y) \sin \omega t,$$

то уравнение форм вынужденных колебаний пластины запишется следующим образом:

$$D\Delta^2 \xi - \frac{\gamma \delta}{g} \omega^2 \xi - f(x, y) = 0, \quad (8.92)$$

где

$$\Delta^2 \xi = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}.$$

Решение задач (8.91) и (8.92) проводится методом разделения переменных.

Метод уравнения Лагранжа

Теоретической основой составления расчетных уравнений колебаний конструкции РЭА могут служить уравнения Лагранжа в обобщенных координатах. Существенным преимуществом этих уравнений для практических расчетов является тот факт, что они не содержат реакций связи и входящие в них величины, определяющие вибрации РЭА (обобщенные координаты, скорости и ускорения), непосредственно связаны с возмущающими (обобщенными) силами.

Уравнения Лагранжа для колебательной системы с n степенями свободы имеют вид [21]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} - F_k = 0;$$

$$\dot{q}_k = \frac{dq_k}{dt} \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (8.93)$$

Уравнения (8.93) носят название уравнений Лагранжа второго рода или уравнений Лагранжа в независимых координатах.

Если обобщенные силы F_k являются потенциальными, т. е. существует потенциал (потенциальная энергия) $\Pi = \Pi(t, q_k)$ и $F_k =$

$= -\partial \Pi / \partial q_k$, то уравнения Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} =$$

$$= -\frac{\partial \Pi}{\partial q_k} \quad (k=1, 2, \dots, n),$$

записываются в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0,$$

где $L = T - \Pi$.

Функция L называется функцией Лагранжа или кинетическим потенциалом.

Малые одномерные колебания конструкции РЭА. Кинетическая и потенциальная энергии системы с одной степенью свободы вычисляются по формулам

$$T = m \dot{\xi}^2 / 2; \quad \Pi = k \xi^2 / 2,$$

$$(\dot{\xi} = d\xi / dt),$$

где m — масса тела; $\xi = q - q_0$ — отклонение координаты q от ее равновесного значения q_0 ; k — коэффициент жесткости.

Функция Лагранжа для системы, совершающей одномерные малые колебания, имеет вид

$$L = m \dot{\xi}^2 / 2 - k \xi^2 / 2.$$

Соответствующее этой функции уравнение Лагранжа

$$m \ddot{\xi} + k \xi = 0, \quad \left(\ddot{\xi} = \frac{d^2 \xi}{dt^2} \right)$$

или

$$\ddot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0,$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — круговая (циклическая) частота.

Для вынужденных колебаний линейной системы имеем

$$\ddot{\xi} + \omega_0^2 \xi = \frac{1}{m} F(t). \quad (8.94)$$

Решение неоднородного уравнения (8.94) для случая $F(t) = f \cos(\gamma t + \beta)$ ищется в виде

$$\xi = a \cos(\omega_0 t + \alpha) +$$

$$+ \frac{f}{m(\omega_0^2 - \gamma^2)} \cos(\gamma t + \beta). \quad (8.95)$$

где a и α — постоянные, определяемые из начальных условий; γ — частота вынуждающей силы.

Решение (8.95) неприменимо при $\gamma \rightarrow \omega_0$, т. е. в случае так называемого резонанса. В этом случае решение уравнения (8.94) имеет вид

$$\xi = a \cos(\omega_0 t + \alpha) + \frac{f}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t + \beta)$$

и амплитуда колебаний растет линейно со временем (колебания перестают быть малыми и линейная теория уже не применима).

Если на систему действует сила трения $R = -\alpha \dot{\xi}$ (α — коэффициент трения), то уравнение колебаний, составленное по схеме Лагранжа, имеет вид $m\ddot{\xi} + k\xi = -\alpha\dot{\xi}$, или, если ввести обозначения $k/m = \omega_0^2$, $\alpha/m = 2\lambda$,

$$\ddot{\xi} + 2\lambda\dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0, \quad (8.96)$$

где 2λ — коэффициент затухания.

Решение уравнения (8.96) будет иметь различную форму в зависимости от соотношений между ω_0 и λ .

Вынужденные колебания при наличии трения под действием возмущающей силы $F(t) = f \sin \gamma t$ описываются уравнением

$$\ddot{\xi} + 2\lambda\dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = \frac{f}{m} \sin \gamma t. \quad (8.97)$$

или, в целях удобства определения решения, уравнением

$$\ddot{\xi} + 2\lambda\dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = \frac{f}{m} e^{i\gamma t}.$$

Частное решение уравнения (8.97) ищется в виде $\xi = Be^{i\gamma t}$, тогда

$$B = \frac{f}{m(\omega_0^2 - \gamma^2 + 2i\gamma\lambda)}.$$

Представив B в виде $B = be^{i\delta}$, имеем

$$b = \frac{f}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\lambda^2 \gamma^2}}, \quad \text{tg } \delta = \frac{2\lambda\gamma}{\gamma^2 - \omega_0^2}. \quad (8.98)$$

Выражение (8.98) для амплитуды b вынужденного колебания хотя и возрастает при приближении γ к ω_0 , но не обращается в бесконечность, как это было при резонансе в отсутствие трения.

Малые колебания системы с несколькими степенями свободы. Кинетическая и потенциальная энергии системы с n степенями свободы могут быть представлены в виде квадратичных форм с постоянными коэффициентами через обобщенные (независимые) координаты q_i и скорости \dot{q}_i ($i = 1, 2, \dots, n$):

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n m_{ik} \dot{q}_i \dot{q}_k; \\ \Pi = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n k_{ik} q_i q_k, \quad (8.99)$$

где $m_{ik} = m_{ki}$, $k_{ik} = k_{ki}$, ($i, k = 1, \dots, n$).

Уравнения Лагранжа, исходя из выражений (8.99), принимают вид

$$\sum_{k=1}^n (m_{ik} \ddot{q}_k + k_{ik} q_k) = 0. \quad (8.100)$$

Частное решение этой системы линейных дифференциальных уравнений ищут в виде

$$q_i = \xi_i \sin(\omega t + \alpha), \quad i = 1, \dots, n. \quad (8.101)$$

Подставляя выражение (8.101) для q_i в дифференциальные уравнения (8.100), получим после сокращения на $\sin(\omega t + \alpha)$ следующую систему алгебраических уравнений, линейных относительно амплитуд ξ_i :

$$\sum_{k=1}^n (k_{ik} - \omega^2 m_{ik}) \xi_k = 0 \quad (8.102)$$

($i = 1, \dots, n$).

Так как все амплитуды ξ_i искомого колебания не должны обращаться в нуль одновременно, то определитель системы однородных

уравнений (8.102) должен быть равен нулю:

$$\begin{vmatrix} k_{11} - \omega^2 m_{11} & k_{12} - \omega^2 m_{12} & \dots \\ k_{21} - \omega^2 m_{21} & k_{22} - \omega^2 m_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} - \omega^2 m_{n1} & k_{n2} - \omega^2 m_{n2} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots k_{1n} - \omega^2 m_{1n} \\ \dots k_{2n} - \omega^2 m_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots k_{nn} - \omega^2 m_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (8.103)$$

После раскрытия определителя в левой части получается многочлен n -й степени относительно ω^2 . Уравнение же (8.103) называется вековым уравнением или уравнением частот. Каждому корню ω^2 уравнения (8.103) соответствует частное решение (8.101) системы дифференциальных уравнений (8.100). Корни векового уравнения всегда вещественны и положительны.

8.8. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РЭА И ЭКРАНИРОВАНИЕ

Уравнения электромагнитного поля и основные электродинамические задачи РЭА

Электромагнитное поле, возникающее в РЭА в процессе ее функционирования, характеризуется векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} напряженностей электрического и магнитного полей и векторами \mathbf{D} и \mathbf{B} электрической и магнитной индукций. К дифференциальным уравнениям электродинамики, называемым уравнениями Максвелла, принадлежат следующие соотношения:

1) уравнение, определяющее зависимость вихря магнитного поля \mathbf{H} от плотности токов проводимости \mathbf{j} и токов смещения $\partial \mathbf{D} / \partial t$:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}^{(e)};$$

2) уравнение, выражающее закон изменения индукции электрического поля при изменении магнитного поля:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t};$$

3) уравнение, указывающее на отсутствие магнитных зарядов:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0;$$

4) уравнение, связывающее электрическую индукцию \mathbf{D} с плотностью распределения зарядов ρ :

$$\text{div } \mathbf{D} = 4\pi\rho,$$

где \mathbf{j} — объемная плотность токов проводимости; \mathbf{j} — плотность токов от сторонних э. д. с.; ρ — объемная плотность зарядов; c — скорость света в вакууме. Для практических расчетов $\mathbf{j}^{(e)} = 0$.

К этим уравнениям присоединяются так называемые материальные уравнения поля

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная; μ — магнитная проницаемость; σ — проводимость среды. Для однородной и изотропной среды ϵ , μ , $\sigma = \text{const}$. Если среда неоднородна, то к уравнениям Максвелла следует присоединить условия сопряжения. На границе раздела двух разных сред (1) и (2) должны выполняться следующие условия:

$E_s^{(1)} = E_s^{(2)}$ — непрерывность тангенциальных составляющих вектора \mathbf{E} ;

$H_s^{(1)} = H_s^{(2)}$ — непрерывность тангенциальных составляющих вектора \mathbf{H} ;

$B_n^{(1)} = B_n^{(2)}$ — непрерывность нормальных составляющих вектора \mathbf{B} ;

$$D_n^{(1)} - D_n^{(2)} = 4\pi\rho_s \text{ или}$$

$$\epsilon_1 E_n^{(1)} - \epsilon_2 E_n^{(2)} = 4\pi\rho_s,$$

где \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 — нормали к поверхности раздела двух сред;

ρ_s — поверхностная плотность зарядов.

В радиотехнике большую роль играют монохроматические (гармонические) колебания. Для этих колебаний зависимость от времени задается множителем $e^{i\omega t}$, а уравнения Максвелла записываются в виде:

$$\text{rot } \dot{\mathbf{H}} = \frac{i\omega}{c} \mathbf{D} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (8.104)$$

$$\text{rot } \dot{\mathbf{E}} = -\frac{i\omega}{c} \mathbf{B}, \quad (8.105)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 4\pi\rho, \quad (8.106)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0. \quad (8.107)$$

Здесь точки над векторами означают, что берется комплексная амплитуда соответствующего вектора.

Задачи анализа электромагнитных полей в РЭА можно разделить на внутренние и внешние. Внутренняя задача формулируется так: требуется найти решение уравнений Максвелла в области V , ограниченной извне поверхностью S , удовлетворяющее на S граничным условиям. При решении внутренних задач различают отыскание собственных полей (решение однородных уравнений) и отыскание полей заданных источников (решение неоднородных уравнений).

Среди внешних задач наиболее простой является задача излучения заданных источников в свободном пространстве. Она формулируется как задача решения неоднородных уравнений Максвелла при наложении условия излучения на бесконечности.

Основные принципы экранирования

Электромагнитное экранирование является наиболее радикальным средством защиты элементов, блоков и цепей РЭА от помех быстропеременных электромагнитных полей. Исследование и расчет экранов базируются на применении уравнений Максвелла.

При изучении электромагнитных колебаний, длина волн которых существенно больше габаритных размеров экранов, можно пренебречь вторичными токами смещения в диэлектрике и все процессы исследовать в квазистационарном режиме. Применительно к задачам экранирования указанное допущение справедливо для частот порядка $10^7 \dots 10^9$ Гц. В экране будут проходить только токи проводимости с плотностью $\sigma \vec{E}$. При условии гармонических колебаний уравнения Максвелла (8.104) ... (8.107) в квазистационарном режиме принимают вид

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -i\omega \mu \vec{H}. \quad (8.108)$$

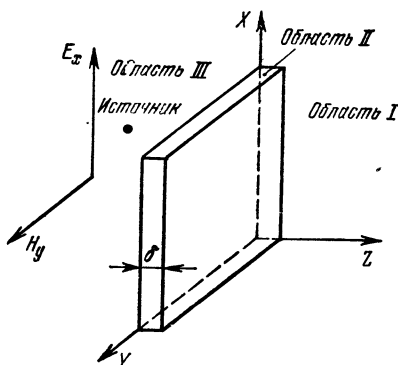


Рис. 8.6. К расчету плоского экрана

Во всех задачах экранирования рассматриваемое пространство делится на три области, в каждой из которых интегрируются уравнения Максвелла. Это следующие области:

1) бесконечное пространство вне экрана, 2) экранированная внутренняя область, 3) объем стенок экрана

В первых двух областях, заполненных воздухом, проводимость $\sigma = 0$ и по уравнению (8.108) $\operatorname{rot} \vec{H} = 0$.

Действие экрана учитывается через параметр \mathcal{E} — коэффициент экранирования, представляющий собой отношение напряженности электромагнитного поля в какой-либо точке пространства при наличии экрана ($E^{\mathcal{E}}$ и $H^{\mathcal{E}}$) к напряженности поля в той же точке без экрана (E и H)

$$\mathcal{E} = \frac{E^{\mathcal{E}}}{E} = \frac{H^{\mathcal{E}}}{H}, \quad 0 \leq \mathcal{E} \leq 1.$$

Плоский экран (рис. 8.6) представляет собой две параллельные пластины достаточно большого размера. Основные уравнения электродинамики в прямоугольной системе координат имеют вид

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega \mu H_x;$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x;$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\omega\mu H_y;$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \sigma E_y;$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega H_z;$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \sigma E_z.$$

Эти уравнения характеризуют электромагнитные процессы в металле экрана. Для воздушной области $\sigma = 0$ и правая часть второй группы уравнений будет равна нулю.

Применительно к плоскому экрану уравнения электромагнитного поля упрощаются:

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu H_y, \quad (8.109)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_x. \quad (8.110)$$

Из системы (8.109), (8.110) получаем дифференциальное уравнение относительно E_x для экрана

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = k^2 E_x, \quad (8.111)$$

где $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов. Для воздушного пространства вне экрана $\sigma = 0$ и поэтому

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = 0. \quad (8.112)$$

Решая уравнения (8.111), (8.112) и используя условия непрерывности тангенциальных составляющих

электрического и магнитного полей на границе раздела сред диэлектрик—экран и экран—диэлектрик, получим выражение для коэффициента экранирования плоского экрана

$$\mathcal{E} = [\operatorname{ch} k\delta]^{-1} \times \left(1 + 0,5 \left(N + \frac{1}{N}\right) \operatorname{th} k\delta\right)^{-1},$$

где δ — толщина экрана; $N = Z_d/Z_m$; $Z_d = -i\omega\mu\delta$ — волновое сопротивление диэлектрика (воздуха); $Z_m = \sqrt{i\omega\mu/\delta}$ — волновое сопротивление металла.

Цилиндрический экран (рис. 8.7). Основные уравнения электромагнитного поля в цилиндрической системе координат записываются следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = -i\omega\mu H_r,$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -i\omega\mu H_\varphi,$$

$$\frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + \frac{E_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} =$$

$$= -i\omega\mu H_r.$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \sigma E_r, \quad (8.113)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} = \sigma E_\varphi,$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = \sigma E_r.$$

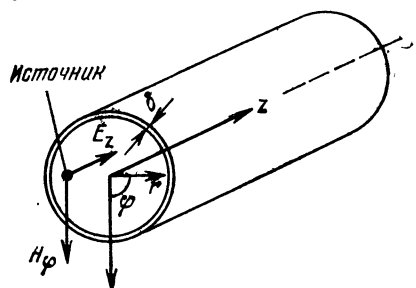
С учетом симметрии для цилиндрического экрана уравнения (8.113) принимают вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} = -i\omega\mu H_r,$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial r} = i\omega\mu H_\varphi,$$

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} = \sigma E_z.$$

Рис. 8.7. К расчету цилиндрического экрана



Отсюда имеем уравнение для определения E_z

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} =$$

$$= \begin{cases} k^2 E_z & \text{для металла} \\ 0 & \text{для воздуха.} \end{cases} \quad (8.114)$$

Из решения уравнения (8.114) можно получить выражение для коэффициента экранирования цилиндрического экрана

$$\mathcal{E} = (\operatorname{ch} k\delta)^{-1} (1 + 0,5 (N + 1/N) \operatorname{th} k\delta)^{-1},$$

где δ — толщина экрана; $Z_d = i\omega\mu r/n$; $Z_m = \sqrt{i\omega\mu/\sigma}$; $n = 1, 2, \dots$; r — радиус экрана; $N = Z_d/Z_m$.

Аналогично можно получить характеристики для сферического экрана [16].

Методы расчета потенциальных полей РЭА

При расчетах электростатических полей РЭА решение уравнений Максвелла сводится к отысканию одной скалярной функции — потенциала U , связанной с напряженностью E поля соотношением: $E = -\operatorname{grad} U$.

Используя уравнение Максвелла $\operatorname{div} E = -4\pi\rho$, получаем

$$\Delta U = -4\pi\rho. \quad (8.115)$$

Таким образом, потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона (8.115) в тех точках пространства, где находятся источники поля, и уравнению Лапласа

$$\Delta U = 0$$

— в тех точках, где источники отсутствуют.

Задача расчета поля сводится к определению потенциальной функции при заданных граничных условиях, т. е. заданных значениях потенциала, градиента потенциала или их комбинации на границах S области V , в которой определяется поле.

В зависимости от вида граничного условия различают три основных вида граничной задачи для уравнений Лапласа и Пуассона:

1) $U(x) = \varphi(x)$, когда $x \in S$ — первая граничная задача или задача Дирихле; 2) $\frac{\partial U}{\partial n} = \psi(x)$, когда $x \in S$ — вторая граничная задача или задача Неймана; 3) $\frac{\partial U}{\partial n} + \beta U = \varphi(x)$, когда $x \in S$ — третья или смешанная граничная задача.

Получение решения сформулированных задач в большой степени зависит от выбора системы координат и метода определения потенциалов.

Основные методы расчета стационарных полей в РЭА следующие:

- 1) метод разделения переменных [33];
- 2) метод Г. А. Гринберга, применяемый для случая ненулевых граничных условий [34];
- 3) метод комплексного потенциала применяется для плоскопараллельных полей. При этом с помощью конформных отображений сложные формы граничных условий преобразуются в более простые, для которых решение может быть найдено относительно легко [30];
- 4) метод зеркальных изображений применяется для плоских и цилиндрических поверхностей области поля, сущность метода заключается в замене влияния границы на исследуемое поле дополнительной системой зарядов (или токов);
- 5) метод функции Грина [19];
- 6) метод интегральных преобразований [19].

В силу известной аналогии между электрическими и магнитными полями можно использовать методы, определяющие электрическое поле, для расчета магнитных полей. При этом, очевидно, необходимо геометрическое подобие конфигураций обеих систем.

8.9. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Общие положения

Универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений для задач конструирования РЭА является метод ко-

нечных разностей (или метод сеток).

Применение метода конечных разностей позволяет отказаться от упрощенной физической модели конструкции РЭА и учесть при математическом описании нелинейности коэффициентов дифференциального уравнения и граничных условий.

При использовании метода конечных разностей необходимо иметь информацию о погрешности разностной схемы, ее устойчивости и скорости сходимости решения разностной задачи к решению исходной задачи.

Сетки и сеточные функции. Для введения сеток и сеточных функций области изменения аргумента x $0 \leq x \leq l$ разбивается точками $x_i = ih$, $i = 0, 1, \dots, N$ на N равных частей длины $h = l/N$ каждая. Множество точек $x_i = ih$, $i = 0, 1, 2, \dots, N$ называется равномерной разностной сеткой и обозначается $\omega_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, \dots, N\}$, а число h — расстояние между точками (узлами) сетки ω_h называется шагом сетки. Если $h_i = x_i - x_{i-1}$ зависит от номера i , то сетка ω_h называется неравномерной. Функцию $y = y(x_i)$ дискретного

аргумента x_i , $i = 0, 1, \dots, N$, поставленную в соответствие непрерывной функции $U(x)$, называют сеточной функцией, определенной на сетке ω_h [28].

По времени t также вводится разностная сетка для $0 \leq t \leq T$ $\omega_\tau = \{t_j = j\tau, j = 0, 1, \dots, N_0\}$ с шагом $\tau = T/N_0$ на отрезке $0 \leq t \leq T$. Множество узлов (x_i, t_j) с координатами $x_i = ih$ и $t_j = j\tau$ называется сеткой в прямоугольнике D и обозначается $\omega_{h\tau} = \{x_i = ih, t_j = j\tau\}$, которая состоит из точек пересечения прямых $x = x_i$, $i = 0, 1, \dots, N$ и прямых $t = t_j$, $j = 0, 1, \dots, N_0$ (рис. 8.8, а).

Всякой непрерывной функции $U(x)$, заданной на отрезке $[0, l]$, можно поставить в соответствие сеточную функцию y_j , заданную на сетке $\omega_{h\tau}$, полагая $y_i = y(x_i, t_j) \equiv \equiv y_j^i \equiv f(x_i, t_j)$.

Аппроксимация простейших дифференциальных операторов. Дифференциальный оператор L , заданный в классе функций непрерывного аргумента, приближенно заменяется (аппроксимируется) разностным оператором Λ_h , заданным на сеточных функциях. Для этого каждая из производных заменяется разностным отношением, содержащим значения сеточной функции в нескольких узлах сетки. Множество узлов сетки, используемое при написании разностного оператора, называется шаблоном этого оператора (рис. 8.8).

Первая производная $LU = U' = \frac{\partial U}{\partial x}$ на сетке $\omega_h = \{x_i = ih\}$ с шагом h аппроксимируется следующим образом:

$$LU \sim \frac{U_i - U_{i-1}}{h} \equiv \Lambda_h^- U_i$$

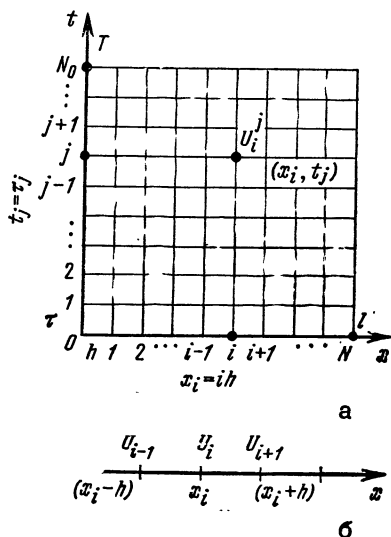
— левое разностное отношение,

$$LU \sim \frac{U_{i+1} - U_i}{h} \equiv \Lambda_h^+ U_i$$

— правое разностное отношение (рис. 8.8, б).

При замене LU разностным выражением $\Lambda_h U$ допускается погрешность $\Lambda_h U_i - (LU)_i = \psi_i$, называемая погрешностью оператора

Рис. 8.8. Сетка (а) и шаблон (б) для аппроксимации простейших дифференциальных операторов



L разностным оператором Λ_h . Необходимо, чтобы при $h \rightarrow 0$ эта погрешность стремилась к нулю.

Для оценки порядка погрешности разложим $U(x)$ в окрестности точки $x = x_i$ по формуле Тейлора:

$$U_{i \pm 1} = U_i \pm hU'_i + O(h^2)$$

и вычислим погрешность

$$\psi_i = \Lambda_h^\pm U_i - U'_i = O(h).$$

Отсюда следует, что разностный оператор $\Lambda_h^\pm U_i$ аппроксимирует $LU = U'$ с первым порядком точности.

Вторая производная $LU = U''$ аппроксимируется на трехточечном шаблоне, состоящем из узлов x_{i-1} , x_i , x_{i+1} . Тогда

$$\Lambda_h U_i = \frac{U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1}}{h^2} \equiv U''_{x, i}.$$

Оператор $U''_{x, i}$ аппроксимирует U'' со вторым порядком.

Для аппроксимации четвертой производной $LU = U^{(IV)}$ выбирается пятиточечный шаблон, состоящий из узлов $x_i \pm kh$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2$). Тогда разностный оператор

$$\Lambda_h U_i = U''''_{x, i} =$$

$$= \frac{U_{i-2} - 4U_{i-1} + 6U_i - 4U_{i+1} + U_{i+2}}{h^4}$$

аппроксимирует $LU = U^{(IV)}$ со вторым порядком.

На практике аппроксимация производных на многоточечных шаблонах используется редко, так как при увеличении шаблона обычно увеличивается объем вычислительной работы и ухудшается устойчивость разностной схемы.

В дальнейшем используются обозначения

$$U_{x, i} = (U_i - U_{i-1})/h,$$

$$U_{x, i} = (U_{i+1} - U_i)/h_{i+1};$$

$$U_{x, i} = (U_{i+1} - U_{i-1})/2h =$$

$$= (U_{x, i} + U_{x, i})/2.$$

Постановка разностных задач. Аппроксимация, сходимость и устойчивость. При аналитическом решении конструкторских задач фи-

зическая модель объекта рассматривается как некоторая область G с границей S , в которой ищется решение линейного дифференциального уравнения

$$LU = f(x), \quad x \in G, \quad (8.116)$$

удовлетворяющее дополнительным (краевым или начальным) условиям

$$lU = \mu(x), \quad x \in S, \quad (8.117)$$

где $f(x)$ и $\mu(x)$ — заданные функции, l — некоторый дифференциальный оператор.

Область $G + S$ непрерывного изменения аргумента заменяется множеством ω_h внутренних узлов и множеством Γ_h граничных узлов сетки $\omega = \omega_h + \Gamma_h$. Граничной задаче (8.116), (8.117) ставится в соответствие разностная задача

$$\Lambda_h y_h = \varphi_h, \quad \text{при } x \in \omega_h;$$

$$l_h y_h = \chi_h, \quad x \in \Gamma_h, \quad (8.118)$$

где $\varphi_h(x)$ и $\chi_h(x)$ — известные сеточные функции; Λ_h и l_h — разностные операторы, действующие на сеточные функции y_i .

Погрешность разностной схемы (8.118) равна

$$z_h = y_h - U_h.$$

Подставив $y_h = z_h + U_h$ в (8.118), получим задачу для z_h :

$$\Lambda_h z_h = \psi_h, \quad x \in \omega_h; \quad (8.119)$$

$$l_h z_h = v_h, \quad x \in \Gamma_h,$$

$$\text{где } \psi_h = \varphi_h - \Lambda_h U_h, \quad v_h = \chi_h - l_h U_h.$$

Правые части ψ_h и v_h задачи (8.119) называются погрешностью аппроксимации задачи (8.116), (8.117) разностной задачей (8.118).

Говорят, что разностное уравнение (8.118):

1) аппроксимирует дифференциальное уравнение (8.116) по норме $\|\cdot\|$, если $\|\psi\| = \|\Lambda_h U - \varphi_h\| \rightarrow 0$ при $h \rightarrow 0$;

2) аппроксимирует дифференциальное уравнение с порядком n ($n > 0$), если $\|\psi\| = O(h^n)$ или $\|\psi\| \leq Mh^n$, где $M = \text{const} > 0$ и не зависит от h .

Решение разностной задачи (8.118):

1) сходится к решению исходной задачи на сетке ω_h , если $\|z_h\| = \|y_h - U_h\| \rightarrow 0$ при $h \rightarrow 0$;

2) сходится к решению исходной задачи (8.116), (8.117) со скоростью $O(h^n)$, $n > 0$, если выполняется

$$\|z_h\| = \|y_h - U_h\| \leq M |h|^n,$$

где $M > 0$ — постоянная, не зависящая от h .

Знание порядка аппроксимации недостаточно для суждения о качестве схемы. Необходимо оценить точность схемы, т. е. порядок погрешности $z_h = y_h - U_h$. Погрешность z_h есть решение задачи (8.119), с правой частью ψ_h и v_h . Поэтому вопрос о связи порядка точности с порядком аппроксимации сводится к вопросу о характере зависимости решения разностной задачи от правой части. Свойство непрерывной зависимости решения разностной задачи от входных данных ψ_h и v_h называется устойчивостью схемы. При этом справедливо неравенство

$$\|z_h\| \leq M (\|\psi_h\| + \|v_h\|). \quad (8.120)$$

Если схема устойчива и аппроксимирует исходную задачу, то она сходится, причем порядок точности (скорость сходимости) схемы совпадает с порядком аппроксимации.

Таким образом, изучение сходимости и порядка точности схемы сводится к изучению аппроксимации и устойчивости, т. е. к получению оценок вида (8.120), называемых априорными оценками [29].

Разностные схемы для уравнения теплопроводности

Явные и неявные двухслойные схемы. При расчете тепловых режимов РЭА часто ставится краевая задача в следующей формулировке: найти непрерывную в прямоугольнике D ($0 < x \leq l$, $0 \leq t \leq T$) функцию $\vartheta = \vartheta(x, t)$, удовлетворяющую условиям:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + f(x, t),$$

$$0 < x < l, 0 < t < T; \quad (8.121)$$

$$\vartheta(0, t) = \mu_1(t), \vartheta(l, t) = \mu_2(t); \quad (8.122)$$

$$\vartheta(x, 0) = \vartheta_0(x). \quad (8.123)$$

Введем D в сетку $\omega_{h\tau} = \omega_h \times \omega_\tau = (x_i = ih, t_j = j\tau, i = 0, 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, N_0)$ с шагами $h = l/N, \tau = T/N_0$. Аппроксимируя производные

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right)^{j+1} \sim \frac{\vartheta_{i+1}^{j+1} - \vartheta_i^{j+1}}{\tau} = \vartheta_{i+1}^{j+1};$$

$$\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \right)_i \sim \frac{\vartheta_{i-1}^j - 2\vartheta_i^j + \vartheta_{i+1}^j}{h^2} = \vartheta_{xx}^j, \quad i; \quad f \sim \varphi_i^{j+1}, \quad f \sim \varphi_i^{j+1}$$

и вводя сеточную функцию $y_i^j = \vartheta(x_i, t_j)$, получим разностную краевую задачу

$$y_i^{j+1} - y_i^j = \gamma (y_{i-1}^j - \alpha y_i^j + y_{i+1}^j) + \tau \varphi_i^{j+1}, \quad 0 < i < N, j > 0;$$

$$y_0^j = \mu_1(t_j), y_N^j = \mu_2(t_j);$$

$$y_0^0 = \vartheta_0(x_i), \quad \gamma = a^2 \tau / h^2.$$

Отсюда

$$y_i^{j+1} = (1 - 2\gamma) y_i^j + \gamma (y_{i-1}^j + y_{i+1}^j) + \tau \varphi_i^{j+1}. \quad (8.124)$$

Так как при $j = 0$ задано начальное условие $y_0^j = \vartheta_0(x_i)$ то формула (8.124) позволяет определить от слоя j к слою $j+1$ значения y_i^{j+1} во всех узлах сетки $\omega_{h\tau}$, используя при этом краевые условия (8.122). Такая вычислительная схема (8.124) называется явной. Схема устойчива при условии $a^2 \tau / h^2 \leq 1/2$ (рис. 8.9, а)

Неявная двухслойная схема для уравнения (8.121) имеет вид (рис. 8.9, б)

$$\frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\tau} = a^2 \frac{y_{i-1}^{j+1} - 2y_i^{j+1} + y_{i+1}^{j+1}}{h^2} + \varphi_i^{j+1}.$$

Для определения y_i^{j+1} на новом слое $j+1$ получаем систему алгебраических уравнений вида

$$\gamma y_{i-1}^{j+1} - (1 + 2\gamma) y_i^{j+1} + \gamma y_{i+1}^{j+1} = -y_i^j + \tau \varphi_i^{j+1}. \quad (8.125)$$

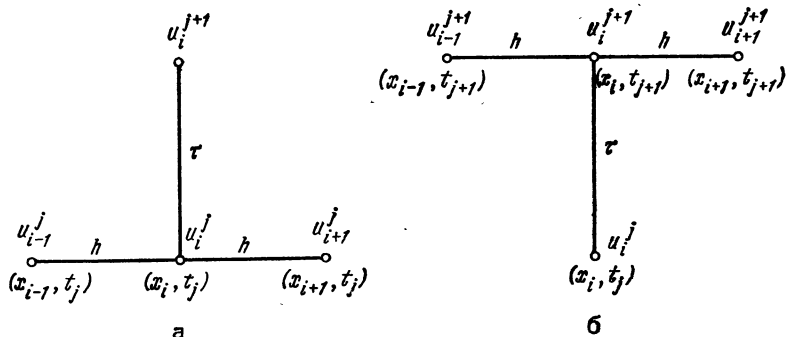


Рис. 8.9. Схемы шаблонов для явных (а) и неявных (б) разностных схем

В отличие от явных схем, где каждое уравнение содержит одно неизвестное u_i^{j+1} , в уравнениях (8.125) имеется по несколько значений, соответствующих искомому моменту времени $j+1$ и различным точкам пространственной координаты. Поэтому применение неявной схемы требует одновременного решения системы N алгебраических уравнений. Учитывая специальный вид матрицы коэффициентов этой системы, задача решается методом прогонки [28]. Неявная схема абсолютно устойчива и не накладывает никаких ограничений на величины шага по времени τ и координате h .

Разностные схемы для уравнений Лапласа и Пуассона

При исследовании стационарного распределения электрического и магнитного полей, а также стационарного теплового режима РЭА обычно приходят к уравнениям Лапласа и Пуассона

$$\Delta U = 0, \quad \Delta U = -\rho,$$

где ρ — плотность источников заряда или тепла; U — потенциал; $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — двумерный оператор Лапласа.

Разностная аппроксимация оператора Лапласа. Каждая из вторых производных оператора Лапласа

заменяется разностными выражениями

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sim \frac{U(x+h_1, y) - 2U(x, y) + U(x-h_1, y)}{h_1^2} = U_{xx} = \Delta_1 U;$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \sim \frac{U(x, y+h_2) - 2U(x, y) + U(x, y-h_2)}{h_2^2} = U_{yy} = \Delta_2 U,$$

где h_1 — шаг по оси x , h_2 — шаг по оси y .

Оператор Лапласа заменяется разностным оператором $\Delta y = y_{xx} + y_{yy}$, который определен на пятиточечном шаблоне («крест»), состоящем из точек (рис. 8.10)

$$(x, y), \quad (x-h_1, y), \quad (x+h_1, y), \\ (x, y-h_2), \quad (x, y+h_2).$$

Погрешность аппроксимации для оператора Δ равна

$$\Delta U - \Delta U = O(|h|^2), \quad |h|^2 = h_1^2 + h_2^2.$$

Для случая $h_1 = h_2 = h$ (на квадратной сетке)

$$\Delta y = y_{xx} + y_{yy} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 4y_0}{h^2}.$$

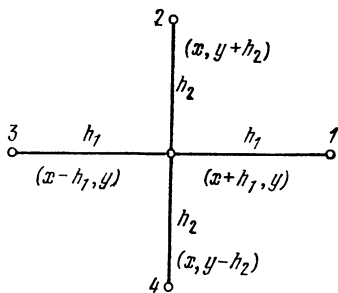


Рис. 8.10. Схема шаблона для аппроксимации оператора Лапласа

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

Разрешив уравнение $\Delta y = 0$ относительно y_0 , получим

$$y_0 = 0,25 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4).$$

Значение U_0 в центре шаблона есть среднее арифметическое значение в остальных узлах шаблона.

Разностная задача Дирихле для уравнения Пуассона. Задача Дирихле для уравнения Пуассона является основной при расчетах потенциальных полей и экранирования в РЭА. Она имеет вид в двумерном случае

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -f(x, y) \text{ в области}$$

$$G = \{0 \leq x \leq l_1, 0 \leq y \leq l_2\}; \quad (8.126)$$

$$U|_S = \mu(x, y) \quad (8.127)$$

Для решения задачи (8.126), (8.127) методом конечных разностей в области $G + S$ необходимо ввести сетку и аппроксимировать на этой сетке уравнение и краевое условие.

В области G вводится сетка ω_h с шагами $h_1 = l_1/N_1$ и $h_2 = l_2/N_2$. Правая часть $f(x, y)$ уравнения (8.126) аппроксимируется сеточной функцией $\varphi(x_1, y_1)$ так, чтобы $\varphi(x_1, y_1) - f(x, y) = O(|h|^2)$. Оператор Лапласа ΔU заменяется разностным оператором $\Delta y = y_{xx} + y_{yy}$.

В результате задачи (8.126), (8.127) ставится в соответствие разностная задача Дирихле: найти сеточную функцию $y(x_i, y_i)$, определенную на ω_h , удовлетворяющую во внутренних узлах (на ω_h) уравнению

$$\Delta y = -\varphi(x_i, y_i) \quad (8.128)$$

и принимающую на границе Γ_h заданные значения

$$y|_S = -\mu(x_i, y_i). \quad (8.129)$$

Задача (8.128), (8.129) решается методом итерации и имеет погрешность аппроксимации $O(h_1^2 + h_2^2)$

Разностные схемы для уравнений колебаний и теории прочности

При расчете колебаний однородных одномерных систем краевая задача имеет вид

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + F(x, t) \text{ в области}$$

$$G = \{0 < x < l, 0 < t < T\},$$

$$\xi(0, t) = \mu_1(t), \quad \xi(l, t) = \mu_2(t), \quad (8.130)$$

$$\xi(x, 0) = \xi_0(x), \quad \frac{\partial \xi(x, 0)}{\partial t} = \bar{\xi}_0(x).$$

При численных расчетах в области G вводится прямоугольная сетка

$$\omega_{ht} = \{x_i = ih, t_j = j\tau, i = 0, 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, N_0\}$$

и производные, входящие в уравнение (8.130), аппроксимируются по формулам

$$\frac{\partial^2 \xi}{\xi t^2} \sim \xi_{tt}; \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \sim \xi_{xx}; \quad F \sim \varphi_i^{j+1}.$$

Присоединяя разностные аналогии краевых и начальных условий, получим разностную задачу

$$y_{it} = c^2 y_{xx} + \varphi; \quad \varphi = \varphi(x_i, t_j); \quad (8.131)$$

$$y_0 = \mu_1(t); \quad y_N = \mu_2(t);$$

$$y(x, 0) = \xi(x_i); \quad y_0^{j+1} = y_0^j + \tau \bar{\xi}_0(x_i).$$

Отсюда получаем систему алгебраических уравнений для вычисления $y = y_i^{j+1}$:

$$\gamma^2 (y_i^{j+1} + y_{i-1}^{j+1}) + \gamma^2 y_i^{j+1} = \\ = -F_i, \quad 0 < i < N; \quad \gamma = \frac{c^2 \tau}{h};$$

$$y_0 = \mu_1; \quad y_N = \mu_2;$$

$$F_i = (2y_i^j - y_i^{j-1}) - \tau^2 y_{xx}^j + \\ + \tau^2 y_{xx}^{j-1} + \tau^2 \varphi,$$

которая решается методом прогонки. Погрешность аппроксимации схемы (8.131) есть величина $O(\tau + h^2)$.

Разностная задача для системы уравнений теории упругости. Система уравнений равновесия однородного изотропного упругого твердого тела (конструкции РЭА) в случае плоской деформации имеет вид [20]

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial y^2} + (\lambda + \mu) \times \\ \times \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial x \partial y} + F_1 = 0; \quad (8.132)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial x \partial y} + \mu \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial x^2} + (\lambda + 2\mu) \times \\ \times \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial y^2} + F_2 = 0, \quad (8.133)$$

где λ, μ — коэффициенты Ламе; ξ_1 и ξ_2 — перемещения по осям x и y ; F_1, F_2 — проекции действующей силы по x и y .

Разностная схема, аппроксимирующая уравнения (8.132), (8.133), имеет вид

$$(\lambda + 2\mu) (y_1)_{xx} + \mu (y_1)_{yy} + \\ + (\lambda + \mu) (y_2)_{xy} = -\Phi_1; \quad (8.134)$$

$$(\lambda + \mu) (y_1)_{xy} + \mu (y_2)_{xx} + \\ + (\lambda + \mu) (y_2)_{yy} = -\Phi_2,$$

где Φ_1 и Φ_2 — аппроксимация действующих сил F_1 и F_2 ;

$$(y_1)_{xx} = \frac{1}{h_1} [\xi_1(x+h_1, y) - \\ - 2\xi_1(x, y) + \xi_1(x-h_1, y)];$$

$$(y_1)_{xy} = \frac{1}{4h_1 h_2} [\xi_1(x+h_1, y+h_2) - \\ - \xi_1(x+h_1, y-h_2) - \xi_1(x-h_1, y) + \\ + h_2) - \xi_1(x-h_1, y-h_2)],$$

h_1 и h_2 — шаги по осям x и y .

Погрешность аппроксимации разностной схемы (8.134) равна $O(h_1^2 + h_2^2)$.

8.10. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЭА С ПОМОЩЬЮ ЭВМ*

Принципы работы и структура ЭВМ

ЭВМ является преобразователем входной информации (числовой или буквенной) в выходную в соответствии с заданной программой. Входные данные, участвующие в преобразовании, называются операндами. Программа обработки данных состоит из последовательности команд, по которым выполняются операции (арифметические, логические и др.) над операндами.

Обобщенная структурная схема ЭВМ приведена на рис. 8.11. Устройство ввода (Увв) предназначено для ввода исходной информации (числовых данных или программы) в память ЭВМ. Ввод информации может осуществляться как автоматически посредством перфокарт, перфолент, так и непосредственно с клавиатуры пульта управления ЭВМ. Вводимая информация поступает на хранение в оперативную память (ОП) ЭВМ. Устройство, в котором осуществляется преобразование входной информации, называется процессором. Он состоит, как правило, из арифметико-логического устройства (АЛУ) и устройства управления (УУ). УУ в соответствии с программой преобразования входной информации задает АЛУ последовательность и типы операций над операндами. Конечные или необходимые промежуточные результаты преобразований фиксируются посредством устройства вывода (Увыв) в следующих видах: печатью на бумаге, за-

* Составители В. М. Курейчик, В. В. Лисяк.

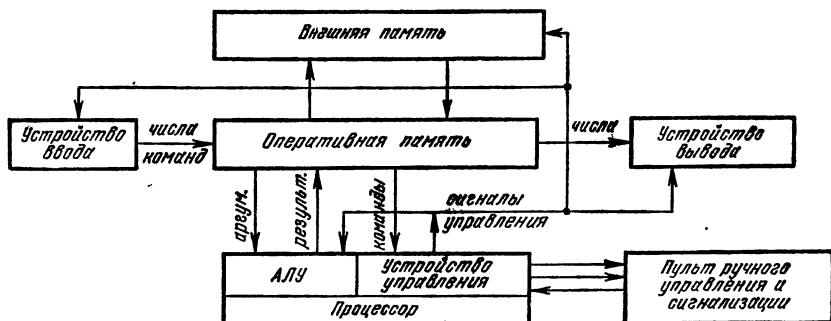


Рис. 8.11. Структурная схема ЭВМ

писью на магнитные ленты, барабан, диски, перфорацией на перфокартах или выводом на устройства визуального контроля.

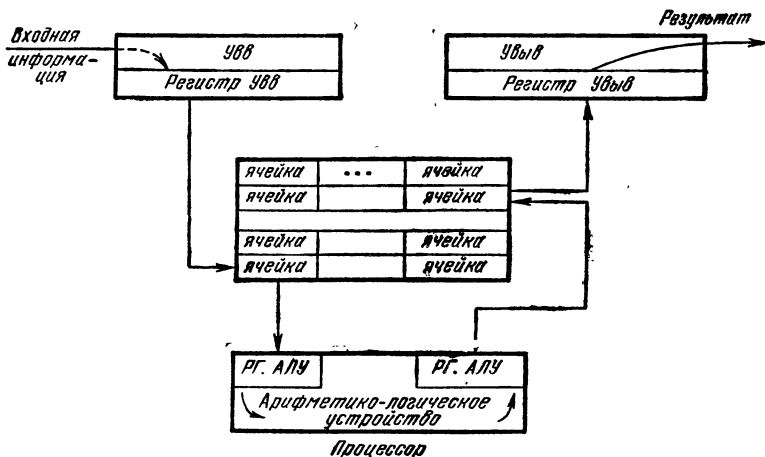
Автоматическое выполнение заданной программы и объединение всех устройств в единый комплекс аппаратуры обеспечивает УУ, которое структурно подразделяется на центральное УУ и местные УУ, в соответствии с заданной программой координирует работу всех устройств ЭВМ, управляет обменом информацией как внутри машины, так и между машиной и внешней средой.

В соответствии с рассмотренной структурной схемой ЭВМ обобщенный процесс прохождения и пре-

образования информации (рис. 8.12) можно представить следующими этапами:

- ввод входной информации с фиксированием в регистре Увв;
- перенос информации из регистра в ОП по адресам, указанным в программе;
- пересылка информации из ячейки ОП, с адресом указанным в программе, в АЛУ;
- преобразование информации в АЛУ посредством указанных в программе операций;
- пересылка результата преобразования из АЛУ в ячейку ОП по адресу согласно программе;

Рис. 8.12. Схема прохождения и преобразования информации в ЭВМ



— пересылка информации из ячейки ОП в регистр УВыв; вывод информации из ЭВМ посредством печати, перфорации или записи на магнитные носители.

При представлении информации в ЭВМ основными единицами представления информации являются: символ, слово, запись, файл. Символ — любой элемент алфавита: буква, цифра, знак. В ЭВМ каждый символ кодируется несколькими упорядоченными сочетаниями битов, т. е. каждому символу поставлен во взаимно-однозначное соответствие код в виде набора нулей и единиц. Слово — это число или часть числа, один или несколько символов либо знаков, сгруппированных для машинного представления. Длину слова определяет количество используемых двоичных разрядов. Запись — это совокупность нескольких слов, органически связанных между собой. Файл — это группа записей с одинаковой структурой, относящихся к одноименным объектам.

Основной структурной единицей хранения и обработки информации в ЭВМ является ячейка, состоящая из нескольких десятков двоичных разрядов. Количество разрядов и их информационное назначение регламентируются принятой для данной ЭВМ разрядной сеткой, удовлетворяющей условию размещения в ячейках полного машинного слова.

В моделях ЕС ЭВМ в качестве минимальной адресуемой единицы принят байт, состоящий из восьми битов, которые позволяют разместить коды цифр, букв русского и латинского алфавита и других символов.

Для ввода в ЭВМ программы и исходного числового материала служат перфорационные носители информации (перфокарты и перфоленды) и магнитные носители информации: магнитные ленты, карты, диски, барабаны. На перфорационных носителях информация представляется в виде системы отверстий. Наличие отверстия в какой-либо позиции носителя рассматривается как единица, отсутствие — как ноль. На магнитных носителях информация представляется за счет намагничивания определен-

ных участков носителя. При этом ноль и единица фиксируются различной полярностью магнитного поля [18].

Современные, высокопроизводительные ЭВМ позволяют обрабатывать информацию, содержащуюся в оперативной памяти, емкостью до $1 \cdot 10^6$ байт со скоростью до $2 \cdot 10^6$ операций в секунду. Это создает предпосылки для эффективного применения ЭВМ в проектно-конструкторских разработках РЭА.

Задачи автоматизации конструкторского проектирования РЭА

При проектировании РЭА только около 15% работ требуют конструкторов высокой квалификации. Остальные 85% работ состоят из трудоемких, нетворческих операций, которые связаны с получением большого числа вариантов решений и их анализом. В этой связи применение ЭВМ, выполняющих большие объемы вычислений, позволяет избавить конструктора от рутинной работы, оставив ему творческие операции. Автоматизация конструкторского проектирования приводит к сокращению сроков разработки РЭА, экономии материальных и трудовых ресурсов, позволяет сочетать опыт и творческие способности конструктора с высоким быстродействием ЭВМ [15, 22, 23, 26, 31, 32, 36].

Работы в области автоматизации конструкторского проектирования характеризуются тремя типами задач: проектирование узлов и блоков с проводными соединениями, на основе микросхем и печатного монтажа, на больших интегральных схемах (БИС).

В системах автоматизации проектирования первого типа решаются задачи размещения элементов и построения монтажных схем по критериям, основанным на минимизации суммарной длины соединений. Для повышения скорости выполнения монтажа используются программно управляемые установки.

В системах автоматизации проектирования второго типа выполняется покрытие функциональной

схемы схемой соединения микросхем, компоновка элементов по платам, размещение микросхем и трассировка печатных соединений. Затем осуществляется автоматизированная подготовка перфолент для технологического оборудования. Структура систем и используемые в ней алгоритмы связаны с конструированием печатных плат и видом технологического оборудования, используемого для изготовления фотошаблонов.

В системах автоматизации проектирования третьего типа решаются задачи входного контроля исходных данных, покрытия, компоновки, взаимного размещения компонентов, основанных на критерии минимума числа пересечений межсоединений, трассировки соединений, контроля топологии, прорисовки чертежей фотошаблонов и вырезания их оригиналов. Здесь широко используются языки описания топологии, чертежные автоматы, микрофотонаборные установки, дисплеи, координатографы и т. п.

Исходными данными для конструкторского проектирования являются данные этапа логического проектирования, т. е. набор функциональных схем и заданная конструктивно-технологическая база реализации схем РЭА.

Процесс подготовки и решения задач конструкторского проектирования обычно включает следующие этапы:

- формализация объекта конструирования;
- разработка алгоритмов оптимизации модели объекта конструирования;
- составление на алгоритмическом языке программ для реализации на ЭВМ;
- решения задач на ЭВМ.

Унификация и стандартизация элементной и конструктивной базы РЭА позволяют рассматривать объект конструирования, при его формальном представлении, как некоторое пространство, состоящее из множества одинаковых ячеек. Например, конструкторская плата формально представляется ограниченной плоскостью, на которую нанесена декартова решетка,

в ячейках которой в виде точек изображаются микросхемы и другие компоненты схемы с их электрическими связями. Аналогично можно представить и конструктивные единицы в виде шкафов, панелей, стоек.

Для получения технической документации на создаваемое устройство на этапе конструкторского проектирования решаются, как правило, следующие задачи:

- покрытие функциональной схемы устройства заданным набором стандартных элементов;
- компоновка принципиальной схемы устройства;
- размещение конструктивов низшего уровня в конструктивах высшего уровня иерархии;
- трассировка межсоединений конструктивных единиц.

Задача покрытия заключается в распределении логических элементов функциональной схемы в стандартных элементах из заданного набора с минимизацией типов стандартных элементов и числа внешних связей между ними. Другими словами покрытие — это преобразование функциональной схемы РЭА в принципиальную (СхЭ).

При компоновке СхЭ решается задача оптимального распределения элементов по конструктивно законченным частям с целью повышения надежности конструкции в местах соединительных разрезов.

Решение задачи размещения указывает на оптимальный порядок расположения одних конструктивов в других, например, микросхем на плате. При этом достигается общее уменьшение длины соединительных проводов и числа их пересечений, вследствие чего уменьшается искажение логических сигналов.

Задача трассировки межсоединений, как завершающая задача оптимизации объекта конструирования, заключается в выборе порядка соединения выводов схемы и определения конкретной геометрии трасс.

Решение задач, возникающих в процессе конструкторского проектирования, является следствием решения задач глобальной оптимизации конструкции РЭА. При решении каждой задачи стоят критерии

оптимизации, некоторым образом эти критерии противоречивы и оптимизация по одному из них приводит к ухудшению других критериев. Для совместного учета частных критериев можно рассмотреть обобщенный критерий [5]:

$$Q(S) = [\Pi(S), K(S), P(S), T(S), C(S)], \quad (8.135)$$

где S — объект проектирования, например, схема коммутации конструктивно законченных частей РЭА; $\Pi(S)$ — обобщенный критерий этапа покрытия; $K(S)$ — критерий этапа компоновки; $P(S)$ — этапа размещения; $T(S)$ — трассировки; $C(S)$ — контроля. В свою очередь каждый из обобщенных критериев любого этапа состоит из частных критериев оптимизации. Каждому критерию в зависимости от класса исследуемых схем или по заданию конструктора ставится в соответствие число μ_k , $k = 1, 2, \dots, p$, которое характеризует его важность по сравнению с другими критериями. Это дает возможность получить обобщенный критерий (8.135) в виде [5]:

$$Q(S) = \sum_{k=1}^p \mu_k (Q_k(S)),$$

$$\mu_k \geq 0; \sum_{k=1}^p \mu_k = 1$$

и объединить частные критерии в один

$$Q(S) = \mu_1 \Pi(S) + \mu_2 K(S) + \mu_3 P(S) + \mu_4 T(S) + \mu_5 C(S).$$

Весовые коэффициенты выбирают на основе интуиции и знаний конструктора. Из-за трудности установления единого критерия качества, обладающего определенным физическим смыслом, и задания весовых коэффициентов μ_i на каждом этапе проектирования, выбирают один преобладающий критерий, а все остальные оформляют в виде ограничений.

Формальные модели схем РЭА

Модели функциональных и принципиальных схем РЭА можно рассматривать как некоторое конечное

множество элементов, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, соединенных между собой электрическими цепями из множества $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, $n = |X|$, $m = |U|$ [31]. Каждый элемент схемы (резистор, транзистор, микросхема, ячейка, блок, стойка) имеет некоторое множество выводов $Z_i = \{z_1^i, z_2^i, \dots, z_{t_i}^i\}$, где i — индекс рассматриваемого элемента; t_i — число выводов. Кроме выводов элементов, в схеме имеются внешние выводы, соединяющие схему с другими схемами, которые обычно относятся к условному элементу $x_j \in X$. Два или несколько выводов считаются связанными, если они объединяются одной электрической цепью.

При конструкторском проектировании схем РЭА важным является вопрос построения математической модели проектируемого устройства, которая должна быть гибкой и учитывать конструкторские ограничения.

В зависимости от степени детализации схемы и требований к алгоритмической базе для этой цели используются графы, гиперграфы и их матричные и списковые эквиваленты.

Если информация о выводах схемы несущественна, то для интерпретации СхЭ гиперграфом $G = (X, E)$ ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество вершин, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ — множество ребер, причем каждое ребро представляет собой некоторое подмножество множества вершин $e_j \subseteq X$, $j \in I = \{1, 2, \dots, n\}$), каждому элементу схемы ставится в соответствие вершина $x_i \in X$ гиперграфа. Если электрическая цепь $u_j \in U$ соединяет элементы s, t, \dots, p , то вершины x_s, x_t, \dots, x_p образуют ребро гиперграфа $e_j = \{x_s, x_t, \dots, x_p\}$.

Если заданы способы соединения элементов ребра гиперграфа, то схеме можно поставить в соответствие граф $G = (X, U)$, где X — множество вершин, соответствующее множеству элементов, а U — множество ребер, соответствующее цепям схемы. Эти модели, сохраняя наглядность и содержательность рассматриваемого объекта, позволяют строить оптимальные алго-

ритмы проектирования. Существуют и другие формальные модели [23, 26, 31].

Покрытие и компоновка схем РЭА

Идея алгоритмов покрытия состоит в выделении среди множества элементов заданного набора подмножеств, покрывающих данную конфигурацию. Процесс ведется путем направленного перебора до достижения минимальной стоимости покрытия.

Компоновкой электрической схемы РЭА называется этап распределения элементов низшего ранга в высшем с выполнением заданных критериев. Критериями компоновки могут быть минимум номенклатуры блоков, функциональная законченность частей схемы, минимум числа выводов от каждого блока, максимум заполнения конструктивной части высшего ранга элементами низшего ранга, простота диагностирования схемы, минимум межблочных соединений, электромагнитная и тепловая совместимость элементов и др.

Исходными данными для решения компоновки РЭА является электрическая схема соединений, полученная на этапе покрытия, набор конструктивных элементов и ограничения.

Сформулируем постановку задачи компоновки схемы как разбиение графа $G = (X, U)$ на куски, не обязательно графы, $G_i = (X_i, U_i)$, $X_i \subseteq X$, $U_i \subseteq U$, $i \in I = \{1, 2, \dots, l\}$, причем U_i — подмножество всех тех ребер G , которые инцидентны хотя бы одной вершине из X_i . Совокупность кусков $B(G) = \{G_i / i \in I\}$ называется разбиением графа G , если

$$(\forall G_i \in B(G)) (G_i \neq \emptyset \cap G_i \subset G),$$

$$(\forall G_i, G_j \in B(G)) (G_i \neq G_j >$$

$$> X_i \cap X_j = \emptyset).$$

$u_{ij} = u_j \cap u_i \subseteq u$ — подмножество ребер, попадающих в сечение между кусками G_i, G_j ; $|u_{ij}| = k_{ij}$ — число реберного соединения этих кусков. Число реберного соединения всех кусков графа

$$K = 0,5 \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l k_{ij}.$$

Одной из основных задач разбиения графа G является нахождение такой совокупности кусков, чтобы число реберного соединения графа было минимальным.

Существующие алгоритмы компоновки можно условно разделить на следующие классы: алгоритмы, основанные на методах исследования операций; последовательные алгоритмы; итерационные алгоритмы; смешанные алгоритмы [23, 26, 31].

К алгоритмам первого класса относятся алгоритмы разбиения, использующие метод ветвей и границ, симплекс-метод, решение задачи о назначениях. При разбиении графа методом ветвей и границ сначала определяется нижняя оценка разбиения графа на заданное число кусков. Далее выполняется построение дерева решений и поиск оптимального результата. Применяя задачу о назначении и симплекс-метод для разбиения графа, можно искать назначение кандидатов (вершин графа) на все работы (в куски), дающее минимальные суммарные затраты. При этом каждая вершина графа может быть назначена только в один кусок и в каждом куске должны содержаться различные вершины графа. Суть последовательных алгоритмов разбиения графа заключается в следующем. Сначала выбирается по определенному правилу вершина или группа вершин, к которым затем присоединяются остальные вершины графа с целью образования первого куска. Далее процесс повторяется до получения заданного разбиения. При использовании итерационных алгоритмов граф сначала разбивается на определенное число кусков произвольным образом. Затем по некоторым правилам производится единичная или групповая перестановка вершин между кусками для оптимизации разбиения. К классу смешанных алгоритмов можно отнести алгоритмы, выполненные на основе комбинации из алгоритмов первых трех классов, а также алгоритмы разбиения, не вошедшие в эти классы.

Идея итерационных методов разбиения графов схемы РЭА заключается в выборе случайного раз-

биения, которым может служить результат работы последовательного алгоритма, с дальнейшими перестановками вершин или групп вершин из одного куска в другой с целью минимизации числа соединений ребер или максимизации числа внутренних ребер.

Разбиение графа G на l кусков итерационным методом можно свести к разбиению на две части. Введем числовую характеристику, использующую локальную степень этой вершины, которая оценивает связь рассматриваемой вершины с другими вершинами, лежащими внутри данного куска, по отношению к вершинам, находящимся вне куска. Назовем $\alpha(x_k)$ числом связности вершины x_k

$$\alpha(x_k) = \begin{cases} r_k(G_i) - r_k(G_j), & \text{если } x_k \in x_j; \\ r_k(G_j) - r_k(G_i), & \text{если } x_k \in x_i, \end{cases}$$

где $r_k(G_i)$ — число ребер, соединяющих вершину x_k с вершинами куска $G_i = (X_i, U_i)$; $r_k(G_j)$ — число ребер, соединяющих вершину x_k с вершинами куска $G_j = (X_j, U_j)$. Перестановка двух произвольных вершин $x_k \in X_i$ и $x_l \in X_j$ приводит к уменьшению числа соединений ребер в случаях: а) x_k несмежна с x_l и выполняется неравенство $\alpha(x_k) + \alpha(x_l) > 0$; б) x_k смежна x_l и справедливо $\alpha(x_k) + \alpha(x_l) > 2r_{lk}$.

При работе алгоритма число итераций, время решения и оптимальность результата в значительной степени зависят от того, на сколько удачно выбрано начальное разбиение. Для устранения этого недостатка алгоритм можно применить несколько раз для различных начальных условий. Алгоритм позволяет получать на каждом шаге оптимальный результат, хотя в общем виде может привести к локальным минимумам. За счет усложнения процедуры, заключающейся в перестановке групп вершин, можно увеличить оптимальность получаемого разбиения.

Для сравнения различных методов перебора при разбиении графов схем можно использовать две оценки: целенаправленность и эффективность ветвления. Целенаправленность перебора позволяет уз-

нать, в какой мере перебор идет в направлении цели. Эффективность ветвления определяется длиной пути перебора и числом вершин, построенных в процессе перебора.

Размещение элементов схем РЭА

Оптимальное размещение элементов преследует две важнейшие цели: снижение искажений логических сигналов, возникающих вследствие наличия в проводнике распределенных емкости и индуктивности, и повышение технологичности изготовления конструктивных единиц за счет создания благоприятных условий для трассировки межсоединений элементов.

Наибольшее распространение получили критерии размещения, позволяющие прямо или косвенно достичь цели, т. е. получить минимумы суммарной длины всех соединений схемы, либо числа пересечений проводников, либо суммарной длины соединений источника сигнала с его наиболее удаленной нагрузкой и др.

В большинстве случаев удовлетворительные результаты позволяют получить применение критерия минимума суммарной длины проводников схемы. При решении задачи размещения можно использовать алгоритмы:

- последовательной оптимизации;
- парных перестановок;
- основанные на комбинаторных методах дискретного [26, 36] программирования.

Отличительной особенностью алгоритмов последовательной оптимизации является инвариантность результатов относительно начального размещения. На первом шаге алгоритма выделяется произвольный элемент и помещается в произвольное посадочное место. На последующих шагах из множества неразмещенных элементов выбирается тот, который имеет максимальное число связей с ранее размещенными элементами и для которого определяется оптимальное по выбранному критерию посадочное место платы. Далее аналогичный процесс повторяется до тех пор, пока не будут размещены все элементы.

Последовательные алгоритмы наиболее просты в реализации и обладают высоким быстродействием, однако оптимальность результата невысокая. Это обусловило их применение в менее быстродействующих, но более точных алгоритмах парных перестановок с целью получения начального размещения.

Алгоритмы парных перестановок зависят от начального размещения элементов на монтажной плоскости. Работа алгоритма осуществляется итеративно. Если r_{ij} — расстояние между элементами, а k_{ij} — число связей между ними, то суммарная длина связей между элементами E_i и E_j будет $R_{ij} = r_{ij}k_{ij}$, длина связей элемента E_j со всеми остальными

$$L^{(i)} = \sum_{j=1}^N r_{ij} k_{ij}, \text{ а } L_{\text{общ}} = \\ = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} k_{ij}.$$

Если выделить из всего множества элементов на плате элементы E_i и E_j , то суммарная длина связей этих элементов со всеми остальными выразится как

$$L^{(i, j)} = L^{(i)} + L^{(j)} - r_{ij} k_{ij} = \\ = \sum_{j=1}^N (r_{ij} k_{ij} + r_{ji} k_{ji}) - 2r_{ij} k_{ij}.$$

При парной перестановке элементов E_i и E_j суммарная длина связей их со всеми остальными элементами станет равной

$$L^{(i, j)} = \sum_{t=1}^N (r_{it} k_{jt} + r_{jt} k_{it}).$$

Таким образом, можно вычислить приращение суммарной длины связей элементов E_i и E_j со всеми остальными, полученное при их перестановке:

$$\Delta L^{(i, j)} = L^{(i, j)} - L^{(i, i)} = 2r_{ij} k_{ij} - \\ - \sum_{t=1}^N (r_{it} - r_{jt}) (k_{it} - k_{jt}).$$

На основании анализа матрицы приращений производится перемещение элементов на монтажной плате.

При проектировании сформированных блоков и элементов на кристалле по линейкам можно использовать точные алгоритмы размещения, основанные на идеях метода ветвей и границ. Для размещения с минимизацией суммарной длины соединений необходимо нахождение нижней границы суммарной длины соединений и определение метода ветвления дерева решения, позволяющего отсекал ветви, содержащие заведомо непригодные решения. Нижнюю границу можно найти как полусумму длин звездных подграфов, образованных при расположении в линейке каждой вершины со всеми инцидентными ребрами оптимальным образом. Ветвление заключается в последовательной фиксации вершин в определенной позиции с нахождением искомой вершины для ветвления и возвратом на каждом шаге на непросмотренные ветви.

Минимизация внутрисхемных пересечений методом ветвей и границ заключается в том, что множество возможных размещений фрагментов цепей разбивается на последовательно уменьшающиеся подмножества. Процесс сопровождается вычислением нижних оценок числа пересечений между фрагментами цепей. На конечном этапе получается подмножество, состоящее из одного решения, для которого число пересечений не более, чем для любого иного решения.

Трассировка межсоединений схемы РЭА

Трассировка печатных плат — одна из самых трудоемких задач конструкторского проектирования устройства. При создании программ трассировки на этапе алгоритмизации решаются две основные задачи: создание модели монтажного пространства и организация процесса поиска кратчайших связывающих сетей, удовлетворяющих заданным конструктивно-технологическим ограничениям.

В качестве модели монтажного пространства, как правило, используется двумерная дискретная ограниченная плоскость, состоящая из множества попарно различных правильно упакованных элементов (дискретов), каждому из которых поставлена в соответствие пара неотрицательных чисел в выбранной системе координат. При этом установлено взаимно-однозначное соответствие между элементарными участками монтажного пространства и дискретами его модели.

Совокупность конструктивно-технологических ограничений оказывает свое влияние на выбор метода организации поиска кратчайших связывающих сетей, который непосредственно влияет на качество проектируемого монтажа и время решения задачи на ЭВМ. Для данной конструктивно-технологической базы такие ограничения могут регламентировать длину наиболее длинной связи, длину параллельно прокладываемых соседних проводников, количество и места переходных отверстий с одного слоя платы на другой, места расположения и типы разъемов, число изгибов проводников, число проводников, подходящих к одной контактной площадке, места платы, запрещенные для трассировки из условий электромагнитного и теплового режима работы элементов схемы, пропускную способность каналов и др.

Существует несколько классов алгоритмов трассировки: волновые, лучевые, каналные [1, 3].

Идея волнового алгоритма заключается в распространении числовой волны поиска кратчайшего соединения на дискретах модели монтажного пространства или дискретном рабочем поле. Дискреты называются занятыми, если по ним прошли ранее построенные участки трасс, запрещенными — если из технологических условий в них нельзя прокладывать трассы, и соседними, если они имеют общее ребро. В k -й фронт волны включаются все свободные дискреты, соседние с дискретами $(k-1)$ -го фронта, а сами дискреты помечаются целыми неотрицательными числами $F = F(c_1f_1 + c_2f_2 + \dots + c_nf_n)$, где f_i — i -й крите-

рий построения трассы (длина трассы, число пересечений, число переходов со слоя на слой и т. п.), а c_i — весовой коэффициент i -го критерия, характеризующий степень его приоритета над критериями f_j ($j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$, $j \neq i$). Формирование фронтов волны осуществляется до тех пор, пока в очередной фронт не будет включен искомым дискрет. На этом процесс распространения числовой волны поиска искомого дискрета заканчивается. Второй этап работы алгоритма называется проведением пути. Заключается он в обратном прохождении дискретов по правилу монотонного убывания записанных в них чисел. После обратного просмотра по всем возможным путям, соединяющим искомые дискреты, выбирается путь, имеющий меньшее число дискретов, т. е. кратчайший. Аналогичная процедура распространения волны и считывания пути повторяется до получения полного решения. Класс волновых алгоритмов является универсальным в отношении критериев проложения пути, обладает возможностями модификаций, простотой и стройностью математической модели. К наиболее существенным недостаткам относятся значительный объем требуемой оперативной памяти ЭВМ и большие затраты машинного времени.

Разработка алгоритмов трассировки с повышенным быстродействием привела к созданию класса лучевых алгоритмов. Пусть в простейшем случае необходимо найти кратчайший путь из s в d .

Устанавливается количество лучей, исходящих из s и d . В зависимости от этого различают двухлучевые и четырехлучевые алгоритмы. Распространение лучей происходит одновременно из обоих источников до встречи в дискрете t . Путь проводится от дискрета t через дискреты, по которым прошли оба луча до встречи. Для увеличения возможности двухлучевых алгоритмов целесообразно разрешение проведения нескольких одноименных лучей по одному дискрету. Для исключения блокировки лучей можно возвращать луч из заблокированных дискретов в соседние, по

которым прошел луч. Лучевые алгоритмы имеют меньшую разрешающую способность и малоэффективны, если на плате уже проведено достаточное число трасс. Поэтому такие алгоритмы целесообразно использовать для трассировки печатных плат с небольшой степенью заполнения или в комплексе с волновым алгоритмом, который применяется на заключительном этапе для построения трасс.

Получают распространение канальные алгоритмы трассировки, основанные на прокладке трасс по укрупненным дискретам рабочего поля, в качестве которых служит система горизонтальных и вертикальных каналов. Ширина каждого канала регламентирует количество магистралей в канале. При этом любое соединение будет представлять совокупность объединенных в одну цепь участков магистралей. Реализация канального алгоритма предполагает выполнение двух процедур: распределения соединений по каналам с учетом их оптимальной загрузки и оптимизации расположения соединений на магистралях каналов. Для заданной конструктивно-технологической базы изготовления печатных плат каждому каналу монтажной плоскости можно поставить в соответствие число, называемое пропускной способностью канала и обозначающее максимально допустимое количество проводников, проходящее через сечение канала с выполнением технологических ограничений. При этом процедура оптимального распределения соединений по каналам, в простом случае, сводится к равномерной их загрузке, а в более сложных случаях дополнительно осуществляет учет фактора электромагнитной и тепловой совместимости соседних проводников. Целью выполнения второй процедуры — оптимизации расположения соединений на магистралях каналов — является минимизация переходных отверстий с одного слоя монтажной плоскости на другой.

Класс канальных алгоритмов трассировки выгодно отличается от волновых повышенным быстродействием, меньшим расходом памяти ЭВМ, однако он менее универ-

сален, что накладывает определенные ограничения на класс конструктивно-технологических решений.

В волновые, лучевые и в меньшей мере канальные алгоритмы заложен последовательный принцип трассировки, что предполагает оптимальное построение каждой отдельной трассы, без прогноза на прокладку последующих соединений на монтажной плоскости. Недостаток этого принципа наиболее ярко проявляется по мере приближения к концу решения задачи, когда, как правило, становится очевидным тот факт, что отдельные ранее проложенные трассы, можно было бы построить не оптимально, но при этом возникли бы дополнительные возможности к прокладке ряда последующих трасс. В определенной мере этот недостаток устраняется алгоритмами «гибкой» трассировки [3], когда ранее проложенные трассы не жестко закрепляются на монтажной плоскости, а имеют свойство деформироваться при построении последующих трасс. При этом моделью монтажной плоскости является система граней, каждая из которых обладает своей пропускной способностью по ребрам. Вершинами граней являются выводы элементов, точки зон, краев платы и др. Построение соединений осуществляется путем организации волнового процесса на множестве граней, причем грань считается запрещенной к прохождению волны, если исчерпаны ресурсы пропускных способностей ее ребер. Соседними некоторому ребру являются те ребра граней, которые достижимы из него без пересечений. Прокладка проводников в алгоритмах «гибкой» трассировки осуществляется последовательно, однако ранее проложенные трассы не закрепляются жестко, что создает благоприятные условия для прокладки последующих соединений. Кроме того, представление монтажной плоскости в виде системы граней оказывается удобным для конструкций, использующих разноразмерные элементы.

После окончания трассировки, особенно для БИС, важна проверка соответствия между исходной электрической схемой и ее топологи-

ческим эквивалентом. Для этого строятся моделирующие графы, отражающие коммутационные свойства электрических и топологических схем. Это графы с разбиениями на множество вершин. Введение разбиений обеспечивает учет реальных свойств схем РЭА. Затем устанавливается взаимно-однозначное соответствие между элементами моделирующих графов. Алгоритм основан на последовательном разбиении множества вершин графов на изоморфные группы. Разбиение ведется с учетом локальных степеней вершин относительно ранее полученных изоморфных групп до получения поперечного соответствия, которое определяет подстановку изоморфизма или различное число вершин в случае неизоморфных графов. После установления изоморфизма графов подстановка интерпретируется как соответствие между элементами схем.

Структура системы автоматизированного проектирования РЭА

Развитие системы автоматизированного проектирования (САПР) РЭА включает сложный и разнообразный комплекс технических средств, в котором можно выделить две основные части: центральный вычислительный комплекс (ЦВК) и

интерактивная графическая минисистема [12]. Типичный состав технических средств развитой САПР приведен на рис. 8.13 и состоит из трех уровней: ЦВК на базе мощной ЭВМ, коммутатора периферийного оборудования и средств связи с рабочими местами разработчиков.

Рабочие места разработчиков в соответствии с этапами проектирования разделены на два типа:

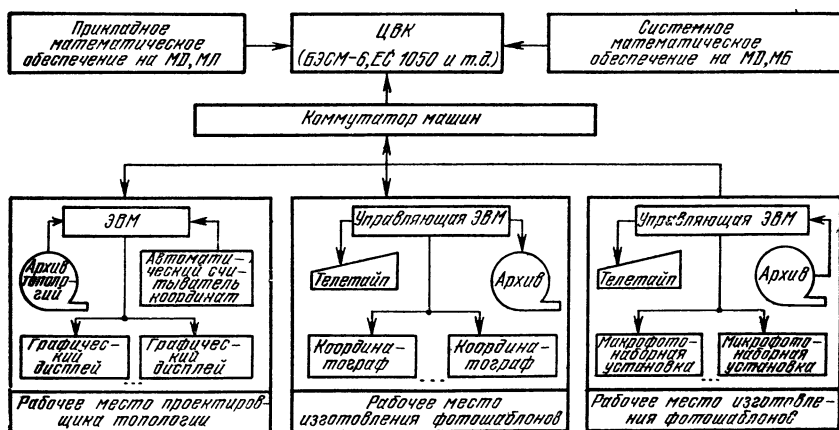
- рабочее место проектирования монтажного рисунка печатной платы и топологии БИС;

- рабочее место изготовления фотосаблонов печатных плат и БИС.

Прикладное математическое обеспечение САПР имеет блочную структуру (рис. 8.14) и состоит из нескольких самостоятельных подсистем, объединяемых в систему диспетчером. Управление подсистемами осуществляется местными блоками управления, которые имеют двухстороннюю связь с диспетчером, пультами управления и между собой.

Подсистема подготовки входной информации предназначена для проверки текстов кодирования исходных данных и их транслирования во внутреннее представление системы. Подсистема работает в двух режимах: 1) проверка текстов кодирования на синтаксис и семантику вводимого языка и 2) трансляция

Рис. 8.13 Состав технических средств САПР БИС



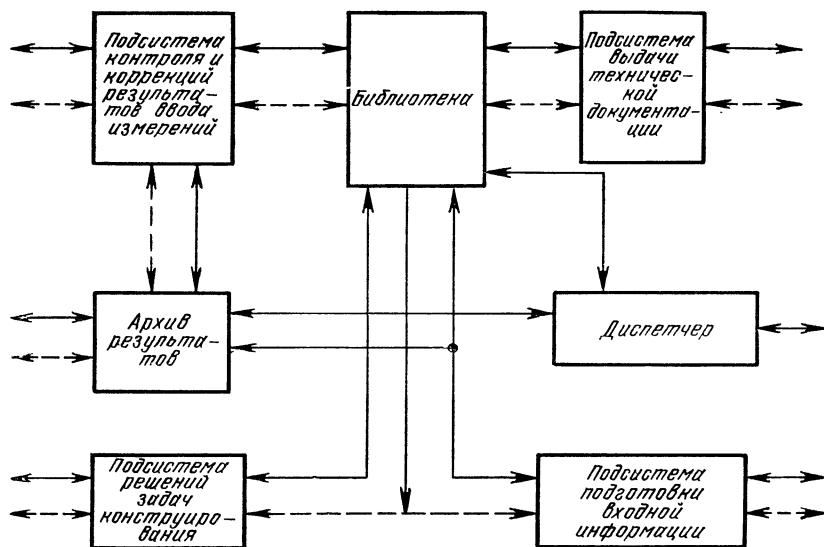


Рис. 8.14. Структура математического обеспечения САПР

синтаксически правильного текста, после чего в виде внутренних массивов текст поступает в библиотеку. Библиотека предназначена для хранения всей исходной информации и программ системы.

Подсистема решения задач конструирования состоит из набора программ алгоритмов конструирования. Необходимая информация поступает из библиотеки или внешних устройств ввода. При изменении исходных данных происходит частичное или полное перерешение задач. Архив результатов предназначен для хранения результатов конструирования. Подсистема коррекции и контроля результатов ввода изменений выполняет следующие основные функции: контролирует результаты проектирования (это необходимо, если при решении задач конструирования использовались эвристические алгоритмы), проверяет выполнение конструкторских и технологических требований, корректирует результаты, вводит изменения.

Подсистема выдачи технической документации формирует и выдает документы для производства и эксплуатации согласно описанию

документов и архива результатов. Диспетчер координирует действия подсистем, разделяет и выполняет по установленной очереди указания оператора, формирует программный состав системы. Автоматизированная система конструирования РЭА является мощным устройством повышения эффективности труда конструктора, если она модернизируется и пополняется новыми средствами конструирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрайтис Л. Б. Лучевой алгоритм для проведения печатных соединений. — Вопросы радиоэлектроники, Сер. 7, 1968, вып. 3.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Наука, 1968.
3. Базилевич Р. П. Основные принципы и обобщение алгоритмических методов гибкой трассировки межсоединений. — Усум, Киев, 1977, № 6.
4. Бальчитис А. А. Емкостная подобласть индукционных процессов преобразования потоков энергии. — Вильнюс: Минтис, 1973.

5. Батищев Д. И. Поисковые методы оптимального проектирования. — М.: Сов. радио, 1975.
6. Бахвалов Н. С. Численные методы. — М.: Наука, 1975.
7. Варламов Р. Г. Введение в теорию конструирования РЭА: Конспект лекций Института повышения квалификации руководителей и специалистов. — М.: Сов. радио, 1970.
8. Варламов Р. Г. Принципы использования методов теории подобия и моделирования в теории радиоаппаратостроения. — Кибернетику — на службу коммунизму! /Под ред. акад. А. И. Берга. — М.: Энергия, 1973, вып. 7.
9. Варламов Р. Г. Информационно-энергетическая модель радиоизмерительной аппаратуры. — Труды 5 респ. конф. по радиоизмерениям, Каунас-Вильнюс, 1973, т. 1.
10. Варламов Р. Г. Общие принципы построения комплексных систем оценки качества радиоизмерительной аппаратуры. — Труды 5 респ. конф. по радиоизмерениям, Каунас — Вильнюс, 1973, т. 1.
11. Варламов Р. Г. Феноменологический и полевой принципы построения компоновочных моделей подсистем. — Кибернетику — на службу коммунизму! /Под ред. акад. А. И. Берга. — М.: Энергия, 1976, вып. 8.
12. Васенков А. А., Казеннов Г. Г.; Шавлев Н. И. Структура технических средств автоматизированной системы проектирования БИС. — Микроэлектроника /Под ред. А. А. Васенкова. — М.: Сов. радио, 1976, вып. 9.
13. Вейник А. И. Термодинамическая пара. — Минск: Наука и техника, 1973.
14. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. — М.: Высшая школа, 1966.
15. Глушков В. М., Капитонова Ю. В., Летичевский А. А. Автоматизация проектирования вычислительных машин. — Киев: Наукова думка, 1975.
16. Гроднев И. И., Сергейчук К. Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. — М.: Связьиздат, 1960.
17. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. — М.: Физматгиз, 1961.
18. Каган Б. М., Каневский М. М. Цифровые вычислительные машины и системы. — М.: Энергия, 1976.
19. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. — М.: Физматгиз, 1962.
20. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теория упругости. — М.: Наука, 1965.
21. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1973.
22. Майоров С. А., Крутовских С. А., Смирнов А. А. ЭВМ: Справочник по конструированию. — М.: Сов. радио, 1975.
23. Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М. Применение графов при проектировании дискретных устройств. — М.: Наука, 1974.
24. Мучник Г. Ф., Рубашов И. Б. Методы теории теплообмена. Ч.1. — М.: Высшая школа, 1970.
25. Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Динамика неавтономных систем. — М.: Наука, 1967.
26. Применение вычислительных машин для проектирования цифровых устройств: Сб. статей/Под ред. Н. Я. Матюхина. — М.: Сов. радио, 1968.
27. Савченко Р. Г., Варламов Р. Г. Анализ подобия: Конспект лекций Института повышения квалификации руководителей работников и специалистов. — М.: Сов. радио, 1971.
28. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971.
29. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем. — М.: Наука, 1973.
30. Свешников А. Г., Тихонов А. Н. Теория функций комплексной переменной. — М.: Наука, 1967.
31. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Сов. радио, 1977.

32. Теория и методы автоматизации проектирования вычислительных систем. Пер. с англ. /Под ред. М. Брейера. — М.: Мир, 1977.
33. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1972.
34. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математичес-

9. Источники энергии питания

- кой физике. — М. — Л.: Гостехиздат, 1957.
35. Харкевич А. А. Теория преобразователей. — М.: Госэнергоиздат, 1948.
36. Штейн М. Е.; Штейн Б. Е. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1973.

9. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ПИТАНИЯ *

Основные аббревиатуры

А — аккумулятор
ВИП — вторичный источник энергии питания
ГБ — батарея гальванических элементов
ГЭ — гальванический элемент
ИП — источник энергии питания
МЦ — марганцево-цинковая система ГЭ
НК — никель-кадмиевая система А
ПИП — первичный источник энергии питания
РЦ — ртутно-цинковая (окиснортутная) система ГЭ
СЦ — серебряно-цинковая система А
ТЭ — термоэлектрический (элемент, преобразователь)
ТЭМ — термоэмиссионный (элемент, преобразователь)
ХИТ — химический источник тока (ГЭ, А и батареи)
ФЭ — фотоэлектрический (элемент, преобразователь)

9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИП

РЭА не может функционировать без источников энергии питания, на выходе которых получают электрическую энергию, последовательно преобразуемую в РЭА в энергию выходного сигнала с заданными информационными, энергетическими и физическими (световые, звуковые и т. п.) параметрами

Все ИП преобразуют энергию первичных или вторичных источников К первым относятся хими-

коэлектрические ГЭ, электрохими-коэлектрические А, биологоэлектрические (биохимические или биологические) элементы, атомноэлектрические (атомные или радиационные) и т. п., ко вторым — термоэлектрические, термоэмиссионные, магнитогидродинамические, фотоэлектрические, акустические, топливные, а также электрические сети постоянного и переменного тока

Особенностью ПИП является то, что они после приведения в эксплуатацию готовы выступать в роли автономных преобразователей исходного вида энергии, запасенной в массе рабочего вещества, в электрическую. Особенностью ВИП является то, что они для нормальной работы требуют внешних источников энергии (тепловой, потока рабочего тела в виде газа или жидкости, световой, акустической и т. п.). Используются ИП и смешанного типа, в которых источником входной энергии является ПИП, а выходной — ВИП. Их часто для краткости называют просто ВИП (транзисторные, тиристорные, вибрационные преобразователи, выпрямители и различные инверторы).

Низкое энергетическое совершенство РЭА (ее полный энергетический коэффициент полезного действия η редко имеет значение 0,05 ... 0,1, находясь чаще всего на уровне 10^{-3} ... 10^{-8} и ниже) требует тщательного выбора параметров ИП. Области целесообразного использования различных видов автономных ИП в зависимости от времени работы и отбираемой мощности можно выбрать по рис. 9.1. При уровнях

* Составитель Р. Г. Варламов,

мощности более $10^3 \dots 10^4$ Вт наиболее целесообразно (по возможности) использовать электрические сети, генераторы переменного тока и магнитогидродинамические генераторы.

Так как коэффициент η растет при увеличении $r_{нг}/r_{вн}$ (рис. 9.2), то целесообразно работать при больших значениях $r_{нг}/r_{вн}$. Однако при этом приходится мириться с невозможностью отбора больших мощностей (например, при $\eta = 0,96$ энергоемкость источника должна быть в 22 раза выше, чем отбираемая мощность), что требует относительно малых разрядных токов ИП.

Обобщенные характеристики ХИТ представлены на рис. 9.3. Срок службы дан в циклах (марганцево-цинковые ГЭ и ГБ тоже допускают до 10 циклов подзаряда), сохранение — в месяцах, самозаряд (за месяц при нормальной температуре) — в процентах. Механическая прочность, работоспособность в буферном режиме (только для аккумуляторов), степень вредности влияния и сложности ухода при эксплуатации даны по 5-балльной системе (5 — наивысшие прочность и работоспособность (в буферном режиме), наибольшие вредность или сложность ухода; 1 — очень низкая прочность, плохая работоспособность, практическая безвредность, очень простой уход). Стоимость дана в относительных единицах по отношению к усредненному МЦ элементу на один рабочий цикл.

Одной из определяющих характеристик ПИП является разрядная кривая которая связывает значение напряжения на выходе с относительной разрядной емкостью Q_p . Эти зависимости показаны на рис. 9.4, а. Все кривые, кроме 7, относятся к 10-ч режиму разряда. Разрядные кривые всех ХИТ, за исключением резервных и РЦ, имеют три характерных участка: начальный, на котором напряжение резко падает (повышается у резервных и РЦ), средний, относительно пологий, который можно аппроксимировать прямой линией, и конечный крутопадающий, соответствующий концу разряда. Поэтому для большей эффективности использования

ХИТ необходимо рассчитывать работу РЭА так, чтобы она обеспечивала требуемые параметры при $U_n/U_{кн} = 2 \dots 1,2$.

Стремление уменьшить объем ХИТ значительно удорожает стоимость эксплуатации. Например, уменьшение объема ХИТ в четыре раза увеличивает эксплуатационные расходы в пять раз, увеличение времени работы в 2,5 раза увеличивает расходы вдвое (рис. 9.4, б), так как в этих случаях ИП работает в невыгодных режимах.

Изменение свойств электролитов от температуры — причина изменения энергоемкости ХИТ (рис. 9.5).

Наиболее полно ХИТ характеризуются связями между параметрами W_m и P_m , W_p и P_p . На рис. 9.6, а, б приведены усредненные данные по системе в целом (внутри нее в зависимости от конструкции могут быть отклонения), позволяющие оценить пригодность того или иного ХИТ для заданных условий.

Для ВИП с фотоэлектрическими преобразователями определяющими факторами будут: плотность потока энергии излучения Солнца P_s и температура, что показано на рис. 9.7.

Основные электрические параметры ИП

Основными электрическими параметрами ИП являются: э. д. с. E — разность потенциалов на выходных зажимах источника, определяемая материалом электродов и концентрацией электролита (для ГЭ $E = 1,7 \dots 0,65$ В, для А — $2,5 \dots 1,36$ В); напряжение U — разность потенциалов на зажимах источника при включенном сопротивлении нагрузки $r_{нг}$ (часто рассматривают значения начального U_n и конечного $U_{кн}$ напряжений); внутреннее сопротивление ИП $r_{вн}$ — собственное сопротивление электродов и находящегося между ними электролита; срок хранения $t_{хр}$ — время, а течение которого ИП сохраняет свои исходные свойства до начала эксплуатации (время хранения, например, ГЭ или А без электролита); срок сохранности $t_{схр}$ — время, в течение которого сохраняется заданное значение напряжения; время рабо-

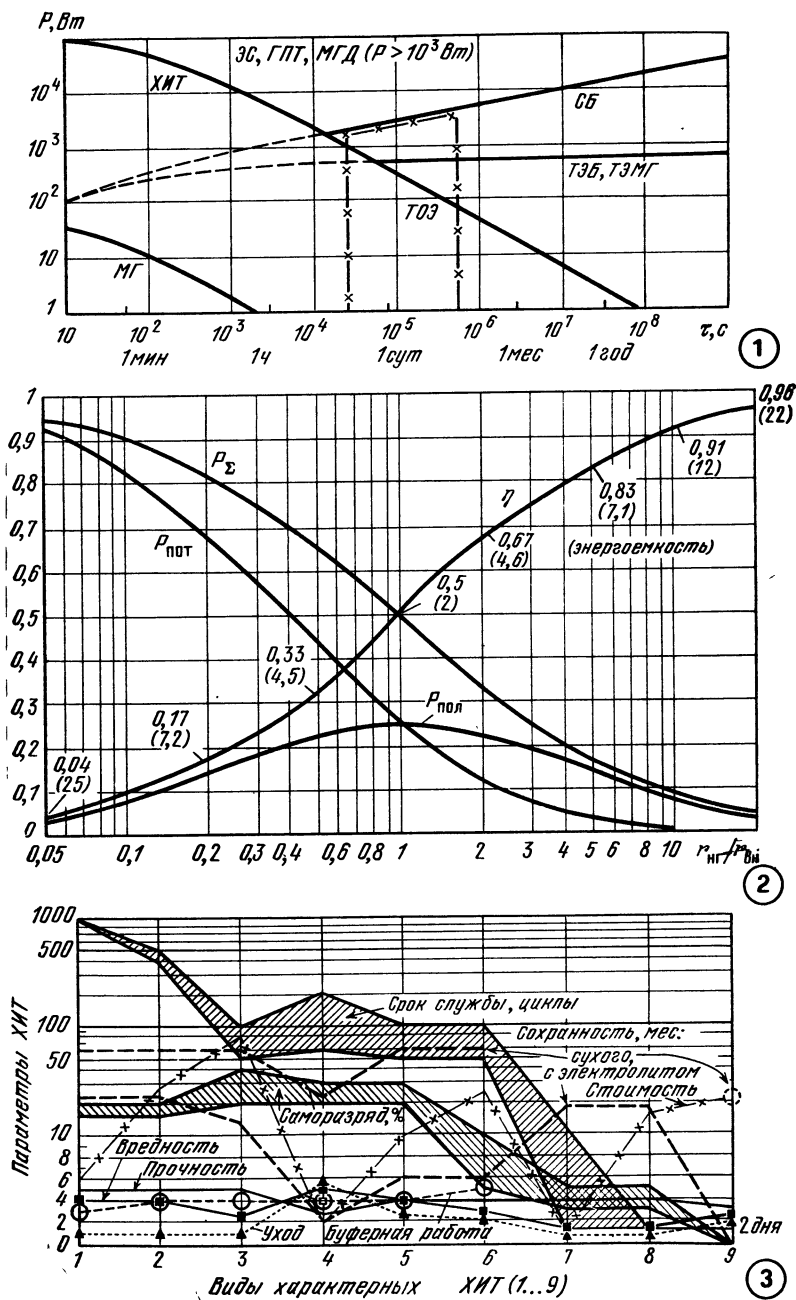


Рис. 9.1. Области целесообразного использования различных видов ИП:

МГ — мускульные генераторы; *ХИТ* — гальванические элементы и аккумуляторы; *ЭС*, *ГПТ* и *МГД* — электрические сети, генераторы переменного тока и магнитогидродинамические генераторы; *СБ* — солнечные батареи; *ТЭБ*, *ТЭМГ* — термоэлектрические батареи и термоэмиссионные генераторы; *ТОЭ* — топливные элементы

Рис. 9.2. Изменение коэффициента полезного действия η , полной (P_{Σ}) и полезной

($P_{\text{пол}}$) мощностей и мощности потерь ($P_{\text{пот}}$) при изменении отношения сопротивления нагрузки к внутреннему сопротивлению ИП ($r_{\text{нл}}/r_{\text{вн}}$)

Рис. 9.3. Обобщенные характеристики ХИТ: 1 — НК-аккумуляторы ламельные; 2 — НК-аккумуляторы безламельные; 3 — НК-аккумуляторы герметичные; 4 — кислотные; 5 — НЦ-аккумуляторы; 6 — СЦ-элементы; 7 — МЦ-элементы; 8 — РЦ-элементы; 9 — ММ (медно-магнелиевые) элементы

ты t_p — время, в течение которого гарантируются определенные значения параметров ИП (для ГЭ и А часто дается время работы свежего $t_{\text{р св}}$ ИП и в конце срока хранения $t_{\text{р хр}}$)

Обычно основные параметры ИП рассматривают во взаимосвязи с циклом $t_{\text{ц}}$ — временем, в течение которого происходит нормальный разряд (для большинства ГЭ только один цикл разряда, для некоторых — возможно частичное восстановление исходных свойств на несколько циклов, для А — несколько десятков или сотен циклов заряд—разряд).

Разряд ХИТ может быть непрерывным в течение заданного промежутка времени, прерывистым, когда ХИТ разряжается в течение периодически повторяющихся промежутков времени, и перемежающимся, когда источник тока непрерывно разряжается в режиме переменных нагрузок (включая режим разряд—заряд в стартерном режиме). Разрядные характеристики задаются либо при $r_{\text{нл}} = \text{const}$, либо при $I_p = \text{const}$.

Разрядная емкость $Q_p = I_p t_p$ представляет собой количество электричества, которое отдается во внешнюю цепь. Теоретическая разрядная емкость определяется числом Фарадея и массой активного вещества. Но так как практически

не все активное вещество используется полностью, то вводят коэффициент использования активного вещества $K_{\text{исп}}^{\text{акт}} = m Q_p / M$ (m — расход активных веществ, г/А·ч, M — полная масса активных веществ). $K_{\text{исп}}^{\text{акт}}$ всегда меньше единицы и зависит от гока I_p . Чем больше I_p , тем меньше Q_p и $K_{\text{исп}}^{\text{акт}}$. При $r_{\text{нл}} = \text{const}$ $Q = \sum (U_{\text{нл}} + U_{\text{кн}}) t_i / 2 r_{\text{нл}}$; при $I_p = \text{const}$ $Q = \sum I_p t_i$, где t_i — отрезки времени, характеризующие значениями $U_{\text{нл}}$ и $U_{\text{кн}}$ или разрядным током $I_{\text{р}}$.

Значения Q_p , W_p или P_p , отнесенные к массе или объему ИП, дают массовые или объемные удельные характеристики обобщенного характера

Изменения температуры окружающей среды ухудшают эксплуатационные параметры ИП: при ее понижении растет сопротивление $r_{\text{вн}}$, из-за чего падают U , Q_p , W_p и P_p , а при повышении увеличивается саморазряд, вследствие чего сокращаются $t_{\text{хр}}$, $t_{\text{с хр}}$, t_p , Q_p , W_p и P_p .

Невозможно одновременно обеспечить минимум потерь на внутреннем сопротивлении $r_{\text{вн}}$ ($\eta \rightarrow 1$) и максимум отдаваемой мощности ($\eta = 0,5$). При $r_{\text{вн}} \rightarrow 0$ мощность источника резко растет по сравнению со значениями мощности, от него отбираемой. При $r_{\text{нл}} = r_{\text{вн}}$ отбор мощности максимален, но при этом падение напряжения на $r_{\text{нл}}$ равно $0,5U$.

Зарядная емкость — количество электричества, которое должно быть введено в аккумулятор, чтобы обеспечить его разрядные характеристики (измеряется в ватт-часах или джоулях). Разрядная емкость ИП тем выше, чем больше в нем химически активных веществ и чем меньше поверхностная плотность тока электродов. Для ГЭ и ГБ рекомендуется выбирать $I_p \leq 0,01 \dots 0,5 Q_p$. При разрядных токах $0,08 \dots 0,2 Q$ разрядная емкость ГЭ и ГБ падает в два, у аккумуляторов и батарей из них (кроме СЦ) — в полтора раза. Поэтому при малых I_p предпочтительнее режим непрерывного, а при больших — прерывистого разряда.

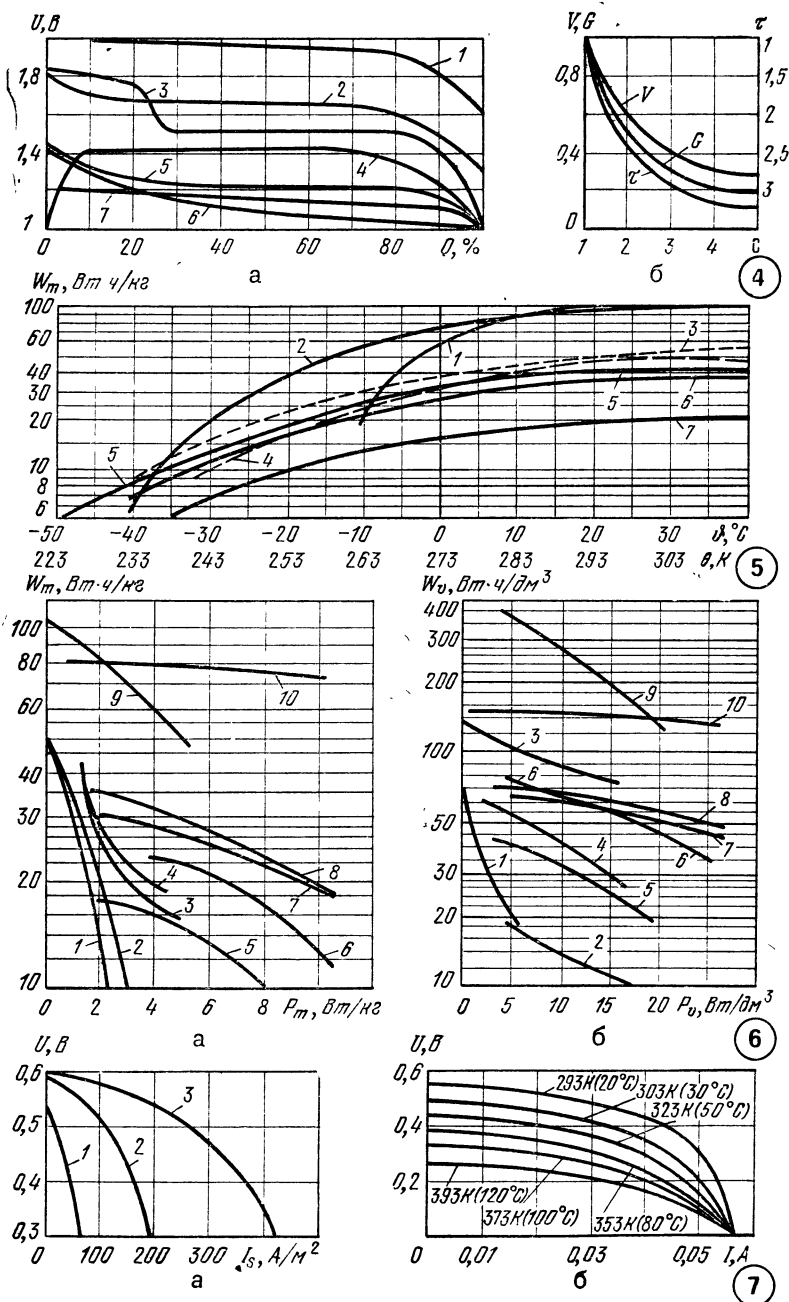


Рис. 9.4. Разрядные кривые аккумуляторов
 1 — кислотных, 2 — никель-цинковых, 3 — серебрено-цинковых, 4 — безламельных (никель-кадмиевых) и гальванических элементов, 5 — медно-магние-вых, 6 — герметичных марганцево-цинковых со щелочным электролитом, 7 — ртутно-цинковых (а) и связь стоимости C с объемом V , весом G и временем работы t ХИТ (б)

Рис. 9.5. Изменение отдачи для аккумуляторов

2 — серебрено-цинковых, 4 — никель-цинковых, 5 — безламельных никель-кадмиевых, 6 — кислотных радиоакальных, 7 — ламельных никель-кадмиевых и гальванических элементов (1 — ртутно-цинковых, 3 — герметичных марганцево-цинковых со щелочным электролитом) при изменении температуры окружающей среды

Рис. 9.6. Связь массовой (а) и объемной (б) удельных энергии и мощности для:

1 — МЦ элементы стаканчиковой конструкции, 2 — МЦ батареи галетной конструкции, 3 — МЦ герметичные элементы со щелочным электролитом, 4 — медно-магние-вые батареи, 5 — ламельные никель-кадмие-вые аккумуляторы, 6 — кислотные радио-акальные аккумуляторы, 7 — безламель-ные никель-кадмиевые аккумуляторы, 8 — прессованные никель-кадмиевые аккумуля-торы, 9 — ртутно-цинковые элементы, 10 — серебрено-цинковые аккумуляторы

Рис. 9.7. Отдача ФЭ преобразователей (на-пряжение U и плотность выходного тока I_s при различной облачности и перпендику-лярном падении лучей Солнца (а). Влия-ние температуры на выходное напряжение U и рабочий ток I (б):

1 — облачность 95%, поток энергии излу-чения Солнца 75 Вт/м², 2 — 50% 750 Вт/м², 3 — 0% и 1500 Вт/м²



Саморазряд — относительная ха-рактеристика потерь емкости: $C = 100 (Q_1 - Q_2)/Q_1$, где Q_1 и Q_2 —, первоначальная и конечная ем-кости ИП; t — время, за которое оценивается саморазряд, %

Разрядные энергия и мощность определяются так: $W_p = U_{cp} Q_p$
 $P_p = U_{cp} I_{cp}$

Степень использования емкости или энергии аккумуляторов зави-сит от режима работы и типа элек-трохимической системы. Для ха-рактерных режимов значения от-дачи емкости Q и энергии W (в про-центах) следующие: свинцовые ак-кумуляторы в стартерном режиме 40 и 30, в длительном режиме — 82 и 70; кадмиево-никелевые ламель-ные и безламельные — 67 и 50, дис-ковые — 50 и 42, цилиндрические — 70 и 58; серебрено-цинковые — 100 и 85.

Области целесообразного использования различных ИП

Особенности конструкции и при-нципа действия определяют следую-щие наиболее характерные област. применения тех или иных ИП. ГЭ и ГВ используются в качестве от-носительно дешевых одноразовых (за небольшим исключением) ИП. ГЭ и ГВ МЦ типа наиболее деше-вы и используются в бытовой аппа-ратуре, сигнализации и связи, РЦ — при малых разрядных токах, по-ложительной температуре и более высокой стоимости эксплуатации, резервные элементы — в основ-ном в специальной аварийно-спас-ательной морской РЭА, для стацио-нарных устройств автоматики и связи используются наливные ГЭ

Аккумуляторы и батареи из них используют при наличии зарядных устройств (в том числе автоматичес-ких). Кислотные АБ находят при-менение в стационарной РЭА и частично в возимой (стартерные автомобильные батареи)

Наиболее часто для питания РЭА применяются щелочные НК акку-муляторы: ламельные, если нет ог-раничений по объему и весу (они наиболее дешевы, но громоздки), смешанного типа (одна пластина ламельная, другая — безламель-ная) для бортовой РЭА (включая космическую); безламельные (они имеют длительный срок службы, надежны, работают при отрицатель-ных температурах и сохраняют свои качества в тяжелых клима-тических условиях) и таблеточные (они обеспечивают большие раз-рядные токи). Никель-цинковые и СЦ щелочные аккумуляторы кон-курируют с безламельными НК при условии меньших сроков служ-бы и работы только при положитель-ной температуре. В особых слу-чаях используют СЦ аккумулято-ры ампульного типа с подогревом, которые начинают действовать после разрушения ампулы с электро-литом и могут работать при отри-цательных температурах, так как имеют систему подогрева и тепло-защиты. Примерно такие же пока-затели и у серебрено-кадмиевых ак-кумуляторов.

При стабильных потоках солнечной радиации (околоэкваториальные области, космос) целесообразно использование ФЭ в виде солнечных батарей. При наличии дешевых или попутных источников тепла, а также в автономных устройствах, расположенных в труднодоступных местах, целесообразно использовать ТЭ и ТЭМ преобразователи в сочетании с газовыми горелками или радиоизотопными источниками тепла.

Стационарную РЭА наиболее удобно питать от сетей постоянного или переменного тока. Более частные и конкретные рекомендации по ИП даются в описаниях соответствующих групп.

Электрические сети и генераторы

В соответствии с ГОСТ 21128—75 электрические сети общего назначения постоянного и переменного тока частоты 50 Гц должны иметь следующие значения напряжений: постоянного тока 6, 12, 24, 36, 48, 60, 115, 220 и 440, однофазного переменного тока 12, 24, 36, 127, 220 и 380 и трехфазного переменного тока 36, 220, 380 и 660 В (междуфазное напряжение).

Выходное междуфазное напряжение генераторов и трансформато-

ров трехфазного напряжения должно быть 230, 400 и 690 В однофазного тока — 133 и 230 В. Напряжение источников питания постоянного тока (для сетей 110, 220 и 440 В) должно быть 115, 230 и 460 В соответственно.

Ряды номинальных токов (ГОСТ 6827—76) в диапазоне 0,1 ... 8000 А выбираются по ряду предпочтительных чисел R10 (0,1, 0,12, 0,16, 0,2, 0,25, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8 и т. д.), причем для значений 10 ... 6300 А предпочтительны значения токов по ряду R5 (10, 16, 25, 40, 63 и т. д.).

Номинальные частоты сетей переменного тока и допуска на них выбираются по ГОСТ 6697—75. Для частоты 50 Гц принят допуск ± 2 Гц при стабильности напряжения $\pm 10\%$.

Для самолетов и вертолетов используют бортовые сети повышенной частоты и постоянного тока (ГОСТ 19705—74). Сети переменного тока (частоты 400 ± 20 Гц) — трехфазные, трехпроводные (соединение звездой), напряжением 200/115 В. Фазное напряжение в нормальном режиме 108 В. В трехфазных сетях переменной частоты частота при работе может меняться в пределах 320 ... 1050 Гц. Напряжение и соединения аналогичны сетям

Таблица 91

Бензо- и электроагрегаты, электростанции (рис. 9.8)

Тип	$P_{\text{ном}}$ кВт	$U_{\text{лн}}$, В	$Q_{\text{топ}}$ кг/ч	Габариты, мм	m , кг
Бензоагрегат: АБ-1-0/230	1	230	0,86	675×395×535	73
Электроагрегаты:					
АД-5-Т-230 (рис. 9.8, а)	5	230; 400	1,32	1300×760×1130	700
АД-8-Д/1В	8	400	2,06	1440×850×1100	750
АД-16/1В	16	400	5,4	1900×1010×1950	1060
АСДА-2-20 (рис. 9.8, б)	20	400	5,0	2000×850×1350	1300
АД-30Т/400-А1Р-У2	30	400	—	2360×1074×1350	1385
АСДА-2-50	50	400	12,2	2450×860×1400	2020
Электростанции:					
ДЭС-60Р	60	230; 400	15,0	2660×828×1950	2100
ЭСД-16-Т/230-А1ВП-У2	16	230	—	3943×2100×2210	2105
ЭСД-100/Т400-А1РК (рис. 9.8, в)	100	400	29,8	6100×2500×2930	5650

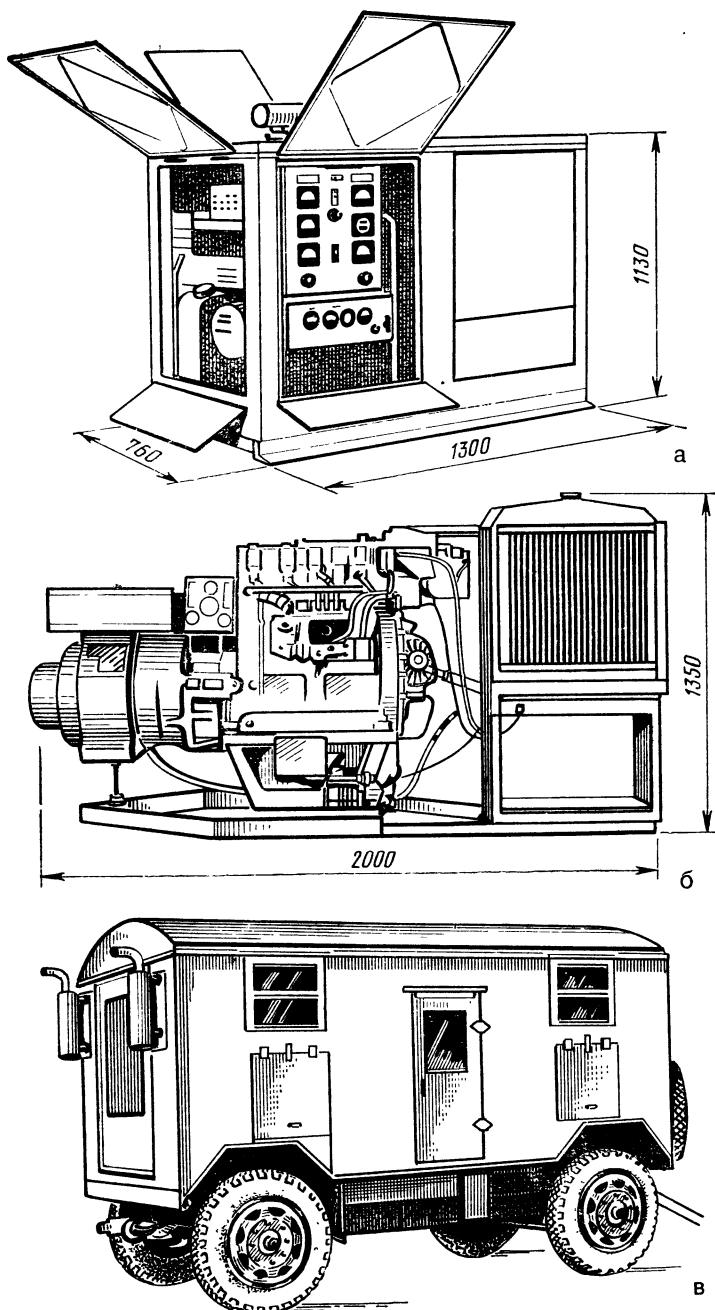


Рис. 9.8. Электроагрегаты АД-5-Т230 (а) и АСДА-2-20 (б) и электростанции ЭСД-100,Т 400-А1РК (в)

постоянной частоты. Однопроводные бортовые сети переменного тока постоянной частоты имеют номинальное напряжение 115 В (108 ... 120) при частоте 400 ± 20 Гц, напряжение в сетях переменной частоты 200 В (187 ... 207) при частоте 320 ... 1050 Гц.

Сети постоянного тока на самолетах и вертолетах однопроводные с номинальным напряжением 27 В и его колебаниями в нормальном режиме в пределах 24 ... 29 В.

В кочевом сельском и промысловом хозяйствах, на строительстве гидроэлектростанций, линий электропередач, газопроводов, лесозаготовках, для кино и телевидения, в учреждениях связи, банках, больницах и вычислительных центрах (в качестве резервных и аварийных источников электроэнергии) используют бензоагрегаты, электроагрегаты и электростанции. Они отличаются высокой надежностью и топливной экономичностью (окружающая температура $233 \dots 323$ К ($-40 \dots +50^\circ$ С), высота над уровнем моря до 1000 м, тропическая влажность).

Данные наиболее распространенных устройств такого типа приведены в табл. 9.1 и рис 9.8. Все они работают с коэффициентом мощности 0,8, имеют частоту вращения ротора генератора 1500 мин^{-1} частоту переменного тока 50 Гц.

9.2. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И БАТАРЕИ

Элементы и батареи системы МЦ стаканчикового и галетного типов

ГЭ системы цинк—двуокись марганца с соевым электролитом выполняются в виде стаканчиковых сосудов круглой или квадратной формы или прессованных галетных элементов в виде параллелепипедов. В галетных элементах лучшее использование объема и поэтому их удельные характеристики в 2 ... 3 раза лучше стаканчиковых. Они используются в виде отдельных элементов или батарей.

ГЭ и ГБ имеют свои условные обозначения, состоящие из букв и цифр или торговые названия. Пер-

вые цифры указывают напряжение в вольтах, буквы обозначают название (А — анодная, Н — начальная, С — сеточная, Ф — фонарная, Р или РЗ — радиозондовая, С — слуховая, Т — телефонная, П — приборная, Ч — элемент для электрических часов, ЭВ — для электронных ламп-вспышек), электрохимическую пару (например, МЦ — марганцево-цинковая, РЦ — ртутно-цинковая и т. п.), тип конструкции (Г — галетная, В или ВД — с воздушной деполяризацией), температурные условия работы: у — универсальная, х — хладостойкая, без обозначения — летняя; последние цифры указывают емкость в ампер-часах или число часов работы (буква «ч»). Элементы тропического исполнения имеют индекс «Т». Например, обозначение 70-АМЦГ-у-1,3 расшифровывается так: напряжение 70 В, анодная, марганцево-цинковой системы, галетной конструкции, универсального применения емкостью 1,3 А·ч. Получили распространение торговые названия «Крона», «Марс», «Маячок» и т. п. Входящие в практику номерные обозначения определяют габариты конструкции, электрохимическую систему и порядок соединения элементов в батарее. Первые две цифры характеризуют габариты конструкции и электрохимическую систему: марганцево-воздушно-цинковая система имеет номера 01 ... 09; марганцево-цинковые стаканчиковые элементы прямоугольной формы — 10 ... 19; марганцево-цинковые стаканчиковые цилиндрические — 20 ... 49; марганцево-цинковые галетные — 50 ... 79. Третья цифра — шифр высоты элемента, после которой может стоять буква, определяющая температурный режим работы: «у» или «т». Число последовательно соединенных элементов батарей определяется цифрой, стоящей перед обозначением элемента (например, 3336 — батарея для карманного фонаря из трех последовательно соединенных элементов 336). Число параллельно соединенных элементов в батарее пишется через тире после обозначения элемента (например, 336—3).

Таблица 9.2

Цилиндрические стаканчиковые (без футляров)
МЦ элементы (рис. 9.9, а)

Тип	$d \times l$, мм	V , см ³	Q_p , А·ч
283	10×20	1,6	0,1
286	10×44	3,5	0,23
312	14×25	3,9	0,24
314	14×38	5,9	0,36
316	14×50	7,7	0,48
326	16×50	10	0,67
332	20×37	11,6	0,77
336	20×59	18,5	1,2
343	24×49	22,2	1,5
373	32×61	49,1	3,2
374	32×75	60,3	4
375	32×81	65,1	4,3
376	32×91	73,2	4,8
425	40×100	126	8,3
465	51×125	255	17

Таблица 9.3

Прямоугольные и квадратные стаканчиковые (без футляров)
МЦ элементы (рис. 9.9, б)

Тип	Габариты, мм	V , см ³	Q_p , А·ч
045	50×50×123	308	52
076	72×72×161	835	150
125	29×29×76	64	7
145	37×37×91	124	11
165	50×50×123	308	38
185	85×85×200	1445	280

Таблица 9.4

Галетные МЦ элементы для батарей (рис. 9.9, в)

Тип	Габариты, мм	V , см ³	Q_p , А·ч	m , г
522	15×15×3	0,68	0,05	1,6
562	24×14×2,8	0,94	0,08	2,4
564	24×14×6	2,02	0,17	5,1
615	23×23×6	3,17	0,27	8,3
633	32×21×3,3	2,22	0,19	5,8
635	32×21×5,3	3,6	0,31	9
653	32×32×3,6	3,7	0,32	9,6
682	43×43×5,6	10,3	0,89	27
683	43×43×6,4	11,9	1,03	30
684	43×43×7,9	14,6	1,26	38
724	54×37×5,5	11	0,95	29
727	54×37×7,9	15,8	1,41	42
735	60×45×10,4	28,1	2,44	74

Таблица 9.5

Эксплуатационные характеристики наиболее распространенных цилиндрических стаканчиковых МЦ элементов с солевым электролитом и батарей (рис. 9.9, а и ж)

Тип	$U_{\text{н. В}}$ ($r_{\text{нг}}$ Ом,	$U_{\text{кв. В}}$	рвс ч	охр. ч	$r_{\text{нг}}$ Ом	хр. мес	т. г
283	1,5	0,9	28	20	300	3	4,5
286	1,48 (50)	1,0	20	16	200	3	10
	1,48 (50)	0,9	60	48	300	3	
412	1,52	0,9	60	48	300	6	10
314	1,52 (50)	1,0	38	30	200	6	15
	1,52 (50)	0,9	75	60	300	6	
316	1,52 (50)	1,0	60	48	200	9	20
	1,52 (50)	0,9	130	100	300	9	
«Уран»	1,52 (50)	1,0	70	—	200	6	20
	1,52 (50)	0,9	180	—	300	6	
326	1,52 (50)	1,0	100	75	200	9	25
	1,52 (50)	0,9	200	150	300	9	
332	1,4	—	6	4,8	—	6	30
	1,4	0,75	1,5	1,2	5	6	
336	1,4	—	10	7	—	6	45
	1,4	0,75	3,5	2,8	5	6	
343	1,55 (10)	0,85	12	9	20	18	52
	1,55 (10)	0,75	4,2	3,3	5	18	
373	1,55 (10)	0,85	40	28	20	18	115
	1,55 (10)	0,75	18	12	5	18	
«Орион»	1,6 (10)	0,85	45	—	20	12	115
	1,6 (10)	0,75	27	—	5	12	
374	1,55 (10)	0,85	50	35	20	18	130
	1,55 (10)	0,75	22	12	5	18	
376	1,55 (10)	0,85	65	46	20	18	165
	1,55 (10)	0,75	28	19	5	18	
2,9-НМЦ-1,5 ч	2,9	2,3	1,6	1	40	10	110
3,0-МЦ-у-110	3,5	1,5	385	308	7	12	5300
3336Л	3,7	2,25	2	1,3	15	6	150
3336У	4,1	2,25	3	2	15	8	150
4,2-САМЦ-5ч	4,2	2	5	2,5	10	6	400
«Метеор»	6,0	—	20	12	13	10	2200

Примечания: 1. Элементы 316 и 373 выпускаются по набивной технологии под марками «Уран» и «Орион», емкость их при тех же габаритах на 30...40% выше. 2. При $r_{\text{нг}}$ 200 Ом (элементы 286...326) и 20 Ом (элементы 332...376) режимы разряда могут быть непрерывными. При $r_{\text{нг}}$ 300 Ом (элементы 286...326) допускается разряжать по 12 ч ежедневно. У элемента 332 при $r_{\text{нг}}=5$ Ом периодичность работы 5 мин в день, 5 дней в неделю; у элементов 336 и 343 — 10 мин соответственно и 5 дней и у элементов 373, 376 — 30 мин и 5 дней (в неделю). 3. Батареи типов 3336Л и 3336У выпускаются по ГОСТ 2583—70. Их разность — батареи «Планета 1» и «Планета 2» — имеют отдачу в 2...3 раза выше.

Таблица 9.6

Эксплуатационные характеристики прямоугольных и квадратных
стаканчиковых МЦ элементов (рис. 9.9, б и г)

Тип	U_H , В	U_{KH} , В	$t_{pсв}$, ч	$t_{pхр}$, ч	r_{Hr} , Ом	$t_{хр}$, мес	m , г
045 (1,35-ТМВЦ-50)	1,3	0,7	550	400	10	15	600
076 (1,3-НВМЦ-150)	1,3	0,7	820	600	5	15	1700
145л (1,48-ТМЦ-7,5)	1,48	0,85	160	130	20	12	300
145у (1,6 ТМЦ-у-8)	1,6	0,85	160	130	20	18	300
165л (1,5 ТМЦ-22,5)	1,5	0,85	550	400	20	21	700
165у (1,6 ТМЦ-у-28)	1,66	0,85	550	400	20	21	700
1,28-НВМЦ-525	1,28	0,8	1100	500	2	15	6500

Примечания: 1. Элементы предназначены для питания устройств связи и автоматики. 2. Из-за дополнительной наружной изоляции размеры элементов 045...165 больше указанных в табл. 9.3 (045— $57 \times 57 \times 132$; 076— $82 \times 82 \times 176$; 145— $42 \times 42 \times 102$; 165— $57 \times 57 \times 137$). Размеры элемента 1,28-НВМЦ-525 $160 \times 160 \times 185$, Q_p 525 А·ч. Длина выводов (кроме 1,28-НВМЦ-525-П, у которого выводы присоединены к гнездам специальной панели) 40...130 мм. 3. Элементы 045 и 075 изготавливаются по ГОСТ 296—76, элементы 145 и 165 — по ГОСТ 3316—74, а 1,28-НВМЦ-525 и 1,28-НВМЦ-525-П по ГОСТ 7534—68. Рабочая температура θ элементов 045; 076 и 1,28-НВМЦ 263...313 К ($-10...+40^\circ\text{C}$), элементов 145л и 165л 256...333 К ($-17...+60^\circ\text{C}$), 145у и 165у 233...333 К ($-40...+60^\circ\text{C}$). При минимальной рабочей температуре емкость равна $(0,7...0,9)Q_{ном}$.

Таблица 9.7

Эксплуатационные характеристики наиболее распространенных
цилиндровых батарей МЦ системы

Тип	U_H , В	U_{KH} , В	I_p , мА	Q , А·ч	$t_{хр}$, мес	Габариты, мм	m , г
4,5-ПМЦГ-0,7	4,5	3,0	350	0,1	12	$55 \times 40 \times 45$	350
5-ПМЦГ-1,5 ч	5	3	35	0,05	4	$42 \times 36 \times 28$	65
«Крона-1Л»	9	5,6	10	0,25	6	$26 \times 16 \times 49$	35
11,5-ПМЦГ-у-1,2	11,5	6,5	14	1,3	8	$56 \times 50 \times 68$	330
13-АМЦГ-0,5	13	8	1	0,5	12	$70 \times 52 \times 42$	250
22,5-ПМЦГ-60 ч	22,5	15	2	0,1	6	$79 \times 35 \times 24$	100
48-ПМЦГ-64 ч	49	30	3,4	0,2	8	$48 \times 39 \times 95$	250
60-ПМЦГ-0,15	60	40	1,4	0,15	6	$78 \times 40 \times 68$	250
75-ПМЦГ-80 ч	75	50	2,6	0,2	6	$52 \times 42 \times 142$	380
80-АМЦГ-80 ч	80	50	4	0,32	10	$71 \times 46 \times 75$	400
87-ПМЦГ-у-0,15	87	50	3	0,15	12	$73 \times 25 \times 150$	450
100-ПМЦГ-у-0,05	100	70	1,2	0,05	12	$77 \times 28 \times 77$	250
105-ПМЦГ-0,05	105	70	1,4	0,05	6	$77 \times 28 \times 180$	180
200-ПМЦГ-10 ч	200	125	1	0,01	6	$65 \times 37 \times 47$	135
ГБ-400-0,01	400	250	1	0,01	6	$87 \times 63 \times 35$	250
3-НМЦГ-8 ч	3	2,2	450	4,5	12	$95 \times 62 \times 145$	1,4
18-ПМЦГ-0,3	18	12	10	0,3	12	$75 \times 43 \times 52$	500
18-ПМЦГ-0,7	18	12	8	0,7	12	$50 \times 58 \times 115$	550
23-ПМЦГ-180 ч	23	15	11	2	24	$65 \times 54 \times 135$	800

Продолжение табл. 97

Тип	U_H , В	U_{KH} , В	I_p , мА	Q , А·ч	t_{xp} , мес	Габариты, мм	m , г
25-ПМЦГ-0,6	25	16	75	0,6	12	95×64×82	650
25-ПМЦГ-0,8	25	16	40	0,8	12	98×50×75	800
90-ПМЦГ-0,15	90	63	2	0,15	7	95×45×75	450
120-ПМЦГ-0,15	120	82	1,4	0,15	7	38×70×150	580
120-АМЦГ-60 ч	120	56	13	0,27	6	94×40×240	1,3
225-ПМЦГ-80 ч	225	150	3	0,2	6	86×63×147	1,0
ГБ-300 № 4	335	220	1	0,05	4	80×60×145	650
315-ПМЦГ-80 ч	315	210	2,6	0,2	6	90×80×155	1,3
450-ПМЦГ-0,06	450	302	1	0,06	6	50×74×162	890

Примечание. Батареи предназначены для питания малогабаритной РЭА, аппаратуры радиозондов, бытовой РЭА, приборов и ламп-вспышек

Таблица 98

Эксплуатационные характеристики наиболее распространенных пугоничных и цилиндрических МЦ элементов со щелочным электролитом и повышенной отдачей (рис. 9.9, а, б)

Тип	U_H , В	U_{KH} , В	I_p , мА	Q , А·ч	t_{xp} , мес	Габариты, мм	m , г	r_{Hr} , Ом
ЧМЦ-2	1,63	1,4	0,3	0,06	18	∅11,1×8,4	1,5	—
ЧМЦ-н	1,5	—	0,1	0,05	18	∅11,1×3,2	1,5	—
МЦ-1К	1,46	0,8	2,5	0,11	15	∅15,5×6,6	4,1	500
МЦ-2К	1,46	0,8	2,5	0,3	15	∅21,0×7,4	8,2	500
МЦ-3К	1,46	0,8	10	0,4	15	∅25,0×8,4	14,5	117
МЦ-4К	1,46	0,8	10	1,0	15	∅31,1×9,4	21,5	117
МЦ-7-1	1,45	1,0	200	7	15	80×35×63	300	7,5
МЦ-7-П	1,45	1,0	200	7	15	40×40×100	300	7,5
А-312	1,52	0,9	30	0,85	—	∅14×25	10	40
А-314	1,52	0,9	30	1,3	—	∅14×38	15	40
А-316	1,52	0,9	30	1,7	—	∅14×50	25	40
А-332	1,4	0,75	22	2,7	—	∅20×37	30	50
А-336	1,4	0,75	220	4,2	—	∅20×59	55	5
А-343	1,55	0,75	260	5,2	—	∅26×49	70	5
А-373	1,6	0,75	270	11,2	—	∅32×51	125	5

Примечания: 1. Часовые элементы ЧМЦ заключены в латунные герметичные золоченые корпуса. Элемент ЧМЦ-2 обеспечивает стабильное напряжение $U=1,48$ В в течение всего срока службы. 2. Элементы А-312...А-373 используются для питания малогабаритной РЭА фонарей, электробритв, а также в случаях, когда требуется повышенный срок службы большой разрядный ток и нет ограничений на стоимость эксплуатации. 3. Элементы А312-Экстра...А373-Экстра предназначены для работы в тяжелых условиях эксплуатации. Их емкость примерно в пять раз выше, чем у однотипных ГЭ с соевым электролитом. Допускают работу на нагрузку 2 или 5 Ом (у А373-Экстра r_{Hr} 1 или 3 Ом) при разрядных токах 0,7 и 0,3 А (А373-Экстра 1,4 и 0,5 А). 4. Фирменные названия элементов «Карат» (А314-Экстра), «Квант» (316), «Ореол» (332), «Свет» (336), «Салют» (343) и «Мир» (373). 5. Емкость элементов ВА-316 Люкс...ВА 373-Люкс в три раза больше, чем у ГЭ серии «Экстра». Типоразмеры всех этих элементов одинаковы, но стоимость отличается в 1,5...4 раза.

ГЭ (без футляров) МЦ системы имеют цилиндрическую, квадратную, прямоугольную или галетную конструкцию. Э. д. с. элементов летнего типа 1,55 В (они работоспособны в интервале температур 253 ... 333 К ($-20 \dots +60^\circ \text{C}$), универсального 1,7 В (работоспособны в интервале температур 233 ... 333 К ($-40 \dots +60^\circ \text{C}$)).

Обозначения и размеры элементов устанавливаются ГОСТ 11100—70. В табл. 9.2 ... 9.4 приведены основные геометрические параметры этих элементов и расчетные значения Q_p при малых разрядных токах ($I_p \leq 0,01Q_p$) и обычном исполнении с солевым электролитом для оценочных расчетов.

При температурах 253 ... 233 К ($-20 \dots -40^\circ \text{C}$) отдаваемая емкость падает до $0,1Q_{\text{ном}}$, в конце срока хранения при нормальной

температуре — до $(0,7 \dots 0,8)Q_{\text{ном}}$. Элементы МЦ с солевым электролитом выдерживают удары с ускорением до $120g$ и вибрации $2 \dots 4g$ в диапазоне $10 \dots 70$ Гц. Эксплуатационные разрядные характеристики ГЭ и ГБ с солевым электролитом приведены в табл. 9.5 ... 9.7.

Элементы и батареи системы МЦ со щелочным электролитом

Благодаря улучшенной конструкции эти источники тока имеют в 3 ... 5 раз больший срок службы, чем элементы с солевым электролитом, у них также больше разрядный ток и срок сохранности (табл. 9.8, 9.9). Элементы и батареи системы МЦ допускают 10 ... 25 перезарядов с отдачей емкости, равной 0,1 емкости первого разряда.

Таблица 9.9

Эксплуатационные характеристики элементов и батарей со щелочным электролитом и элементов большой емкости резервных наливных (рис. 9.9, е, ж, и)

Тип	U_H , В	$U_{\text{нн}}$, В	I_p , мА	Q , А·ч	Габариты, мм	m , кг	$\tau_{\text{нг}}$, Ом
«Крона ВЦ»	9	5,6	8	0,7	16×26×49	0,04	900
«Пионер»	9	5,6	17	10	54×108×140	0,9	435
«Полет»	9	5,6	17	35	105×116×206	3,2	435
«Синичка»	9	5,6	40	2,6	24×72×126	0,25	200
«Финиш»	9	5,6	10	0,9	21×26×62	0,06	900
«Рубин-2»	4,5	2,5	230	2,5	22×63×65	0,2	15
МЦ5Н	1,55	1 (0,8)	10	9 (9,5)	45×31×85	0,18	120
			250	7 (8)			5
МЦ10Н	1,55	1 (0,8)	100	15 (18)	50×35×115	0,3	12
			1000	11 (15)			1,2
МЦ25Н	1,55	1 (0,8)	250	50 (60)	51×66×162	0,87	5
			1000				1,2
МЦ100Н	1,55	1 (0,8)	100	180 (220)	114×62×209	2,7	12
			3000	150 (180)			0,4
			9000	110 (120)			0,14
МЦ600Н	1,55	1 (0,8)	500	650 (850)	168×118×265	10,2	2,5
			6000	600 (800)			0,2
МЦ1500Н1	1,55	1 (0,8)	300	1800 (1900)	180×170×500	32	4
			7000	1650 (1800)			0,18

Примечания: 1. Время разряда соответствует прерывистому режиму для батарей и непрерывному для элементов. Батарея «Финиш» допускает 25 перезарядов ($t_p=10$ ч). 2. Время сохранности $t_{\text{хр}}$ МЦ элементов в сухом состоянии 5 лет, а в залитом — 6 мес., батарей «Крона ВЦ» — 9 мес., «Пионер» и «Полет» — 12 мес. 3. Батарея «Крона ВЦ» выпускается по ГОСТ 17659—72.

МЦ элементы пуговичного типа используются в часах (ЧМЦ-2 и ЧМЦ-п), в слаботочных устройствах (МЦ1...МЦ4). Элементы «Карат» (А-314), «Квант» (А-316), «Ореол» (А-332), «Свет» (А-336), «Салют» (А-343-4) и «Мир» (А-373) предназначены для питания различной РЭА, игрушек, фонарей и т. п. МЦ и ВЦ батареи предназначены, в первую очередь, для питания транзисторных приемников, портативных магнитофонов и телевизоров, они могут использоваться и в специальной РЭА. Внешний вид и габариты наиболее распространенных типов приведены на рис. 9.9.

Наливные и резервные элементы и батареи

Медно-магниевые и свинцово-магниевые элементы и батареи используются для питания РЭА радиозондов, геофизической и аварийной морской и речной аппаратуры (табл. 9.10, 9.11). Они установлены в прямоугольных корпусах без дна (рис. 9.9, л) Выводы выполнены в виде проводников с колодками, штырей или зажимов. Минимальное время сохранения работоспособности ГЭ и ГБ после их активации не более

Рис. 9.9. Габаритные чертежи наиболее распространенных гальванических элементов:

а — цилиндрических, б — прямоугольных, в — галетных, г — прямоугольных и квадратных с проволочными выводами или с разъемом типа 1 28-НВМЦ, д — пуговичных, е — МЦ-100, ж — 3336, и — «Крона», к — ВДЖ, л — МХМ. «Маячок» и ПМХМ

суток. Характерной особенностью этих ИП является выпуклая форма разрядной кривой, обеспечивающая достаточно стабильное напряжение разряда в интервале 10...90% времени работы. Свинцово-магниевые элементы ПМХС более устойчивы к воздействию кислорода воздуха, что облегчает их хранение в незалитом состоянии (без герметизации, как у медно-магневых элементов).

Для аппаратуры, работающей в стационарных условиях и при пониженной температуре [до 263 К (-10°C)], целесообразно применять наливные медно-окисные элементы типов МОЭ и МОЭМ. Элементы МОЭ в сухом виде имеют срок сохранности $t_{\text{хр}}$ до 1, 5 лет, а МОЭМ до 3 лет (в залитом состоянии — 1 мес). Их рабочее напряжение достаточно стабильно держится в условиях эксплуатации на уровне 0,65 В, а потеря емкости при тем-

Таблица 9.10

Эксплуатационные характеристики наливных элементов с воздушной деполаризацией (ВД) и медноокисных (МО) (рис 9.9, к)

Тип	$U_{\text{н}}, \text{В}$	$U_{\text{кн}}, \text{В}$	$I_{\text{р}}, \text{мА}$	$Q, \text{А} \cdot \text{ч}$	$t_{\text{хр}}, \text{мес}$	Габариты, мм	$m, \text{г}$
ВД-300	1,4	1,0	500	300	12	$186 \times 110 \times 312$	4500
ВД-500	1,4	1,0	750	500	12	$190 \times 165 \times 345$	6200
ВД-1000	1,4	1,0	1500	1000	12	$222 \times 178 \times 446$	10600
ВДЖ-50	1,0	0,5	250	50	12	$\varnothing 110 \times 30$	520
ВДЖ-400	1,0	0,5	500	400	12	$\varnothing 221 \times 75$	5000
МОЭ-250	0,9	0,5	500	250	36	$180 \times 170 \times 350$	3800
МОЭ-500	0,9	0,5	1000	500	36	$168 \times 193 \times 350$	7100
МОЭ-1000	0,9	0,5	2000	1000	36	$232 \times 180 \times 460$	12500
МОЭМ-300	0,84	0,55	1000	300	36	$133 \times 133 \times 212$	4400
МОЭМ-800	0,84	0,55	1500	800	36	$200 \times 200 \times 237$	8500
МОЭМ-1000	0,84	0,55	2200	1000	36	$225 \times 180 \times 460$	11000
3-ХС-15	5,3	4,7	3000	15	24	$175 \times 92 \times 123$	4000

Примечание. Элементы ВДЖ-50, ВДЖ-400 и 3-ХС-15 поставляются залитыми электролитом, остальные — в сухом виде, значение их массы дано без электролита

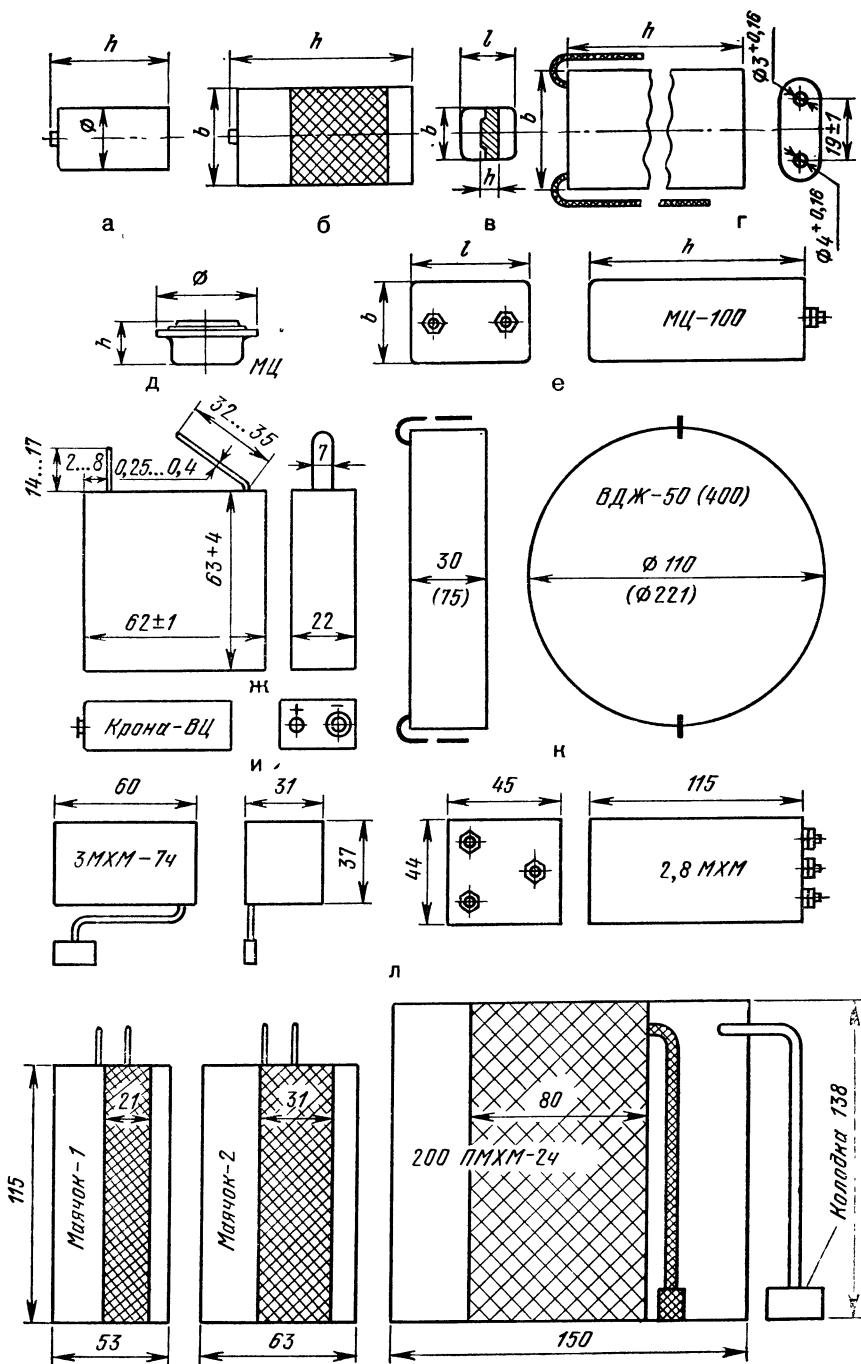


Таблица 9.11

Эксплуатационные характеристики резервных батарей (рис. 9.9, а)

Тип	$U_H, \text{В}$	$U_{KH}, \text{В}$	$I_p, \text{мА}$	$Q, \text{А·ч}$	$t_{xp}, \text{мес}$	Габариты мм	м. г
3-РЗН-МЦ-2ч	2	1,5	100	0,2	48	39×39×36	55
21-РЗА-МЦ-2ч	21	15	2	0,002	48	62×39×36	95
2,8МХМ	3	2,6	700	1,2	24	44×45×115	200
3-МХМ-7ч	3	2,4	14	1	24	37×31×60	80
«Маячок-1»	2,95	1,8	160	1,6	42	21×48×100	85
«Маячок-2»	2,95	2,4	160	2,4	42	31×61×99	155
12-ПМХС-0,5ч	12,7	10	300	0,15	15	46×36×40	67
80-ПМХС-2ч:					12	96×58×85	275
анод	90	72	14	0,03			
накал	3,4	2,52	100	0,2			
200-ПМХМ-2ч:					24	150×138×80	850
анод	212	178	20	0,04			
накал I	6,65	5,45	300	0,6			
накал II	2,65	2,15	260	0,56			

Примечания: 1. Батареи устройств начинают работать после заливки морской или пресной воды. Батареи «Маячок» используются в аварийных буйках с лампой накаливания напряжением 2,5 В, работоспособны при температурах 233...323 К (−40...+50° С), выпускаются по ГОСТ 5.867-71. Батарея 200-ПМХМ-2ч может быть использована для работы аварийного морского передатчика. 2. Время активации элементов и батарей 3...40 мин и зависит от температуры (чем она выше, тем меньше время) и солености воды (в морской воде в полтора раза меньше, чем в пресной). 3. Комплект питания 80 ПМХС-М-2ч выпускаются по ГОСТ 5.1846-73.

температуре 363 К (−10° С) всего 0,1 $Q_{ном}$. Постоянство характеристик этих элементов позволяет использовать их без устройств стабилизации.

Железо-угольные элементы со щелочным электролитом и воздушной деполяризацией типа ВДЖ отличаются эксплуатационной неприхотливостью, высокими значениями удельной энергии (на уровне СЦ аккумуляторов), и поэтому они незаменимы в сигнальных устройствах речных бакенов, телефонной связи, устройствах автоматики и других подобных случаях, когда не требуется высокое напряжение питания аппаратуры, а рабочая температура среды не опускается ниже нуля.

Элементы и батареи системы РЦ

Малогабаритные и высоконадежные сухие элементы РЦ системы «цинк-окись ртути» (окисно-ртутные или ртутно-цинковые) используются для питания малогабарит-

ной РЭА, когда можно пренебречь стоимостью или нужна высокая стабильность напряжения. Э. д. с. элементов лежит в пределах 1,354 ... 1,25 В и практически не зависит от степени разряда, изменяется в течение года не более, чем на 0,2% и имеет температурный коэффициент э. д. с. в интервале 273 ... 323 К (0 ... 50° С) всего 4·10^{−5} К^{−1}. Саморазряд не превышает 1% в год (табл. 9.12).

При разряде малыми токами ($I_p \leq 0,05Q$ и меньше) напряжение весьма стабильно держится на уровне 1,3 В, изменяясь за время разряда всего на 1,5 ... 2,5%, что делает целесообразным их использование в различных измерительных устройствах в качестве стабильных (опорных) источников напряжения.

Элементы работоспособны после хранения в течение 1 ... 1,5 лет при относительной влажности воздуха 85% и температурах 253 ... 303 К (−20 ... 30° С), сохранность гарантируется в течение трех месяцев.

Таблица 9.12

Эксплуатационные характеристики элементов и батарей РЦ системы
(рис. 9.9, д)

Тип	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$U_{\text{кв}}, \text{ В}$	$I_{\text{р}}, \text{ мА}$	$Q, \text{ А} \cdot \text{ч}$	$t_{\text{хр}}, \text{ мес}$	Габариты, мм	$m, \text{ г}$
РЦ-11	1,25	1	0,15	0,02	6	4,7×5	0,5
РЦ-13	1,25	1	0,15	0,02	6	6×3,5	0,45
РЦ-15	1,25	1	0,3	0,04	6	6,3×6	0,85
РЦ-31	1,25	1	1	0,07	12	11,5×3,6	1,3
РЦ-32	1,25	1	2	0,05	6	11×3,5	1,3
РЦ-53	1,25	1	10	0,25	18	15,6×6,3	4,6
РЦ-55	1,25	1	10	0,5	30	15,6×12,5	9,5
РЦ-57	1,25	1	20	1	12	16×17	15
РЦ-59	1,25	1	60	3	12	16×50	44
РЦ-63	1,25	1	20	0,55	18	21×7,4	10,5
РЦ-65	1,25	1	20	1	30	21×13	18,1
РЦ-73	1,25	1	30	1	18	25,5×8,4	17,2
РЦ-75	1,25	1	30	1,5	30	25,5×13,5	27
РЦ-82Т	1,25	1	50	1,5	18	30,1×9,4	30
РЦ-83	1,25	1	50	1,5	18	30,1×9,4	28,2
РЦ-84	1,22	1	50	2,5	30	30,1×14	45
РЦ-85	1,22	1	50	2,5	30	30,1×14	39,5
РЦ-93	1,25	1	300	13	6	31×60	170
2РЦ55с	2,68	1,8	10	0,45	—	16,2×27	20
3РЦ55с	4,02	2,7	10	0,45	—	16,2×40	30
4РЦ55с	5,36	3,6	10	0,45	—	16,2×53	40
5РЦ55с	6,7	4,5	10	0,45	—	16,2×66	50
2РЦ-63	2,5	1,8	60	0,55	12	22×16	21,1
5РЦ-84	6	4,5	100	3	—	35×85	250
6РЦ-63	7,2	5,4	10	0,6	6	23×48	71

Примечания: 1. Элемент РЦ-82Т имеет двойной особонадежный корпус. 2. Батарея 6РЦ-63 встречается под торговым названием «Крона РЦ». 3. Батареи типов 2РЦ55с.. 5РЦ55с предназначены для электрокардиостимуляторов сердца, они имеют пластмассовый корпус и выводы с лепестками под пайку с торцевых сторон. 4. Элементы РЦ53, 55, 63, 65, 73, 75, 82Т, 83 и 85 выпускаются по ГОСТ 12537—76.

Тропическую влажность 92...98% при температурах 311...315 К (38...42°С) элементы выдерживают в течение 48 ч. Вибрации в диапазоне 10...1500 Гц с перегрузкой 10g и линейные ускорения до 15g — в течение 6ч, воздействие разряженной атмосферы до 133 мкПа (10⁻³ мм рт.ст.) или уплотненной атмосферы до 1,01 МПа (10 атм). Элементы РЦ используются как отдельно, так и в виде модулей, в которых соединение элементов может быть как последовательным, так и параллельным, точечной сваркой никелевых лент шириной 4,2 и толщиной 0,15 мм. При большой

плотности гока целесообразнее применять элементы меньшей высоты (РЦ53, РЦ63, РЦ73, РЦ83 и т.п.), у которых меньше величина внутреннего сопротивления.

Буквенный шифр РЦ характеризует систему, после тире идут две цифры: первая из которых характеризует диаметр (5 — 15,6 мм, 6 — 21 мм; 7 — 25,5 мм; 8 — 30,1 мм) и высоту (3 — 2,3...4 мм; 5 — 6,3 мм). У летних элементов (индекс не ставится) рабочая температура 273...323 К (0...+50°С) у универсальных (у) — 243...323 К (−30...+50°С), у термостойких (т) — 273...343 К (0...+70°С).

9.3. АККУМУЛЯТОРЫ И АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Аккумуляторы и батареи системы НК

Использование ИП многократно-го действия выгоднее, чем гальванических элементов, если имеется возможность регулярного заряда. Однако энергоемкость (произведение отдачи за один цикл на общее число циклов), отнесенная к общей стоимости аккумулятора или батареи при их эксплуатации, меньше, чем у гальванических элементов (батарей). Номинальный разрядный ток аккумуляторов равен $0,1Q_{ном}$ (т. е. в 10 раз больше номинального разрядного тока гальванических элементов). При увеличении разрядного тока потеря ем-

Таблица 9.13

Дисковые герметичные безламельные никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи (рис. 9.10, а, в)

Тип	Габариты, мм	т. г
Д-0,025	11,6×5,5	2
Д-0,06	15,6×6,4	4
Д-0,1	20×6,9	7
Д-0,25	27×10	14
Д-0,55С	36,4×9,8	26
Д-0,8Д	50,7×7,7	47
2×2Д-0,1	23,2×38	36
2Д-0,25	27×22,5	33
5Д-0,25	34×68	100
7Д-0,115	24,1×62,2	60
10Д-0,25	82×109×10,5	200

Примечания: 1. Элементы и батареи выпускаются по ГОСТ 11258—72 (Д-006, Д-0,1 и Д-0,25), ГОСТ 21446—75 (7Д—0,115), ГОСТ 5.353—73 (Д-0,25) и ЧТУ. Число циклов заряд—разряд Д-0,06 и Д-0,1 не менее 150, Д-0,25 — 200, Д-0,55С и Д-0,8Д — 390. Срок службы не менее 1 года. Работоспособны при температуре 263...323 К (—10...+50°С), с потерей емкости не более 40%, при 263 К (—10°С) или при 253...308 К (—20...+35°С) (Д-0,06, Д-0,1 и Д-0,25). Элементы Д-0,55С и Д-0,8Д работоспособны при 253...318 К (—20...+45°С). 2. Рекомендуемые области использования: Д-0,025 — портативные электронные часы и слуховые аппараты, Д-0,06 — слуховые аппараты, Д-0,1 и Д-0,25 — транзисторные приемники, Д-0,55С и Д-0,8Д — микрокалькуляторы, магнитофоны, приемники. Батареи 2×2Д-0,1 и 2Д-0,25 используются в фонарях

9. Источники энергии питания

кости незначительна, что также выгодно отличает аккумуляторы от гальванических элементов

Для питания РЭА используют три основные системы: никель-кадмиевые (НК), серебряно-цинковые (СЦ) и серебряно-кадмиевые (СК). Аккумуляторы и батареи системы НК наиболее распространены, так как при относительной малой стоимости и простоте эксплуатации имеют весьма высокие удельные характеристики, что позволяет использовать их в стационарной, мобильной и даже космической РЭА. Целеобразные области использования — специальная и портативная стационарная и возимая РЭА, носимая РЭА, фонари и измерительная аппаратура при условии регулярных зарядов. Ранее для обозначения никель-кадмиевой системы в типах аккумуляторов и батарей использовалась аббревиатура КН (кадмий-никелевая система), которая постепенно заменяется на НК.

Дисковые аккумуляторы (табл. 9.13) имеют герметичную конструкцию, не выделяют газов и паров, могут монтироваться непосредственно в аппаратуре, допускают простое последовательное соединение в батареи путем механического прижима элементов. Используются в портативных радиоприемниках, слуховых аппаратах, портативных магнитофонах и диктофонах, маломощных карманных фонарях и специальных системах освещения или подсветки (например в оптических прицелах). Допускают параллельное и последовательное соединение.

Цилиндрические аккумуляторы системы НК (табл. 9.14) выполнены в прочном герметичном гофрированном корпусе, что расширяет области их использования в устройствах со значительными кратковременными токовыми нагрузками. Сохраняют работоспособность при охлаждении до температуры 263 К (—10°С), гарантируемый интервал 278...308 К (5...35°С); допускаемое число циклов заряд—разряд $N = 100...390$. Повышенная герметичность позволяет использовать цилиндрические аккумуляторы системы НК в портативных

радиоприемниках и магнитофонах, в устройствах связи, геофизической аппаратуре и в специальной РЭА. Батарея 3ЦНК-0,45 дает хорошие результаты при замене батареи 3336 (меньшая масса и габариты, лучшее качество работы).

Герметичные НК аккумуляторы безламельной и смешанной конструкции в прямоугольных корпусах (табл. 9.15) имеют дополнительный внутренний угольный электрод, предназначенный для снижения давления, что улучшает их эксплуатационные характеристики.

В зависимости от режима разряда выпускаются три модификации аккумуляторов: для длинных (Д), средних (С) и коротких (К) режимов разряда НК системы работоспособны при 263...313 К (—10...+40°С) (при —10°С теряет-

Таблица 9.14

Цилиндрические герметичные безламельные никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи (рис. 9.10, б)

Тип	Габариты, мм	м, г
ЦНК-0,2	16×24,5	15
ЦНК-0,45	14×50	23
ЦНК-0,85	14×90,6	41
3ЦНК-0,2	16×74	40
5ЦНК-0,2	87×24×27	117
5ЦНК-0,45	90×22×72	160
5ЦНК-0,85	90×22×103	300
6НГ-0,8	27×354	800
11ЦНК-0,45	39×57×112	350
12ЦНК-0,85	46×71×105	730

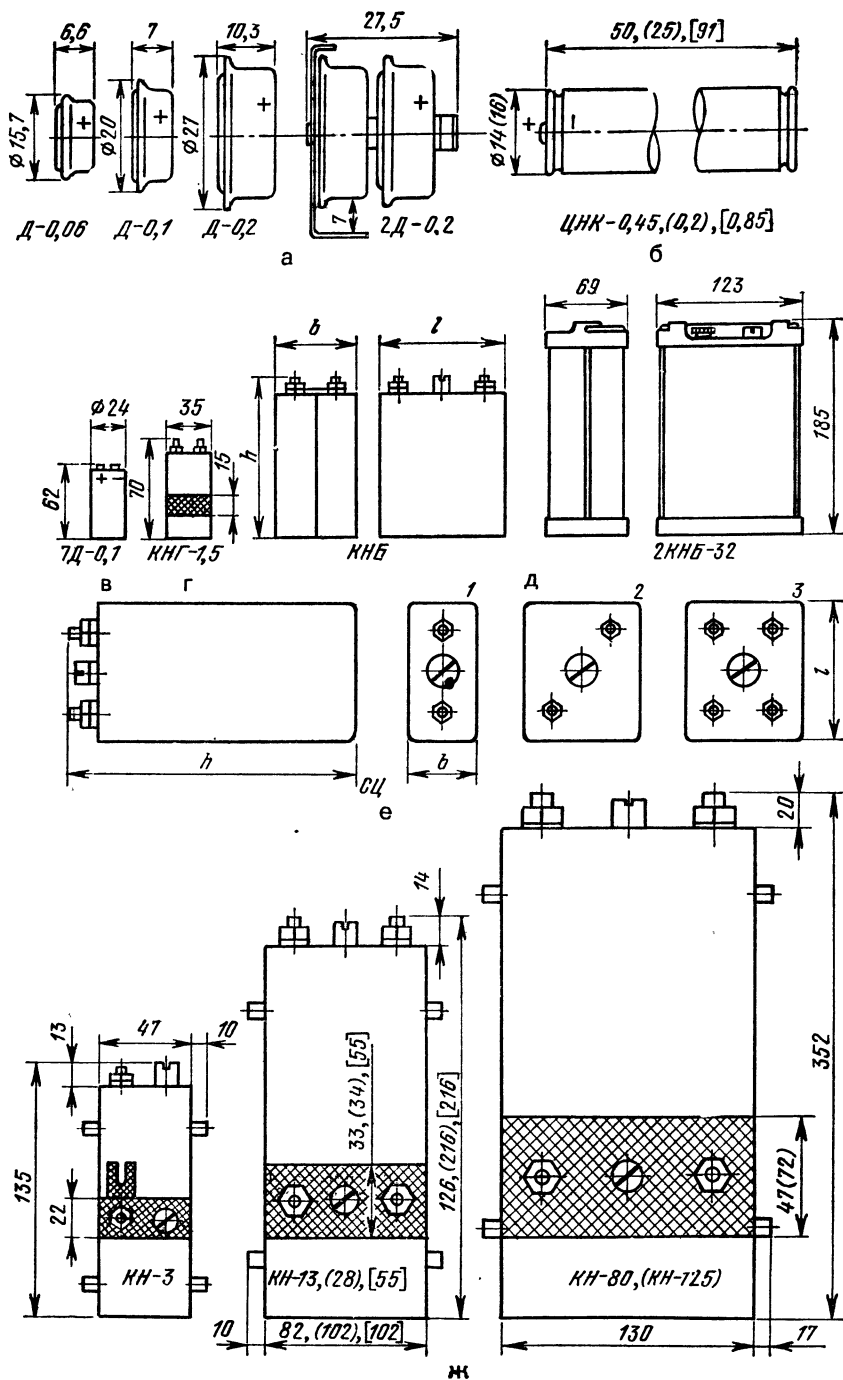
Примечания: 1. Элементы имеют U_n 1,25 В, $U_{кн}=1$ В. Используются в портативной РЭА. 2. Батарея 6НГ-0,8, предназначена для питания приборов, используемых при бурении нефтяных и газовых скважин. Имеет стальной цилиндрический корпус, может разряжаться током до 1 А, работоспособна при температуре до 73...433 К (100...160°С), $N=100...300$. 3. Аккумуляторы ЦНК-0,45 и ЦНК-0,85 (по ФЛ0.357.009Т0 ЦНК-0,85 (обозначается ЦНК-0,9) допускают до 390 циклов заряд—разряд и могут иметь разную конструкцию контактов: ЦНК-0,45-1-У2 и ЦНК-0,9-1-У2 по ОСТ 16 0 529 013—74, как на габаритном чертеже, вариант II — имеет ленточные выводы в разные стороны, вариант III (только для ЦНК-0,9-III-У2) — ленточные выводы в одну сторону.

Таблица 9.15

Прямоугольные герметичные безламельные и смешанной конструкции никель-кадмиевые аккумуляторы и батареи (рис. 9.10, г)

Тип	Габариты, мм	м, г
КНГ-0,35Д	15×10×41	22
КНГ-0,7Д	25×12×41	38
КНГ-1,5	35×14×70	100
КНГ-3,5Д	45×20×70	200
КНГ-5,5	34×47×97	230
КНГ-7,5	34×47×122	450
КНГ-10Л	34×47×147	550
КНГК-12С	46×33×127	440
КНГ-15С	46×45×146	830
КНГ-30С	41×86×173	1500
КНГ-50С	71×86×173	2900
3КНГ-10Д	90×45×145	1,8
3КНГ-12С	101×49× ×127	1,4
2×22КНГ-50СА	1085× ×390×270	150,0
НКГК-4С	30×37×60	150
10НКГК-4С	85×170×75	1750
НЦ-125	82×123× ×230	4300
КНТ-160	100×100× ×460	9500

Примечания: 1. Элементы КНГ-0,35Д и КНГ-0,7Д предназначены для питания аппаратуры управления биоэлектрических протезов, рабочая температура 253...323 К (—20...50°С), $N=100$ и 250. КНГ-1,5 служит для питания разнообразной аппаратуры, работает в любом положении, взрывобезопасен, $N=100$. КНГК-12С может работать при 223...323 К (—50...50°С) (при —50°С потеря 60% емкости), работоспособен в течение $N=1000$ циклов (с потерей после 600 цикла к 1000-му не более 0,2 Qном). 2. Батарея 2×22КНГ-50СА используется на спутнике связи «Молния-1», обладает высокими эксплуатационными показателями, работоспособна в течение 12 мес., $N=800$. 3. Элемент НКГК-4С — представитель серии аккумуляторов комбинированной конструкции емкостью Q 4...90 А·ч, параметры которых превосходят требования МЭК. Элемент НЦ-125 комбинированной конструкции рассчитан на 100 циклов при 253...313 К (—20...+40°С), работоспособен при вибрациях 15. 40 Гц и амплитудах 3,5. 0,5 мм, основное назначение — электрооборудование легковых автомобилей. 4. Элемент КНТ-160 табличной конструкции, емкость его Q=160 А·ч после 500 циклов, работоспособен при 223...333 К (—50...60°С), применяется в аккумуляторах батареях электровозов, погрузчиков, электрокаров, катеров и теплоходов, $U_{ср}=1,2$ В.



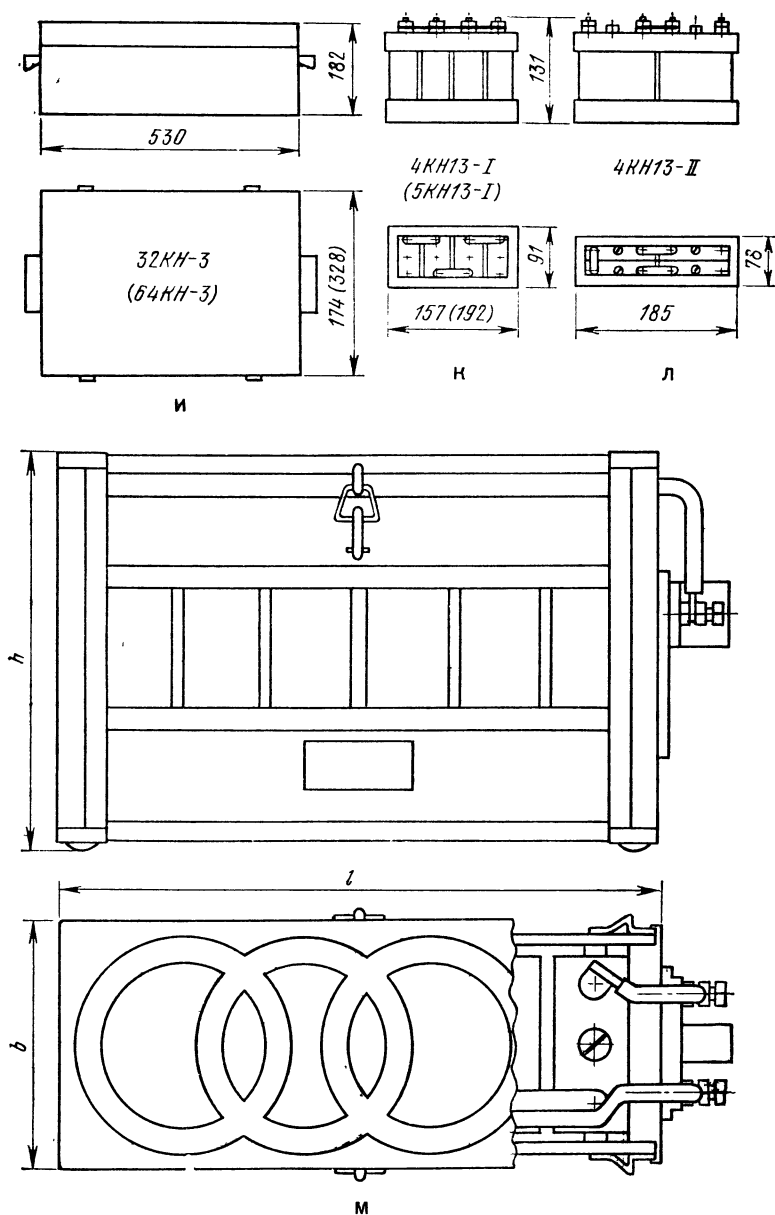


Рис. 9.10. Габаритные чертежи аккумуляторов

Таблица 9.16

Прямоугольные безламелльные
никель-кадмиевые аккумуляторы
и батареи (рис. 9.10, д)

Тип	Габариты, мм	m, г
2КНБН-1,5	35×35×60	150
3КНБН-1,5	55×35×60	220
2КНБ-2	36×36×92	220
4КНБ-15	112×83×125	2100
2КНБ-20	163×44×125	1600
4КНБ-20	180×93×127	3200
4КНБ-25	180×151×132	5800
8КНБ-25	190×180×132	7500
2НКП-24	69×82×126	1500
2КНБ-32	69×123×185	3100
10КНБ-60	450×178×225	30·10 ³

Примечание Для элемента $U_{\text{н}} = 1,25 \text{ В}$, $U_{\text{кн}} = 1 \text{ В}$

ся 30% емкости), саморазряд $C = 30\%$ за месяц, аккумуляторы выдерживают вибрационные перегрузки до 10g в диапазоне 10 ... 2000 Гц и ударные нагрузки до 400g, $N \geq 800$ циклов. Для автоматических систем выпускаются

Таблица 9.17

Прямоугольные ламелльные
никель-кадмиевые аккумуляторы
и батареи (рис. 9.10, ж)

Тип	Габариты, мм	m, г
НК-3	22×47×135	330
НК-13	33×82×126	750
НК-28	34×102×16	1690
НК-55	55×102×216	2780
НК-80	47×130×352	4460
НК-125	72×130×352	6600
32НК-3	174×601×183	14400
64НК-3	341×583×181	27600
4НК-13-I	91×157×131	3200
4НК-13-II	78×185×131	3200
5НК-13-I	91×192×131	4000
17НК-13Т	143×803×177	16400
25НК-13Т	240×637×177	23300
34НК-13Т	240×803×177	31100

Примечание Для элемента $U_{\text{н}} = 1,25 \text{ В}$, $U_{\text{кн}} = 1 \text{ В}$

аккумуляторы с автоматом заряда (КНГ-30СА и КНГ-50СА), что позволяет использовать их на космических объектах. Использование комбинированных блоков пластин (ламельного и металлокерамического) и таблеточных существенно улучшает показатели аккумуляторов НК системы Комбинированные аккумуляторы выпускаются для длительных и средних режимов работы

Безламелльные НК аккумуляторы (табл. 9.16) обладают малым внутренним сопротивлением и могут работать в стартерных режимах. Они имеют непроливаемую (но не герметичную) конструкцию, работоспособны до 233 К (-40°C) и при воздействии вибраций и ударов, возникающих в малогабаритной полковой РЭА, в переносных светотехнических приборах.

Ламелльные аккумуляторы и батареи непроливаемой (но не герметичной) конструкции (табл. 9.17) работоспособны в условиях вибрации с частотой 14 ... 18 Гц и амплитудой 2,5 мм, имеют значительный срок службы ($N \geq 1000$), дешевы. Собираются в батареи из элементов шести типоразмеров емкостью 3 ... 125 А·ч. Нормальные циклы 20 ... 500, отдача нормальной емкости при температуре 288 ... 298 К ($15 \dots 25^\circ \text{C}$). При хранении за счет саморазряда потеря емкости за 30 сут. ~ 14%, за 6 мес. — 50%. При пониженной температуре до 253 К (-20°C) отдают 60% емкости, при 233 К (-40°C) — 20%. Конструктивно выполнены в деревянных ящиках из хвойной или лиственной древесины либо в рамках ясеневой, буковой или дубовой древесины с соединением по длине в один (дополнительное обозначение — I) или в два (II) ряда (рис. 9.10). Если выводы находятся на торцевой стороне ящика, то добавляется буква Т, для металлических ящиков вводится дополнительное обозначение: К.

Аккумуляторы и батареи системы СЦ

Серебряно-цинковые (СЦ) аккумуляторы и батареи из них (табл. 9.18) характеризуются исключительно стабильным напря-

жением $U_p = 1,5$ В и малым внутренним сопротивлением, что позволяет использовать их в режимах разряда весьма большим током ($I_p = 5 \dots 10Q_p$), падение отдачи при пониженных температурах у них минимально (при 243 К (-30° С) отдача — 50% $Q_{ном}$, при 233 К (-40° С) — 25%). Срок сохранности сухих АЭ (не бывших в употреблении и не заливавшихся электролитом) 3...8 лет, саморазряд $S = 10\%$ за 30 суток хранения. При 313 К ($+40^\circ$ С) СЦ аккумуляторы безвозвратно теряют часть своей емкости. Выпускаются пять групп аккумуляторов, отличающихся режимами работы:

К — короткие режимы разряда, t_p до 1 ч, N до 10 циклов заряд-разряд, $t_{хр}$ — 4 мес.;

С — средние режимы разряда, t_p 1...5 ч, $N = 25$, $t_{р}$ — 6 мес.;

М — многоцикловые режимы разряда $N = 100$, $t_{хр}$ — 9 мес.;

Д — длительные режимы разряда, t_p 10...20 ч, $N = 30$, $t_{хр}$ — 6 мес.;

Б — буферные режимы разряда с большим числом циклов, допускающих импульсные нагрузки. Области использования: портативная аппаратура, радиостанция, геофизические и геологические приборы, авиационная и космическая техника. Для обеспечения нормальной работы при температурах 233...223 К ($-40 \dots -50^\circ$ С и ниже) используются теплоизолирующий корпус и (при необходимости) авторазогрев за счет короткого замыкания. В этом случае можно получить ~70% номинальной емкости.

Аккумуляторы и батареи системы СК

Герметичные серебряно-кадмиевые аккумуляторы и батареи по большинству параметров и областям использования аналогичны аккумуляторам системы СЦ, но отличаются от последних лучшей сохранностью (в залитом состоянии — 18 мес., в заряженном — 6 мес.), малым саморазрядом (~1,5% за месяц) и значительным числом N циклов заряд-разряд ($N = 1500 \dots 3000$). Недостаток серебряно-кадмиевых аккумуляторов

Таблица 9.18

Прямоугольные серебряно-цинковые аккумуляторы (ГОСТ 12616—67) и батареи (рис. 9.10, е)

Тип	Габариты, мм	т, г
СЦС-0,5	24×12×37	24
СЦС-1,5	28×14×50	35
СЦ-3	44×19×64	110
СЦ-5	47×34×69	200
СЦ-12	50×23×104	230
СЦ-15	50×29×104	280
СЦ-18	50×35×104	360
СЦ-25	50×50×118	540
СЦ-40	56×52×141	825
СЦ-50	66×51×144	990
СЦ-70	92×52×149	1505
СЦС-100	108×51×168	1750
СЦС-120	71×55×212	1985
3СЦС-1,5	44×30×54	150
3СЦ-5	96×45×77	590
5СЦ-5	160×45×77	1020
3СЦ-25	144×48×136	1050
8СЦ-45	200×110×160	6480
15СЦ-45	432×126×170	16000

Примечания: 1. Разрядные характеристики: у элементов СЦ-1, СЦ-18 типа С, К, Д, М; СЦ-5, СЦ-70 — С, Д, М, Б; СЦ-12, СЦ-15 — С, Д, М; СЦ-25; СЦ-50 — С, К, Д, М, Б; СЦ-40 — С, К, Д, Б. 2. Запрещается параллельное соединение элементов. Высота (третий размер) дана без борнов. 3. Высота борнов над уровнем корпуса 8 мм (СЦ-0,5 и СЦ-1,5), 12 мм (СЦ-3...СЦ-25), 18 мм (СЦ-40...СЦ-120). Диаметр шпильки М4 (СЦ-0,5 и СЦ-1,5), М6 (СЦ-3...СЦ-18), М8 (СЦ-25...СЦ-50) и М10 (СЦ-70...СЦ-120). 4. Схемы расположения выводов: а (СЦ-0,5...СЦ-18), б, в (СЦ-25...СЦ-50), в (СЦ-70...СЦ-120).

Таблица 9.19

Прямоугольные серебряно-кадмиевые аккумуляторы (рис. 9.5, е)

Тип	Габариты, мм	т, г
СКГ-1,5	28×14×52	52
СК-15	66×32×100	400
СК-80	107×52×168	1720
СК-100	107×52×183	1900
СК-300	138×56×255	4650

Примечания: 1. Высота дана с борнами. 2. $U_{нп} = 1,05$ В $U_{нз} = 0,9$ В.

состоит в том, что при понижении температуры у них падает не только Q_p , но и U (до 0,8 В при 253 К (-20°C) и 0,4 В при 233 К (-40°C)). Преимущественная область использования — авиационная техника (табл 9 19)

9.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И БАТАРЕИ

Фотоэлектрические элементы и батареи

С помощью фотоэлектрических (ФЭ) преобразователей энергия солнечного излучения превращается в электрическую в солнечных батареях, основой которых являются полупроводниковые материалы. Наибольшее распространение получили кремниевые ФЭ преобразователи. Типичный кремниевый элемент имеет размеры $10 \times 20 \times 0,05$ мм, $\eta = 0,12$ и при максимальной освещенности обеспечивает мощность 24 мВт, что при напряжении 0,45 В дает ток около 0,045 А.

Величина тока, отбираемого от ФЭ преобразователя, зависит от его площади и освещенности, напряжение же почти не зависит от этих параметров. Для получения требуемых значений U и I используют параллельное и последовательное соединение кремниевых ФЭ преобразователей, толщина которых с учетом необходимых конструктивных элементов доходит до 0,5 ... 1,5 мм (за исклю-

чением так называемых пленочных элементов).

Величина потока энергии излучения Солнца по нормали на уровне Земли и широте экватора равна 1500 Вт/м^2 . При 50%- и 90%-ной облачности — 750 и 15 Вт/см^2 . Этим значениям при $U = 0,4 \text{ В}$ соответствуют значения плотности тока 34; 17 и 2 мА/см^2 , которые могут быть положены в основу приближенных расчетов элементов солнечных батарей. Ток и напряжение их существенно зависят от температуры поверхности ФЭ преобразователя, которая в обычных условиях может быть 50°C , повышение ее уменьшает напряжение.

Кремниевые элементы достаточно сложны в изготовлении и дороги. Лучшие результаты можно получить используя пленки арсенида галлия GaAs и сернистого кадмия CdS, так как ФЭ преобразователи из них имеют стоимость примерно в 10 раз меньшую, чем кремниевые при тех же примерно выходных параметрах по мощности (э. д. с. элементов из GaAs равна 0,8 ... 0,9 В).

Примером кремниевых фотоэлектрических элементов могут служить приборы серии ФКД, параметры которых приведены в табл. 9.20.

Для автономного питания наземных средств навигационного обеспечения судоходства, средств связи и телеуправления, радиоприемной и радиопередающей РЭА используют солнечную батарею,

Таблица 9.20

Основные параметры приборов ФКД

Тип	Габариты, мм	$S, \text{ см}^2$	$I_{\text{вых1}}, \text{ мА}$	$P_{\text{вых1}}, \text{ мВт}$	$I_{\text{вых2}}, \text{ мА}$	$P_{\text{вых2}}, \text{ мВт}$
ФКД-2	$10 \times 10 \times 1,5$	0,85	27	11	18	7,2
ФКД-3	$10 \times 15 \times 1,5$	1,27	40	16	27	10,8
ФКД-4	$10 \times 20 \times 1,5$	1,7	54	22	36	14,4
ФКД-5	$10 \times 30 \times 1,5$	2,4	95	38	50	20

Примечание. Меньшие значения $I_{\text{вых2}}$ и $P_{\text{вых2}}$ соответствуют энергии солнечной радиации $0,1 \text{ Вт/см}^2$ (южные районы СССР), большие — $I_{\text{вых1}}$ и $P_{\text{вых1}}$, $0,15 \text{ Вт/см}^2$ (околоэкваториальные области) Температура поверхности элементов 303...308 К ($+30 \dots +35^\circ\text{C}$), а средний $\eta = 0,08$. Поэтому с учетом вариации освещенности для расчетов берут следующие максимальные данные: $U=0,4 \text{ В}$, $I_p=0,02 \text{ А/см}^2$ и $\eta=0,08$

каждый модуль которой имеет выходную мощность 4 Вт при $U = 12$ В. Десять модулей образуют батарею мощностью $P_{\text{вых}} = 40$ Вт, с габаритами $430 \times 720 \times 850$ мм, массой 15 кг.

При использовании наземных солнечных батарей следует иметь в виду, что для северных областей Союза на широте Маточкина Шара вероятность ясного неба в январе—августе около 0,2 и в октябре—ноябре уменьшается до 0,1; вероятность того, что на широте Москвы в апреле—сентябре будет ясное небо, составляет 0,3 и снижается в остальное время до 0,15; на юге (район Кушки) в июле—октябре вероятность ясного неба 0,9, в январе—марте около 0,25. Космические солнечные батареи при использовании систем ориентации обеспечивают работу при максимальных значениях энергии солнечной радиации и могут иметь удельную массу до 50 кг/кВт при стоимости до 400 тыс. дол [9]. Гибкие солнечные батареи пленочного типа позволяют получить мощность P_m около 8 кг/кВт.

Существуют комбинированные ФЭ устройства, в которых источник радиоактивного излучения возбуждает свечение люминофора, воздействующего на кремниевый ФЭ преобразователь. Микробатарея для электронных часов из двух кремниевых ФЭ преобразователей, работающих от света фосфора, люминесценция которого обеспечивается радиоизотопом прометия-147, имеет диаметр 16 мм и толщину 1 мм. Ее параметры: $U = 1$ В, $I = 2 \cdot 10^{-6}$ А, $t_p = 3$ года.

От фотоэлектрических преобразователей целесообразно питать бортовую РЭА космических объектов (при использовании буферных аккумуляторных батарей), обслуживаемую РЭА в районах с достаточной солнечной радиацией, а в некоторых случаях маломощную носимую аппаратуру.

Термоэлектрические элементы и батареи

Основой термоэлектрических (ТЭ) ИП являются полупроводниковые элементы, выполненные из мате-

риалов с ярко выраженным термоэлектрическим эффектом. Э. д. с. ТЭ элементов весьма невелика и лежит в пределах $(1 \dots 4) \cdot 10^{-4}$ вольт на градус. В основе работы ТЭ ИП лежит эффект Зеебека: нагревание спая разнородных проводников или полупроводников является причиной возникновения на холодных концах спая разности потенциалов. Современные ТЭ устройства имеют мощность от долей ватта до киловатт. Их используют для питания приемников в сельских местностях, станций катодной защиты газо- и нефтепроводов, на акваториях и космических объектах.

Так как большинство ТЭ генераторов работает при разности температур горячего и холодного спаев 300...600 градусов, то э. д. с. одного элемента $E = 0,03 \dots 0,25$ В при $r_{\text{вн}} = 0,0001$ Ом. Для получения больших напряжений и токов используют последовательное или параллельное соединение элементов. Требуемую величину тока можно получить выбором сечения и длины ТЭ элемента. При изменении сечения от единиц до сотен миллиметров кв и длине 3...20 мм ток $I_p = 0,01 \dots 20$ А.

Если мощность ТЭ генератора более 10 кВт, а время работы лежит в пределах от недели до десяти лет, то в качестве источника тепла выгодно использовать ядерные реакторы. Такие радиоизотопные ТЭ генераторы наземного и авиаторного назначения выполняются в соответствии с ГОСТ 18696—73 и ГОСТ 19717—74.

В генераторах мощностью 0,1...10 кВт удобно применять специальные газовые горелки или солнечные концентраторы. В диапазоне мощностей 1...1000 Вт ТЭ ИП с газовым подогревом экономически выгоднее аккумуляторов, солнечных батарей или двигателей внутреннего сгорания. При мощностях до 100 Вт (особенно при малом и среднем сроке службы) для ТЭ ИП целесообразно использовать радиоизотопные источники энергии излучения.

Конструктивно ТЭ ИП состоит из трех частей: собственно ТЭ генератора и устройств подогрева и

охлаждения, так как η ТЭ преобразователей около 0,05. Мощный ТЭ генератор может иметь панельную конструкцию (с одной стороны панели нагрев, с другой — охлаждение), генератор с газовым нагревом может быть выполнен в виде радиальной (трубчатой) конструкции, а с радиоизотопными источниками — в виде шара (источник тепла, помещенный внутри генератора, позволяет полнее использовать энергию) Масса ТЭ генераторов достаточно велика, так как плотность полупроводниковых материалов равна 3,5 ... 5 г/см³.

Источником тепла маломощных ТЭ генераторов служат керосиновые лампы или горелки, работающие на природном, попутном или сжиженном газе. Солнечные ТЭ генераторы (особенно при использовании фасетных концентраторов из отдельных плоских зеркал) в ряде случаев оказываются более экономичными, чем солнечные ФЭ преобразователи ($P_s = 40$ Вт/м², удельная масса 50 Вт/кг) Зеркальные солнечные концентраторы в фокальном пятне увеличивают поток энергии примерно в 50 раз ($4 \cdot 10^4$ Вт/м²), а фасетные — в 150 раз ($12 \cdot 10^4$ Вт/м²) Устройства отвода тепла чаще всего выполняются в виде пластинчатых радиаторов для естественной конвекции, реже — с жидкостными системами отвода тепла

Преимуществами термоэлектрических ИП являются: нечувствительность к коротким замыканиям (при этом незначительно увеличивается перегрев ТЭ элементов), практически неограниченный срок хранения и мгновенная готовность, возможность работы под водой, при высокой радиоактивности, в космосе Недостатки ТЭ ИП: значительная масса, необходимость внешнего мощного источника энергии, сложность коммутации (так как за счет большого перегрева возникают силы, стремящиеся сломать собственно полупроводниковый ТЭ генератор) большое число элементов, противоречия между теплопроводностью ТЭ элементов и необходимостью их дополнительной теплоизоляции (например, пенопластом), возгонка материалов

полупроводников при высоких температурах.

Основные данные характерных ТЭ ИП приведены в табл. 9.21, внешний вид некоторых из них дан на рис. 9.11.

В ТЭ ИП типа ТГК-3 и ТЭГК-2-2 в качестве источника тепла используется 20-линейная керосиновая лампа «Молния». Секция 2 В х 0,5 А имеет отвод 1,2 В. Для ТГК-10 используется горелка типа «Керогаз». Расход керосина 75 ... 105 г/ч. ТЭ ИП серии УГМ используются в качестве автономных ИП в труднодоступных и малоосвоенных районах для питания станций катодной защиты газопроводов, радиорелейных станций, линий технологической связи, средств автоматики, телемеханики и связи.

В генераторе УГМ-10 теплоприемник выполнен в виде тепловой трубы, что увеличивает изотермичность системы подвода тепла к термобатареям при высоком η горелки. Генератор оснащен системами поддержания качества электроэнергии, автоматики и защиты Топливо — сжиженный газ при избыточном давлении 50...150 кПа (0,5...1,5 атм). В генераторе УГМ-80М для интенсификации отвода тепла применена вытяжная труба. Генератор используется на газопроводах Якутии и Зап. Сибири. Топливо — природный или попутный газ при избыточном давлении 20 ... 30 кПа (0,2 ... 0,3 атм). Генератор УГМ-200 Т имеет модульную конструкцию с теплоприемником в виде тепловой трубы, парожидкостную термосифонную систему отвода тепла с воздушным радиатором, системы автоматики, защиты и стабилизации, может дистанционно управляться по радио. Топливо — сжиженный или природный газ при избыточном давлении 20 ... 150 кПа (0,2 ... 1,5 атм). Все генераторы серии УГМ работоспособны при температуре окружающей среды 213 ... 323 К (-60 ... $+50^\circ$ С), относительной влажности до 98%, скорости ветра до 30 м/с. Гарантированный ресурс работы — 5 лет, автономность — 1 год.

Радиоизотопные ТЭ ИП типа «Пингвин», «Бета-С» и «Эфир-М» используют в качестве радиоак-

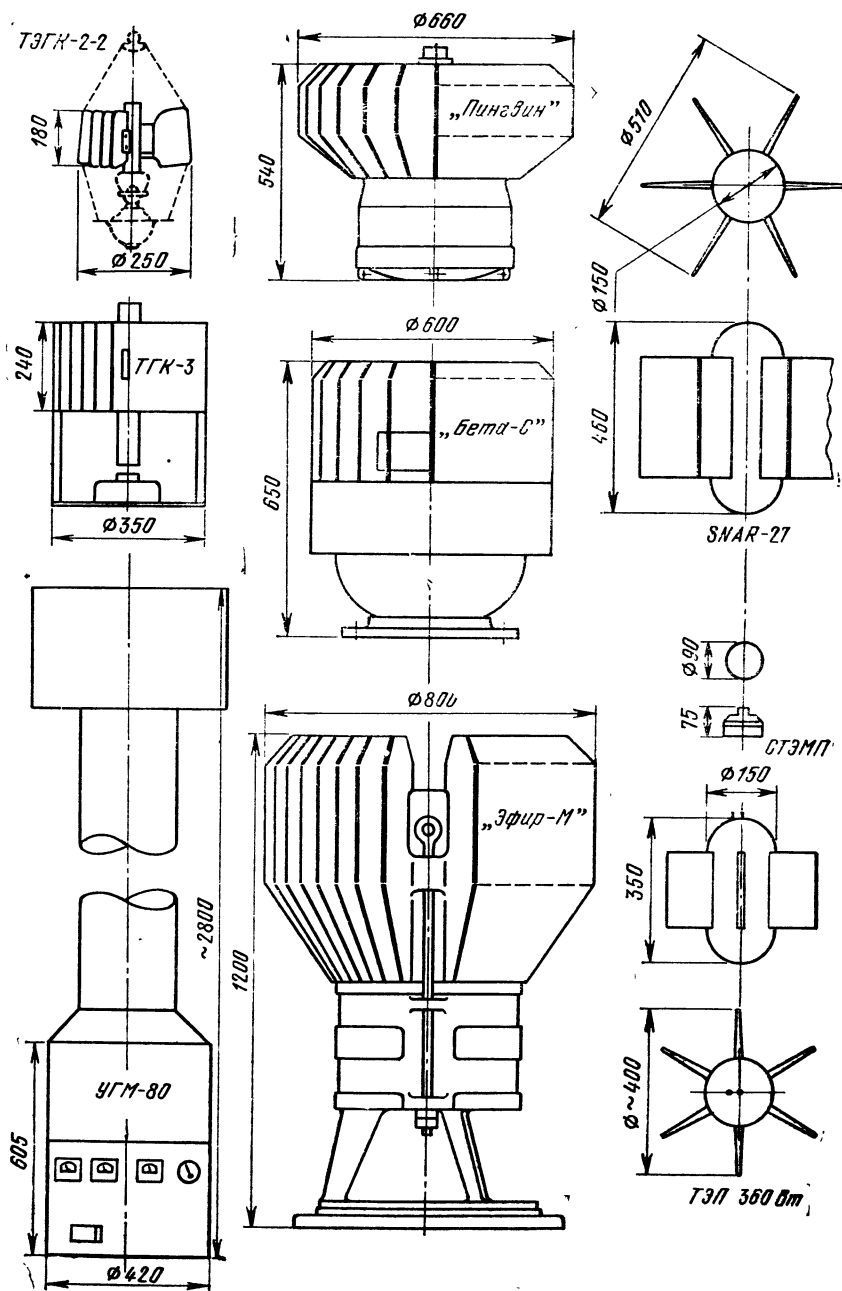


Рис. 9.11. Габаритные чертежи термоэлектрических ИП

10 Зак. 1321

Термоэлектрические устройства (рис. 9.11)

Тип	F	$Q_m, \text{ в}$	Габариты, мм	$m, \text{ кг}$	$U \times I (\text{В} \cdot \text{А})$
ТГК-3	3	75 г	250×180	8	2×0,5; 2×1
ТЭГК-2-2	4	80 г	250×180	8	1,2×0,4; 100×0,01
ТГК-10	10	105 г	350×240	—	1,2×0,7; 10×1
УГМ-1	1,25	0,004 м ³	208×242×360	5	12×0,1
	2,5	0,006 м ³	208×242×360	6,5	24×0,1
УГМ-10	10	0,022 м ³	340×340×460	10	12×0,8; 24×0,4
ТГГ-35	40	3 (кг/кВт·м)	300×300×1500	35	6×6,7
УГМ-80М	80	0,8 м ³	420×600	70	24×3,3
УГМ-200Т	200	0,38 м ³	800×1000× ×1000	150	24×8,3
«Пингвин»	2	изотоп	660×540	300	1,5×0,7
«Бета-С»	8	изотоп	600×655	500	7×1,2
«Эфир-М»	30	изотоп	800×1200	1000	12×2,5
SNAP-9A	13	—	510×280	2,8	3,3×4
SNAP-27	56	—	510×460	—	14,5×3,8

Примечания: 1. Расход горючего дан за час работы. 2. Устройства УГМ-1, УГМ-10, ТГГ-35 и УГМ-200Т выполнены в виде шкафов

тивного горючего изотопа стронций-90 и иттрий-90, помещенные в герметичной капсуле в вольфрамовом стакане. «Пингвин» предназначен для автоматической антарктической магнитной вариационной станции, имеет энергоемкость $2,1 \cdot 10^5$ Вт·ч. «Бета-С» используется для питания автоматической метеостанции, имеет энергоемкость $7 \cdot 10^5$ Вт·ч, снабжена блоком накопления электрической энергии позволяющим развивать мощность в импульсном режиме 1 ... 2 кВт, работоспособна в диапазоне температур 213 ... 303 К (−60 ... +30° С), при относительной влажности до 98% и атмосферном давлении не менее 0,023 МПа (170 мм рт. ст.). «Эфир-М» питает автоматический навигационный радиомаяк АНМР-1, имеет энергоемкость $2,4 \cdot 10^6$ А·ч, работоспособен в диапазоне температур 233 ... 303 К (−40 ... +30° С), при относительной влажности до 98% и атмосферном давлении не менее 0,05 МПа (300 мм. рт. ст.). Все генераторы этой серии имеют ресурс работы 10 лет при непрерывном режиме работы.

Американские ТЭ устройства SNAP-9A и SNAP-27, предназначенные для работы на космических объектах, не имеют надежной радиационной защиты и поэтому легче устройств типа «Пингвин» и др. Их можно использовать только на беспилотных космических объектах. Значительная доля массы ТЭ ИП радиоизотопного типа приходится на контейнер. Так, например масса ТЭ устройства «Бета-С» без контейнера всего около 5,9 кг.

Термоэмиссионные элементы и батареи

Основой работы термоэмиссионных (ТЭМ) ИП является преобразование тепловой энергии в электрическую вследствие эффекта термоэлектронной эмиссии. Сам ТЭМ преобразователь представляет собой, по сути дела, вакуумный или газонаполненный, диод, который преобразует тепловую энергию нагрева катода в электрическую энергию потока электронов (электронного газа). Характеристики этих преобразователей в отличие

от обычных диодов выбраны так, чтобы получить удовлетворительные энергетические показатели. Хотя мощности термоэмиссионных ИП меньше, чем термоэлектрических, они имеют ряд преимуществ по работе при высоких температурах, а также с радиоизотопными нагревателями, что позволяет весьма эффективно использовать их на космических объектах и в других тяжелых условиях работы.

ТЭМ преобразователь конструктивно состоит из трех частей: собственно ТЭМ генератора, устройства подогрева (обычно ядерного или солнечного типа) и системы охлаждения. ТЭМ устройство включает в себя катод (термоэлектронный эмиттер), анод (коллектор) и рабочее вещество в межэлектродном пространстве. В вакуумном ТЭМ генераторе рабочее вещество — «электронный газ», в плазменном или термоионном — смесь атомов, электронов и положительных ионов.

Основные параметры, определяющие работу ТЭМ устройства: температура катода θ (температура анода должна быть ниже температуры катода, в противном случае согласно второму закону термодинамики не удастся получить на выходе полезную мощность), величина зазора катод—анод, поток выходной энергии. Чем больше разность температур, меньше зазор и выше P_s , тем лучше энергетические показатели ТЭМ ИП. Вакуумные устрой-

ства работают при $\theta_K = 800 \dots 1300 \text{ K}$, зазорах 10 мкм и $P_s = 1 \text{ Вт/см}^2$, $\eta = 0,05 \dots 0,08$. Лучшие характеристики у газонаполненных устройств ($\theta_K = 1700 \dots 2300 \text{ K}$, зазор до 1 мм , $P_s = 10 \text{ Вт/см}^2$, $\eta \approx 0,1$). Наиболее перспективные ТЭМ преобразователи высокого давления ($\theta_K = 2200 \text{ K}$, зазор 100 мкм , $P_s = 40 \text{ Вт/см}^2$ и $\eta = 0,2$). Один термоэлемент развивает напряжение $U_{\text{вых}} 0,7 \dots 0,8 \text{ В}$ и поэтому для повышения напряжения используется последовательное соединение нескольких ТЭМ преобразователей.

Чаще всего используют реакторные, солнечные и газопламенные (аналогичные термоэлектрическим) ТЭМ устройства. При этом наилучшие результаты по энергоемкости получают во встроенном варианте реакторных ТЭМ (массовая мощность $4,5 \text{ кг/кВт}$), который технологически и компоновочно наиболее сложен, наихудшие — при расположении ТЭМ преобразователей на поверхности активной зоны ($18 \dots 26 \text{ кг/кВт}$) и удовлетворительные — при выносном варианте ($6 \dots 16 \text{ кг/кВт}$).

При стабильных потоках солнечной радиации (околоэкваториальные области, космос) и возможности ориентации системы целесообразно использование солнечных ТЭМ устройств, так как отпадает необходимость в громоздких источниках тепла. Одной из проблем создания газопламенных ТЭМ устрой-

Таблица 9.22

Параметры термоэмиссионных устройств

$P_{\text{вых}}$, Вт	U , В	К. п. д	P_m , Вт/кг	θ , К	m , кг	Габариты, мм	Ресурс, годы
360	5,25	0,1	8,7	1580	41,5	400×350	—
160	—	0,15	0,37	—	431	330×430	5
100	—	0,11	0,21	1400	476	320×330	5
20	0,8	0,1	4	2000	1+4	90×75	—

Примечания: 1. В термоэмиссионном устройстве мощностью 20 Вт масса собственно преобразователя (рис. 9.7) равна 1 кг, масса зеркала и привода 4 кг. 2. Устройство мощностью 360 Вт предназначено для непилотируемых космических объектов и не имеет радиационной защиты. 3. ТЭМ преобразователь мощностью 160 Вт используется в наземной аппаратуре и имеет надежную радиационную защиту. 4. ТЭМ преобразователь мощностью 100 Вт предназначен для работы в подводных условиях и имеет надежную радиационную защиту. 5. СТЭМ ИП на 20 Вт используется в наземных условиях с зеркалом диаметром 500...800 мм. 6. Габариты даны без учета размеров средств защиты.

ств является защита тугоплавкого катода от окисляющего действия продуктов сгорания и среды. Существующие образцы таких устройств при $P_s \approx 50$ Вт/см² обеспечивают мощность 30...300 Вт. Данные некоторых характеристик зарубежных ТЭМ ИП приведены в табл. 9.22, а габаритный чертеж солнечного ТЭМ ИП без солнечного концентратора — на рис. 9.11. Целесообразные области использования реакторных ТЭМ ИП — космос (при малой защите от радиации), специальные устройства наземной и подводной РЭА; солнечные ТЭМ ИП — автономная маломощная РЭА в космосе и наземных условиях (радиобун, навигационные и связанные радиоустройства).

9.5. ОЦЕНКА И ВЫБОР ИП

Принципы технико-экономической оценки ИП

Все виды ИП — преобразователи энергии. Поэтому их определяющими параметрами являются энергия W или ее поток P ($\partial W/\partial t$). Задаваясь обобщенными координатами (пространством определяющих параметров) в виде массы m , объема V , поверхности S , заряда q и стоимости C , получаем 10 определяющих обобщенных сил, а именно: массовую $X_m = W/m = \partial W/\partial m$, объемную $X_v = W_v = \partial W/\partial V$ и поверхностную плотности энергии $X_s = W_s = \partial W/\partial S$, разность потенциалов $E = \partial W/\partial q$, удельную энергию на единицу стоимости $W_{ст} = \partial W/\partial C$. Аналогично записываются обобщенные силы для мощности: $P_m = \partial P/\partial m$, $P_v = \partial P/\partial V$, $P_s = \partial P/\partial S$, напряжения $U = \partial P/\partial I$, $P_{ст} = \partial P/\partial C$ или обратные им соотношения вида $W_m^{-1} = \partial m/\partial W$, $W_v^{-1} = \partial V/\partial W$ и т. п.

Для оценки статических характеристик ИП наибольшее распространение получили: энергоемкости W , W_m , W_v ; разрядная емкость Q_p ; динамическая мощность P ; удельные масса и объем, удельные разрядные емкости Q_m , Q_v , удельная стоимость $C_p = \partial C/\partial P$, руб/Вт и их производные.

Рис. 9.12. Падение разрядной емкости ИП при разряде токами в n раз больше номинального (а) и характер разрядных кривых при относительно разряде (б)

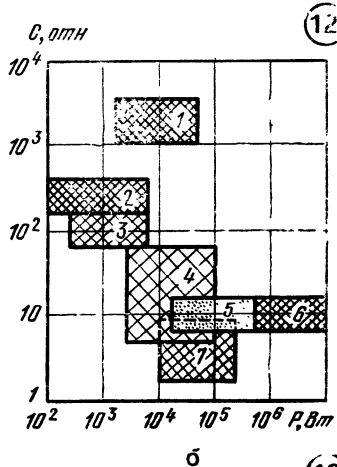
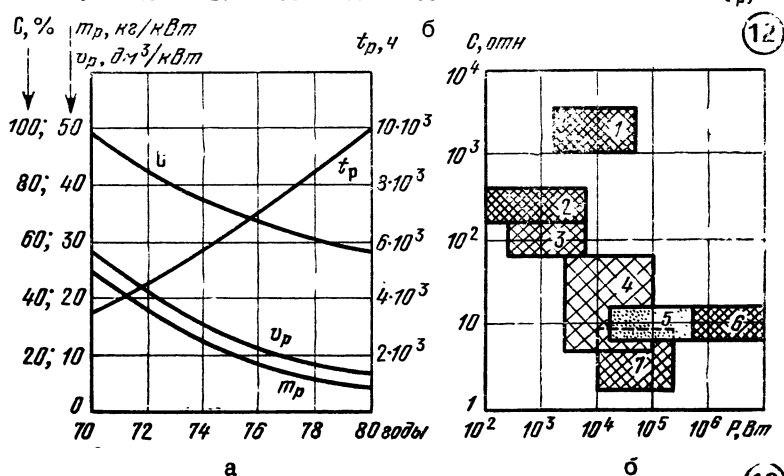
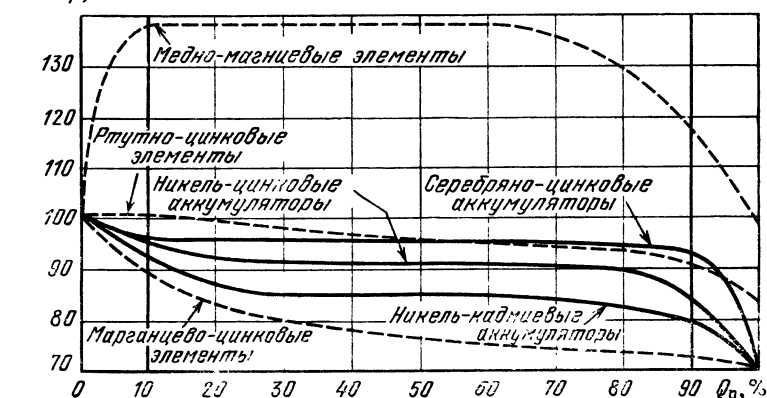
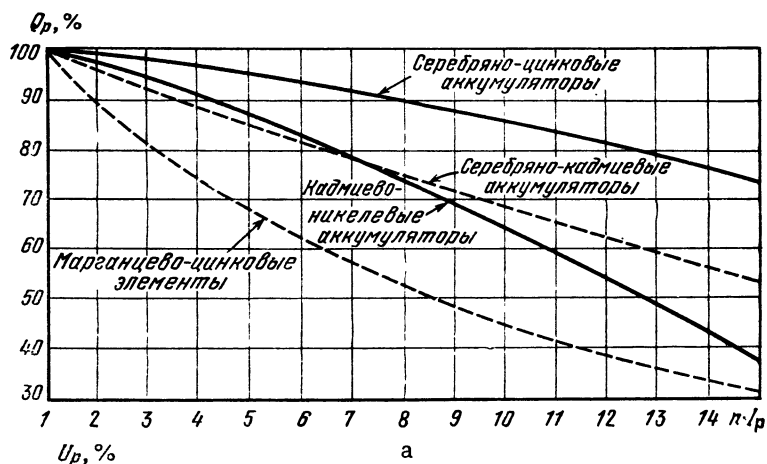
Рис. 9.13. Относительная стоимость C , удельные массы m_p и объем v_p и ресурс работы t_p электрохимических генераторов космического назначения (а), допускаемые значения относительной стоимости C и мощности P для ИП различного назначения (б):

1 — космического, 2 — военного, 3 — для отдельных районов при допущении повышенной стоимости, 4 — для электрического транспорта (кроме автобусов), 5 — местные энергосистемы, 6 — центральные энергосистемы, 7 — коммерческие автобусы

Так как основой ИП чаще всего являются термочувствительные структуры, то в число определяющих параметров приходится вводить температуру, влияние которой показано на рис. 9.5. Из анализа зависимостей (рис. 9.6) видно, сколь нецелесообразно использовать гальванические ИП при больших разрядных токах. На основе этих же зависимостей можно проанализировать технико-экономическую целесообразность использования тех или иных ИП при заданном объеме или массе. Определив объем или массу и мощность ИП по графику рис. 9.2, а и б, можно найти ориентировочную энергоемкость, а по ней и систему ИП. Если ИП работает при низкой температуре, когда отдача падает, то реальные характеристики ИП оценивают по графику рис. 9.5.

Большинство аккумуляторов при разрядных токах в 5...10 раз выше номинального теряют 10...25% Q_p , ГЭ в этих же условиях теряют до 50% Q_p . Поэтому для оценки использования химических ИП при больших токах разряда (для ГЭ примерно 0,01 Q_p , для А 0,1 Q_p) следует по графику рис. 9.12 оценить снижение реальной отдачи при разряде токами, превышающими в n раз номинальный. При особых требованиях к стабильности напряжения в процессе разряда следует оценивать относительное значение $U_p = f(Q)$ по графику рис. 9.12, б.

Одной из важнейших технико-экономических характеристик ИП является отдача ими энергии (по



сути дела, к. п. д.). Для ГЭ она равна отношению отданной во внешнюю цепь емкости при разряде к емкости, запасенной активными массами электродов; для А — отношением емкости разряда к емкости заряда; для полупроводниковых ИП — отношением емкости выходной (электрической природы) к затраченной. К. п. д. термоэлементов 0,08 ... 0,1, фотоэлементов — 0,001 ... 0,01, атомных батарей — 0,001 ... 0,25.

Для А целесообразно рассматривать различные виды отдачи: по энергии $W_p/W_a = I_p U_p t_p / I_a U_a t_a$; по емкости $Q_p/Q_a = I_p t_p / I_a t_a$; по напряжению U_p/U_a .

Для повышения эксплуатационных характеристик аккумуляторов необходим контроль минимального напряжения ($U < 1$ В губительно для большинства аккумуляторов), использование датчиков давления, визуальных или автоматических сигнализаторов уровня, водородных визуальных (Х11, Х13, Х15) или автоматических

9. Источники энергии питания

(Х602) счетчиков количества электричества. Их использование особенно необходимо в автоматизированных системах электропитания для необслуживаемой РЭА.

Сводные данные, необходимые при технико-экономическом анализе ИП, даны в табл. 9.23, 9.24. Зависимость $U_p = f(Q)$ (рис. 9.12) позволяет оценить относительную стабильность напряжения как в течение всего времени разряда, так и в области 10 ... 90% Q_p . Для примерной оценки эксплуатационных расходов можно воспользоваться данными табл. 9.25 и 9.26 и примерами выбора ИП (с. 297).

Перспективные ИП

По мере освоения перспективных ИП с улучшенными параметрами происходит их быстрое внедрение в практику. Так например, аппроксимированные характеристики электрохимических генераторов космического назначения (рис. 9.13, а) показывают, что за последнее де-

Таблица 9.23

Электродвижущая сила и напряжение некоторых видов источников питания

Тип элемента или аккумулятора	E , В	U , В
Свинцово-кадмиевый	2,4	2,1...1,8
Хлорный	2,05	1,9...1,6
Марганцево-магнневый	2,0	1,5...1,4
Марганцево-цинковый солевой	1,8	1,46...0,95
Марганцево-цинковый щелочной	1,5	1,3...1,1
Ртутно-цинковый	1,35	1,25...1,1
Воздушно-цинковый	1,4	1,25...1,0
Воздушно-железный	1,0	0,65...0,5
Медно-цинковый	0,96	0,7...0,5
Серебряно-цинковый	1,84	1,5...1,4
Никель-цинковый аккумулятор	1,83	1,5
Серебряно-кадмиевый аккумулятор	1,5	1,15...1,05
Железо-никелевый аккумулятор	1,4	1,2
Кадмиево-никелевый аккумулятор	1,36	1,2...1,1
Топливный	1,2...1,0	0,9
Биологический	1,0...0,6	0,5
Термоэлектрический	0,2...0,13	0,1
Термоэмиссионный	2,5...0,7	2,0...0,5
Фотоэлемент на органической основе	1,1	0,8
Фотоэлемент кремниевый	0,55	0,4

Примечание. Напряжения зависят от режима разряда и могут отличаться от указанных в таблице

Таблица 9.24

Удельные разрядные и энергетические характеристики гальванических элементов, аккумуляторов и батарей

Тип элемента, батареи	Q_v	Q_m	W_v	W_m
326	100	40	120	50
Пуговичный МЦ	90	27	124	40
3336	51	31	30	17
МЦ рамочной конструкции	53	24	213	96
ГБ-у-10-1,3	87	56	86	50
«Крона-1Л»	125	71	112	64
«Крона ВЦ»	300	150	270	135
«Финиш»	290	160	235	133
Медно-магниевого	130	64	200	97
Медно-окисный	53	80	35	52
РЦ-83	226	53	282	67
Хлорно-свинцовый	70	27	127	46
Медно-магниевого	70	33	82	40
Серебряно-цинковый	130	50	200	70
Авиационный свинцовый	39	16	58	26
Ламельный НК	36	13	43	16
Ламельные НЖ	30	15	45	15
Безламельные КНБ	54	32	65	36
Аккумулятор Д-0,25	62	14	75	17
Аккумулятор ЦНК	63	21	76	26
Аккумулятор КНГ	42	15	52	18
Аккумулятор серебряно-цинковый	87	77	130	114
Аккумулятор серебряно-кадмиевый	100	53	105	56
Аккумулятор никель-цинковый	67	36	106	57

сятилетие их относительная стоимость уменьшилась на 40%, а удельная масса m_p и объем сократились с 28 до 7 кг/кВт и с 25 до 4,5 дм³/кВт при почти трехкратном (с 3500 до 10 000 ч) увеличении времени работы t_p .

Определяющим фактором экономичности ИП является стоимость их электродов. По зарубежным данным, в зависимости от условий эксплуатации допускается (рис. 9.13, б) относительное изменение стоимости (С) в пределах 1,5 ... 5000. Расчеты показывают, что во многих случаях стоимость передачи энергии в химической форме (в наземных энергетических системах) значительно ниже, чем в электрической. Это является основой разработки водородных энергетических систем с использованием различных типов топливных элементов.

Поиски новых видов ИП объясняются специфическими требованиями к массе, объему и надежности, новыми областями применения (космос, океан), загрязнением окружающей среды, необходимостью повышения удельных характеристик автономных ИП, а также ограничениями по использованию природных видов топлива. Разработаны ГЭ с твердым электролитом и литиевым анодом, они практически не имеют саморазряда, срок службы их 10 ... 20 лет. ИП с твердым электролитом целесообразно использовать при малых разрядных токах, например, в биостимуляторах сердца. Такой ГЭ с размерами 17×30 мм имеет $U_H = 1,9$, $U_{KH} = 1,5$ В при $Q_p = 0,75$ А·ч. Для использования в ГЭ щелочных металлов, имеющих высокую энергоемкость, разработаны элементы с органическими электролитами. Они имеют э. д. с.

Таблица 9.25

Отдача некоторых аккумуляторов по заряду и энергии, %

Тип аккумулятора	Q_t	Ψ_t
Свинцовый кислотный авиационный	70..80	65...70
Никель-кадмиевый ламельный	58..67	44..50
Никель-кадмиевый безламельный	63...75	45..50
Никель-кадмиевый герметический	55...65	45..50
Никель-кадмиевый цилиндрический	60..67	48...55
Никель-железный	47..58	41...47
Серебряно-цинковый	90..98	80..85

Примечание. Данные по относительной отдаче никель-кадмиевых герметичных аккумуляторов даны для дискового типа

Таблица 9.26

Стоимость электроэнергии и розничная цена некоторых источников энергии

Источник энергии	Цена, коп	Стоимость, 1 Вт ч, коп	Примечания
Элемент 316	10	17,3	$I_p = 5$ мА
Элемент 332	3,5	3,8	$I_p = 8$ мА
Элемент 336	5	3,5	$I_p = 12$ мА
Элемент 343	13	7,3	$I_p = 15$ мА
Элемент 373	17	4,4	$I_p = 32$ мА
Батарея 3336	17	3,4	$I_p = 12$ мА
Батарея «Рубин-2»	64	3,3	$I_p = 25$ мА
Батарея «Крона ВЦ»	48	9,2	$I_p = 8$ мА
Устройство зарядное	250	—	Д-0,1; 7Д-0,1
Аккумулятор Д-0,1	80	4,8	$N_p = 150$
Батарея 7Д-0,115	600	7,9	$N_p = 100$
ТЭ генератор изотопный	—	0,8	$P = 60$ Вт
Атомная ЭС тепловая	—	0,25	—
Дизельная ЭС	—	0,05	—
ТЭ генератор солнечный	—	0,09	$P = 125$ Вт
ТЭ генератор газовый	—	0,04	$P = 6$ Вт
Атомная ЭС	—	0,01	—
Топливная ЭС	—	0,005	—

Примечания: 1 Цены указаны розничные. Цена элементов со щелочным электролитом на 30-300% выше, чем с соевым, 2 Данные по стоимости ватт-часа энергий достаточно стабильны, для остальных источников энергии они могут отличаться от приведенных в таблице вследствие модернизации, особых условий эксплуатации и т. п.

2,45 ... 2,95 В и весьма стабильное напряжение при разряде, значения W_m около 200 Вт·ч/кг, W_b до 55 Вт·ч/дм³ при ресурсе до 2000 ч и интервале рабочих температур 263 ... 333 К (—10 ... +60° С).

В качестве новых аккумуляторов предполагается использовать натрий-серные, литий-серные и литий-хлорные. Ожидается получение весьма высоких показателей по ресурсу (до 26 000 ч), числу рабочих циклов (до 13000), при этом параметр W_m достигает 200 Вт·ч/кг и P_m 550 Вт/кг, а Q_b составляет 600 А·ч/дм³. Металло-газовые аккумуляторы теоретически могут дать энергию до 3700 Вт·ч/кг при ресурсе до 10 000 ч.

Ведутся активные поиски новых материалов и конструктивно-компоновочных решений ГЭ и ТЭМ генераторов, в качестве источников тепловой энергии которых используют солнечную радиацию, радиоизотопные и ядерные источники.

Существующие электрохимические генераторы на основе топливных элементов с ионообменной мембраной имеют ресурс 6000 ч, а P_m 100 Вт/кг и P_b 15 Вт/дм³. Для наземных условий при работе в интервале температур 238 ... 328 К (—35 ... +55° С) и любой погоде созданы ЭХГ мощностью 1500 Вт, с напряжением 25 ... 34 В, масса их $m = 70$ кг, объем $V = 0,2$ м³, потребление топлива 1 г/Вт·ч при бесшумной и бесперебойной работе в течение 480 ч. В качестве перспективного топлива (из-за низкой стоимости) для топливных элементов предполагается использовать аммиак.

Примеры выбора ИП

Пример 1. Выбрать ИП для малогабаритного транзисторного приемника: $U = 9 \dots 6$ В, $I_p = 8 \dots 9$ мА, t_p не менее 1000 ч. Рассмотрим три типа ИП: 1) «Крона ВЦ», 2) 7Д-0,1, 3) две батареи 3336. При $t_p = 1200$ ч (20%-ный запас) получим: 1) «Крона ВЦ» — 15 шт. (1200 : 80), стоимость 720 коп., 2) 7Д-0,115 (с учетом стоимости зарядов на 100 циклов 0,8 коп. и выработки 0,1 ресурса зарядного устройства на 2,5 коп. при 10 000 циклах) — 1 шт., стоимость 603,3 коп.;

3) батареи 3336 — 9 комплектов, стоимость 305 коп. Таким образом, приемник выгоднее питать от малогабаритных ИП «Крона ВЦ», если нельзя использовать зарядные устройства (например, при длительном отсутствии электрических сетей). Если же есть возможность подзарядки 7Д-0,115, выгоднее аккумуляторная батарея, так ее практический ресурс $N = 150 \dots 170$ циклов, что в 1,5 ... 1,7 раза повышает экономичность эксплуатации. Если нет ограничений на вес и габариты, то еще более экономичным будет использование двух батарей 3336.

Пример 2. Выбрать ИП для автономного навигационного устройства с ресурсом не менее 5 лет, $P_{ср} = 0,5$ Вт, скважность работы 0,2. Полная энергоемкость ИП $W = 50\,000 \cdot 0,5 \cdot 0,2 = 5\,000$ Вт·ч.

В зависимости от условий эксплуатации допустимы следующие варианты электропитания: в арктических или труднодоступных районах — радионизотопный генератор подобный «Бета-С»; в непосредственной близости от магистрали газопровода — ТЭГ; в сравнительно легких условиях (специальное помещение) — шесть ГЭ типа ВД-1000 или семь типа МОЭ-1000 (МОЭМ-1000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов Р. Г. Первичные источники питания/ В кн.: Краткий справочник конструктора РЭА. — М.: Сов. радио, 1972, с. 27...49.
2. Дамье В. Н., Рысухин Н. Ф. Производство гальванических элементов и батарей— М.: Высшая школа, 1970.
3. Елисеев В. Б., Пятницкий А. П.; Сергеев Д. И. Термоэмиссионные преобразователи энергии.— М.: Атомиздат, 1970.
4. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания.— М.: Сов. радио, 1968.
5. Коровин Н. В. Новые электрохимические источники тока. Обзор иностранной печати /Информэлектрон.— М.: 1974.
6. Орлов В. А. Малогабаритные источники тока.— М.: Воениздат, 1970.

7. Прямое преобразование энергии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1969.
8. Романов В. В., Хашев Ю. М. Химические источники тока. — 2-е изд. М.: Сов. радио, 1978.
9. Сизов Н. И., Шабловский В. И. Бортовые источники электри-

10. Защита от паразитных наводок
ческого питания. — М.: Воениздат, 1973.

10. Термоэлектрические генераторы /Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С. — М.: Атомиздат, 1971.

10. ЗАЩИТА ОТ ПАРАЗИТНЫХ НАВОДОК*

Основные аббревиатуры

ИН — источник наводки
ИС — интегральная микросхема
ОС — обратная связь
ПН — приемник наводки
ПС — паразитная связь
РЯ — развязывающая ячейка
УП — усилительный прибор (ЭВП,
ИС, транзистор или их комбинация)
Э — эффективность экранирования
ЭФ — эффективность фильтра (фильтрации)
ЭГП — эквивалентная глубина проникновения

10.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОЧНИКАХ И ПРИЕМНИКАХ ПАРАЗИТНЫХ НАВОДОК

Паразитная наводка — это не предусмотренная электрической схемой и конструкцией передача напряжения, тока или мощности от одного радиотехнического устройства к другому или из одной части РЭА в другую. Наводки возникают вследствие паразитных связей (ПС) между РЭА и их частями, которые невозможно указать на принципиальной электрической схеме, так как они зависят от конструкции, компоновки элементов и РЭА в целом и почти не поддаются расчету. При анализе наводок всегда можно выделить источник наводимого напряжения (ИН), приемник этого напряжения (ПН) и паразитную связь (ПС) между ними.

Любая РЭА или часть ее может стать ИН и ПН. Все зависит от отношения между выходной энергией данного элемента РЭА и чувствительностью к восприятию этой энергии другого элемента. Поэтому на первом этапе решения конкретной задачи считают, что каждый элемент РЭА может быть как приемником так и источником наводок. Затем методом последовательного исключения отбирают наиболее вероятные варианты, подлежащие детальной проработке.

Наводка на основной частоте ИН чаще всего оказывает влияние на чувствительные резонансные усилители, настроенные на частоты ИН. Чем выше добротность контуров, тем более вероятна наводка. Такой же наводке подвержены чувствительные усилители низкой (УНЧ) и видеочастоты (ВУС), на выходе которых возникают искаженные сигналы и импульсы, даваемые ИН (рис. 10.1).

Реже встречается наводка на гармониках. Она возникает в устройствах, содержащих элементы, работающие на кратных частотах. Если каскад, имеющий относительно высокий уровень мощности, работает в нелинейном режиме, то мощность гармоник основной частоты может оказаться достаточной, чтобы помешать работе чувствительных элементов, настроенных на кратные частоты. Примером такой наводки является радиостанция с совмещенным расположением передатчиков и приемников, работающих на разных частотах, в которой отсутствует возможность приема на гармониках частот передатчиков. Другим примером наводки на гармониках может слу-

* Составитель М. Л. Волин.

жить супергетеродинный радиоприемник с большим усилением по ВЧ и ПЧ. В нем иногда возникает самовозбуждение, хрипы и искажения характеристик при настройке усилителя ВЧ на гармоники ПЧ.

Ударное возбуждение

ИН могут быть любые электро- радио- и электронные установки, в которых наблюдаются резкие скачки постоянного (рис. 10.2, а) или переменного напряжения и тока. Они вызывают заряд, разряд и перезаряд емкости одиночного колебательного контура, который протекает в виде затухающего колебательного процесса, подобного звону колокола (рис. 10.2, б). Связь ИН с одиночным контуром всегда невелика и редко приводит к заметной помехе. Ударное возбуждение обнаруживается в многокаскадных приемниках и в другой РЭА с большим коэффициентом усиления, достаточным для доведения малых входных мощностей до величин, создающих заметное мешающее действие. В таких сложных системах анализ ударного возбуждения производится спектральным методом, сущность которого заключается в следующем.

На вход ПН поступает от ИН скачок постоянного напряжения (рис. 10.3, а). Его можно заменить суммой синусоидальных напряжений всех частот от 0 до ∞ , амплитуды которых обратно пропорциональны частоте. График (рис. 10.3, б) показывает зависимость амплитуд входных синусоид $A_{вх}$ от частоты, так называемой «спектр скачка». Такая замена, сделанная на основании интеграла Фурье, позволяет вместо подробного анализа процессов, происходящих в каскадах, контурах и элементах ПН, пользоваться анализом прохождения через него всех частот спектра (рис. 10.3, б). Это прохождение определяется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) ПН (рис. 10.3, в). Он пропускает частоты от ν_1 до ν_2 и подавляет все остальные. Поэтому выходной спектр ПН будет содержать только синусоиды с частотами $\nu_1 \dots \nu_2$ (рис. 10.3, г). После суммирования всех этих си-

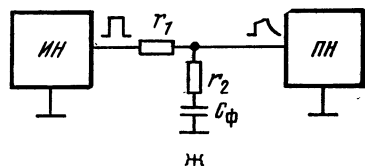
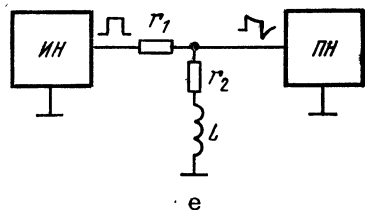
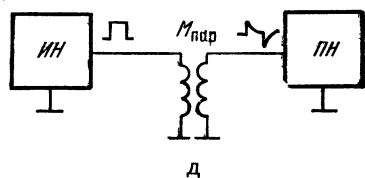
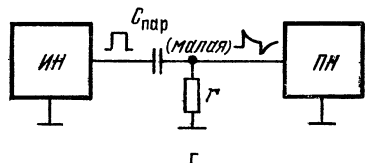
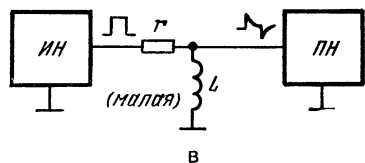
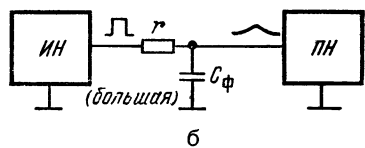
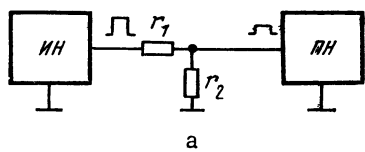


Рис. 10.1. Искажения прямоугольного импульса при различных цепях связи

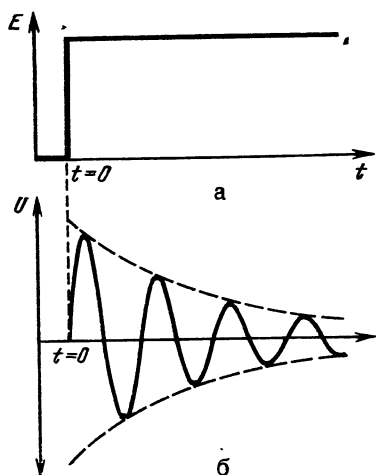
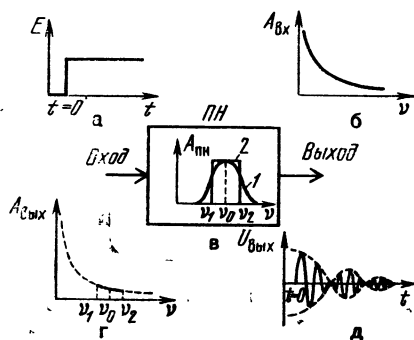


Рис. 10.2. Скачок постоянного напряжения (а) и затухающий колебательный процесс (б)

нусонд получается отклик $U_{\text{вых}}(t)$ ПН на скачок напряжения на его входе (рис. 10.3 д). Он представляет собой затухающую серию ВЧ импульсов, несущая частота которых равна средней частоте полосы пропускания ПН ν_0 . Когда амплитудно-частотная характеристика ПН имеет пологие края (кривая 1 на рис. 10.3, в), серия импульсов сливается в один с растянутым срезом. Длительность этого импульса, измеренная на половинном уровне,

Рис. 10.3 Скачок напряжения (а), спектр скачка (б), амплитуды входных синусоид (в), выходной спектр ПН (г), отклик ПН на скачок напряжения (д)

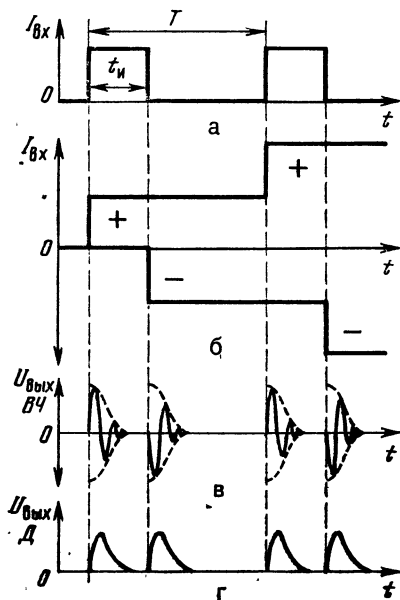


10. Защита от паразитных наводок

приблизленно равна $t_{\text{и}} = 1/2\Delta\nu_{0,7}$, где $\Delta\nu_{0,7}$ — полоса пропускания ПН.

ИН, в цепях которых возникают одиночные скачки напряжения и тока, встречаются не часто. К ним можно отнести реле и выключатели с редкими и нерегулярными срабатываниями. Значительно чаще встречаются ИН, вырабатывающие непрерывную последовательность импульсов, которую можно рассматривать как сумму положительных (включение) и отрицательных (выключение) скачков напряжения, посылаемых в моменты, соответствующие фронту и срезу наводимых импульсов (рис. 10.4, а, б). В результате каждого скачка получается затухающая серия или один импульс с растянутым срезом, как показано выше. Если длительность наводимых видеомпульсов $t_{\text{и}}$ и интервалов между ними $T - t_{\text{и}}$ таковы, что процесс, вызванный предыдущим скачком, успевает полностью затухнуть к моменту появления следующего скачка, то на выходе ПН

Рис. 10.4. Последовательность прямоугольных импульсов (а), эквивалентные им скачки тока или напряжения (б) затухающие колебания (в) и соответствующие им импульсы (г)



получается непрерывная последовательность затухающих импульсов, начинающихся в моменты, соответствующие фронту и срезу импульсов ИН (рис. 10.4, в, г). При уменьшении длительностей $t_{и}$ и T происходит суммирование сдвинутых во времени выходных импульсов ПН с учетом разности фаз составляющих колебаний. При этом форма импульсной помехи на выходе ПН усложняется.

Скачки и импульсы ВЧ напряжения наводят на ненастроенные на их несущую частоту ПН помеху, форма которой мало отличается от рассмотренной выше. Количественный анализ явления показывает, что скачок переменного напряжения создает значительно меньшую наводку, чем скачок постоянного напряжения. Из-за этого прямая наводка высокочастотных импульсов встречается редко. Опаснее наводка их путем детектирования, т. е. преобразования в видеосигналы в любом нелинейном элементе ПН. Это необходимо учитывать при разработке радиоприемников, предназначенных для работы вблизи мощных импульсных радиопередатчиков [5].

Наиболее вероятные ИН и ПН

При проектировании РЭА важно знать вероятные ИН и ПН для принятия необходимых мер в наиболее опасных местах аппаратуры.

ИН: сеть переменного тока; мощные генераторы ВЧ, особенно работающие в нелинейном режиме, и импульсные; импульсные модуляторы с высоким напряжением и большим током; генераторы импульсов, особенно с большим током, например, блокинг-генераторы; выходные и предоконечные каскады УВЧ, УПЧ и УНЧ; генераторы развертки, особенно с высоким напряжением и малым временем обратного ухода; реле и другие включающие и выключающие приборы; выходные и силовые трансформаторы; коллекторные электрогенераторы.

ПН: все радиоприемники, особенно высокочувствительные и работающие в длинноволновом диапазоне; входные и первые промежуточные каскады усилителей всех

типов; входные трансформаторы УНЧ; спусковые устройства (триггеры, ждущие мультивибраторы и т. п.) с высокой чувствительностью срабатывания.

Защита РЭА от наводок сводится к выполнению следующих требований: все ИН, находящиеся в разрабатываемой РЭА, должны не мешать ее нормальному действию; разрабатываемая РЭА не должна мешать нормальному действию окружающей аппаратуры (за исключением случаев принципиальной невозможности осуществления этого); в разрабатываемой РЭА должны быть приняты меры к тому, чтобы окружающая аппаратура ей не мешала.

Для решения первых двух задач необходимо встраивать помехоподавляющие устройства (экраны, фильтры) во все вероятные ИН, что гарантирует отсутствие наводки не только на данный конкретный ПН, то и на все другие, которые могут обнаружиться в дальнейшем. В тех частных случаях, когда наводка поступает на ПН по входным цепям вместе с сигналами и на тех же частотах, подавление ее у ИН является единственным способом избавления от нее. В остальных случаях, для большей надежности, полезно решать и третью задачу — вводить помехоподавляющие устройства в ПН, хотя бы частично. Особенно это важно делать в радиоприемниках и усилителях, работающих совместно с мощными импульсными генераторами.

10.2. ЦЕПИ ПАРАЗИТНОЙ СВЯЗИ

ИН может быть связан с ПН через электрическое и магнитное поле, электромагнитное поле излучения и соединительные провода.

Напряженность ближних электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от элемента, возбуждающего поле. Напряженность электромагнитного поля излучения обратно пропорциональна первой степени расстояния. Напряженность на конце проводной линии или волновода с увеличением расстояния

падает весьма медленно. Из этой зависимости действия различных видов связи от расстояния следует, что при малых расстояниях наводка может поступать по всем четырем путям. С увеличением расстояния в первую очередь исчезают связи через ближние электрическое и магнитное поля, во вторую очередь перестает влиять электромагнитное поле излучения и на большом расстоянии наводка может передаваться только по проводам и волновым.

Непосредственная паразитная емкостная связь

Эта ПС осуществляется через ближнее электрическое поле. Если (рис. 10.5) тело A имеет напряжение $E_{ин}$ относительно корпуса, то на теле B , связанном с телом A малой паразитной емкостью $C_{пар}$ и являющемся ПН, возникает напряжение $U_{пн}$, величина которого определяется соотношением между емкостным сопротивлением $x_{пар} = 1/j\omega C_{пар}$ и входным сопротивлением ПН $Z_{пн}$. Комбинация из этих двух сопротивлений является простейшим делителем, к которому и сводится любая емкостная ПС. Так как всегда $x_{пар} \gg Z_{пн}$, то напряжение $U_{пн} = E_{ин} Z_{пн} / x_{пар}$ и коэффициент паразитной емкостной связи будет

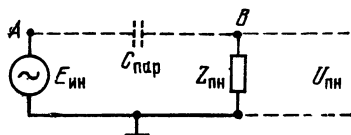
$$\beta_e = U_{пн} / E_{ин} = Z_{пн} / x_{пар} = \omega C_{пар} Z_{пн}. \quad (10.1)$$

Отсюда следует, что влияние емкостной ПС тем больше, чем выше рабочая частота, если $Z_{пн}$ не падает с повышением частоты.

Пример. Если $C_{пар} = 1$ пФ и $Z_{пн} = 1$ кОм, то на высшей частоте УНЧ 5 кГц:

$$\beta_e = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 = 3,14 \times 10^{-5} = 0,00314\%.$$

Рис. 10.5. Схема возникновения емкостной паразитной связи



10. Защита от паразитных наводок

В видеоусилителе, высшая частота которого достигает 5 МГц, этот коэффициент возрастает в 1000 раз т. е. $\beta_e = 3,14\%$.

Часто ПН имеет чисто емкостное входное сопротивление $Z_{пн} = 1/\omega C_{пн}$. Тогда делитель (рис. 10.5) будет емкостным и коэффициент ПС

$$\beta_e = C_{пар} / C_{пн} \quad (10.2)$$

не зависит от частоты

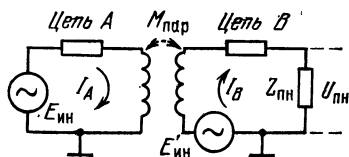
Непосредственная паразитная индуктивная связь

Эта ПС возникает через ближнее магнитное поле. В цепи ИН A (рис. 10.6) проходит переменный ток $I_A = E_{ин} / Z_A$, где Z_A — полное сопротивление цепи A . Эта цепь индуктивно связана с цепью ПН B паразитной взаимоиндуктивностью $M_{пар}$. Ток I_A возбуждает в цепи B электродвижущую силу $E'_{ин} = I_A \omega M_{пар} = E_{ин} \omega M_{пар} / Z_A$, под действием которой в цепи B протекает ток $I_B = E'_{ин} / Z_B = E_{ин} \omega M_{пар} / Z_A Z_B$, где Z_B — полное сопротивление цепи B , частью которого является входное сопротивление ПН $Z_{пн}$. В результате на входе ПН получается напряжение $U_{пн} = I_B Z_{пн} = E_{ин} \omega M_{пар} Z_{пн} / Z_A Z_B$, откуда, коэффициент индуктивной ПС:

$$\beta_m = U_{пн} / E_{ин} = \omega M_{пар} Z_{пн} / Z_A Z_B \quad (10.3)$$

Таким образом, индуктивная ПС проявляется тем сильнее, чем выше частота, чем больше паразитная взаимоиндуктивность, чем больше входное сопротивление ПН и чем меньше полные сопротивления связывающихся цепей.

Рис. 10.6. Схема возникновения индуктивной паразитной связи



Пример. Определим коэффициент индуктивной ПС между выходным и входным трансформаторами УНЧ на высшей частоте $\nu_B = 5$ кГц, если известно, что входное сопротивление первого каскада $Z_{\text{вх}} = 1$ кОм, индуктивность рассеивания выходного трансформатора $L_{s \text{ вых}} = 10$ мГ, входного трансформатора — $L_{s \text{ вх}} = 40$ мГ, полное сопротивление выходной цепи $Z_A = 10$ Ом, входной — $Z_B = 2$ кОм.

Для расчета $M_{\text{пар}}$ нужно знать величину коэффициента связи k_c между трансформаторами, которая зависит от их взаимного расположения и может быть определена только измерением на макете. Предположим, что измерение дало: $k_c = 0,1\%$. Тогда $M_{\text{пар}} = k_c \sqrt{L_{s \text{ вых}} L_{s \text{ вх}}} = 10^{-3} \cdot \sqrt{40 \cdot 10} = 20$ мкГ, откуда коэффициент индуктивной ПС $\beta_M = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^3 \times 20 \cdot 10^{-6}}{10^3 \cdot 2} = 3,14\%$. Из этой цифры следует, что при коэффициенте усиления по напряжению $K_{\text{ус}} > 32$ УНЧ может самовозбудиться. Во избежание этого нужно или изменить расположение трансформаторов так, чтобы уменьшить k_c , или изменить конструкцию входного трансформатора для уменьшения $L_{s \text{ вых}}$.

Емкостная и индуктивная паразитные связи по посторонним проводам

Эти виды связи могут получаться и при отсутствии непосредственной связи между ИН и ПН. На рис. 10.7 показано размещение ИН и ПН в отдельных экранированных отсеках, находящихся на большом расстоянии друг от друга. Через отсеки проходит провод АВ, не имеющий непосредственного отношения к обоим

Рис. 10.7. Схема емкостной и индуктивной паразитных связей через посторонний проводник:

$$C_1 = C_{\text{пар}1}, C_2 = C_{\text{пар}2}$$

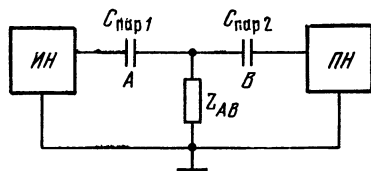
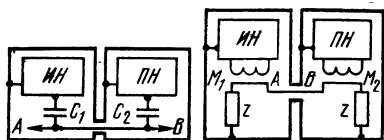


Рис. 10.8. Эквивалентная схема емкостной паразитной связи

элементам. Этот провод имеет емкость $C_{\text{пар}1}$ или взаимоиндукцию $M_{\text{пар}1}$ по отношению к ИН и емкость $C_{\text{пар}2}$ или взаимоиндукцию $M_{\text{пар}2}$ по отношению к ПН.

Из-за наличия провода АВ оба элемента имеют емкостную, индуктивную или индуктивно-емкостную ПС. Величина ПС определяется значениями $C_{\text{пар}1}$, $C_{\text{пар}2}$, $M_{\text{пар}2}$ и Z_{AB} , где Z_{AB} — полное сопротивление провода относительно корпуса. Из эквивалентной схемы для случая емкостной ПС (рис. 10.8) следует, что комбинация $C_{\text{пар}1}$ и Z_{AB} представляет собой делитель, действие которого определяет величину напряжения, наводимого через $C_{\text{пар}1}$ на ПН. Подобные эквивалентные схемы могут быть составлены для случаев индуктивной и смешанной ПС.

Паразитная связь через электромагнитное поле излучения

Эта связь наблюдается при значительных расстояниях между ИН и ПН, на которых непосредственные емкостная и индуктивная ПС практически отсутствуют. Такими считаются расстояния, превышающие пять длин волн, из-за чего эта ПС «по радио» прежде всего может проявиться не в пределах одного прибора, в котором имеются прямые индуктивные и емкостные ПС, а между разнесенными в пространстве устройствами. К нежелательным наводкам может приводить электромагнитное поле излучения соседних радиостанций, грозовых разрядов и промышленных помех. ПН почти всегда являются радиоприемные устройства, помехи поступают через антенну, которая соединяет с окружающим пространством на-

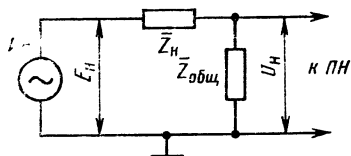


Рис. 10.9. Паразитная связь через общее полное сопротивление

более чувствительную точку приемника. Иногда сеть питания имеет ПС с антенным вводом или с входными каскадами радиоприемника. Тогда помехи наблюдаются и при отключенной антенне.

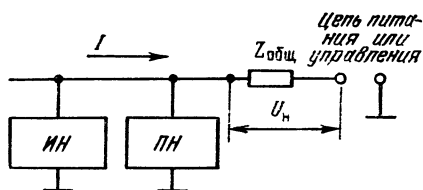
В пределах одного прибора связь через электромагнитное поле излучения в принципе возможна на волнах короче 30 см, т. е. на частотах выше 1 ГГц. Но волны деци- и сантиметрового диапазонов хорошо распространяются только в свободном пространстве и по волноводам. В объеме прибора, заполненном деталями, узлами и перегородками, эти волны затухают еще быстрее ближних, из-за чего ПС этого вида маловероятна и учитывать ее не следует.

Паразитная связь через общее полное сопротивление

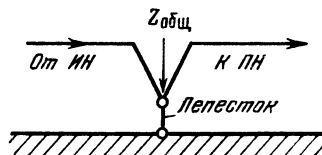
Причиной этого вида ПС являются провода, входящие в состав ИН и ПН (рис. 10.9). Показанная на рисунке цепь представляет собой делитель, в котором $Z_{общ} \ll Z_n$. Поэтому коэффициент ПС

$$\beta_{общ} = U_{пн}/E_n = Z_{общ}/Z_n. \quad (10.4)$$

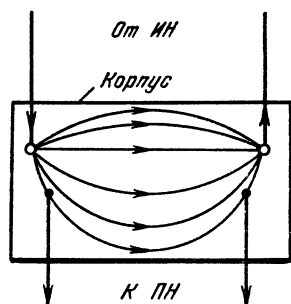
ПС через общее сопротивление встречается наиболее часто. На рис. 10.10, а изображена схема возникновения наводки по соединительным проводам и внутреннему сопротивлению источника питания или



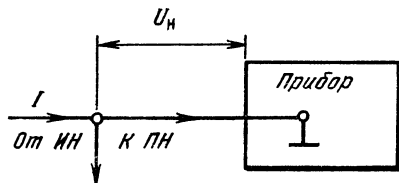
а



б



в



г

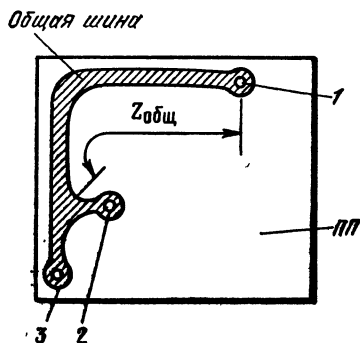


Рис. 10.10. Варианты паразитной связи:

а — через внутреннее сопротивление цепи питания или управления; б — через общий контактный лепесток; в — через общий участок корпуса; г — через общую шину присоединения к корпусу; д — через общий участок корпуса (шину) (1, 2, 3 — точки подключения к корпусу соответственно напряжения питания, общего провода первого и последнего каскада)

элементов управления РЭА. Через цепи ИН и ПН протекает ток I , создающий на $Z_{\text{общ}}$ падение напряжения U_n , которое оказывается приложенным к ПН. Величина $Z_{\text{общ}}$ зависит от частоты. Для постоянного тока и очень низких частот — это в основном сопротивление дросселей и резисторов фильтра и диодов выпрямителя или внутреннее сопротивление химических источников питания, для звуковых частот — активное сопротивление соединительных проводов и емкостное сопротивление выходного конденсатора фильтра питания. На ВЧ величина $Z_{\text{общ}}$ зависит в основном от индуктивного сопротивления соединительных проводов и конденсаторов фильтра питания. Для цепей управления — это выходное сопротивление источника управляющего напряжения. На рис. 10.10 б...д даны варианты наводок через общий лепесток, шины присоединения к корпусу, общий его участок.

Сравнение различных видов паразитной связи

С помощью данных табл. 10.1...10.3 можно приближенно оценить степень влияния того или иного вида ПС. Допустим, что провода диа-

метром 1 мм, относящиеся к возможным ИН и ПН, проложены рядом и на участке 200 мм расстояние между ними составляет 10 мм. В этом случае между ними будет паразитная емкость 1,8 пФ. Если ИН присоединен к корпусу шиной диаметром 2 мм, к которой подключен ПН на расстоянии 50 мм от корпуса, то в общее сопротивление войдет активное сопротивление 0,28 мОм и индуктивность 0,04 мкГ. Сведения о ПС между некоторыми радиоэлементами имеются в работе [1].

Взаимная индуктивность двух замкнутых контуров зависит от их взаимного расположения и конфигурации каждого контура. Если в оба контура входят участки двух параллельных объемных или печатных проводов, то изменение расстояния между ними может привести и к увеличению, и к уменьшению взаимной индуктивности. Это будет зависеть от изменения расположения и конфигурации контуров, а не от изменения, произведенного в указанном участке. В большей части литературы даются формулы для расчета взаимной индуктивности прямых проводников. Использовать их нельзя и истинную величину индуктивной паразитной связи можно определить только измерением на макете.

Таблица 10.1

Параметры плоских медных проводников, нанесенных на одностороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Индуктивность, нГ:				
при длине 10 мм	9,6	8,4	7,0	5,6
при длине 100 мм	138	130	116	102
Емкость между двумя одинаковыми проводниками, пФ/см:				
при расстоянии между ними 0,5 мм	0,42	0,47	0,6	0,7
1 мм	0,26	0,38	0,47	0,6
2 мм	0,21	0,28	0,38	0,5
Емкость, пФ/см, между проводом и экраном, расположенном рядом на расстоянии				
0,5 мм	0,53	0,6	0,7	0,8
2 мм	0,32	0,4	0,46	0,6

Т а б л и ц а 10.2

Параметры плоских прямых проводников, нанесенных на двустороннюю стеклотекстолитовую печатную плату

Параметр	Ширина проводника, мм			
	0,3	0,5	1,0	2,0
Индуктивность, нГ/см, при широком втором слое, являющемся обратным проводом, и толщине платы 0,5 мм	4,9	3,9	2,5	1,1
1 мм	6,3	5,3	3,9	2,5
2 мм	7,7	6,7	5,3	3,9
Емкость, пФ/см, между двумя одинаковыми проводниками, нанесенными на обе стороны платы толщиной 0,5 мм	0,84	1,08	1,75	2,7
1 мм	0,66	0,75	1,08	1,75
2 мм	0,54	0,63	0,75	1,08
Емкость, пФ/см, между проводом и экраном, нанесенным на обе стороны платы толщиной 0,5 мм	1,32	1,68	2,4	3,35
1 мм	0,93	1,17	1,68	2,4
2 мм	0,9	0,9	1,17	1,68

Т а б л и ц а 10.3

Ориентировочные значения параметров медного прямого провода длиной 100 мм

Параметр	Диаметр, мм			
	0,1	0,5	1,0	2,0
Сопротивление, мОм	220	8,9	2,2	0,55
Индуктивность, мкГ	0,15	0,12	0,10	0,08
Индуктивность, мкГ, провода, проходящего параллельно корпусу на расстоянии 10 мм	0,116	0,084	0,07	0,056
100 мм	0,142	0,110	0,096	0,08
Емкость, пФ, между проводом и параллельным ему корпусом при расстоянии 10 мм	0,9	1,4	1,6	1,8
100 мм	0,7	0,8	0,9	1,0
Емкость, пФ, между двумя параллельными проводниками при расстоянии 10 мм	0,5	0,75	0,9	1,2

Примечания: 1. Емкость и сопротивление пропорциональны длине провода. 2. Зависимость индуктивности от длины провода нелинейная, однако при длине провода 25...400 мм ее можно считать линейной, не делая ошибки, большей $\pm 20\%$. 3. Величины индуктивностей даны без учета частотно-зависимого поправочного коэффициента. 4. Обратные токи протекают по корпусу.

10.3. ЭКРАНИРОВАНИЕ

Подавление наводок в большинстве случаев сводится к устранению или ослаблению ПС между ИН и ПН путем экранирования и развязывания цепей

Экранированием называется локализация электромагнитной энергии в определенном пространстве, за счет ограничения распространения ее всеми возможными способами.

Из этого определения следует, что в понятие экрана входят как детали механической конструкции, так и электротехнические детали фильтрующих цепей и развязывающих ячеек, ибо только их совместное действие дает необходимый результат.

Как показано выше, ПС между разнесенными ИН и ПН получается в основном по проводам. В таких случаях достаточно включить в них одну или несколько развязывающих ячеек (РЯ), чтобы получить удовлетворительное экранирование без механических деталей. Если же в хорошо заэкранированное перегородками и корпусами пространство ввести неотфильтрованный провод, то можно полностью нарушить экранирование.

Определение необходимости той или иной степени экранирования данной электрической цепи, так же как и определение достаточности того или иного вида экрана, почти не поддается техническому расчету, потому что известные теоретические решения отдельных простейших задач оказываются не применимыми к сложным электрическим цепям, состоящим из произвольно расположенных в пространстве элементов, излучающих электромагнитную энергию в самых разнообразных направлениях. Для расчета экрана пришлось бы учитывать влияние всех этих отдельных излучений, что невозможно. Поэтому от конструктора, работающего в этой области, требуется особенно ясное понимание физического действия каждой экранирующей детали, ее относительного значения в комплексе деталей экрана и умение выполнять ориентировочные подсчеты эффективности экрана.

Эффективность экранирования

Эффективностью экранирования (\mathcal{E}) называется отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемом пространстве при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = U/U' = I/I' = E/E' = H/H'. \quad (10.5)$$

В технике проводной связи эту величину оценивают в неперах (Нп): $B = \ln \mathcal{E} = 0,115 A$, а в радиотехнике — в децибелах (дБ): $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8,7 B$

Подавление паразитной емкостной связи

Чтобы уменьшить емкость $C_{\text{пар}}$, изменяя расположение тел A и B (рис. 10.5), отдаляя их на максимально возможное расстояние друг от друга, меняют ориентацию; используют в конструкции миниатюрные радиоэлементы. При недостаточности всех этих мер между элементами устанавливается экран (рис. 10.11, а), служащий для экранирования электрического поля (постоянного и переменного). Иногда этот вид экранирования называют электростатическим. Экран вводит в цепь связи тел A и B дополнительный делитель, состоящий из емкостей C_1 и C_3 , который определяет напряжение на нем. Напряжение на теле B зависит от напряжения на экране и делителя из емкостей C_2 и C_B . Если $C_1 \gg C_3$, то первый делитель почти не действует, напряжение на экране почти равно напряжению на теле A , напряжение на теле B и на ПН ($U_{\text{ПН}}$) после установки экрана возрастает, а экран оказывается вредным. С увеличением емкости C_3 напряжение $U_{\text{ПН}}$ падает и при $C_3 = \infty$ (что равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом) делается равным нулю, если не учитывать остаточную паразитную емкость $C'_{\text{пар}}$ между телами (рис. 10.11, б). В действительности напряжение на теле B не равно нулю и может быть определено из уравнения

$$U'_{\text{ПН}} = E_{\text{ИН}} C'_{\text{пар}} / C_B. \quad (10.6)$$

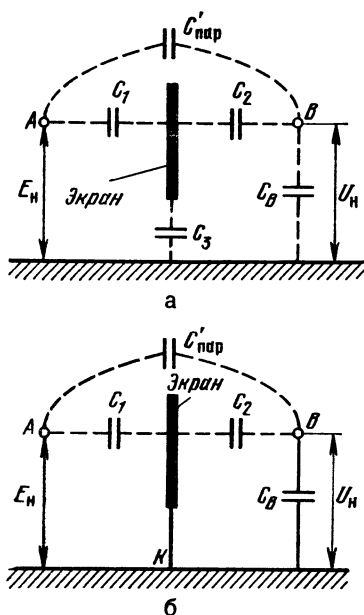


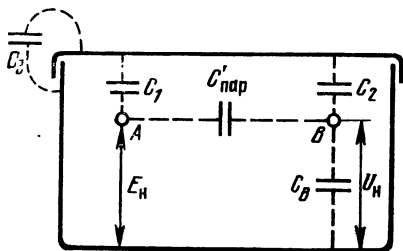
Рис. 10.11. Незаземленный (а) и заземленный (б) экраны

Учитывая (10.2), получаем, что для постоянного и переменного электрического поля

$$\mathcal{E} = C_{\text{пар}}/C'_{\text{пар}} \quad (10.7)$$

Таким образом, применение экрана, соединенного с корпусом прибора, сводится к уменьшению $C_{\text{пар}}$ путем создания короткого замыкания на корпус для большей части паразитной емкости, имеющейся между экранируемыми друг от друга телами.

Рис. 10.12. Паразитные емкости корпуса и крышки (листа)



10. Защита от паразитных наводок

Между точками АК (рис. 10.11, б) протекает ток I , величина которого определяется большим сопротивлением паразитной емкости C_1 . Этот небольшой ток создает незначительный магнитный поток, который пренебрегают. Также пренебрегают падением напряжения, получающимся на большой поверхности экрана. Важно, чтобы соединение экрана с корпусом было, действительно, коротким. Здесь соединительные проводники недопустимы. Несколько сантиметров провода могут резко ухудшить экранирование, особенно на КВ и УКВ.

Эффективность экранирования электрического поля не зависит от толщины экрана. Применимы даже электропроводящие краски [10]. Узкие щели и отверстия в экране не ухудшают экранирование электрического поля, если они малы по сравнению с длиной волны.

Металлический лист (крышка), прикрывающий экранируемые тела, может действовать по-разному. На рис. 10.12 нанесены все паразитные емкости, обозначенные также, как на рис. 10.11, а. Если лист не соединен с корпусом, то C_3 мала, последовательное соединение C_1 и C_2 значительно больше $C_{\text{пар}}$ (см. рис. 10.5) и такая крышка дает увеличение ПС. Если лист замкнуть на корпус, то C_1 и C_2 не будут связывать тела А и В и останется только $C'_{\text{пар}}$, которая меньше $C_{\text{пар}}$. Отсюда следует, что присоединенная к корпусу прибора крышка улучшит эффективность экранирования, несмотря на то, что крышка расположена не между экранируемыми телами. Экранирование может быть довольно эффективным, если лист проходит вблизи от экранируемых точек. В конструкции крышки важно, чтобы надежный контакт с корпусом не нарушался в производстве и эксплуатации. Крышка, плохо соединенная с корпусом, может оказаться причиной отказа в работе устройства.

Особенно тщательно нужно подходить к выбору конструкции крышек, прикрывающих одновременно несколько экранированных отсеков. На ВЧ приходится учитывать индуктивность и сопротив.

ление внутренней поверхности крышки, создающих остаточную ПС. Для устранения ее к крышке приклепывают пружинные губки, обеспечивающие контакт с промежуточными перегородками почти по всему периметру. Такое решение дорого, сложно, не очень надежно и не полностью устраняет ПС. Лучше делать отдельные крышки, закрывающие каждый отсек или два-три отсека. В этом случае можно обойтись без губок, обеспечивая надежный контакт каждой крышки с корпусом не менее, чем в двух точках. Подробно см. [4 и 5].

Металлизация

В РЭА всегда имеются металлические части, служащие не для экранирования, а для крепления, предохранения от повреждений, амортизации, силовых приводов и т. д. Случайно размещенные вблизи ИН или ПН несоединенные с корпусом металлические детали могут образовывать ПС. Поэтому следует обеспечивать надежный контакт с корпусом всех нетоконесущих деталей устройства. Съемные детали должны иметь по всему периметру соприкосновения металлическое покрытие, не подверженное коррозии. Несъемные детали следует приваривать или припаивать. Не надежные контакты в системе металлизации могут сами оказаться ИН. Особенно сложно осуществить надежное контактное соединение в конструкциях из алюминия и алюминиевых и магниевых сплавов, на которых получается окисная нетокопроводящая пленка. Здесь применяют самонарезающие винты, лепестки из биметалла АПМ, врезающиеся шайбы и пластины, герметизацию мест присоединения компаундом и другие способы, изложенные в [13]. Неучет свойств алюминия в бытовой РЭА и в приборах широкого применения, особенно при креплении корпусов электролитических и проходных конденсаторов, приводит к ухудшению параметров и увеличению числа отказов.

Подавление паразитной индуктивной связи

Для уменьшения взаимной индуктивности $M_{\text{пар}}$ (рис. 10.6) можно применить различные способы: изменить расположение связывающих цепей при максимальном расстоянии одной от другой, подобрать ориентацию трансформаторов, дросселей и катушек так, чтобы их оси были перпендикулярны, использовать элементы с малым рассеиванием магнитного потока (торондальные и броневые сердечники из магнитоэлектриков и ферритов, материалы с высокой магнитной проницаемостью), увеличить полное сопротивление связывающихся цепей. При недостаточности этих мер производится экранирование магнитного поля.

Экранирование постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля

Этот вид экранирования часто называют магнитоэлектрическим. Экраны изготавливают из ферромагнитных материалов (пермаллоя или стали) с большой относительной магнитной проницаемостью μ_r (табл. 10.4). Линии магнитной индукции проходят в основном по стенкам такого экрана (рис. 10.13), которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования магнитных полей зависит от магнитной проницаемости экрана и сопротивления магнитопровода, которое будет тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, идущих поперек направления линий магнитной индукции.

Экран такой конструкции используется редко, только при необходимости подавить наводку на частотах 0...1 кГц. В этом диапазоне эффективность экрана от частоты не зависит. Ее можно приближенно определить по уравнению [12]

$$\mathcal{E} = 1 + \mu_r \delta_{\text{экр}} / D, \quad (10.8)$$

где $\delta_{\text{экр}}$ — толщина стенок, экрана, D — диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий к длине стенки кубического экрана.

Электрофизические параметры некоторых металлов

	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м	0,0175	0,06	0,03	0,1		0,65
Удельная проводимость σ , см·см ³	$57 \cdot 10^4$	$16,6 \cdot 10^4$	$33 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$		$1,54 \cdot 10^3$
Относительная магнитная проницаемость μ_r	1	1	1	50	100	12000

На указанных частотах экран получается громоздким и дорогим. Получить сколько-нибудь удовлетворительную эффективность удается только при применении специальных материалов с высоким значением μ_r .

Пример. Определим эффективность подавления наводки на частотах 0,1 кГц экраном кубической формы с длиной ребра $D = 100$ мм; материал — сталь толщиной $\delta_{\text{экр}} = 0,8$ мм, $\mu_r = 100$. После подстановки в (10.8) получим: $\mathcal{E} = 1 + 100 \cdot 0,8/100 = 1,8$ или $B = \ln 1,8 = 0,59$ Нп; $A = 20 \lg 1,8 = 5,1$ дБ.

Увеличением толщины стального экрана нельзя добиться значительного повышения его эффективности. Так, при $\delta_{\text{экр}} = 2$ мм (что техноло-

гически крайне неудобно) $\mathcal{E} = 3$, $B = 1,1$ Нп и $A = 9,6$ дБ, т. е. значение \mathcal{E} возрастает всего на 4,5 дБ. Если же взять пермаллой ($\mu_r = 5000$) той же толщины (0,8 мм), то $\mathcal{E} = 41$, $B = 3,7$ Нп; $A = 32$ дБ. Данные этого расчета хорошо согласуются с результатами эксперимента [5, рис 2.28]

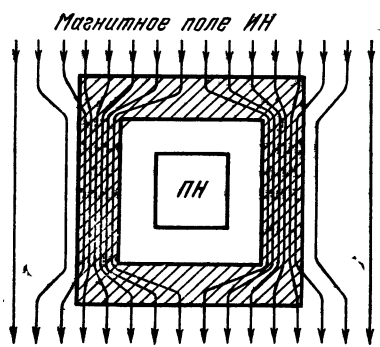
Экранирование высокочастотного магнитного поля

В конструкции электромагнитных экранов применяют немагнитные и ферромагнитные металлы. Вихревые токи, наведенные полем ИН в теле экрана, вытесняют внешнее поле из пространства, занятого экраном (рис. 10.14). Токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению, что обусловлено поверхностным эффектом (скин-эффектом). Сущность последнего заключается в том, что переменное магнитное поле ослабляется по мере проникновения в глубь металла, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях.

Из-за поверхностного эффекта плотность тока и напряженность магнитного поля падает по экспоненциальному закону по мере углубления в металл:

$$\frac{\text{Плотность тока на глубине } x}{\text{Плотность тока на поверхности}} = e^{-x/\delta}, \quad (10.9)$$

Рис. 10.13. Схема действия низкочастотного экрана



10.3. Экранирование

$$\text{где } \delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \quad (10.10)$$

— показатель уменьшения поля и тока, называемый эквивалентной глубиной проникновения (табл. 10.5). На глубине $x = \delta$ плотность тока и напряженность магнитного поля падает в e раз, т. е. до величины $1/2,72 = 0,37$ от плотности и напряженности на поверхности.

Экранирующее действие вихревых токов определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана. На высоких частотах, при относительно большой толщине материала экрана $\delta_{\text{экр}} > \delta$ действуют оба фактора и эффективность экрана можно определить по приближенному уравнению [12]

$$\mathcal{E} \approx e^{\delta_{\text{экр}}/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8t\mu\delta} \right). \quad (10.11)$$

На низких частотах, когда $\delta_{\text{экр}} < \delta$, поверхностный эффект незначителен, действует почти только первый фактор и эффективность рассчитывают по уравнению [12]

$$\mathcal{E} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\omega\mu\sigma D\delta_{\text{экр}}}{2m} \right)^2}. \quad (10.12)$$

В уравнениях (10.9) ... (10.12) приняты следующие обозначения: $\mu = \mu_0\mu_r$ — магнитная проницаемость; $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Г.см⁻¹ — магнитная постоянная; μ_r — относительная магнитная проницаемость; $\delta_{\text{экр}}$ — толщина стенок экрана, см; D — ширина прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического, см; $\omega = 2\pi\nu$ — угловая частота; ν — частота, Гц; σ — проводимость, См.см⁻¹; m — коэффициент формы экрана, для прямоугольного $m = 1$, для цилиндрического $m = 2$ и для сферического $m = 3$.

Пример. Определить эффективность медного цилиндрического экрана ($\delta_{\text{экр}} = 0,8$ мм, $D = 80$ мм) на частоте 0,1 МГц.

По табл. 10.5 находим ЭГП $\delta = 0,21$ мм; так как $\delta_{\text{экр}}/\delta = 0,8/0,21 = 3,8$, то можно поль-

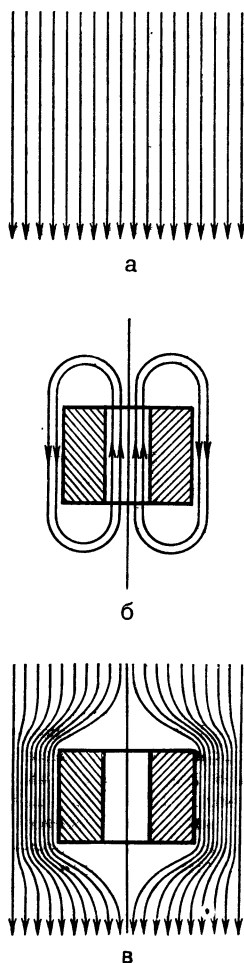


Рис. 10.14. Схема действия высокочастотного экрана: поле ИН (а), поле цилиндра (б), суммарное поле (в)

зоваться формулой (10.11) для случая $\delta_{\text{экр}} > \delta$. После подстановки получим:

$$\mathcal{E} = e^{3,8} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 0,21} \right) = 44,7 \cdot 68,5 = 3063;$$

$$B = 8 \text{ Нп, } A = 69,7 \text{ дБ.}$$

Пример. Определить, как изменится значение \mathcal{E} , если экран из предыдущего примера выполнить из стали с $\mu_r = 100$ (табл. 10.4).

ЭГП δ для различных экранирующих материалов, мм

Частота v, Гц	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь		Пермаллой
				$\mu_r = 50$	$\mu_r = 100$	
10^2	6,7000	12,4000	8,8000	—	1,540	0,380
10^3	2,1000	3,9000	2,7500	—	0,490	0,120
10^4	0,6700	1,2400	0,8800	—	0,154	0,038
10^5	0,2100	0,3900	0,2750	—	0,049	0,012
10^6	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	—	—
10^7	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	—	—
10^8	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	—	—

Примечание. Чтобы получить значения δ для других значений параметров v, σ и μ_r (см. табл. 10.4) следует учитывать, что δ обратно пропорциональна корню квадратному из всех этих величин

По табл. 10.5 находим $\delta = 0,049$ мм. Отношение $\delta_{\text{экp}}/\delta = 0,8/0,049 = 16,3$. Подставляя в (10.11), получаем

$$\mathcal{E} = e^{16,3} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,049} \right) = 1,2 \cdot 10^7 \cdot 3,4 = 4,1 \cdot 10^7,$$

$B = 17,5$ Нп, $A = 152$ дБ

Пример. Определить экранирующее действие вихревых токов на частотах 0,1 и 1 кГц, возникающих в цилиндрическом медном экране: $\delta_{\text{экp}} = 0,8$ мм, $D = 80$ мм.

По табл. 10.5: $\delta_{0,1} = 6,7$ мм; $\delta_1 = 2,1$ мм. Для обеих частот $\delta_{\text{экp}} < \delta$ и нужно пользоваться формулой (10.12). После подстановки получим для частоты 0,1 кГц;

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 100 \cdot 57 \cdot 10^4}{\cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08} \right)^2} = 1,23;$$

$B = 0,21$ Нп, $A = 1,8$ дБ.

Для частоты 1 кГц

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 1000 \cdot 57 \cdot 10^4}{\cdot 10^{-8} \cdot 1,256 \cdot 8 \cdot 0,08} \right)^2} = 7,27;$$

$B = 2,0$ Нп, $A = 17,4$ дБ.

Пример. Найти, как изменится значение \mathcal{E} при замене медного экрана в предыдущем примере стальным с $\mu_r = 100$.

По табл. 10.5: $\delta_{0,1} = 1,55$ мм; $\delta_1 = 0,49$ мм. $\delta_1 > \delta_{\text{экp}}$ и нужно пользоваться формулой (10.12). На частоте 0,1 кГц

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^4}{\cdot 1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 0,08} \right)^2} = 1,008;$$

на частоте 1 кГц:

$$\mathcal{E} = e^{0,8/0,49} \left(0,5 + \frac{80}{2,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 0,49} \right) = 5,1 \cdot 0,79 = 4,05;$$

$B = 1,4$ Нп, $A = 12,2$ дБ.

Последние два примера подтверждают, что на частотах 0,1 и 1 кГц экранирование вихревыми токами действует слабо и магнитное поле можно ослабить только шунтированием его толстым ферромагнитным материалом с большим μ_r . С повышением частоты увеличивается вытеснение магнитного поля из толщи ферромагнитного материала вследствие поверхностного эффекта, уменьшается действующая толщина экрана и эффективность экранирования шунтированием поля падает, а вытеснением поля растет.

В диапазоне звуковых частот 0,1 ... 1,0 кГц экранирование магнитного поля является труднейшей задачей и к нему прибегают крайне редко. Предпочитают пользоваться средствами подавления индуктивных ПС, отказываются от использования трансформаторов, что довольно просто достигается в аппаратуре на транзисторах и ИС. Только в редких случаях применяют многослойные экраны из различных материалов, см. [4,5, 8 и 12].

На частотах выше 10 кГц всегда можно по табл. 10.4 и 10.5 подобрать материал и его толщину так, чтобы выполнялось неравенство $\delta_{\text{экр}} > \delta$. Это позволяет пользоваться формулой (10.11), из которой следует, что ориентировочная эффективность экрана будет $\mathcal{E}_{\text{мин}} = e^{\delta_{\text{экр}}/\delta}$, откуда

$$B_{\text{min}} = \delta_{\text{экр}}/\delta \text{ [Нп]}. \quad (10.13)$$

Пример. Какой толщины должен быть алюминиевый экран, чтобы получить $\mathcal{E} \geq 100$ дБ на частоте 1 МГц?

Р а с ч е т. $B_{\text{min}} = 0,115 \cdot 100 = 11,5$ Нп; из табл. 10.2 находим $\delta = 0,088$; $\delta_{\text{экр}} = B_{\text{min}}\delta = 11,5 \times 0,088 = 1$ мм.

Из табл. 10.4 и 10.5 следует, что на частотах свыше 1 МГц экран из любого металла толщиной 0,5 ... 1,5 мм действует весьма эффективно. При выборе толщины и материала экрана в первую очередь следует учитывать не электрические свойства металла, а его механическую прочность, вес, жесткость, стойкость против коррозии, удобство стыковки отдельных деталей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобство пайки, сварки и пр.

Из данных табл. 10.5 видно также, что для частот выше 10 МГц хорошим экраном является медная пленка толщиной около 0,1 мм. Поэтому на этих частотах в конструкции экранов допустимо применение фольгированного гетинакса или другого изоляционного материала с нанесенным на него медным покрытием. Можно также использовать электропроводящие краски и пленки [10].

Значения эффективной глубины проникновения для стали с относи-

тельной магнитной проницаемостью $\mu_r = 50$ (табл. 10.5) показывают, что и на ВЧ эффективность стального экрана больше, чем немагнитного. Однако экраны из стали могут вносить значительные потери в экранируемые цепи вследствие большого значения ρ и явления гистерезиса. Поэтому их применяют только в случаях, когда с вносимыми потерями можно не считаться.

При правильно выбранных размерах и материале магнитного экрана рассчитанное значение \mathcal{E} почти всегда оказывается больше необходимого. При этом действительная эффективность зависит исключительно от конструкции и качества выполнения экрана. Коэффициент индуктивной ПС (10.3) пропорционален $M_{\text{пар}}$. Очевидно, что подобно подавлению емкостной ПС после экранирования магнитного поля остаточная индуктивная ПС пропорциональна $M'_{\text{пар}}$. Учитывая, что все другие величины, входящие в (10.3), при экранировании не изменяются, получаем

$$\mathcal{E} = M_{\text{пар}}/M'_{\text{пар}}. \quad (10.14)$$

Одновременное экранирование электрического и магнитного полей

Конструкции таких экранов одинаковы, но действуют они по-разному. Токи, протекающие по экрану под влиянием магнитного поля, значительно превосходят токи, наблюдаемые при экранировании электрического поля. Причиной этого является то, что токи, возбуждаемые в экране магнитным полем, протекают в короткозамкнутом поверхностном слое тела самого экрана, сопротивление которого невелико, в то время как в цепи тока, протекающего при экранировании электрического поля, всегда включено большее сопротивление паразитной емкости между экранируемым телом и экраном.

Эффективность электрического экрана почти целиком определяется наличием короткого замыкания между экраном и корпусом прибора. При экранировании магнитного поля присоединение экрана к корпусу не изменяет величины возбуж-

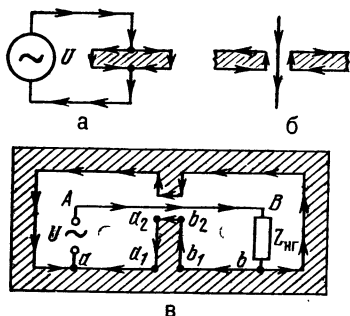


Рис. 10.15. Ток на поверхности идеального проводника (а), на краях отверстия пластины из идеального проводника (б) и образование блуждающих токов (в)

даемых в экране токов и, следовательно, на эффективность магнитного экранирования не влияет, если стыки отдельных частей экрана не снижают эти токи.

Изменение частоты мало влияет на действие электрического экрана. Точно так же незначительно влияет удельная проводимость материала, из которого он сделан. Магнитное экранирование целиком зависит от частоты. Чем она ниже, тем слабее действует магнитный экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одной и той же эффективности.

При работе на ВЧ, когда $\delta_{\text{эк}} \gg \delta$, экран ведет себя почти как идеальный проводник, у которого проводимость $\sigma = \infty$.

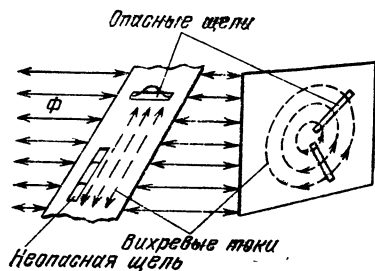
При конструировании экранов необходимо знать следующие свойства идеального проводника.

10. Защита от паразитных наводок

1) Внутри идеального проводника не могут существовать переменные электрические и магнитные поля, поверхность проводника является эквипотенциальной. 2) Токи протекают только по поверхности пластины из идеального проводника (рис. 10.15, а) несмотря на наличие более короткого пути. 3) Ток, протекающий по проводу, пропущенному через отверстие в пластине из идеального проводника, возбуждает в пластине (рис. 10.15, б) поверхностные токи такой силы и направления, что сумма токов, протекающих через поперечное сечение отверстия, будет равна нулю. 4) В экране с перегородками (рис. 10.15, в) возникают блуждающие токи, охватывающие всю поверхность экрана; при сближении точек присоединения к экрану а и в растут токи, протекающие по более коротким путям, и уменьшаются все остальные; присоединение к точкам а₁ и б₁ не освобождает экран от блуждающих токов; только присоединение цепи АВ к точкам а₂ и б₂ позволяет избавиться от этих токов, но при условии, что отсутствуют паразитные емкости между экраном и цепью АВ. 5) Суммарный магнитный поток через отверстие в пластине из идеального проводника равен нулю; малые отверстия почти не ухудшают качество экрана, так как магнитное поле, выходящее из отверстия, можно обнаружить только вблизи него, а паразитная емкость, связывающая через электрическое поле экранируемые друг от друга точки, почти не зависит от наличия таких отверстий.

Длинные узкие щели, допустимые в электрическом экране, опасны в магнитном, если они направлены поперек направления вихревых токов (рис. 10.16). Когда экранируют сложные электрические цепи, в которых направления магнитных потоков могут быть самыми разнообразными, следует избегать длинных щелей. Желательно крышки и экраны соединять друг с другом и с корпусом прибора; так, чтобы длина щелей не превосходила 0,01 ... 0,001 длины волны. Это важно и для экранирования электрического поля, так как от качества контакта между частями экрана, определяю-

Рис. 10.16. Опасные и неопасные щели в экране



щего разность потенциалов между ними, почти целиком зависит эффективности электрического экрана.

Экранирование электромагнитного поля излучения

Экранирование происходит благодаря отражению электромагнитной волны от металлической поверхности экрана и затуханию преломленной волны в теле экрана. Пусть (рис. 10.17) у падающей плоской волны $P_{\text{пад}}$ векторы $[8, 12, 14]$ электрического $E_{\text{пад}}$ и магнитного $H_{\text{пад}}$ полей параллельны плоскости экрана. В точке 1, находящейся на границе сред воздух—металл волна $P_{\text{пад}}$ частично отразится (волна P_1) и частично преломится (волна $P_{1М}$). Распространяясь в металлической среде, преломленная волна $P_{1М}$ затухает по экспоненциальному закону (10.9) и в точке 2 напряженности обоих полей будут в $e^{\delta_{\text{эк}}/\delta}$ раз меньше, чем в точке 1. В точке 2 снова произойдет преломление и отражение от границы сред металл—воздух. Преломленная волна P_2 выйдет в экранируемое пространство, а отраженная $P_{2М}$ будет затухать и в точке 3 напряженности полей будут в $e^{2\delta_{\text{эк}}/\delta}$ раз меньше, чем в точке 1. Затем будут происходить отражения в точках 3, 4, 5, ... до полного затухания волны в металле. В экранируемое пространство будут проникать волны P_2, P_4, P_6, \dots преломленные в точках 2, 4, 6 ... Их суммарное воздействие определяет напряженности полей E и H в этом пространстве. Напряженности полей волны P_4 будут в $e^{2\delta_{\text{эк}}/\delta}$ раз меньше, чем P_2 , и т. д. Экранирование электромагнитного поля излучения может представлять интерес (см. § 10.2) на частотах выше 10 МГц, на которых согласно табл. 10.5 $\delta_{\text{эк}} > 2\delta$, при толщине любых применяемых материалов $\delta_{\text{эк}} > 0,1$ мм. Взяв минимальное соотношение $\delta_{\text{эк}} = 2\delta$, получим, что напряженность поля волны P_4 будет в $e^4 = 55$ раз меньше, чем P_2 . Можно считать, что из всех волн в экранируемое пространство проникает только волна P_2 , допускаемая

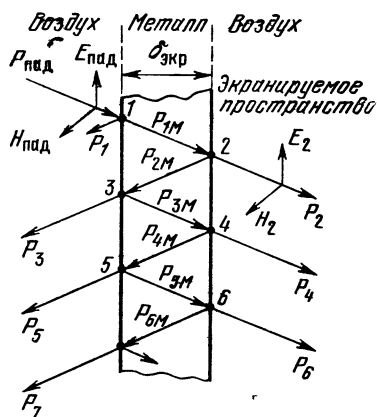


Рис. 10.17. Схема экранирования электромагнитного поля излучения

при этом ошибка не превосходит 2%. Отсюда получается, что

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &\approx E_{\text{пад}}/E_2 = H_{\text{пад}}/H_2 = \\ &= e^{\delta_{\text{эк}}/\delta} Z_{\text{с возд}}/4Z_{\text{с мет}}, \end{aligned} \quad (10.15)$$

где $Z_{\text{с возд}} = 377$ Ом — характеристическое сопротивление вакуума (и воздуха);

$$Z_{\text{с мет}} = \sqrt{\omega\mu/\sigma} \quad (10.16)$$

— модуль характеристического сопротивления металла, который в сотни и тысячи раз меньше характеристического сопротивления воздуха. Входящее в (10.15) отношение $4Z_{\text{с мет}}/Z_{\text{с возд}}$ является приближенным значением произведения коэффициентов преломления на границах сред: воздух—металл и металл—воздух.

Пример. Определить эффективность экрана из алюминиевой фольги толщиной $\delta_{\text{эк}} = 0,1$ мм на частоте $\nu = 10$ МГц. Из табл. 10.5 имеем: $\delta = 0,0275$ мм; $\delta_{\text{эк}}/\delta = 0,1/0,0275 = 3,6$; $Z_{\text{с мет}} = \sqrt{2\pi \cdot 10^7 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8}/33 \cdot 10^4} = 1,55 \cdot 10^{-3}$ Ом; $\mathcal{E} = e^{3,6} \cdot 377/4 \times 1,55 \cdot 10^{-3} = 2,27 \cdot 10^6$, $B = 14,7$ Нп, $A = 127$ дБ.

Приведенное значение \mathcal{E} очень велико. На более высоких частотах эффективность будет больше. Очевидно, что реальное значение \mathcal{E} определяется проникновением элек-

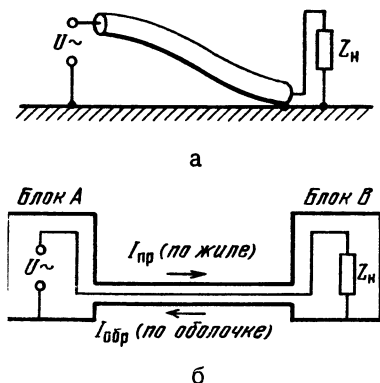


Рис. 10.18. Действие экранирующей оплетки только на электрическое (а), на электрическое и магнитное (б) поля.

ромагнитной волны не через толщу экрана, а по проводам и через щели, имеющиеся в конструкции

Экранирование проводов и кабелей

Оплетка проводов, не соединенная с корпусом, никакого экранирующего действия не вызывает. При соединении с корпусом в одной точке, в окружающее пространство не будет проникать только электрическое поле. По цепи (рис. 10.18, а): внутренний провод—оплетка—корпус протекает емкостный ток, растущий с повышением частоты. Эффективность экранирования полностью зависит от качества контакта между оплеткой и корпусом.

Для экранирования магнитного поля необходимо, чтобы весь обратный ток генератора (рис. 10.18, б) протекал по оплетке. Тогда оба тока будут создавать магнитные потоки, равные по величине и обратные по направлению, которые взаимно компенсируются. Полная компенсация получается только тогда, когда оп-

летка является единственным соединением корпусов отсека генератора с отсеком нагрузки. На низких частотах ЭГП в тело корпуса и оплетки велика, и при дополнительном замыкании их часть обратного тока будет протекать минуя оплетку, что нарушит экранирование. Чем выше частота, тем меньше вероятность снижения эффективности при замыкании корпусов и оплетки.

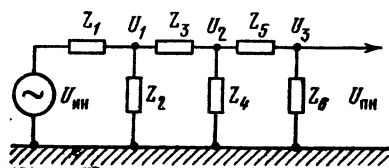
Применение экранированных проводов для внутриприборного монтажа всегда нежелательно, так как они увеличивают емкость провода на корпус, громоздки, усложняют монтаж и требуют предохранения от случайных соединений с другими деталями. Поэтому прежде чем прибегнуть к экранированным проводам, следует рассмотреть все другие варианты предохранения от наводок. При этом почти всегда найдется удобный вариант, позволяющий обойтись без экранированных проводов.

Экранирование провода, коаксиальные кабели и многожильные экранированные шланги с экранированными проводами внутри них следует применять в основном для соединения отдельных блоков и узлов друг с другом. Они позволяют защитить многоблочные устройства от наводок, поступающих извне, от взаимных наводок внутри устройства и защитить от наводок приборы, находящиеся в окружающем пространстве. Следует обратить особое внимание на качество присоединения оплеток к корпусам приборов.

Подавление паразитной связи через общее сопротивление

Прежде всего необходимо стремиться к уменьшению $Z_{общ}$ (рис. 10.9). Поэтому монтаж не должен иметь общих соединений с корпусом (см. рис. 10.10), источник питания и управления, включая общую часть монтажа, шунтируются конденсаторами; на очень низких частотах изредка применяются отдельные источники питания для ИН и ПН. Для подавления этого вида связи можно также увеличивать выходное сопротивление ИН, включая в его цепи дополнительные резисторы или дроссели. При недос-

Рис. 10.19. Общая схема фильтрующей цепи



точности этих мер в общие провода и шины включаются фильтрующие (развязывающие) цепи

Фильтрующие (развязывающие) цепи

В фильтруемый провод включают последовательно ($Z_1, Z_3, Z_5 \dots$) (рис. 10.19) и параллельно (Z_2, Z_4, Z_6, \dots) сопротивления. Величина последовательных сопротивлений для фильтруемых частот выбирается большой, а для параллельных — малой. При этом фильтрующую цепь можно рассматривать как серию последовательно включенных делителей напряжения. Если напряжение ИН равно $U_{ин}$, то в результате действия первого делителя, состоящего из сопротивлений Z_1, Z_2 , напряжение снизится до величины $U_1 = U_{ин} Z_2 / Z_1$, после второго делителя напряжение будет равно $U_2 = U_{ин} Z_2 Z_4 / Z_1 Z_3$ и т. д. К последнему делителю подключен ПН и напряжение на его входе будет равно

$$U_{пн} = U_{ин} Z_2, 4, 6 / Z_1, 3, 5$$

Под эффективностью фильтрации будем понимать отношение

$$\mathcal{E}F = U_{ин} / U_{пн} = Z_1, 3, 5 / Z_2, 4, 6, \quad (10.17)$$

показывающее, во сколько раз изменится напряжение на входе ПН от включения фильтра. Величина $\mathcal{E}F$ часто выражается в неперах или децибелах.

Полезное (не паразитное) действие фильтруемого провода заключается в передаче постоянных напряжений питания, переменных напряжений силовой сети, импульсных или медленно изменяющихся напряжений управления и др. Одновременно с необходимым подавлением наводки фильтрующая цепь должна передавать полезные напряжения без значительных потерь и искажений.

В качестве последовательных сопротивлений в фильтрующей цепи применяются непроволочные постоянные резисторы или дроссели. Резисторы удобны тем, что величина их сопротивления практически не зависит от частоты. Кроме того, резисторы имеют небольшие размеры и дешевы. Применение резисторов ограничивается падением на них на-

пряжений не только частот, подлежащих фильтрации, но и полезных. Поэтому резисторы применяются только при малых токах и высоких напряжениях, передаваемых по фильтрующему проводу, когда небольшая потеря напряжения и мощности не существенна.

При недопустимости включения сопротивлений в фильтруемый провод применяются дроссели. Они имеют собственную распределенную емкость и собственную резонансную частоту. Вследствие этого реактивное сопротивление любого дросселя при изменении частоты сначала имеет индуктивный характер и растет с повышением частоты, затем принимает максимальное значение, после чего оно становится емкостным и с повышением частоты падает. При дальнейшем повышении частоты дроссель, как и любая другая цепь с распределенными постоянными, на некоторых частотах ведет себя как последовательный резонансный контур, его сопротивление может достигать малых величин и действие РЯ на этих частотах окажется незначительным. Чтобы получить развязку во всем необходимом диапазоне частот, не следует применять в развязывающей ячейке слишком большие индуктивности, а собственную резонансную частоту катушек надо подбирать так, чтобы она была выше или не более чем на 20...30% ниже самой высокой из подаваемых частот. Поэтому в диапазонах КВ и УКВ применяются однослойные катушки малого диаметра, так как они имеют минимальную собственную емкость.

Если катушка намотана на каркасе из изоляционного материала, то согласно экспериментальным данным ее собственная длина волны $\lambda_0 = 3l$, где l — длина провода катушки. Часто однослойные дроссели наматывают на стержнях из магнитоэлектрика (табл. 10.6). Такие дроссели имеют меньшие размеры при этой же индуктивности.

Можно обходиться и без катушек, заменив их «безвитковыми дросселями» — трубчатыми ферритовыми цилиндрами (ГОСТ 19726—74), надеваемыми на отрезки проводов между точками подключения Z_2, Z_4, Z_6, \dots (см. рис. 10.19). Индук-

Таблица 10.6

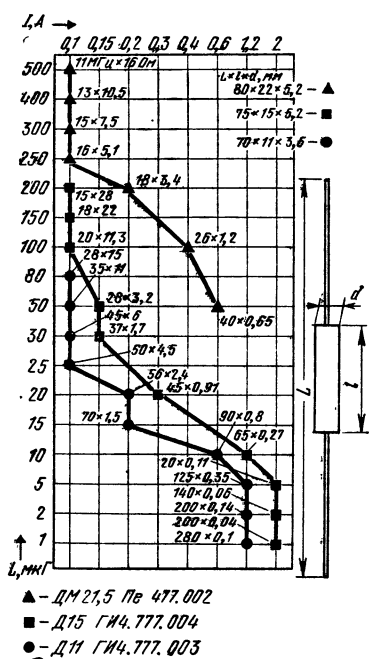
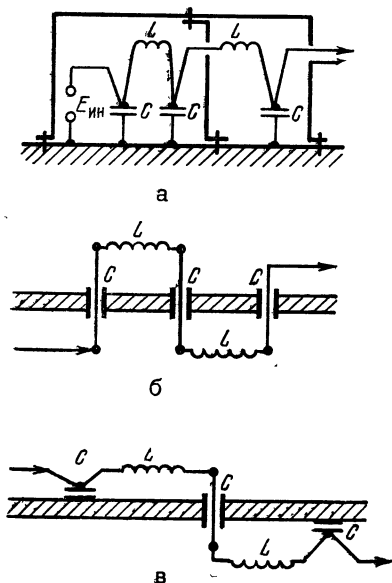


Рис. 10.20. Варианты монтажа фильтра



10. Защита от паразитных наводок

тивное сопротивление такого дросселя мало и для получения нужной ЭФ приходится уменьшать сопротивление Z_2, Z_4, Z_6, \dots и увеличивать число ячеек.

В параллельные ветви Z_2, Z_4, \dots (см. рис 10.19) включают конденсаторы, с помощью которых создается минимально возможное сопротивление этих ветвей РЯ. При выборе конденсатора следует учитывать не только его емкость, но и собственную индуктивность, включая индуктивность выводов, так как индуктивное сопротивление конденсатора на ВЧ может превосходить емкость. На НЧ и в диапазоне ДВ применяют бумажные конденсаторы большой емкости любой конструкции. На КВ и УКВ удовлетворительно работают слюдяные конденсаторы, керамические, специальные безындуктивные бумажные и пленочные. Для работы в широком диапазоне частот рекомендуется применять проходные и опорные конденсаторы, так как они позволяют обходиться без соединительных проводов, а также имеют минимальную индуктивность. В малогабаритных узлах они неприменимы.

Рациональный монтаж фильтра имеет первостепенное значение. Ошибки в монтаже могут привести к резкому снижению ЭФ. В правильно смонтированном фильтре наводки не должны проходить мимо его ячеек. Так, для устранения паразитной взаимной индукции между дросселями устанавливают экранирующую перегородку (рис. 10.20, а) или дроссели монтируют с разных сторон металлической или фольгированной платы корпуса (рис. 10.20, б, в) с применением проходных и опорных конденсаторов. При отсутствии последних (рис. 10.20, а) очень важно каждый конденсатор отдельно соединять с корпусом в ближайшей к нему точке, не применяя общей шины, лепестка или точки на перегородке. Подробно вопросы монтажа рассмотрены в [4 и 5].

Эффективность фильтрации фильтра рассчитывают по формуле (10.17). Если фильтр начинается с резистора или дросселя, то сопротивление Z_1 представляет собой геомет-

рическую сумму сопротивлений резистора или дросселя и выходного сопротивления ИН. Если фильтр начинается с конденсатора, то Z_1 — это выходное сопротивление ИН.

Пример. Определить ЭФ трехъячеечного фильтра, начинающегося с конденсатора, при условии, что $\nu = 1$ МГц и выходное сопротивление ИН $r_{\text{ин}} = 100 \text{ Ом} = Z_1$. В качестве последовательных сопротивлений применены резисторы $r = Z_3 = Z_5 = 50 \text{ Ом}$. Емкость конденсаторов $C = 0,047 \text{ мкФ}$, тип КБП-Р (проходные)

$$\begin{aligned}\Phi &= Z_1/Z_2 \cdot Z_3/Z_4 \cdot Z_5/Z_6 = \\ &= r_{\text{ин}} \omega C \cdot r \omega C \cdot r \omega C = r_{\text{ин}} \omega^3 C^3 r^3 = \\ &= 100 \cdot (2\pi)^3 \cdot 10^{18} \cdot 0,047^3 \cdot 10^{-18} \cdot 50^3 = \\ &= 6440;\end{aligned}$$

$$B = 8,8 \text{ Нп}, A = 76 \text{ дБ}.$$

Пример. Определить, как изменится ЭФ рассчитанного выше фильтра, если исключить первый конденсатор и заменить два резистора $r = 50 \text{ Ом}$ на дроссели с индуктивностью $L = 20 \text{ мкГ}$.

Фильтр из трехъячеечного становится двухъячеечным, в котором:

$$\begin{aligned}Z_1 &= \sqrt{r_{\text{ин}}^2 + (\omega L)^2} = \\ &= \sqrt{100^2 + (2\pi \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6})^2} = \\ &= 160,6 \text{ Ом}; \\ \Phi &= Z_1/Z_2 \cdot Z_3/Z_4 = 160,6 \omega C \cdot \omega L \omega C = \\ &= 160,6 \omega^3 C^2 L = 160,6 (2\pi)^3 \times \\ &\times 10^{18} \cdot 0,047^2 \cdot 10^{-12} \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1760; \\ B &= 7,5 \text{ Нп}, A = 65 \text{ дБ}.\end{aligned}$$

10.4. ПАРАЗИТНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

При передаче β -й части выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ усилителя (рис. 10.21) на его вход образуется замкнутый контур, называемый кольцом или петлей обратной связи (ОС). При этом коэффициент передачи напряжения усилителя K примет значение

$$K_{\text{ос}} = K / (1 - \beta K), \quad (10.18)$$

т. е. изменится в $(1 - \beta K)$ раз. Произведение βK , называемое кольцевым усилением, в общем виде яв-

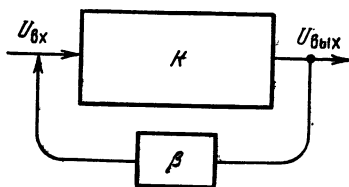


Рис. 10.21. Усилитель с цепью обратной связи

ляется комплексным. Модуль и аргумент его зависят от частоты. Такая ОС является частотнозависимой.

Из (10.18) следует, что при наличии ОС усиление возрастает, если абсолютное значение знаменателя $|1 - \beta K| < 1$; такая ОС называется положительной. Увеличение кольцевого усиления βK при положительной ОС приводит к самовозбуждению усилителя, который делается неработоспособным. При отрицательной ОС $|1 - \beta K| > 1$ и усиление падает.

Отрицательная ОС особенно часто вводится в усилители НЧ для улучшения их характеристик [3, 18].

Через паразитные ОС выходное напряжение любого каскада усилителя проникает на входы предыдущих каскадов. Цепи паразитных ОС рассмотрены в § 10.2. Будучи частотнозависимыми, они могут на одних частотах уменьшать усиление, на других — увеличивать, на третьих — давать самовозбуждение. Изменения коэффициента β , зависящие от случайных обстоятельств и от времени, дают изменения параметров усилителя в процессе эксплуатации, что является признаком низкой его устойчивости.

Паразитные ОС подразделяются на внутренние и внешние. Первые возникают через усилительные приборы (УП), вторые — вследствие недостаточного экранирования каскадов усилителя.

Внутренние паразитные ОС

Этот вид паразитных ОС неизбежно присутствует в любом усилителе, поскольку у всех транзисторов и ламп имеется связь между элек-

тродами, определяющая влияние выходных цепей каскада на входные. Это влияние характеризуется проводимостью ОС Y_{12} или коэффициентом ОС h_{12} , имеющими различные величины для различных усилительных приборов и схем их включения. В УНЧ и ВУС на биполярных транзисторах, включаемых по схеме ОЭ, влияние этого вида связи сводится к некоторому увеличению входной проводимости, незначительному по сравнению с большой основной входной проводимостью прибора. В ВУС на полевых транзисторах и вакуумных триодах ОС через Y_{12} значительно больше, так как собственная входная проводимость этих приборов мала. Для уменьшения проводимости Y_{12} часто применяют каскодное включение транзисторов или экранированные лампы.

В эмиттерных, истоковых и катодных повторителях внутренняя паразитная ОС действует одновременно с отрицательной ОС, являющейся основой принципа работы этих усилителей. При неудачном выборе типа усилительного прибора, нагрузки и предохранительного резистора повторитель может самовозбудиться или изменить параметры [5].

В резонансных усилителях ВЧ и ПЧ роль связей через проводимость Y_{12} велика. Чем больше коэффициент усиления каскада по напряжению, тем большая разность потенциалов прикладывается к проводимости Y_{12} , тем сильнее выходные цепи влияют на входные и тем меньше устойчивость усилителя. Повысить устойчивость можно уменьшением либо проводимости Y_{12} (что связано с выбором уси-

10. Защита от паразитных наводок

лительного прибора и схемы его включения), либо коэффициента передачи (с одновременным увеличением числа каскадов для получения необходимого общего усиления) ОС этой группы подробно рассмотрены в [5]. Там же даны расчетные формулы, позволяющие определить допустимое усиление на каскад в различных вариантах резонансных усилителей, исходя из того, что внутренняя паразитная ОС изменяет усиление не более чем на 10%.

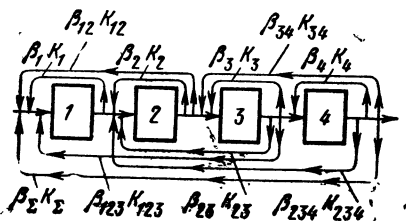
Внешние паразитные ОС

Качество экранирования каскадов и других цепей усилителя друг от друга так же, как и внутренние паразитные ОС, определяют устойчивость работы усилителя. В собранном усилителе трудно бывает определить, за счет каких паразитных ОС — внутренних или внешних — он работает неустойчиво, с искажениями. Поэтому прежде чем приступить к проектированию экранов и фильтров, необходимо сделать проверочный расчет допустимого усиления по напряжению и убедиться в том, что рабочий коэффициент усиления всех каскадов ниже допустимого.

Оценка необходимой эффективности экранирования

В многокаскадных усилителях имеется много каналов, по которым напряжение из точек с большим уровнем может передаваться в точки с меньшим уровнем. Каждое из показанных на рис. 10.22 колец ОС, состоящих из усилительных каскадов $1 \dots 4$ с коэффициентами усиления $K_1, K_2, \dots, K_{12}, K_{123}, \dots, K$ и цепей ОС, передающих на вход этих каскадов части $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{12}, \beta_{123}, \dots, \beta$ их выходного напряжения, соответствует функциональной схеме рис. 10.21 и уравнению (10.18). Так как действие внутренней ОС неизбежно, то при расчете усилителя допускается 10%-ное изменение коэффициента усиления. Внешние паразитные ОС не являются неизбежными. Усложнением конструкции усилителя они могут быть снижены до любого уровня.

Рис. 10.22. Многокаскадный усилитель с кольцами обратной связи



Желательно только, чтобы в худшем случае их совместное влияние было меньше влияния внутренних связей. Это позволяет считать допустимым 1%-ное изменение усиления, вызываемое любой из внешних ОС.

Введя этот допуск в (10.18), получим $1 \pm |\beta K| = 1 \pm 0,01$.

Отсюда максимально допустимое значение коэффициента передачи по каждой из цепей паразитной ОС будет равно

$$|\beta_{\max}| = 0,01 / |K|. \quad (10.19)$$

Из этого соотношения находим, во сколько раз любая фильтрующая цепь или междукаскадный экран должен ослаблять напряжение ИП:

$$\mathcal{E} \Phi = \mathcal{E} > 100K. \quad (10.20)$$

Значения $\mathcal{E} \Phi$ и \mathcal{E} должны быть прямо пропорциональны коэффициенту усиления по напряжению. Чем большее усиление имеется между какими-либо точками усилителя, тем лучше следует экранировать эти точки друг от друга.

Максимальное усиление получается между последними и первым каскадами, в частности между выходной и входной цепями. Между этими частями усилителя и нужно добиваться наилучшего экранирования.

Паразитная обратная связь по цепям питания и управления

Причиной этой ОС является наличие полного выходного сопротивления источника питания вместе с соединительными проводами ($Z_{\text{общ}}$). Это сопротивление является общим для всех каскадов, подключенных к источнику питания. На рис. 10.23 показана зависимость сопротивления Z от частоты, рассчитанная для активного сопротивления выпрямителя 300 Ом (вместе с фильтром), емкости выходного конденсатора фильтра 10 и 100 мкФ и индуктивности соединительного провода 0,1 мкГ.

На низших частотах полное сопротивление выпрямителя близко к 300 Ом и на него почти не влияет увеличение емкости фильтра и введение развязывающих ячеек. Большое полное выходное сопротивление

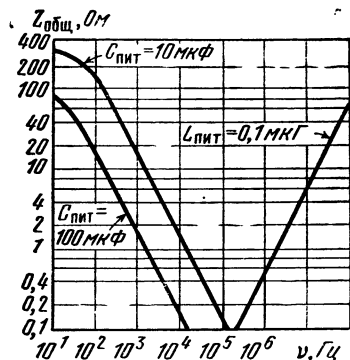


Рис. 10.23. Изменение полного выходного сопротивления источника питания

$Z_{\text{общ}}$ приводит к большой паразитной ОС на низших частотах, которая проявляется в виде искажения частотной характеристики усилителя или его самовозбуждения на частотах около нескольких герц. Очевидно, что это проявление будет тем резче, чем больше коэффициент усиления на низших частотах. Поэтому основным методом борьбы с самовозбуждением усилителя на очень низких частотах является максимально возможное снижение усиления на этих частотах. При расчете усилителя не следует задаваться излишне малым значением нижней граничной частоты ν_n и нельзя считать достижением получение величины ν_n ниже требуемой. Наоборот, параметры усилителя следует выбирать так, чтобы усиление на частотах ниже ν_n падало как можно круче. Очевидно, что любые меры по снижению внутреннего сопротивления источника питания постоянному току: уменьшение сопротивления резисторов или дросселей фильтра, применение диодов с малым внутренним сопротивлением, электронная стабилизация выходного напряжения выпрямителя — ведут к ослаблению ОС. Примерно 5-кратное уменьшение глубины ОС на низших частотах и в усилителях постоянного тока можно получить, применяя двухтактные усилительные каскады.

Наиболее эффективным способом подавления паразитной ОС на низ-

ших частотах является питание усилителя от двух отдельных источников с подключением к одному из них первых, а к другому — последних каскадов. К этому способу приходится прибегать в многокаскадных усилителях с очень большим усилением и низкой граничной частотой.

Транзисторные усилители часто питаются от химических источников тока различных типов, особенно в тех случаях, когда требуется увеличение внутреннего сопротивления по мере использования их и с течением времени, из-за чего паразитная ОС в усилителе увеличивается с течением времени. При свежих батареях усилитель работает нормально. Потом происходит постепенное изменение частотной характеристики, заканчивающееся генерацией тех усилителей, у которых ОС положительна. В таких усилителях несложно применить отдельные источники питания для первых каскадов и в ответственных случаях обеспечить периодическую проверку состояния батарей. Самовозбуждение двухкаскадных усилителей НЧ и постоянного тока из-за большого $Z_{общ}$ не происходит, так как у них действует только отрицательная ОС. С нею часто мирятся, чтобы не усложнять систему питания, добиваясь только получения заданной частотной характеристики в области низших частот.

С повышением частоты выходное сопротивление источника питания $Z_{общ}$ (рис. 10.23) растет за счет ин-

дуктивности соединительных проводов. В многокаскадных резонансных усилителях ВЧ и ПЧ подавление паразитных ОС по всем цепям питания имеет первостепенное значение. Для этого в каждую шину питания, идущую вдоль всего усилителя, включаются последовательно (рис. 10.24) резисторы или дроссели Z_{p1} , Z_{p2} , ..., Z_{pn} , которые вместе с конденсаторами C_{p1} , C_{p2} , ..., C_{pn} составляют развязывающие ячейки. Ими разделены все каскады, и чем дальше они отстоят друг от друга по схеме, тем больше развязка между ними. Через развязывающие элементы Z_{p1} , ..., Z_{pn} протекает постоянная составляющая тока УП. Если применить резисторы, то их сопротивления определяются допустимым падением напряжения питания и допустимой мощностью рассеивания. Постоянный ток, протекающий через Z_p , уменьшается по мере удаления от точки подключения $E_{пит}$. В результате может оказаться удобным применение резисторов только в первых ячейках фильтра, с заменой их дросселями в последующих.

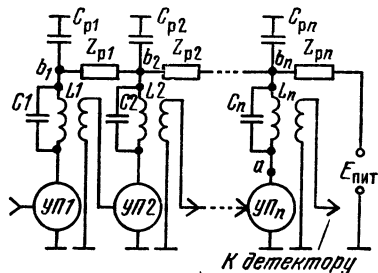
Последнее сопротивление фильтра Z_{pn} не участвует в ослаблении связи между последним и всеми предыдущими каскадами. Оно служит для предохранения усилителя от внешних наводок, поступающих по проводам питания. Через это сопротивление протекает суммарный ток всех каскадов. Чтобы избежать бесполезной потери $E_{пит}$, в качестве этого сопротивления обычно применяют дроссель.

В двухкаскадных усилителях допускается параллельное включение РЯ, что нерационально для большого числа каскадов [4 и 5]. Поэтому при конструировании многокаскадных усилителей на ИС приходится вводить внешнюю фильтрующую цепь (рис. 10.24) несмотря на то, что в ИС есть свои РЯ.

Кроме показанной на рис. 10.24 схемы межкаскадной связи, известен ряд других схем. Использование любой из таких схем почти не отражается на действии и расчете фильтров в цепях питания.

В ламповых усилителях с большим усилением, работающих на частотах выше 10 МГц, приходится

Рис. 10.24. Включение развязывающих ячеек между каскадами с усилительными приборами УП



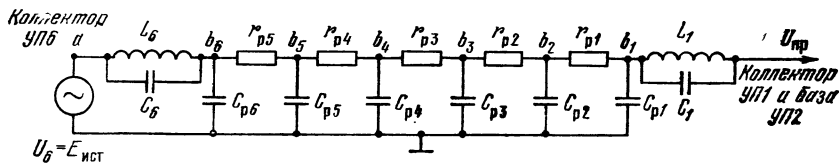


Рис. 10.25. Фильтрующая цепь шестикаскадного усилителя

фильтровать цепь накала. Подробно этот вопрос изложен в [4 и 5].

Пример. Рассчитать фильтрующую цепь 6-каскадного транзисторного широкополосного усилителя, работающего на частоте $\nu = 60$ МГц. Транзисторы включены по последовательной каскодной схеме ОЭ—ОБ и работают в режиме: $I_a = 5$ мА; $U_K = 4 \dots 6,5$ В. Для стабилизации режима применены делители, потребляющие дополнительный ток в каждом каскаде ($I_{дел} = 5$ мА), и эмиттерные резисторы, на которых падает напряжение 2 В. Напряжение источника питания $E_{пит} = 15$ В. Резонансное сопротивление контура $r_a = 200$ Ом. Усиление по напряжению на каскад $K_{u1} = 7$ всего усилителя — $K_u = K_{u1}^6 = 120 \cdot 10^3$.

В качестве развязывающих элементов $Z_{р1} \dots Z_{р3}$ применены резисторы r_p . На рис. 10.25 изображена эквивалентная ВЧ-схема фильтрующей цепи для 6 каскадов ($n = 6$). В соответствии с ней ВЧ-напряжение U_6 , получающееся в точке а между коллектором УП6 и корпусом, снижается сначала делителем, составленным из эквивалентного сопротивления r_a контура $L_6 C_6$ и развязывающей емкости $C_{р6}$. Затем действует делитель из $r_{р5}$ и $C_{р5}$ и т. д., вплоть до делителя из $r_{р1}$ и $C_{р1}$, с которого ослабленное напряжение паразитной ОС поступает через контур $L_1 C_1$ на базу УП2. Подачей паразитного напряжения на базу УП1 пренебрегаем, так как оно дополнительно ослабляется делителем $r_6 C_6$.

На каждом из пяти резисторов r_p теряется часть постоянного напряжения $E_{пит}$, из-за чего напряжение на коллекторах УП6 получается максимальным и на коллекторах УП1 — минимальным. Рас-

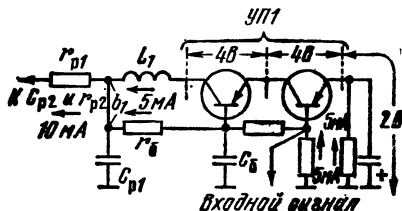
пределение напряжений и прохождение токов через УП1 показано на рис. 10.26. В соответствии с ним на всех пяти резисторах r_p допускается падение напряжения $\Delta E_{пит} = E_{пит} - 2U_K - U_a = 15 - 2 \cdot 4 - 2 = 5$ В.

Ток одного каскада $I_1 = I_a + I_{дел} = 5 + 5 = 10$ мА. Падение напряжения на всей цепи $\Delta E_{пит} = I_1 r_p + 2I_1 r_p + 3I_1 r_p + 4I_1 r_p + 5I_1 r_p = 15I_1 r_p = 5$ В, откуда $r_p = \Delta E_{пит} / 15I_1 = 5 / 15 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 33$ Ом.

Максимальная мощность рассеивается на последнем резисторе $r_{р6}$: $P = (5I_1)^2 r_p = 50^2 \cdot 10^{-6} \cdot 33 = 0,083$ Вт, что позволяет применять резисторы любых типов, вплоть до самых миниатюрных. Эффективность фильтра согласно (10.20): $\Phi = 100 K = 100 \cdot 7^6 = 1,68 \cdot 10^6$.

При емкости конденсатора $C_p = 470$ пФ, имеющего на частоте 60 МГц сопротивление $X_C = 5,6$ Ом, все промежуточные ячейки будут ослаблять напряжение в $33/5,6 = 5,89$ раза. Первая ячейка фильтра при $r_a = 200$ Ом будет снижать напряжение в $200/5,6 = 35,7$ раз. Для всего фильтра $\Phi = 35,7 \cdot 5,89^5 = 2,53 \cdot 10^5$, которая в 6,5 раз меньше необходимой. Для увеличения Φ можно увеличить емкость кон-

Рис. 10.26. Распределение напряжений и токов в цепях усилительного прибора УП1



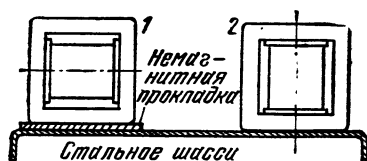
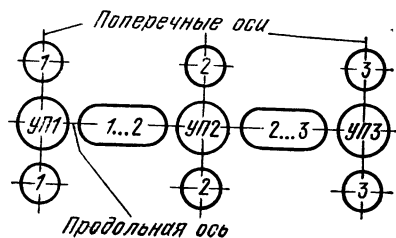


Рис. 10.27. Ориентация осей катушек входного (1) и выходного (2) трансформаторов

денсаторов с 470 до 680 пФ, что повысит эффективность в $(680/470)^2 = 6,34$ раза. Можно также вместо резистора $r_{ps} = 33$ Ом поставить дроссель. Можно взять любой дроссель с собственной частотой выше 60 МГц. Выбираем из группы $l = 11$ мм (см. табл. 10.6) дроссель индуктивностью 2 мкГ, имеющий на частоте 60 МГц, сопротивление 760 Ом. Увеличивать индуктивность дросселя не стоит, так как он и без того улучшает ЭФ в $760/33 = 23$ раза. Кроме того, дроссели небольшой индуктивности, намотанные толстым проводом, надежнее и дешевле.

Фильтрация цепей подачи управляющих напряжений в принципе не отличается от фильтрации цепей питания. В некоторых типах многокаскадных усилителей управляющие напряжения быстро изменяются, так как служат для кратковременного запираания и отпираания усилителя или изменения усиления. В этом случае к развязывающим ячейкам предъявляются два противоречивых требования: они должны хорошо подавлять паразитную ОС и мало замедлять и искажать управляющие напряже-

Рис. 10.28. Размещение усилительных приборов (УП1, УП2, УП3), деталей, относящихся к ним (1, 2, 3) и к двум УП одновременно (1...2 и 2...3).



10. Защита от паразитных наводок

ния. Эти требования усложняют фильтрующую цепь, что подробно рассмотрено в [5].

Разделение усилителей ПЧ радиоприемников сантиметровых волн на предварительный и главный производится для того, чтобы облегчить борьбу с паразитной ОС. В [4 и 5] показано, что такое разделение не уменьшает ПС, а приводит только к усложнению усилителя и ухудшению его параметров.

Конструкции усилителей НЧ и видеоприемников

При конструировании усилителей, работающих в диапазоне частот до $5 \cdot 10$ МГц, вопросам экранирования не придают особого значения. Нужно только следить за тем, чтобы входные и выходные радиоэлементы и провода были разнесены. Если в усилителе имеется два или три трансформатора (входной, выходной и силовой), то входной размещают как можно дальше от двух других, ориентируя его ось так, чтобы она (рис. 10.27) была перпендикулярна осям выходного и силового трансформаторов. При монтаже входного трансформатора на стальном шасси под него подкладывают немагнитную прокладку. В трансформаторах желательно как можно большую часть пластин и других деталей соединять с корпусом. В резонансных усилителях индуктивные катушки (особенно большой добротности) закрепляют в броневи сердечники или в металлические экраны или крепят к разным сторонам плоского экрана.

Конструкции широкополосных усилителей работающих на частотах выше $5 \cdot 10$ МГц, должны выполняться с учетом того, что смещение токов, протекающих в поверхностном слое шасси или печатного экрана и относящихся к различным каскадам, может быть причиной значительной паразитной ОС. Для устранения такого смещения необходимо (рис. 10.28), чтобы все детали, провода и точки присоединения к корпусу, относящиеся к выходу и входу двух соседних по принципиальной схеме каскадов, размещались только в промежутке между ними, по возможности ближе

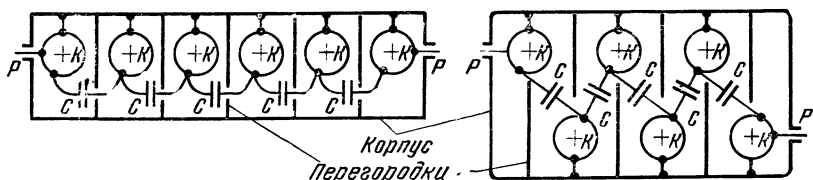


Рис. 10.29 Размещение элементов фильтров (С — конденсаторы, К — контуры, Р — разъемы)

к продольной оси. Детали, провода и точки присоединения к корпусу, относящиеся к подсобным цепям одного каскада, должны размещаться как можно ближе к его поперечной оси. Эти условия удается выполнить, располагая каскады по прямой линии в отдельном узком и длинном узле. Особенно важно правильно сконструировать общий экран и его крышки, так они могут образовать цепь паразитной ОС (§ 10.3). Монтажные соединения должны быть максимально короткими, каждый лишний миллиметр провода ухудшает работу усилителя. Применение плат с печатным монтажом не исключает необходимости в общем экране. В таких платах нужно добиваться минимальной длины печатных проводников, стремиться к соединению выводов элементов на одном контакте. Участки печатных проводников не следует вводить в резонансные контуры. Съемные экраны миниатюрных ламп приспособлены для вертикальной установки. Это нужно учитывать при установке ламп на печатных платах во избежание выхода их из строя и сокращения срока службы из-за недостаточного охлаждения. Подробно вопросы конструкции и монтажа широкополосных усилителей даны в [4 и 5].

Конструкция, монтаж и размещение фильтров сосредоточенной селекции

Основные требования: 1) отсутствие паразитного прохождения сигналов мимо фильтра и его ячеек, 2) малые потери в контурах фильтра. На частотах выше 5 .. 10 МГц выполнение первого требования приводит к вытянутой в линию конструкции, представляющей собой

вставку в коаксиальный кабель (рис 10.29, где К — контур, Р — разъем) с крышками, выполненными с учетом рекомендаций § 10.3. ФСС следует размещать не сбоку от УП, а вместе с другими элементами в линию. Полезно также изолировать корпуса ФСС, усилителя и смесителя, соединяя их только через оплетку кабеля. Второе требование приводит к необходимости наматывания катушек на каркасе из материала с малым углом потерь и изготовления корпуса и перегородок из меди лучше посеребренной.

Относительно низкочастотные ФСС надо конструировать так же, как высокочастотные, что гарантирует их качество. К упрощениям конструкции следует подходить осторожно. Особенно опасны с точки зрения прохождения сигналов мимс ФСС конструкции с общими платами и общими проводами присоединения к корпусу.

Усилители на ИС

Для аппаратуры на интегральных схемах характерна большая плотность компоновки, поэтому при конструировании усилителей на ИС необходимо придерживаться принципов размещения и монтажа, изложенных в § 10.3 и 10.4. Очевидно, особая осторожность нужна при разработке многокаскадных усилителей с большим усилением, работающих на частотах выше 5 .. 10 МГц. Важно предусмотреть максимальное удаление друг от друга входных и выходных радиоэлементов и проводников, фильтрацию проводников электропитания и управления независимо от наличия в ИС своих развязывающих цепей, необходимо, кроме того, избе-

гать нефильтрованных проводов, проходящих вдоль всего тракта усиления, ИС и другие элементы следует размещать, как показано на рис. 10.28. Общий экран должен иметь удлиненную конструкцию (в виде линейки), крышки экрана выполняют в соответствии с рекомендациями § 10.3.

Для получения гарантированной устойчивости работы других типов усилителей на ИС также полезно соблюдать перечисленные принципы. В усилителях НЧ и ПТ нужно учитывать требования к источникам питания (§ 10.4.), во избежание неустойчивой работы на низших частотах.

10.5. ФОН И ПОМЕХИ, НАВОДИМЫЕ СЕТЬЮ ПИТАНИЯ

Известны три причины появления фона: недостаточное сглаживание выходного напряжения выпрямителей, питание накала вакуумных приборов переменным током и наводки переменного напряжения сети питания на отдельные части устройства. При использовании выпрямителя, спроектированного в соответствии с потребностью данного прибора, уровень фона, вызванного первой причиной, будет ниже допустимого. Нужно только учесть, что при питании прибора от нескольких источников (выпрямители и трансформаторы), подключение каждого из них к корпусу прибора должно производиться отдельными проводами. Наличие общего провода приводит к повышению уровня фона, что подробно разобрано в [4 и 5]. Там же рассмотрены способы подавления фона, получающегося при питании накала переменным током.

Провода сети питания могут нарушать экранирование прибора и вносить помехи от других приборов и радиостанций

Фон, вызываемый магнитным потоком рассеивания

Силовой трансформатор и дроссель сглаживающего фильтра могут быть причиной появления фона сети питания на выходе чувствительных усилителей, имеющих

10. Защита от паразитных наводок

входные трансформаторы НЧ, и на экранах электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). В последних поток рассеивания может непосредственно модулировать электронный луч, внося расфокусировку и искажение изображения. Для уменьшения вероятности появления такого фона в приборах с совместным размещением силовой и радиоэлектронной частей следует избегать применения трансформаторов НЧ (кроме выходных). При использовании же входного трансформатора его следует ориентировать по отношению к силовому, как показано на рис. 10.27. Для уменьшения поля рассеивания силового трансформатора применяют сердечники с высоким относительным коэффициентом магнитной проницаемости μ_r , а также тороидальные и ленточные, уменьшают воздушные зазоры, заменяют в сглаживающих фильтрах выпрямителей дроссели резисторами, компенсируя ухудшение фильтрации увеличением числа ячеек и емкости фильтрующих конденсаторов; экспериментально подбирают взаимное расположение силового трансформатора и ЭЛТ; экранируют ЭЛТ в приборах, предназначенных для установки вблизи от силовых трансформаторов и других источников медленно изменяющегося магнитного поля; в исключительных случаях, когда прибор работает в особо гадких условиях, можно применить многослойные экраны для НЧ и силовых трансформаторов [4, 5, 12].

Фон, вызываемый асимметрией сети питания

Этот фон наводится в основном через электрическое поле. Провода на вводе сети питания в прибор (рис. 10.30) могут иметь различные напряжения U_1 и U_2 относительно корпуса прибора. Если прибор подключен к двум фазам равномерно нагруженного трехфазного трансформатора силовой сети, то $U_1 = U_2$. При неравномерной нагрузке трехфазной сети $U_1 \neq U_2$. В наихудшем случае прибор питается от трехфазной сети с нулевым проводом, тогда $U_1 = U_{\text{сети}}$ и $U_2 = 0$. На этот случай и следует

ориентироваться для того, чтобы прибор мог питаться от любой сети переменного тока. Блок питания прибора, состоящий из проводов, выключателя, трансформатора, выпрямителей и других деталей, может иметь ряд паразитных емкостей, связывающих его с входными электродами УП. Для упрощения будем считать, что $C_{\text{пар}1}$ эквивалентна суммарному действию всех емкостей, связывающих детали, находящиеся под U_1 , с входом УП, и $C_{\text{пар}2}$ эквивалентна такому же действию деталей, находящихся под U_2 . Напряжение, наведенное на вход УП, приблизительно равно

$$U_{\text{вх}} = U_1 \omega C_{\text{пар}1} r_{\text{вх}} - U_2 \omega C_{\text{пар}2} r_{\text{вх}}. \quad (10.21)$$

Если $C_{\text{пар}1} = C_{\text{пар}2}$, то

$$U_{\text{вх}} = (U_1 - U_2) \omega C_{\text{пар}} r_{\text{вх}}. \quad (10.22)$$

Здесь $r_{\text{вх}}$ — входное сопротивление УП с учетом сопротивления всех подключенных к нему элементов.

Пример. Определить напряжение фона на входе УП ($r_{\text{вх}} = 100 \text{ кОм}$). Провода сети питания и входной цепи УП имеют диаметр 1 мм и на участке 50 мм идут параллельно на расстоянии 10 мм, остальными емкостями можно пренебречь. Прибор питается от трехфазной сети 220 В 50 Гц с нулевым проводом.

Из табл. 10.3 находим $C_{\text{пар}} = 0,45 \text{ пФ}$. Подставляя величины в (10.22), получаем $U_{\text{вх}} = (220 - 0) \times 314 \cdot 0,45 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5 = 3,1 \text{ мВ}$. Если этот уровень фона возникает на входе усилителя с коэффициентом усиления 100 ... 1000, то напряжение

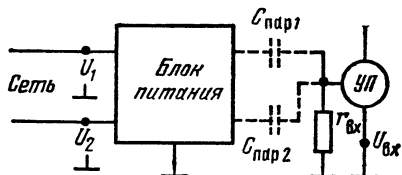


Рис. 10.30. Схема возникновения фона при асимметрии сети питания

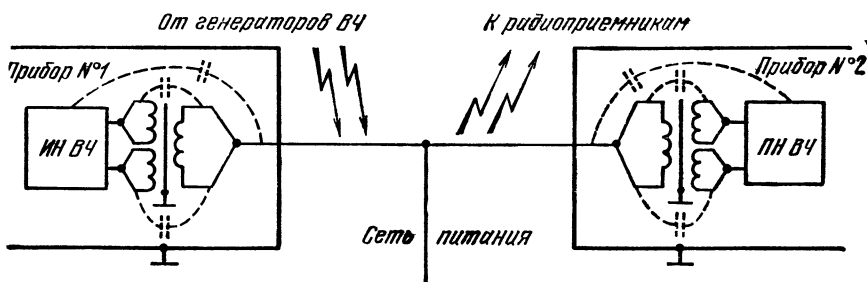
фона на выходе его достигнет недопустимых величин 0,31 ... 3,1 В.

Наводка фона пропорциональна частоте сети $\omega = 2\pi\nu$. В аппаратуре, питающейся от сети с частотой 400 ... 800 Гц, возможность наводки в 8 ... 16 раз больше, чем при питании от сети 50 Гц. Еще больше возможность наводки фона в устройствах, питающихся от бортовой сети постоянного тока с применением полупроводниковых преобразователей в переменный ток. Такие преобразователи бывают резко асимметричными относительно корпуса прибора, в них используется повышенная частота в несколько килогерц, при искаженной форме напряжения, в котором содержится ряд высших гармоник.

Наводка и излучение помех через провода сети питания

Провода, которые входят внутрь прибора, образуют паразитную связь с его внутренними частями. Вне прибора эти провода проходят через другие устройства, помещения и здания, создавая паразитные связи между внутренними частями различной РЭА (рис. 10.31).

Рис. 10.31. Схема паразитных наводок через сеть питания



Иногда провода сети питания имеют связь с антеннами радиопередатчиков и радиоприемников.

Оба провода сети переменного тока прокладываются вместе, за исключением небольших отводов к однополюсным выключателям. Провода имеют одинаковые паразитные емкости относительно ИН, наводка распространяется по этим двум (или трем) проводам, как по одному. Обратным проводом является земля или корпус. Такой способ передачи ВЧ наводки называется «асимметричным», в отличие от рассмотренной выше «симметричной» наводки фона. Симметричная ВЧ наводка может вызываться только асимметрией проводов питания и непосредственным включением в них коллекторных электродвигателей, реле и других устройств, дающих скачки тока. Она встречается реже, чем асимметричная, и все меры подавления последней действуют и на симметричную наводку. Поэтому ее обычно не рассматривают.

Методы компоновки и монтажа элементов устройств питания

Для защиты от фона и помех используются два метода.

Первый метод заключается в уменьшении емкостной связи между проводами и элементами конструкции, относящимися к сети питания вместе с первичной обмоткой трансформатора, и другими частями прибора. Этот метод, действующий одновременно на фон и помехи, включает в себя следующие способы защиты.

а) Электрическое экранирование первичной обмотки силового трансформатора от всех остальных обмоток. Для этого между ними прокладывается один разомкнутый виток из медной фольги с шириной, равной длине катушки. Виток соединяется с корпусом, вместе с сердечником и другими металлическими деталями трансформатора. В устройствах, работающих на частотах ниже 5...10 МГц, вместо витка из фольги можно применить однослойную экранирующую обмотку, один конец которой изолируется, а другой соединяется с корпусом. Во всех случаях важно обес-

10. Защита от паразитных наводок

печить кратчайшее соединение экрана с корпусом.

б) Силовой трансформатор, предохранители и выключатель сети следует устанавливать в одном месте, на максимальном расстоянии от остальной части прибора, около ввода сети. Желательно скомпоновать все эти детали в узел, избегая смешивания с деталями и проводами, относящимися к радиоэлектронной части прибора. Если выключатель устанавливается на передней панели или на пульте управления, то следует заводить сеть сначала на него, а затем вести ее к узлу питания, не заделывая в общие жгуты с другими проводами. Нежелательно пользоваться выключателями совмещенными с переменными непровольными резисторами.

в) При блочной конструкции РЭА провода сети питания не следует прокладывать в общих кабелях и жгутах.

г) Если силовая и радиоэлектронная части РЭА прикрываются общей крышкой, не несущей функции экранирования, то следует обеспечить надежное соединение крышки с корпусом или выполнять ее из изоляционного материала.

д) Лучше всего питающую часть РЭА размещать в отдельном блоке, наблюдая за тем, чтобы выходные провода его не имели связи с проводами и деталями, относящимися к сети.

Второй метод заключается в установке развязывающей ячейки на вводе сети питания, которая действует только на помехи, распространяющиеся по сети питания, и не влияет на фон, который подавляется только уменьшением паразитной связи. Фильтрами в сети питания в первую очередь снабжаются вероятные ИН с коллекторными электродвигателями и другими мощными генераторами помех. В измерительной РЭА, содержащей маломощные генераторы ВЧ, небольшое излучение генерируемого напряжения может сказаться на точности измерений. В таких приборах следует также устанавливать сетевые фильтры (см. § 10.3). В ПН сетевые фильтры применяются редко, только когда ПН устанавливаются вблизи от мощ-

ных ИН (например, на кораблях, самолетах и др.).

Изображенные на рис. 10.32, а два провода сети питания (или три для трехфазной сети) следует рассматривать как один провод, в который включают одну, две или три ячейки В крайнюю ячейку, со стороны ИН, входит его внутреннее сопротивление $Z_{ин}$. Например, если фильтр рис. 10.32, б включен на вводе сети в ИН, то первая ячейка — это $Z_{ин}C_1$, вторая — LC_2 . Здесь $Z_{ин}$ — сопротивление суммы паразитных емкостей между ИН и элементами сети, справа от точек *aa*. Если тот же фильтр включен на вводе сети в ПН, то первая РЯ $Z_{мин}C_2$, вторая — LC_1 , где $Z_{мин}$ — сопротивление сети питания для напряжения наводки В обоих случаях величины $Z_{ин}$ и $Z_{мин}$ могут быть самыми разнообразными. Поэтому эффективность фильтрации первой ячейки рассчитать невозможно, определить ее можно только экспериментально. Ячейки, включенные в каждый провод сети, по фильтруемому ВЧ работают параллельно. Между точками, отмеченными на рисунке одинаковыми буквами, отсутствует ВЧ разность потенциалов. Поэтому соответствующие дроссели предохранять от связи не нужно. Можно помещать их на общем сердечнике, намотывая параллельно двумя (для однофазного питания) или тремя (для трехфазного питания) проводами, заботясь только об их электрической прочности. Конденсаторы фильтров необходимо присоединять к корпусу отдельно, за исключением подключенных к точкам равного потенциала. Лучше всего пользоваться проходными конденсаторами и конденсаторами типа КЗ. Разработана серия сетевых фильтров [17] больших габаритов на токи до 600 А.

10.6. ИМПУЛЬСНЫЕ НАВОДКИ

Импульсными называются помехи, создаваемые скачками постоянного или переменного напряжения и тока, в любых цепях и устройствах. К ним относятся: ударное возбуждение (прохождение спектра) ВЧ устройств скачками,

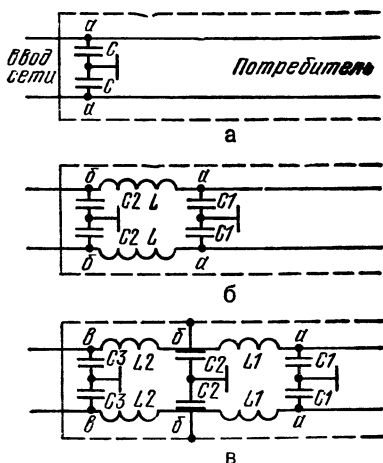


Рис. 10.32. Фильтры на вводе сети питания из емкостей (а), одной (б) и двух (в) развязывающих ячеек

получающимися при работе реле, выключателей, электрического зажигания двигателей внутреннего сгорания, электросварки, электро транспорта, коллекторных электродвигателей, медицинской и научной аппаратуры, люминесцентного освещения и др., ударное возбуждение ВЧ устройств видеопульсами, непосредственная наводка видеопульсов на видеоусилители (см. рис. 10.1), ударное возбуждение ВЧ устройств импульсами ВЧ, атмосферные (грозовые) помехи.

В конструкции всех устройств, как радиоэлектронного, так и любого другого применения, содержащих источники перечисленных импульсных помех, за исключением двух последних, должны встраиваться помехоподавляющие детали и узлы, рассмотренные в предыдущих главах. Это обеспечивает совместную работу ИН с любыми ПН в диапазоне действия помехоподавляющих деталей. Если ИН эксплуатироваться в условиях, в которых он может мешать приему радиовещания и телевидения в диапазоне частот 0,15 . 300 МГц, то он регламентируется «Общесоюзными нормами допустимых промышленных радиопомех» [16] и ГОСТ 17822—72. Контроль за вы-

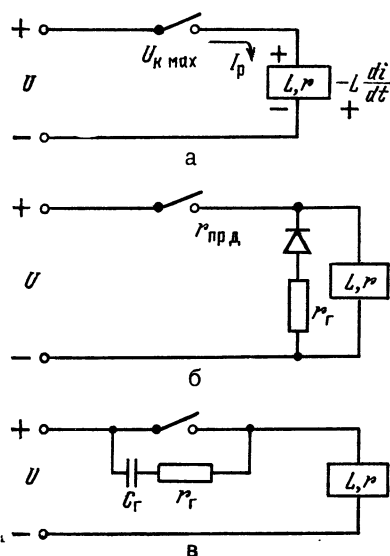
полнением этих норм, обязательных для всех организаций СССР, проводит Государственная инспекция электросвязи. Правилами классификации и постройки морских судов эти нормы распространены на суда [6]. На другие объекты, содержащие РЭА и ИП, имеются свои нормы допустимых радиопомех. Если таковые отсутствуют, то следует придерживаться норм [16].

Любая РЭА, содержащая ИП, должна также удовлетворять нормам [16]. Это позволит обеспечить работу с низким уровнем помех всех чувствительных устройств, входящих в состав РЭА. Пренебрежение общими правилами и традициями при конструировании РЭА новой техники, в частности указанными выше нормами, может оказаться причиной длительного экспериментального налаживания образцов.

Искрогасящие цепи

Цепи предназначены прежде всего для уменьшения износа контактов и увеличения срока их службы [2].

Рис. 10.33. Контактная пара без искрогасящей цепи (а), с диодно-резистивной (б) и емкостно-резистивной (в) цепями



10 Защита от паразитных наводок

Одновременно они дают некоторое снижение уровня импульсных помех. При отсутствии искрогасящих цепей (рис. 10.33, а) через включенное реле, контактор или другую индуктивную нагрузку протекает рабочий ток $I_{\text{рб}} = U/r$. В момент выключения исчезающий магнитный поток наводит на индуктивности э. д. с. $-L \frac{di}{dt}$ и на контакте возникает напряжение

$$U_{\text{к max}} = U + L \frac{di}{dt}, \quad (10.23)$$

значительно превосходящее напряжение питания. Оно пробивает контактный промежуток и в возникающей электрической искре расходуется накопленная в обмотке энергия. Действие искрогасящих цепей заключается в том, что эта энергия расходуется не в зазоре между контактами, а в активном сопротивлении цепи.

Для искрогашения чаще всего применяется цепь состоящая из диода и резистора (рис. 10.33, б) которую можно включать только параллельно нагрузке L, r . В рабочем состоянии через нагрузку протекает ток создающий на диоде обратное напряжение, и искрогасящая цепь практически не шунтирует нагрузку. В момент выключения к диоду приложено прямое напряжение и в цепи $r_{\text{прд}}, r_2$ расходуется энергия, накопленная в магнитном поле нагрузки. Ток через реле (нагрузку) протекает некоторое время после выключения, из-за чего увеличивается время отпускания. Если это не существенно, то можно r_2 не ставить. Расчет цепи имеется в [2].

В искрогасящих цепях применяются также варисторы [11], т. е. нелинейные резисторы, сопротивление которых зависит от приложенного напряжения, но не от его полярности (рис. 10.34). Варистор можно подключать параллельно как нагрузке, так и контакту. В последнем случае варистор действует лучше, так как находится под большим напряжением (10.23). Варисторы особенно удобны для при-

менения с поляризованными реле. На них подается напряжение обеих полярностей, что препятствует использованию диодов.

Искрогасящая цепь C_r, r_r (рис. 10.33, в) подключается параллельно контакту. Напряжение на контакте растет по мере заряда конденсатора C_r , который может проходить аperiodически и колебательно, в зависимости от значений L, r, C_r и r_r . Резистор r_r служит для предохранения контакта от спекания большим начальным током разряда конденсатора в момент включения. В простейшем случае берут $r_r = r$ и $C_r = L/r^2$. Тогда конденсатор C_r заряжается аperiodически и напряжение на контакте не может превысить U . Недостатком этого режима является большая емкость конденсаторов и увеличение времени отпущения. Расчет режимов дан в [2].

Искрогасящая цепь снижает импульсные помехи, так как она уменьшает максимальные токи и напряжения, получающиеся в устройстве, и крутизну их перепадов. Величину этого снижения можно оценить только экспериментально. Если оно оказывается недостаточным, то приходится прибегать к экранированию, начиная с включения блокировочных (проходных) конденсаторов, РЯ (см. рис. 10.32) и кончая применением сплошных экранирующих коробок.

Образование электрической искры указывает на то, что в цепи происходят резкие изменения высокого напряжения и большого тока. Поэтому электросварка и системы зажигания двигателей внутреннего сгорания являются одними из наиболее опасных источников импульсных наводок. Подавление этих наводок может быть выполнено только путем полного экранирования источника с фильтрацией входящих из экрана проводов. Это означает, что систематически действующий электросварочный аппарат должен размещаться в экранированном помещении или кабине, если в опасной близости от него находится чувствительная РЭА. Системы электрического зажигания двигателей различного назначения

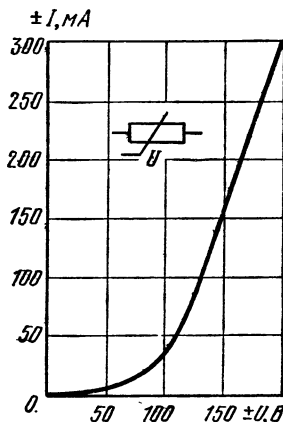


Рис. 10.34. Характеристика варистора, расширяющая возможность его использования в искрогасящей цепи

экранируются в соответствии с производственными нормативами и проверяются по [16].

Особенности конструкций РЭА, работающей в условиях импульсных помех

Радиоприемники и усилители, предназначенные для совместной работы с мощными импульсными генераторами ВЧ и СВЧ, должны конструироваться так, чтобы в них не происходило детектирование мешающих импульсов. Для этого они должны снабжаться многоконтурным диапазонным преселектором или ФСС, обеспечивающими большое ослабление сигналов всех частот, кроме входящих в полосу пропускания приемника, перед первым нелинейным элементом — УП или детектором. Во избежание прохождения помехи, помимо преселектора, необходимо устанавливать развязывающие ячейки в местах ввода всех проводов, включая телефонный шнур в связанном приемнике (см. § 10.5).

Если требуется приспособить готовый приемник для указанного выше применения, то можно получить удовлетворительный результат, включив в цепи антенны одно- или двухъячеичный фильтр, рассчитанный на подавление несущей частоты мешаю-

ших импульсов, и внешние РЯ в местах ввода всех остальных проводов.

Часть спектра ВЧ импульсов непосредственно может проникать только через антенный ввод на тех же частотах, что и полезные сигналы. Единственным способом снижения уровня этой наводки является ограничение спектра излучаемых частот. Известно, что радиоприемники импульсных сигналов ВЧ имеют полосу пропускания несколько большую чем $1/t_y$, где t_y — время установления краев импульса на выходе. Только эта часть спектра радиопередатчика проходит через приемник и несет с собой необходимую информацию. Весь остальной спектр приемником не используется, его энергия бесполезно расходуется и может давать помехи.

Наводки в ЭВМ и импульсной РЭА, быстродействующие ЭВМ, другая сложная импульсная РЭА должны конструироваться с учетом того, что они являются также ВЧ и СВЧ устройствами. Если время установления краев импульсов $t_y = 10 \dots 100$ нс, то высшая граничная частота их спектра $\nu_b = 0,35/t_y = 3,5 \dots 35$ МГц соответствует частотам усилителей, особенности конструкций которых даны в § 10.4. Для получения устойчивого усиления на этих частотах необходимо придерживаться размещения, рекомендованного на рис. 10.28. Облегчающим фактором для рассматриваемых здесь сложных устройств является то, что в них обычно не приходится иметь дело с большим усилением. Оно в $10^4 \dots 10^5$ раз меньше усиления по напряжению, используемого в радиолокации и связи. Усложняющим фактором является наличие большого числа параллельных и пересекающихся каналов и плотная компоновка, увеличивающая паразитные связи.

Чтобы обеспечить нормальное функционирование ЭВМ и другой сложной РЭА, каждый узел, блок и шкаф должны иметь металлический «корпус», по которому протекают обратные токи всех частей ЭВМ. Соединения всех корпусов друг с другом должны быть короткими и надежными. Где только возможно, следует применять сварку и пайку

10. Защита от паразитных наводок

для соединения корпусов. Присоединение корпусов сменных узлов и блоков к общему корпусу блока, стойки и всей машины должно производиться без соединительных проводов и разъемов, путем создания нескольких надежных и больших контактирующих поверхностей. Точки ВЧ спектра, определяющие быстродействие машины, протекают только в поверхностном слое металла. Поэтому толщина всех деталей, входящих в общий корпус машины с радиотехнической точки зрения значения не имеет и должна выбираться только из механических соображений. Поверхности частей корпуса, по которым протекает много обратных токов в различных направлениях, должна быть как можно больше. Отсюда следует, что для соединения корпусов, шкафов и других приборов и пультов, устанавливаемых в помещении, занятием ЭВМ, лучше всего применить сплошной (сварной или паяный) тонкий медный лист, покрывающий все помещение под паркетом или пластиком. Этот лист заземляется, в соответствии с правилами техники безопасности, и к нему непосредственно (без соединительных проводов) подключаются корпуса всех частей ЭВМ, устанавливаемых на полу. Возможно, что медный лист можно заменить окраской пола электропроводящей краской [10], но это подлежит экспериментальной проверке.

Схемы расположения элементов в узлах, узлах в блоках, блоков в шкафах должны быть выбраны так, чтобы протекающие по корпусу обратные токи данной части ЭВМ минимально выходили за пределы корпуса своей части. Одновременно нужно стремиться к минимальному числу и минимальной длине сигнальных связей между узлами, блоками и шкафами.

Входные и выходные (сигнальные) провода всех элементов и других частей ЭВМ следует максимально удалять друг от друга и не заделывать в общие жгуты. При необходимости такой заделки сигнальные провода в жгуте следует экранировать.

Проходящие вдоль блоков, стоек и всей ЭВМ шины или провода пи-

тания полезно разбивать на участки включением в них развязывающих ячеек (рис. 10.35). Конденсаторы здесь удобно ставить проходные максимальной емкости, а вместо дросселя надевать на соединительные провода между конденсаторами ферритовые трубки (ГОСТ 19726—74). Элементы, потребляющие большой импульсный ток (блокинг-генераторы, выходные каскады), желательно питать от отдельного источника, не связанного с питанием чувствительных элементов или подключать их к общей шине через отдельные развязывающие цепи LC с постоянной времени, в тысячи раз превосходящей длительность импульса.

Все контактные элементы, например, реле, коллекторные электродвигатели, выключатели, должны быть снабжены искрогасящими и фильтрующими цепями и проверены [16]. Такой же проверке, как в [16], подлежат и все другие ИН.

В местах ввода в ЭВМ проводов сети переменного тока должны устанавливаться фильтры, во всех трансформаторах должны быть экраны между сетевыми отмотками и всеми остальными, общий выключатель должен устанавливаться у ввода сети в ЭВМ и т. д. (см § 10.5). Не следует вводить сеть переменного тока непосредственно в блоки, особенно содержащие электронные узлы. Если это необходимо, то нужно подключаться к вторичной обмотке экранированного трансформатора, используя пониженное напряжение и экранированный кабель [9].

В ЭВМ необходимо провести сплошную металлизацию, заключающуюся в том, что к общему корпусу надежно присоединяются все металлические части: крышки, кожуха, салазки, угольники и другие крепежные детали, корпуса электродвигателей, реле, трансформаторов и других деталей — независимо от предполагаемого прохождения по ним обратных токов. Это позволяет уберечься от неожиданных дефектов, так как любая не присоединенная к корпусу или случайно отсоединившаяся от него металлическая деталь может оказаться «посторонним проводом», связывающая части электронного устройства,

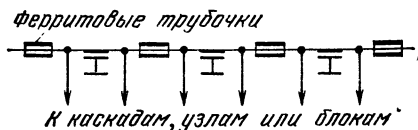


Рис. 10.35. Вариант развязывающих ячеек для ЭВМ

а соединенная с корпусом деталь всегда действует как частичный экран

Осторожно следует подходить к компоновке устройств на ИС, следя за тем, чтобы в одну «упаковку» не попадали возможные ИН и ПН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барулин Л. Г. Резонансные усилители на транзисторах. — М.: Связь, 1969.
2. Виттенберг М. И. Расчет электромагнитных реле. — М.: Энергия, 1966.
3. Войшвилло Г. В. Усилительные устройства. — М.: Связь, 1975.
4. Волин М. Л. Паразитные связи и наводки. — 2-е изд. — М.: Сов. радио, 1965.
5. Волин М. Л. Паразитные процессы в РЭА. — М.: Сов. радио, 1972.
6. Григорьев А. Г., Матисен А. М. Защита радиоприема на судах от радиопомех. — Л.: Судостроение, 1973.
7. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. — М.: Связь, 1972.
8. Гроднев И. И., Сергейчук К. Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. — М.: Связьиздат, 1960.
9. Гурвич И. С. Защита ЭВМ от внешних помех. — М.: Энергия, 1975.
10. Гуль В. Е. и др. Электропроводящие полимерные материалы. — М.: Химия, 1968.
11. Зайцев Ю. В. Полупроводниковые резисторы. — М.: Энергия, 1969.
12. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной тех-

- нике и технике электросвязи: Пер. с нем. — М.: Госэнергоиздат, 1957.
13. Кондрашкин Н. М. Переходные контакты в устройствах заземления и экранирования РЭА, — М.: Сов. радио, 1973
 14. Круг К. А. Теория переменных токов. — М.: Госэнергоиздат, 1946.
 15. Пекелис В. Г., Симхес В. Я. Паразитные связи и наводки в быстродействующих ЭЦВМ. — Минск: Наука и техника, 1967.
 16. Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех. — М.: Связь, 1973.
 17. Турин Л. С. Широкополосные фильтры для подавления высокочастотных помех. — Вестник связи, 1974, № 5.
 18. Цыкин Г. С. Усилительные устройства. — М.: Связь, 1971.

11. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ *

Список аббревиатур

Вл — относительная влажность
 ГР — герметизация (общее обозначение)
 И — изделие
 ЖС — жизнеспособность герметика

11.1. ВИДЫ ГЕРМЕТИЗАЦИИ

Герметизация (ГР) — обеспечение практической непроницаемости корпуса РЭА для жидкостей и газов с целью защиты ее элементов и компонентов от влаги, плесневых грибов, пыли, песка, грязи и механических повреждений.

Различают индивидуальную, общую, частичную и полную ГР.

Индивидуальная ГР допускает замену компонентов РЭА при выходе их из строя и ремонт И. При общей ГР (она проще и дешевле индивидуальной) замена компонентов и ремонт возможны только при демонтаже гермокорпуса, что может вызвать затруднения. Выбор вида ГР зависит от срока службы РЭА. Если он мал и отсутствует необходимость в уходе, то целесообразно герметизировать все изделие (И). В противном случае герметизируют компоненты или РЭА в целом.

Для частичной ГР РЭА применяют пропитку, обволакивание и заливку как компонентов, так и РЭА лаками, пластмассами или компаун-

дами на органической основе. Они, как правило, не обеспечивают герметичность в течение длительного времени.

Практически полная защита РЭА от проникновения воды, водяных паров и газов достигается при использовании металлов, стекла и керамики с достаточной степенью непроницаемости. Наиболее распространенные способы такой ГР — применение металлических корпусов с воздушным, газовым (редко жидкостным) заполнением. Часто РЭА располагают в разъемном герметичном корпусе, который затем заполняют сухим воздухом либо инертным газом при атмосферном или повышенном давлении, после чего корпус запаявается. Газовое заполнение не ограничивает рабочую температуру, предотвращает окисление смазки движущихся частей, понижает вероятность образования дуги между контактами реле, переключателей, улучшает тепловой режим компонентов (по сравнению с заполнением компаундами) благодаря охлаждению конвекцией газа. Недостатки разъемного герметичного корпуса: повышенные требования к механической прочности, трудность выполнения и контроля надежного разъемного гермосоединения. Преимущество — относительно легкий доступ к компонентам РЭА.

При размещении РЭА в неразъемном (паяном или сварном) корпусе существенно затрудняется доступ к компонентам при облегчении конструкции гермокорпуса И.

* Составители А. И. Фефер, В. С. Герценштейн.

Важным фактором повышения эффективности ГР являются лакокрасочные, гальванические и химические покрытия пропитывающих, обволакивающих и заливочных материалов, металлического или металлополимерного гермокорпусов.

11.2. ПРОПИТКА

Назначение и область применения

Пропитка — процесс заполнения изоляционным пленкообразующим материалом пор и малых зазоров в компонентах РЭА с целью увеличения их электрической и механической (защита от повреждений) прочности, влаго-, нагрево- и химостойкости.

Пропитке подвергаются моточные изделия (трансформаторы, дроссели, катушки), детали из волокнистых и пористых материалов (каркасы катушек монтажные колодки, платы и т. д.). Пропитка и сушка выполняются при нормальном (или повышенном) атмосферном давлении или под вакуумом. Наилучшие результаты дает чередование вакуума и повышенного давления.

Особенности конструкций пропитываемых изделий

Конструкция моточных изделий должна обеспечивать хороший доступ пропиточного состава внутрь И. Жесткие выводы следует выполнять шинами из меди или латуни с антикоррозионным покрытием (лужение или серебрение), одножильным проводом типа ПЭВ, гибкие — теплостойкими проводами ПВСТ, ПТЛ, ПМРВ и др.

Пайка элементов моточных И производится припоями, температура плавления которых превышает температуру полимеризации пропиточного материала не менее, чем на 35...45 град. Нельзя применять пропитанные лаком электроизоляционные материалы: лакоткань, хлопчатобумажные (линосиновые) и хлорвиниловые трубки и фибру В многослойных обмотках (с числом слоев более 4) применяется микалентная бумага, стекло-

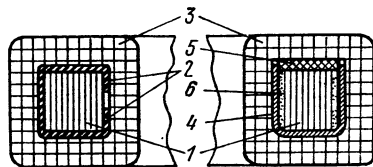


Рис. 11.1. Конструкция торoidalной катушки, герметизированной пропиткой:

1 — сердечник, 2 — прокладка, 3 — обмотка, 4 — контейнер, 5 — крышка контейнера, 6 — смазка ЦИАТИМ-221

ткань и другие легкопропитываемые материалы. Сердечники из феррита и пермаллоя, а также катушки с обмоткой из провода $d < 0,08$ мм необходимо защищать от воздействия напряжений (возникающих при полимеризации пропиточных материалов), которые значительно уменьшают и сердечники и ухудшают параметры трансформатора. Для этого рекомендуется использовать прокладки из термостойких резин и специальные контейнеры (рис. 11.1), компаунды на основе кремнийорганического каучука типа «Виксинт У-1-18» и теколовые герметики типа УТ-34.

Основные свойства пропиточных материалов и рекомендации по их применению

При выборе материалов для пропитки (рис. 11.2...11.4) необходимо учитывать нейтральность к элементам пропитываемого И, нетоксичность, влаго- и нагревостойкость.

При использовании пропитки и заливки (рис. 11.5) для И, работающих в среде с $\theta = 313$ К и Вл 90...98% для многослойных обмоток открытого типа, индекс I (в кружке), после трехкратной пропитки наносят дополнительное защитное эмалевое покрытие. При двухкратной пропитке и защитным эмалевым покрытием И работоспособно при 293 ± 5 К и Вл до 98%. При однократной пропитке и защитным эмалевым покрытием — $\theta = 293 \pm 5$ К и Вл $65 \pm 15\%$.

После пропитки для повышения влагостойкости используют заливку и обволакивание. Особенностью

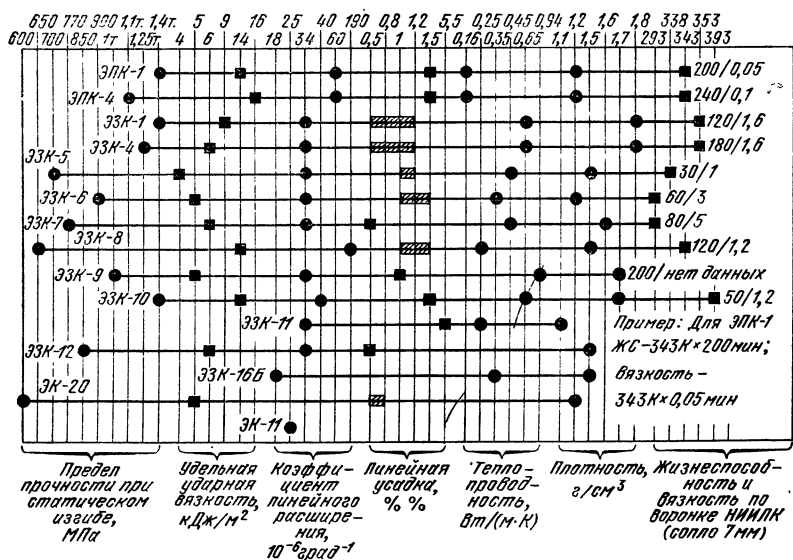
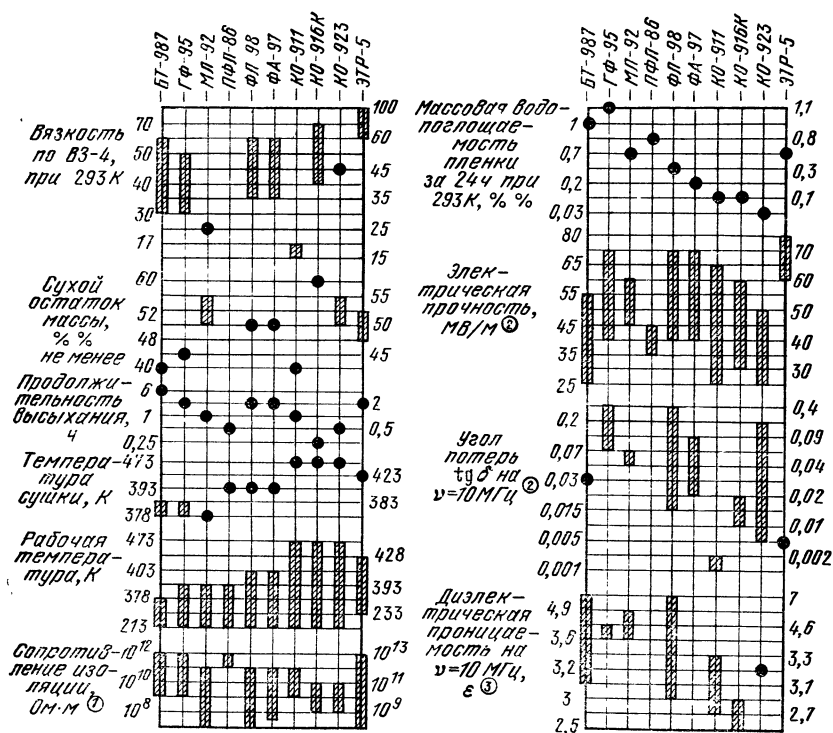
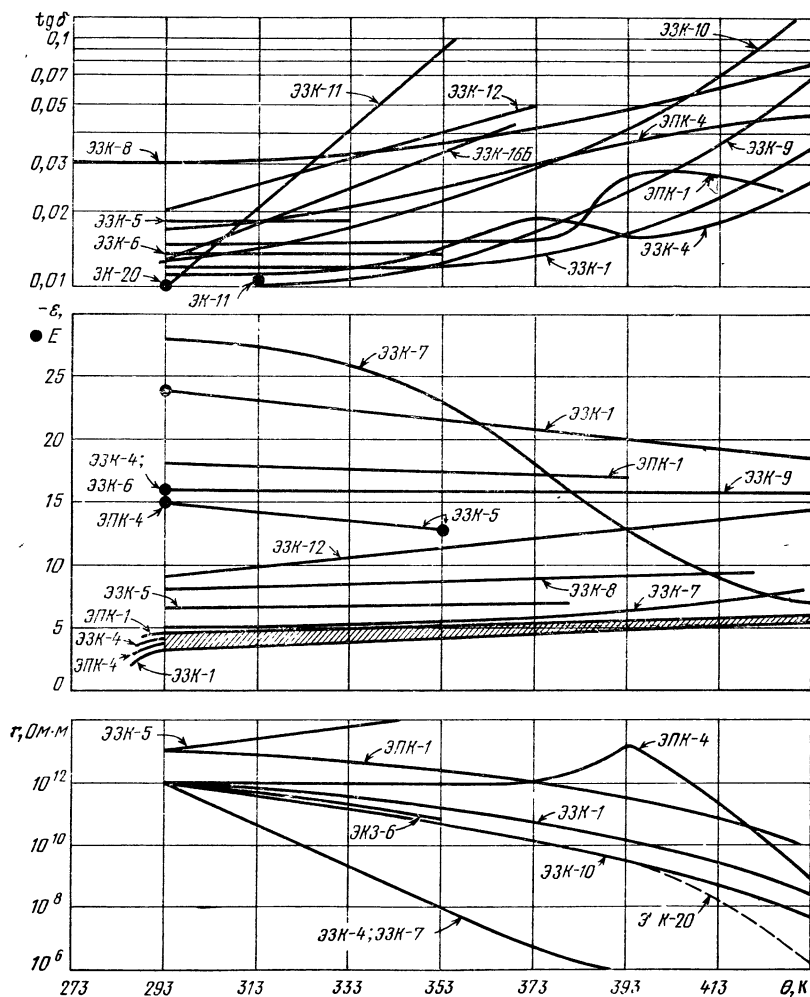


Рис. 11.2. Основные свойства пропиточных лаков.

1. Удельное объемное сопротивление изоляции дается для нормальной температуры 293 К (верхнее значение) и для температуры 393...413 К (нижнее значение).
2. Аналогично дается электрическая прочность ($\theta=293$ и 393 К) и $\operatorname{tg} \delta$ ($\theta=393$ и 293 К).
3. Значения ϵ даны для $\theta=293$ и 393...413 К, причем у КО-911 и КО-916К зависимость обратная (ϵ падает при повышении температуры)

Рис. 11.3. Основные свойства эпоксидных компаундов.

Жизнеспособность характеризуется температурой и временем выдержки при ней (мин), а вязкость — той же температурой и вязкостью при ней (мин). Значения времени для ЖС и вязкости в виде отношения ЖС/вязкость

Рис. 11.4. Зависимость электрических параметров $\operatorname{tg} \delta$, ϵ и r эпоксидных компаундов от температуры

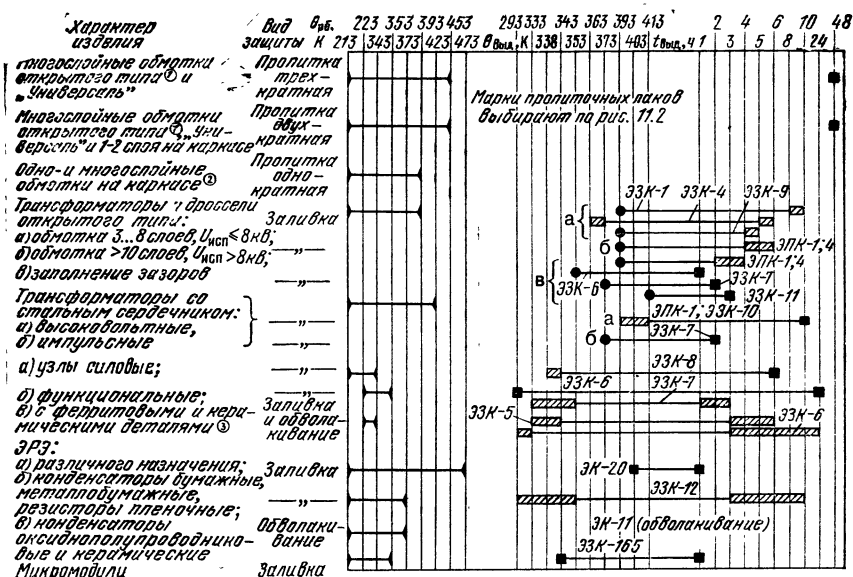


Рис. 11.5. Области использования пропитки, заливки и обволакивания для некоторых изделий при температуре среды 40°C и Вл 90...98%.

1 — температура среды 288...298 К и Вл до 98%; 2 — температура среды (288...298 К) и Вл $65 \pm 15\%$. Режимы отверждения устанавливаются экспериментально

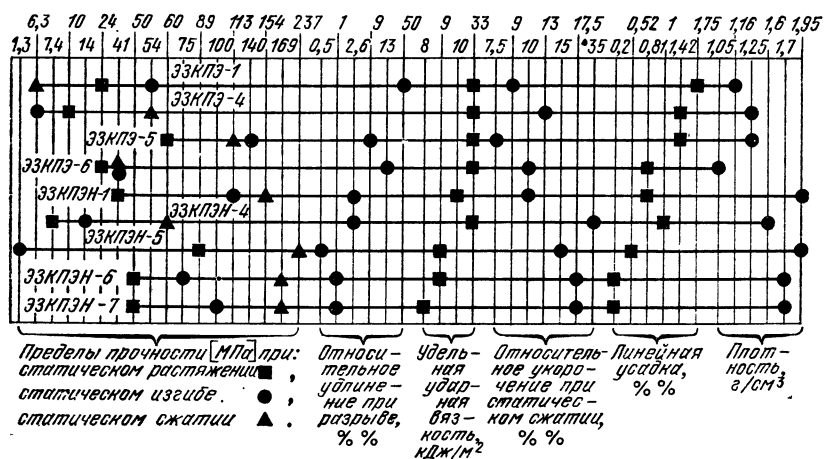


Рис. 11.6. Основные свойства эпоксидных компаундов повышенной эластичности

заливки ферритовых и полупроводниковых деталей (индекс 3) является применение компаунда ЭЗК-6 без наполнителя.

11.3. ОБВОЛАКИВАНИЕ И ЗАЛИВКА

Назначение и область применения

Обволакивание — процесс образования покровных оболочек на поверхности И, предназначенных для кратковременной работы в условиях воздействия влаги. Обволакиванию может предшествовать пропитка.

Заливка — процесс заполнения изоляционным материалом свободного пространства между узлом и стенкой защитного корпуса. Изделия без корпуса заливают в специальной форме. При помощи заливки можно нанести защитный слой компаунда на поверхность узлов РЭА заполнить зазоры и т. п. Заливка выполняется при нормальном, повышенном давлении или под вакуумом. Наилучшие результаты дает средование вакуума и повышенного давления. Заливка узлов РЭА, кроме защиты от метеорологических факторов, позволяет получить И с точными геометрическими размерами и высокой чистотой обработки поверхности, повышает механическую прочность.

Широкое распространение эти методы защиты И получили благодаря простоте технологического процесса и минимального расхода материалов. По степени обеспечения влагостойкости обволакивание уступает заливке.

Обволакивание, пропитка и заливка не заменяют полную герметизацию, так как не исключают проникновение влаги внутрь изделия. Слабым местом являются выводы, вдоль которых образуются капилляры на границе соприкосновения материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР)

Расчет внутренних напряжений в компаундах при заливке

Возникающие при заливке напряжения вызваны взаимодействием компаунда с компонентами зали-

ваемого И и обусловлены в основном несвободным изменением объема И при отверждении и различием ТКЛР компаунда и заливаемых деталей.

Максимальное значение напряжения возникает на границе компаунд — заливаемая деталь. Напряжения уменьшаются по мере удаления от границы раздела и (незначительно) после термообработки.

Внутренние напряжения в цилиндрическом полимерном теле заливки, армированной стержнем из инородного материала, можно рассчитать по формуле

$$P_K \approx E_K (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta\theta / \{ (d_0^2 + d_c^2) / (d_0^2 - d_c^2) + \mu \}, \quad (11.1)$$

где P_K — давление компаунда на стержень (деталь), Па; E_K — модуль упругости компаунда, Па; α_1, α_2 — ТКЛР компаунда и материала стержня; $\Delta\theta$ — перепад от температуры полимеризации до рабочей, К; d_0 — диаметр полимерного тела заливки из компаунда, м; d_c — диаметр стержня, м; μ — коэффициент Пуассона компаунда

При понижении температуры величина внутренних напряжений в эластичном компаунде в некоторых случаях может стать больше, чем в жестком.

Методы снижения внутренних напряжений в компаундах

Модификация свойств компаундов позволяет снизить внутренние напряжения путем введения наполнителей, пластификаторов, изменением их соотношения или режима отверждения. Снижение напряжений конструктивными методами обеспечивается использованием демфирующих прокладок, контейнеров и других элементов для защиты деталей РЭА, чувствительных к сжатию (пермаллой, феррит и т. п.).

Демпирующие прокладки изготавливают из резины, эластичных компаундов и пенопластов. Плотность прилегания демпирующих прокладок достигается технологическими приемами — окунанием,

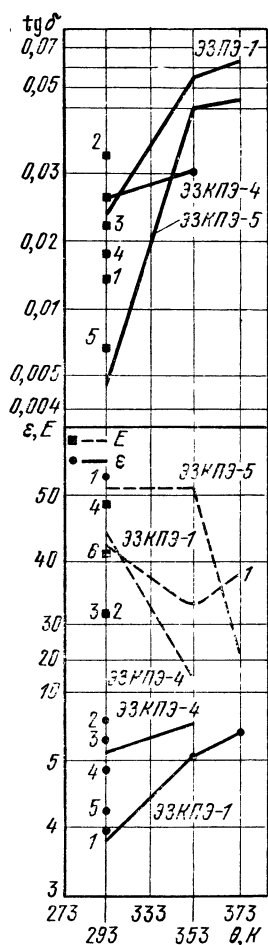


Рис. 11.7. Зависимость электрических параметров эпоксидных компаундов повышенной эластичности от температуры: 1 — ЭЗКПЭ-6; 2 — ЭЗКПЭ-4; 3 — ЭЗКПЭ-7; 4 — ЭЗКПЭ-1; 5 — ЭЗКПЭ-5; 6 — ЭЗКПЭ-5 (данные только для $\theta = 293$ К)

обволакиванием, нанесением демпфирующего слоя методом вихревого напыления и т. п.

Большое значение имеет выбор размеров и геометрии компоновки узлов РЭА, подлежащих заливке компаундом в монолитной блок, так как внутренние напряжения увеличиваются с увеличением размеров, а деформации и внутренние напряжения имеют минималь-

Рис. 11.8. Изделия и параметры их защиты герметиками густой консистенции «Виксинт» $\theta_{\text{вул}}$ ЖС (а) и эпоксидными компаундами $\theta_{\text{вул}}$, $\theta_{\text{жс}}$, $\theta_{\text{жс}}$ (б). характеристики временем вулканизации $t_{\text{вул}}$, жизнеспособность ЖС, температурой и временем отверждения $\theta_{\text{жс}}$ и $t_{\text{жс}}$

Рис. 11.9. Основные свойства герметиков и компаундов на каучуковой основе

ную величину в геометрическом центре отливки. В нем нужно располагать наиболее чувствительные к сжатию детали.

Основные свойства компаундов и рекомендации по их применению

Марки эпоксидных компаундов повышенной эластичности, основные свойства компаундов и рекомендации по их применению приведены на рис. 11.6 и 11.7. Рекомендации по защите различных изделий герметиками густой консистенции и эпоксидными компаундами приведены на рис. 11.8.

Герметики и компаунды на каучуковой основе (рис. 11.9) рекомендуются использовать в следующих условиях работы. «Виксинт У-1-18» — воздействие вибраций, масла МВП, бензина и морской воды СКН-1 (всех марок) — герметизация приборов с избыточным давлением $1,96 \cdot 10^4$ Па (0,2 атм) «Виксинт К-18» — воздействие воздуха с повышенной влажностью, а также температур 213 .. 523 К в течение 200 ч ВГО-1 — воздушная среда при 213 .. 523 К (работоспособен при $\theta = 523$ К в течение 3500 ч) «Виксинт У-2-28» — воздействие $\theta = 213 \dots 573$ К при поверхностной герметизации и $\theta = 213 \dots 523$ К при внутришовной заделке.

Значения сопротивления разрыву, относительного удлинения, твердости в единицах ТИР (твердость измерения резины), усилия отслаивания и электрической прочности и др. лежат в пределах, указанных на рис. 11.9.

Точные значения ЖС и $t_{\text{вул}}$ (обычно 288 .. 303 К) зависят от дозировки катализаторов, молекулярного веса полимера, климатических условий в цехе. В случае применения

Характеристики изделий

Разъемы, прямые и газфированные волноводы, сварные соединения

Поверхности клепаных и сварных соединений

Малогоабаритные ЭРЗ

Крупногоабаритные ЭРЗ

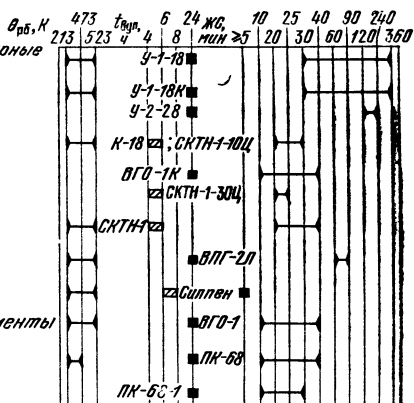
Трансформаторы и элементы памяти

Элементы в надежной маломассовой заливке

Разъемы и электромонтаж

Поверхности с резьбой и ремонтируемые элементы

Трансформаторы, блоки памяти, разъемы



Трансформаторы высоковольтные

— " — крупногоабаритные

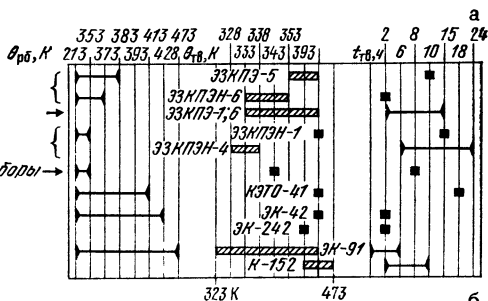
Изделия теплонагруженные

Ферритовые и полупроводниковые приборы

Трансформаторы и дроссели

Конденсаторы керамические

Конденсаторы свеклетокерамические



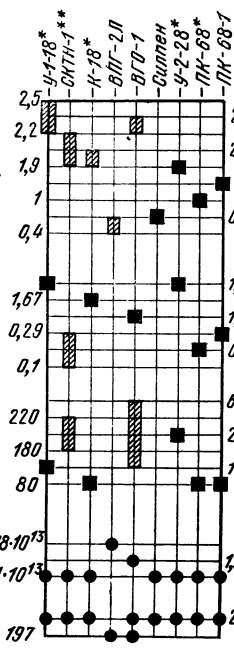
Плотность,
г/см³

Сопротивле-
ние
разрыву,
МПа

Относитель-
ное
удлинение,
%

Удельное
объемное
сопротивле-
ние,
Ом·см

Температура
хрупкости, К



Твердость по
твёрдометру
ТИР, ед.

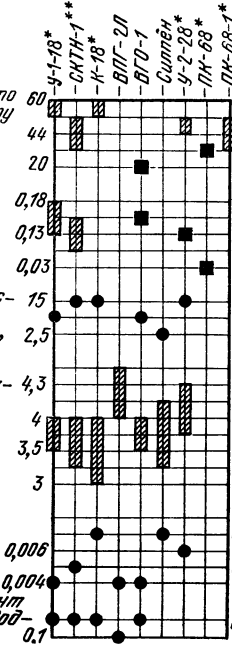
Усилие
при отсла-
ивании,
МПа

Электричес-
кая
прочность,
кВ/мм

Диэлектри-
ческая
проницае-
мость, ε

Угол
поверх-
ности,
град

Коэффициент
теплопровод-
ности,
Вт/(м·К)



* — вилсинт марки У-1-18 и т.д.

** — для всех марок

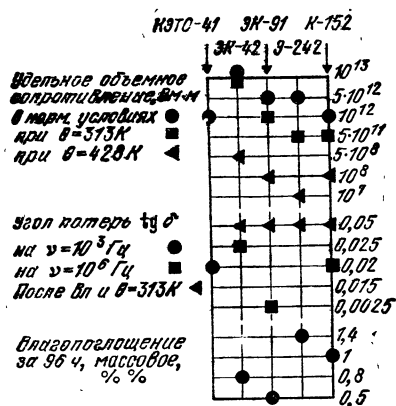


Рис. 11.10. Основные свойства гиксотропных компаундов.

После измерения удельного объемного сопротивления в нормальных условиях образцы выдерживаются в течение 96 ч при Вл 95...98%, а затем измерения повторяются при 313 и 428 К. Диэлектрическая проводимость и ТКЕ нормированы только для КЭТО-41 и равны: $\sigma=5,2$, ТКЕ (в диапазоне 303...343 К) — $570 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Значение $\text{tg } \delta=0,05$ получено после выдерживания образца в течение 96 ч при $\theta=313 \text{ К}$. Вл 95...98%. Для КЭТО-41 дополнительно нормированы: удельная ударная вязкость $5 \dots 7 \text{ кДж/м}^2$, пределы прочности при статическом изгибе 70...80 МПа, при растяжении и сжатии 75...85 МПа, плотность 1,6...1,7 г/см³ и линейная усадка 1...1,5%.

герметика ВПГ-2Л для заливки многотырьковых разъемов с плотным монтажом рекомендуется готовить пеногерметик с каучуком СКТН марки А, имеющим меньшую вязкость.

Недостатком компаундов и герметиков на каучуковой основе является их недостаточная адгезионная способность к металлам и различным материалам, улучшение адгезии достигается нанесением подслоя из лаков П-11 или П-90.

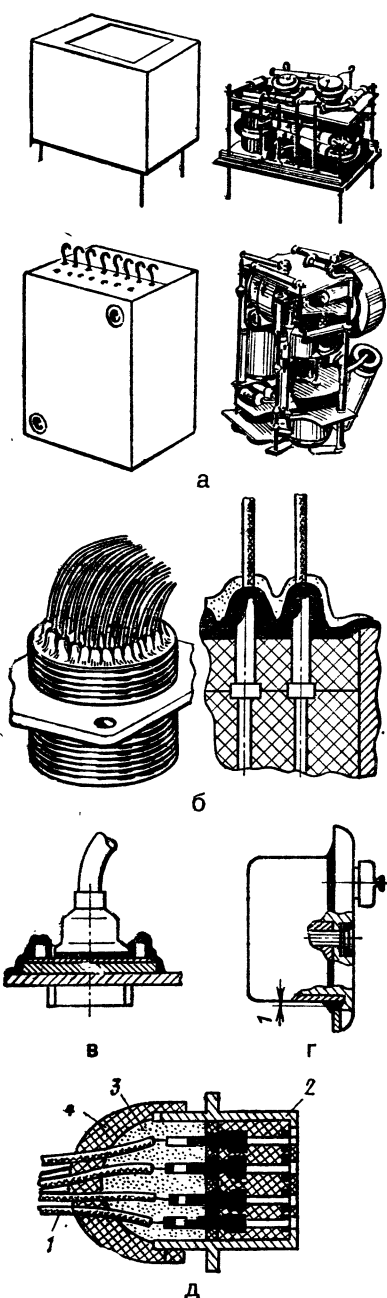


Рис. 11.11. Конструкции герметизированных узлов РЭА:

а — узлы, залитые в форму, б — разъем, герметизированный обволакиванием герметиком ВГО-1, в — узел крепления разъема на кожухе (ВГО-1), г — кожух герметизированный ВГО-1, д — герметизированный разъем (1 — жгут, 2 — корпус, 3 — герметик ВПГ-2Л (ПК-68), 4 — компаунд повышенной эластичности)

При введении специальных добавок в лаки и эмали, например бентонита или тонкодисперсной двуокиси кремния, образуются обратимые коагуляционные (тиксотропные) структуры благодаря которым материал утрачивает текучесть и удерживается на вертикальных поверхностях. Такие материалы называются тиксотропными. Гелеобразное состояние материала может быть легко разрушено при механическом или термическом воздействии и вновь восстановлено по прекращении его. Эпоксидные тиксотропные компаунды обеспечивают покрытие необходимой толщины путем разового окунания.

Марки и свойства эпоксидных тиксотропных компаундов даны на рис. 11.10, а рекомендации по применению их для герметизации методом обволакивания — на рис. 11.8.

На рис. 11.11 представлены примеры выполнения отдельных узлов РЭА, герметизированных обволакиванием и заливкой.

11.4 РАЗЪЕМНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ

Назначение и область применения

Разъемная ГР применяется для защиты блоков РЭА, требующих замены компонентов при ремонте, регулировке или настройке.

Размеры и масса герметизированного изделия меньше, чем негерметизированного. Для предотвращения электрического пробоя нужно увеличивать зазоры между компонентами, находящимися под разными потенциалами, надо умножить на коэффициент (рис. 11.12), вычисленный по нормам электрической прочности воздуха при нормальном давлении

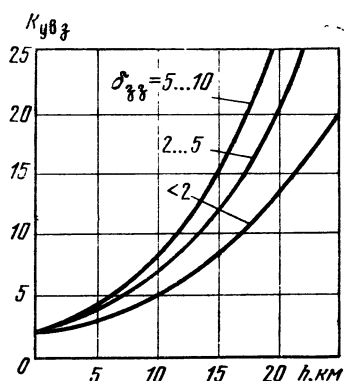


Рис. 11.12. Зависимость коэффициента увеличения зазора $K_{увз}$ между деталями от высоты над уровнем моря h при зазорах $\delta_{эф} < 2$, $2 \dots 5$ и $5 \dots 10$ мм

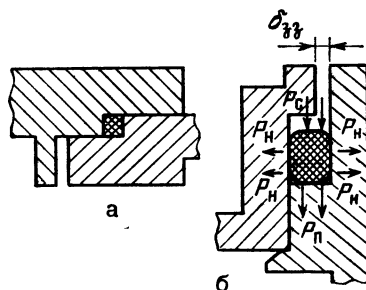


Рис. 11.13. Принудительное уплотнение резиновыми прокладками (а) и самоуплотнение (б)

Герметичность разъемного контейнера достигается уплотнением стыков корпуса с кожухом при помощи уплотнительных прокладок эластичных с принудительным уплотнением (рис. 11.13, а), эластичных с самоуплотнением (рис. 11.13, б), металлических (рис. 11.14).

Прокладка с самоуплотнением из упругого неметаллического материала, помещенная в гнездо уплотняемого разъема или замка,

Рис. 11.14. Сечения металлических уплотнительных прокладок

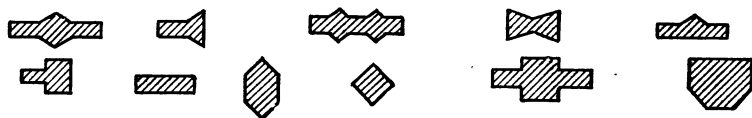


Таблица 11.1

Упругие свойства резин
при различных зазорах

Твердость резин по Шору	Зазор, мм, при давлении P_c , МПа						
	10	20	30	40	50	60	80
30	0,5	0,3	0,25	0,25	0,2	0,15	0,1
45	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,13
60	—	—	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
80	—	—	—	—	0,5	0,5	0,4

сжимается на некоторую определенную величину — натяг. Размеры посадочного места должны соответствовать размерам прокладки, а объем прокладки должен быть меньше объема посадочного места.

Давление, с которым прокладка всегда прижата к стенкам: $P_{\Pi} = P_n + P_c$, где P_n — начальное давление, P_c — давление окружающей среды.

В уплотнительных узлах с принудительным уплотнением удельное давление на прокладку выбирается таким, чтобы контактное давление во всем диапазоне рабочих температур всегда оказывалось выше P_c . В качестве материала прокладок здесь, наряду с мягким металлом, часто используется эластичный упругий материал, преимущественно резина. Резиновые прокладки помещают в замкнутую по объему камеру. При этом резина

не деформируется (не «вытекает»), но находится в сильно напряженном состоянии (табл. 11.1).

Область применения этого типа уплотнений — трубопроводы и арматура при всех значениях давления, РЭА в небольших герметичных корпусах.

Металлические уплотнительные прокладки изготавливают из алюминия, меди, индия, свинца, реже из никеля, серебра, железа (см. рис. 11.14). Алюминиевые прокладки могут работать до температуры примерно 673 К, медные — до 353 К. Прокладки, работающие на срез или предназначенные для гребешковых и клиновых уплотнений, изготавливают из медной ленты толщиной около 1 мм, отожженной в водороде при 1223 К. Индий применяют в виде тонкой проволоки $d = 0,7 \dots 1,5$ мм, которая укладывается между фланцами (с перекрытием концов).

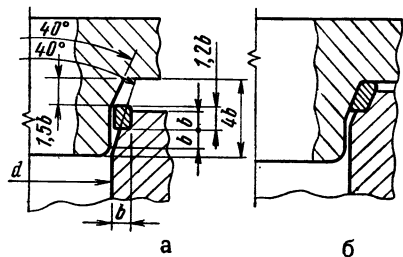
При смятии прокладки до 0,85 ... 0,75d происходит холодная сварка индия с элементами уплотнения. Индий наносится и в виде покрытия на фланцы или медные кольца. Он имеет высокую пластичность и не требует больших усилий затяжки, как другие металлы.

Пример применения металлических прокладок показан на рис. 11.15.

Рекомендуемые зависимости для этого типа уплотнителей:

d , мм	≤ 5	50...100	100...3000
b , мм	1	1,5	2

Рис. 11.15. Герметизация металлическими прокладками в свободном состоянии (а) и после деформации (б)



Следует отметить, что уплотнение за счет пластических деформаций металлических прокладок не всегда приводит к надежной герметизации. Например, красномедные кольца с зубцами обладают большим ТКЛР, из-за чего при нагревании дополнительно обжимаются в уплотнении. При многократном повторении этого процесса ГР уплотнения нарушается из-за усадки в виде наклепа. Это особенно опасно, когда узел уплотнения находится в труднодоступном месте.

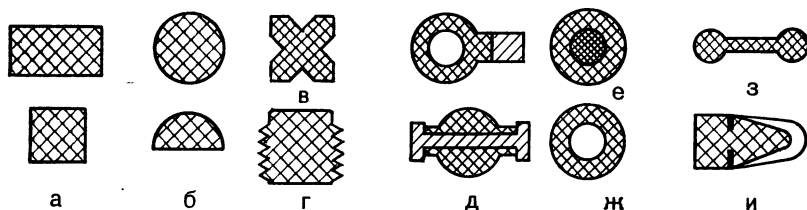


Рис. 11.16. Сечения эластичных уплотнительных прокладок

и его нельзя контролировать. Срок службы такого уплотнения снижается и при воздействии вибрации, поэтому его нужно применять с особой осторожностью.

Особенности проектирования резиновых уплотнений

При длительной эксплуатации, широком диапазоне изменений давления и незначительной деформации применяют прокладки, форма сечения которых дана на рис 11.16, а. Наиболее распространены прокладки (рис. 11.16, б): они просты в изготовлении, выдерживают широкий диапазон давлений. Сечение прокладки Х-образной формы (рис 11.16, в) не требует большого сжатия, используется для низких давлений. Прокладка рис 11.16, г применяется для принудительных уплотнений с большим сроком службы. Резинометаллические прокладки (рис 11.16, д) не требуют канавки, устанавливаются между плоскостями.

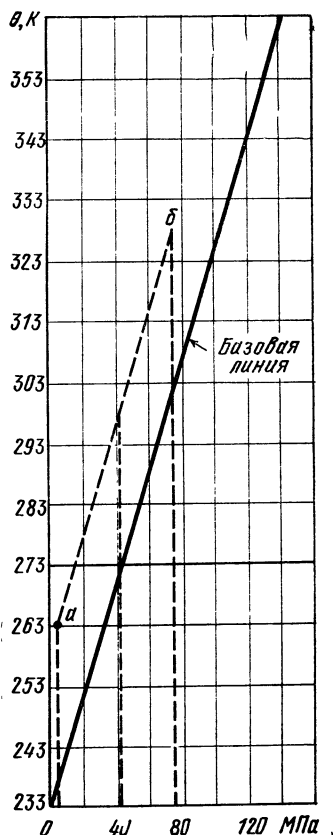
В агрессивных (для резины) средах применяют торцевые прокладки, армированные пластмассой (рис. 11.16, е). На рис 11.16, ж изображено сечение прокладки, внутрь которой подается газ под давлением 0,28 ... 0,35 МПа (2,8 ... 3,5 атм), прокладка предназначена для уплотнения люков и окон.

Для уплотнения плоских фланцев с откачкой воздуха из полости между кольцами используется прокладка с формой сечения, показанной на рис. 11.16, з. Металлическая лента в прокладке рис 11.16, и служит для защиты резины от воздействия внешней среды, например радиации.

Основные свойства резины и рекомендации по ее применению

При использовании резиновых прокладок важно знать, что резина, помещенная в замкнутый

Рис. 11.17. Зависимость между температурой и напряжением резины в замкнутом объеме



Области использования, параметры и условия работы резин

Назначение	Марка	Рабочая температура, К	Условия работы	Предел прочности при разрыве, Па	Относительное остаточное удлинение, %		Твердость по Шоркеру, ед.	Температура хрупкости, К
					при разрыве	после разрыва		
Резино-металлические детали	ИРП-1054	213...423	в, м(1)	$0,79 \times 10^6$	120	6	75...90	—
То же	ИРП-1078	223...423	м, т	$1,08 \times 10^6$	130	6	75...85	218
Уплотнительные детали	ИРП-1267	203...473	в, о	$0,25 \times 10^6$	140	—	40...60	203
То же	ИРП-1338	223...523	в, о	$0,64 \times 10^6$	300	10	55...70	—
»	ИРП-1354	203...523	в, о, с (2)	$0,54 \times 10^6$	250	10	55...65	203
»	НО-68-1	218...373	б, в, к, м, щ	$0,88 \times 10^6$	250	12	55...70	223
Уплотнительные детали, диафрагмы		213...373	а, в, м	$0,98 \times 10^6$	160	8	50...65	223
Уплотнительные детали, упоры клапанов	14К-10	213...373	в, к, щ	$0,54 \times 10^6$	220	10	50...65	203
Уплотнительные детали, манжеты	98-1	238...423	в, вд, к	$0,49 \times 10^6$	160	8	50...65	213

Обозначения условий работы: а — азот, б — бензин, в — воздух, вд — вода, к — слабые растворы кислот, м — масло, о — озон, с — солнечная радиация, т — топливо, щ — слабые растворы щелочей; 1 — работа в масле при статической деформации; 2 — работа в воздухе с содержанием озона и при воздействии солнечных лучей 50 ч при 573 К и деформации 20%.

Примечание. ТУ на резиновые смеси: МРТУ-38-5-1166-64 (ИРП-1054, ИРП-1078, НО-68-1, В-14, 14К-10, 98-1), МРТУ-38-5-6074-67 (ИРП-1267), ТУ 38 103-109-72 (ИРП-1338, ИРП-1354)

объем, передает давление как жидкость, а напряжение во всех точках резинового массива выравнивается за несколько минут. В ней наблюдается явление релаксации. При постоянном значении деформации напряжение в резине падает в течение 48 ч. Она практически несжимаема: при давлении 80 МПа (800 кгс/см^2) сжатие ее около 3%. Коэффициент объемного расширения резины разных марок примерно в 10 раз больше, чем у стали, и равен $(2 \dots 6,7) \cdot 10^{-4}$, что может быть причиной разрыва узла уплотнения при его малой прочности.

Связь между температурой и напряжением, возникающим в резине, находящейся в замкнутом

объеме, показана на рис. 11.17. Если, например, требуется узнать напряжение при температуре 328 К через точку а, где при 263 К напряжение равно 5 МПа (50 кгс/см^2) надо провести прямую, параллельную сплошной линии, и в точке б пересечения ее с линией, соответствующей 328 К, отсчитать на оси абсцисс напряжение 75 МПа.

Основные свойства резин и рекомендации по применению некоторых марок приведены в табл. 11.2.

При уплотнении неподвижных соединений (корпуса, кожухи и т. д.) диаметр d сечения торoidalной прокладки выбирается в зависимости от ее внутреннего диаметра: $D(D_1, D_2)$ на рис. 11.18);

D , мм	4...10	10...20	10...50
d , мм	$1,8 \pm 0,08$	$2 \pm 0,08$	$2,5 \pm 0,1$
D , мм	20...160	150...272	150...300
d , мм	$3 \pm 0,15$	$4 \pm 0,15$	$4,5 \pm 0,2$
D , мм	250...330	330...390	400...505
d , мм	$5 \pm 0,2$	$6 \pm 0,2$	$7 \pm 0,25$

Для резиновых торцевых прокладок применяются в основном два типа гнезд: клиновидное (рис. 11.18, а), которое рекомендуется для уплотнения узлов, работающих в агрессивных средах, и прямоугольное (рис. 11.18, б) — для узлов, работающих в неагрессивных или мало агрессивных средах (например, воздух, вода, смазки ПЭС-С-1 по ГОСТ 10957—74. ЦИАТИМ-221).

Размеры гнезд даны для резин с твердостью 40...50 по Шору. При выборе величины деформации по графику рис. 11.19, для резины другой твердости размеры гнезд необходимо корректировать.

Натяг тороида по внутреннему диаметру вследствие растяжения при установке на вал (в канавку) равен

$$a = (D_1 + d)/(D + d). \quad (11.2)$$

Для неподвижных соединений:

D_1 , мм	10...20	20...70
a , мм	$1,025...1,02$	$1,02...1,015$
D_1 , мм	70...100	св. 100
a , мм	$1,015...1,01$	1,01

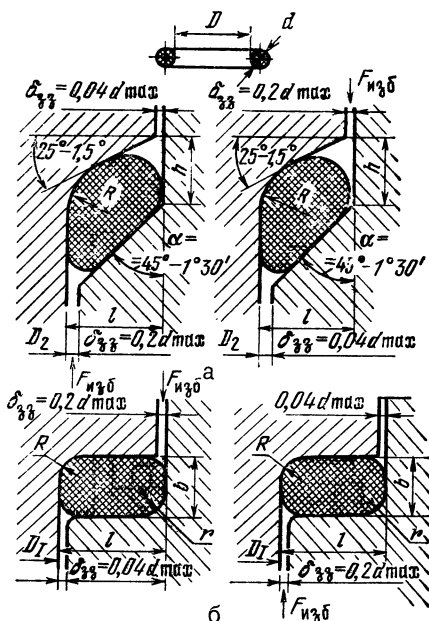


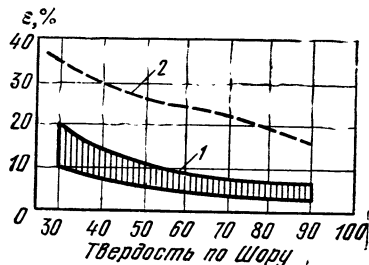
Рис. 11.18. Клиновидные и прямоугольные гнезда для торцевых прокладок

а) l 2,8...9,3, h 0,4...2, R 1,2...4,2, r 0,1...0,5 мм; б) l 2,1...8,5, b 1,1...4,9, R 0,3...1,5, r 0,15...0,5 мм

Увеличение натяга ускоряет процесс старения резины. Обеспечить заданный натяг можно, установив на внутренний диаметр тороида односторонний допуск в минус. Посадочный диаметр D_1 гнезда для уплотнительной прокладки выполняется не ниже 3-го кл. точности

Рис. 11.19. Зависимость деформации резиновых прокладок от твердости:

1 — минимум, необходимый для вакуумного уплотнения; 2 — допустимая величина



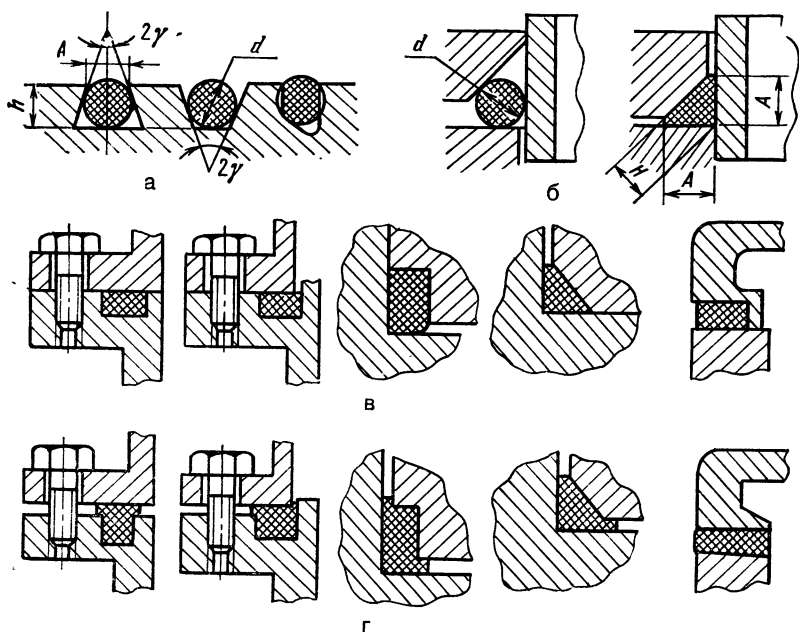


Рис. 11.20 Трапецидальные (а) и конусные (б) канавки для резиновых прокладок. Правильные (в) и неправильные (г) конструкции соединений корпусов и крышек

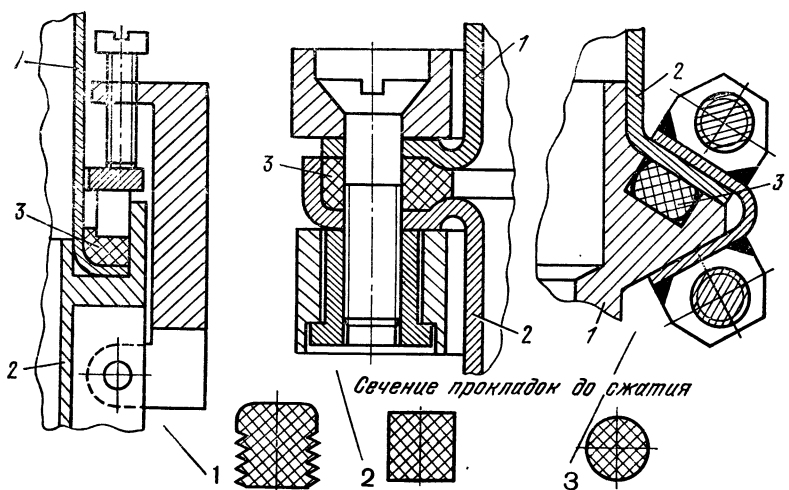


Рис. 11.21. Примеры герметизации контейнеров для РЭА:
1 — корпус. 2 — крышка, 3 — прокладка

Увеличение конструктивного зазора $\delta_{\text{зз}}$ (рис. 11.18) приводит к вытеканию резины в зазор и ускоренному разрушению прокладки. Для обеспечения уплотнения по всей поверхности необходим жесткий допуск на эксцентриситет.

На всех деталях, которые при обработке вставляются в резиновую прокладку или протягиваются через нее, необходимо снимать фаску. Шероховатость поверхности всех деталей, соприкасающихся с прокладками, должна соответствовать 7-му кл. В виде исключения допускается обработка по 6-му кл. Уплотнительные тороидальные прокладки перед сборкой смазывают тонким слоем кремнийорганической жидкости ПЭС-С-1 или ЦИАТИМ-221. Если применение смазки нежелательно, прокладку перед сборкой смачивают спиртом.

Для конусных уплотнений (рис. 11.20, а, б) поперечное сечение прокладки укладывается в площадь треугольника при $A = 1,32 d$ или $h/d = 0,92$.

Для трапециевидных канавок (рис. 11.20, а)

$$A = (1,13 - 0,68 \operatorname{tg} 2 \gamma) d \quad (11.3)$$

при степени сжатия $h/d = 0,72$, $2 \gamma = 30 \dots 40^\circ$

Корпуса, крышки и их соединения

Типовые конструкции уплотнительных стыков корпусов и крышек изображены на рис. 11.20, в, г. На рис. 11.21 показаны примеры герметизации контейнеров для РЭА.

В работе конструктора РЭА расчеты герметичности встречаются редко, поэтому представляет интерес сравнительная оценка проницаемости некоторых систем газ — материал.

Система	Проницаемость, $\text{м}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
$\text{H}_2 - \text{Fe}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
$\text{CO} - \text{Fe}$	$9,4 \cdot 10^{-10}$
$\text{N}_2 - \text{Fe}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
$\text{H}_2 - \text{Cu}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$
$\text{H}_2 - \text{Al}$	$1,1 \cdot 10^{-32}$
Воздух — каучук (резина)	$5 \cdot 10^{-11}$
Воздух — фторопласт-4	$5 \cdot 10^{-10}$

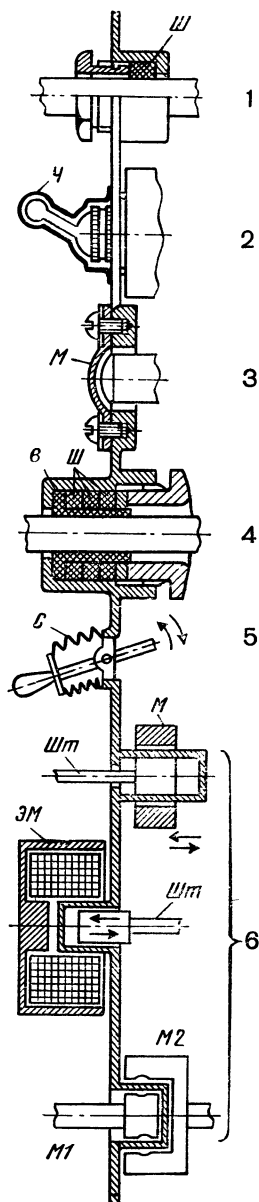


Рис. 11.22. Примеры герметизации:

1 — кабель (Ш — резиновая зажимная шайба), 2 — тумблер (Ч — резиновый чехол), 3 — кнопка (М — резиновая мембрана), 4 — вращающийся вал (В — фторопластовая втулка), 5 — рычаг (С — сильфон), 6 — механизм вращательного и поступательного движений (Шт — шток, М — постоянный магнит, М1 — наружный, М2 — внутренний магнит, ЭМ — электромагнит)

Органы управления и электрические соединения герметизируют резиновыми чехлами и шайбами электрические соединения — эластичными прокладками (рис. 11.22)

11.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ КАЧЕСТВА ГЕРМЕТИЗАЦИИ

Критерий качества определяющий совершенство конструкции по отношению к базовому образцу с предельным значением возможного «натекания» $6,75 \text{ с}/(\text{г} \cdot \text{см}^2)$ (рис. 11.23), имеет вид:

$$K_R = 1,48 \cdot 10^{-6} K_1 K_2 K_3 / Q m_e$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от степени деформации Δl прокладки из эластомера и зазора δ ; K_2 — коэффициент, зависящий от технологичности герметизирующего узла, т. е. от числа деталей узла N и числа S крепежных элементов на длине уплотнения 1 м ; $K_3 = \lg(1/1 - P) = 5$ (для $P = 0,99999$), $4,301$ (для $P = 0,99995$); 4 (для $P = 0,9999$), $3,301$ (для $P = 0,995$), P — вероятность безотказной работы, Q — утечка рабочей среды через уплотнение, $\text{см}^3/\text{с}$; m_e — погонная масса деталей узла в зоне герметизации (см рис. 11.21) $\text{г}/\text{см}$.

Пример 1. $\Delta l = 15\%$, $\delta = 0,3 \text{ мм}$, $N = 2$, $S = 19$, $P = 0,99992$, $Q = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$, $m_l = 12,6 \text{ г}/\text{см}$, $K_R = 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot 0,85 \cdot 0,67 \times 4,09691/1,32 \cdot 10^{-5} \cdot 12,6 = 0,02$.

Пример 2. $\Delta l = 25\%$, $\delta = 0,2 \text{ мм}$, $N = 20$, $S = 25$, $P = 0,99992$, $Q = 1,92 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, $m_l = 7,6 \text{ г}/\text{см}$; $K_R = 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,2 \times 4,09691/1,92 \cdot 10^{-6} \cdot 7,6 = 0,083$

Пример 3. $\Delta l = 35\%$, $\delta = 0,15 \text{ мм}$, $N = 3$, $S = 1$, $P = 0,99992$, $Q = 0,63 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$, $m_l = 6,3 \text{ г}/\text{см}$, $K_R = 1,48 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 \times 4,09691/0,73 \cdot 10^{-5} \cdot 6,3 = 0,132$

Для идеальной конструкции $K_R = 1$. Вариант 1-го примера является наихудшим, а 3-го — наилучшим. Чтобы повысить качество герметизации, необходимо улучшить технологичность конструкции и уменьшить утечку рабочей среды.

Следовательно, можно не только оценивать качество конструкции герметизированного узла на этапе проектирования, но и наметить пути улучшения конструкции, если уровень разработки окажется недостаточно высоким.

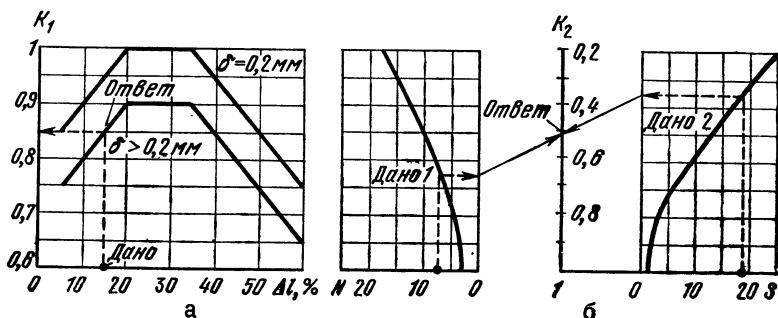
11.6. НЕРАЗЪЕМНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ

Назначение и области применения

РЭА помещают во влажную и газонепроницаемый корпус, в котором поддерживается неизменное барометрическое давление, что позволяет использовать РЭА при высоком и низком давлении, в тропических условиях, под водой, в агрессивных средах. При неразъемной герметизации не применяют клей и компаун-

Рис. 11.23. Определение коэффициентов K_1 и K_2 .

Дано: $\Delta l = 15\%$, $\delta = 0,3 \text{ мм}$ находим $K_1 = 0,85$ (а); $N = 7$, $S = 18$, находим $K_2 = 0,5$ (б)



ды из-за различия ТКЛР деталей корпуса и заливочных материалов, которое приводит к образованию трещин при тепловых ударах. При малых размерах герметичных швов допускается использование герметиков типа висксинта «Победа», Силпена, ВГО-1, а также полиэтилена (см. гл. 5).

Неразъемная герметизация сваркой и пайкой

При конструировании сварных герметичных корпусов необходимо правильно выбрать материалы. При сварке плавлением целесообразно соединение встык, при роликовой сварке — внахлестку. Роликовая сварка применяется для получения особо прочных и плотных швов. В табл. 11.3 даны рекомендации по выбору минимального расстояния a_1 от центра шва до края нахлестки в зависимости от ее размеров.

Хорошие результаты дает лазерная и электронно-лучевая сварка. Лучом лазера сваривают тугоплавкие металлы, приваривают контакты в полупроводниковых приборах, основаниях ИС и т. д. С помощью лазера легко свариваются алюминий

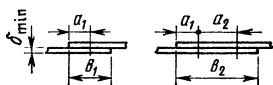
и его сплавы, монель-металл, бронза, нержавеющая сталь, ниобий, молибден, вольфрам и др. При этом не требуется специальной защиты от влияния атмосферы (как и при металлообработке). Очень хорошо свариваются лазером медь, серебро и золото, так как из-за высокой теплопроводности, они противостоят мгновенному нарастанию температуры. При правильном выборе режимов процесса можно сваривать материалы с различными температурами плавления: золото и германий, алюминий и вольфрам, тантал и медь и т. д. Такие сочетания часто встречаются в РЭА на ИС.

Луч лазера позволяет сваривать кольцевым швом стальной корпус термистора. При этом не наблюдается растрескивание керамического изолятора с выводами. Другие способы сварки корпуса термистора положительных результатов не дают.

Сварка в вакууме в совокупности с высокой интенсивностью нагрева электронным лучом обеспечивает высокое качество сварного шва, так как в процессе сварки удаляются газы, окислы, примеси и загрязнения как с поверхности металла, так и из внутренних слоев. Шов получается вы-

Таблица 11.3

Величина нахлестки для одно- и двухрядного швов (b_1/b_2)



Минимальная толщина детали, δ_{\min} мм	0,5	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4
Нержавеющие и жаропрочные стали, титановые сплавы	8/14	8/16	10/18	12/20	14/22	16/26	18/34	22/40
Малоуглеродистые и легированные стали	10/16	10/18	12/20	14/22	16/24	18/22	20/36	24/42
Легкие сплавы	12/22	12/22	14/24	14/26	16/30	20/35	26/46	30/50

Примечание. Расстояние между швами в двухрядном шве $a_2 = b_2 - b_1$, минимальное расстояние от края нахлестки до центра шва $a_1 = 0,5b_1$.

сокопрочным и надежным, деформации незначительные.

При конструировании вакуум-плотных соединений при помощи сварки плавлением необходимо учитывать следующее (рис. 11.24).

При сварке встык сварной шов должен быть со стороны вакуума (1), а не наоборот (2), и не с двух сторон (3). При сварке внахлестку шов варить только со стороны вакуума (4), а не с двух сторон (6) и использовать при угловой сварке сверху встык (5), а не внахлестку (8). Не рекомендуется сварка внахлестку с двойным швом и усиливающими пластинками (7), так как в объеме между швами могут быть скрыты микротечи. Такие же принципы положены в основу конструирования Т-образной, угловой и краевой сварок. По аналогии с (4) выполняются соединения (9) и не рекомендуются (10, 11 и 12), аналогами которых являются (2, 6 и 7). Угловые соединения необходимо выполнять с полной проваркой (13), чтобы не допустить образования трещин (14), а при краевых (чтобы в месте соединения не образовывались загрязнения и га-

зы) проварку надо выполнять до внутренней поверхности V-образной отбортовки (15), чтобы не получались «карманы» (16).

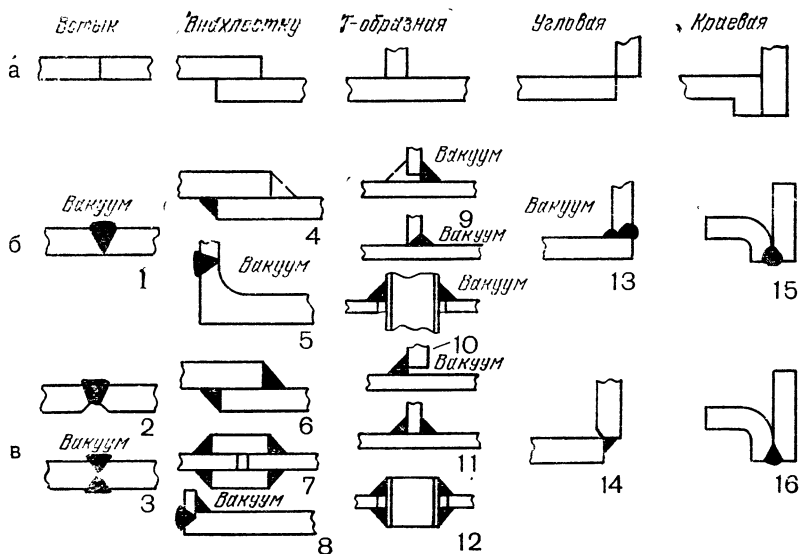
Конструкции, характерные для сварных соединений герметичных корпусов, изображены на рис 11.25.

При выборе припоев для вакуум-плотного соединения необходимо учитывать ряд факторов, к основным из которых следует отнести давление паров металла, чистоту припоя, способность его к смачиванию и растеканию при температуре пайки, способность припоя образовывать с соединяемыми металлами химстойкие механически прочные сплавы.

Лучшими с точки зрения смачиваемости для деталей из сплавов меди являются припой на основе олова, никеля, серебра, золота, для никелевых деталей — припой на основе меди, олова, цинка, свинца, золота, для стальных деталей — на основе цинка, олова, свинца, никеля, золота.

Для паяных герметичных соединений следует применять припой с малым температурным интервалом кристаллизации во избежание ра-

Рис. 11.24. Схемы (а), рекомендуемые (б) и нерекомендуемые (в) конструкции сварных соединений



стрессирования (например, ПОС-61)

При пайке мягкими припоями ($\theta_{пл} < 673 \text{ К}$) необходимо разгрузить швы от больших нагрузок (скрепляя детали точечной сваркой, развальцовкой, винтами и т. п.). Паяный шов в этом случае используется только для обеспечения герметизации.

При выполнении вакуумплотных соединений пайкой необходимо учесть следующие рекомендации. Для обеспечения капиллярного засасывания припоя в зазор между деталями взаимное перекрытие соединяемых поверхностей должно быть 2...3 мм. При пайке деталей из материалов с различными ТКЛР наружная деталь должна иметь больший ТКЛР, чтобы обеспечивать сжатие припоя при остывании.

Растекание припоя в зазоре определяется конструкцией последнего (рис. 11.26). Так, прямые углы обеспечивают хорошее протекание припоя через все соединения (рис. 11.26, б). Расширение в зазоре и скругленные углы останавливают течение припоя. Если ближайший со стороны подачи припоя угол скруглен (рис. 11.26, а), то припой не пройдет за этот угол (рис. 11.26, г). Если скруглен второй угол, то соединение будет прочным и герметичным (рис. 11.26, е). Прямой угол, прижатый к скругленному углу (рис. 11.26, ж), также останавливает течение припоя, несмотря на то, что зазоры с обеих сторон углов выбраны правильно. Если необходимо устранить растекание припоя по поверхности, то последнюю покрывают графитом или хромом.

Вакуумплотные соединения получают пайкой внахлестку при оптимальных размерах зазоров (рис. 11.26).

При конструировании паяных соединений необходимо учитывать вид нагрузки, которую оно будет испытывать (рис. 11.27, а, б, в), нельзя копировать элементы сварных соединений (рис. 11.27, г).

Прходные изоляторы для герметизированных корпусов

Электрические выводы осуществляются через проходные изоляторы. Их основными элементами являются

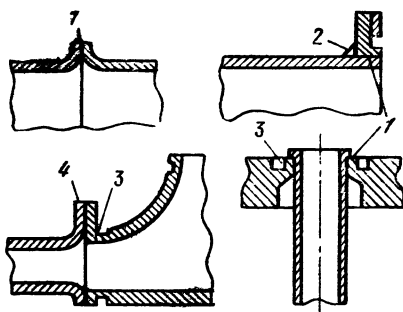
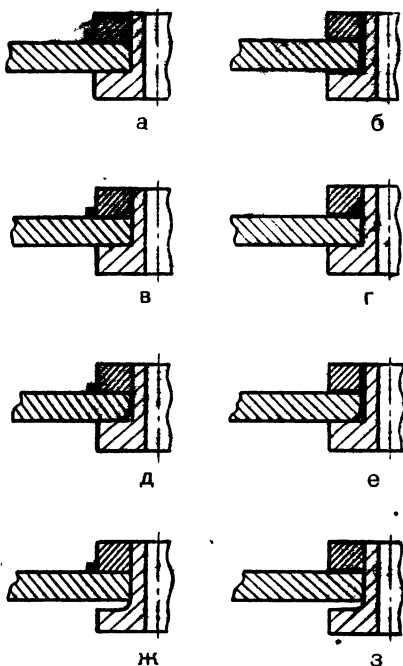


Рис. 11.25. Конструкции сварных соединений герметичных корпусов:

сварка оплавлением (1), приварка в отдельных точках (2) с использованием гофрированных фланцев с проточками (3) или отбортовок (4)

Рис. 11.26. Влияние расширений в зазорах на протекание припоя. Для деталей из алюминиевых сплавов зазоры 0,1...0,25, стальных 0,01...0,05 (твердые припои) и до 0,2...0,75 (мягкие), из меди и медных сплавов 0,075...0,4 (латунные припои) и 0,02...0,125 мм (меднофосфористые припои)



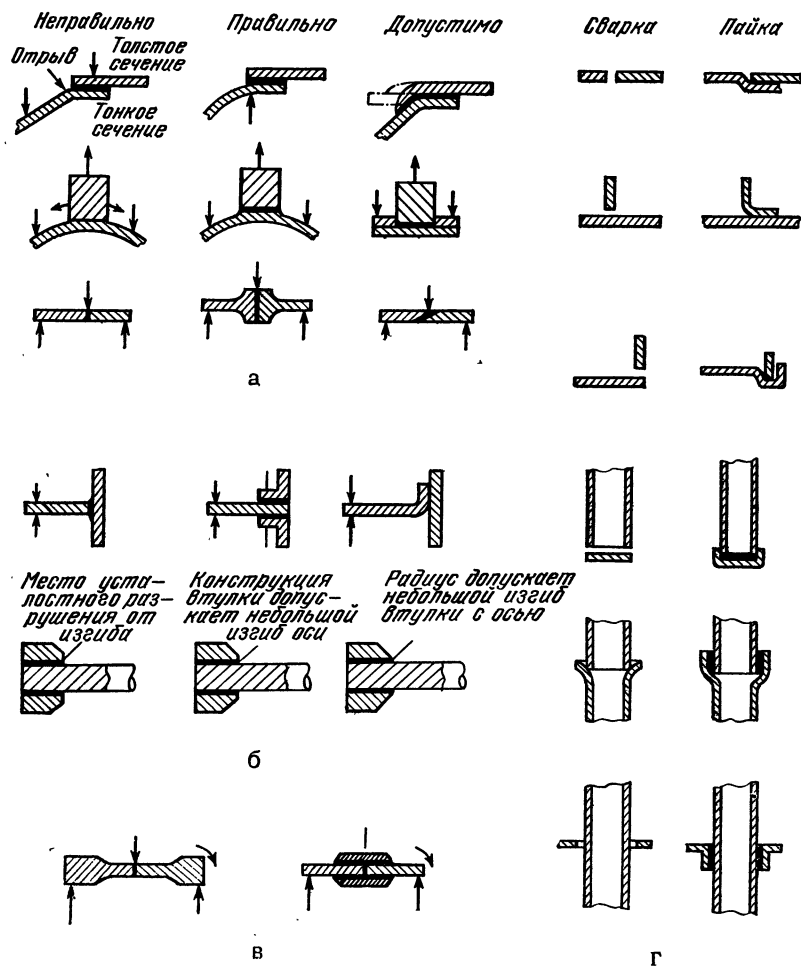


Рис. 11.27. Паяные соединения:

а — работающие на отрыв, б — ударопрочные, в — вибропрочные, г — сравнение соединений сваркой и пайкой

ся трубка и фланец, впаянные в стеклянный изолятор. Материалы деталей соединения выбираются с примерно равными значениями ТКЛР. В результате образуется согласованный спай. Недостатки стеклянных изоляторов — высокая чувствительность к резкому изменению температуры. Более надежными являются стеклокерамические и керамические изоляторы (рис. 11.28).

В стеклокерамическом изоляторе втулка из керамики между фланцем

и стеклом предохраняет последнее от растрескивания при тепловых ударах (рис. 11.28). Для внешних соединений на корпусах герметизированных приборов укрепляют гермопроходники, электрически изолированные от корпуса, и герметичные штепсельные разъемы.

Выбор материалов токопровода для его вакуумного уплотнения определяется конкретными условиями эксплуатации. Наибольшее распространение получили гермопроходни-

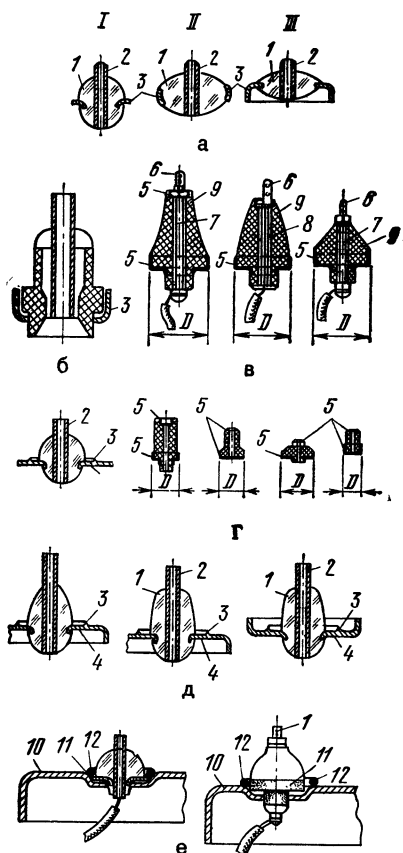
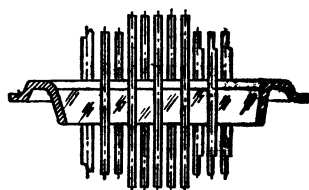


Рис. 11.28. Изоляторы для вакуумплотной герметизации выводов:

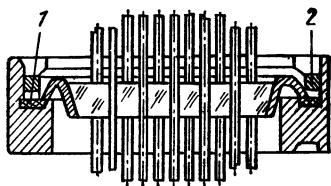
а — стеклянные для пайки (I — шайбовый ИСШ, II — цилиндрический — ИСЦ, III — колпачковый — ИСК), *б* — стеклокерамический для пайки, *в* — керамический для пайки; *г* — стеклянный для рельефной сварки ИСШ, *д* — стеклянный для дуговой сварки (ИСК); *е* — способ пайки стекляного и керамического изоляторов. Обозначения: 1 — стеклянный изолятор, 2 — трубка, 3 — фланец, 4 — кольцевой зиг, 5 — слой серебра, вожженный в керамику, 6 — лепесток, 7 — токоведущий стержень, 8 — пустотелая заклепка, 9 — керамический изолятор, 10 — крышка корпуса, 11 — облуженная поверхность пуклевков, 12 — кольцо из припоя ПОС-40.

Рис. 11.29. Конструкция гермопроходников;

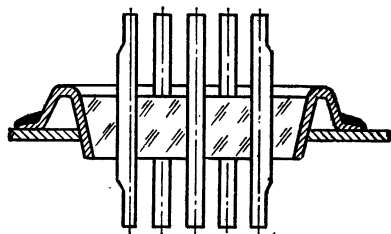
а — многотырьковый гермопроходник, *б* — крепление гайкой (1 — прокладка, 2 — гайка), *в* — крепление пайкой, *г* — крепление винтами (1 — втулка, 2 — прокладка). Конструкции работоспособны при $U_{pb}=200$ В, $h=0 \dots 30\,000$ м ($760 \dots 8,9$ мм рт ст., или $1010 \dots 1,18$ кПа), $\theta=213 \dots 423$ К, вибрациях до 1000 Гц, линейных ускорениях до



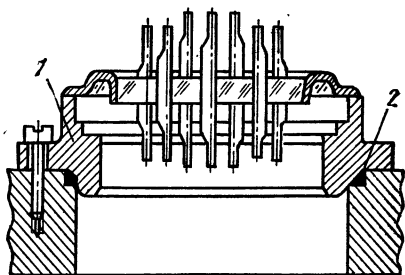
а



б



в



г

25 g (245 м/с²), многократных ударах с ускорением 10 g (98,1 м/с²) и однократных — 60 g (588 м/с², при Вл 98% и $\theta=313$ К (40° С) в течение 3 лет. Срок хранения 5 лет, сопротивление изоляции в нормальных условиях 500 МОм, после воздействия тропических условий в течение 48 ч, 5 МОм

Таблица 11.4

Марки материалов для спая корпуса, вывода и стеклянного изолятора

Вид изделия	Согласованное сочетание			Несогласованное сочетание		
	корпус	вывод	изолятор	корпус	вывод	изолятор
Вилки штепсельных разъемов	29НК	29НК	C48-2	Ст.10; 20; 45	29НК	C48-2
Корпуса ИС	29НК	29НК	C48-1	47НД 47НД	38НКД 38НКД	C72-4
Рамки резонаторов	48НКД 30НКД	38НКД 29НК	C72-4 C38-1	—	—	—
Узлы для специальных установок	29НК 29НК	29НК МРН	C48-2 М52-1	Ст.10; 20; 45 Х18Н10Т	29НК 29НК	C48-2 C52-1
Цоколи гермокорпусов реле	29НК	29НК	C48-1	ВТ1; Х18Н10Т 47НД	МРН 38НКД	C52-1 C72-4

ки на базе согласованных спаев металла со стеклом. На рис. 11.29 показана конфигурация гермопроходников из сплава Н29К18 (ковар) со стеклом С48-2.

В табл. 11.4 даны рекомендации по выбору сочетаний и применению согласованных и несогласованных металлостеклянных спаев. Несогласованные спай имеют более высокие механические характеристики, однако их целесообразно применять только при работе изделия в ограниченном интервале температур.

Попытки использовать в качестве гермопроходников металлические штыри, залитые эпоксидными компаундами, неудачны, так как в результате разных ТКЛР металлов и эпоксидных компаундов в процессе пайки монтажных проводов к выводам происходит разгерметизация. Термоудары и вибрация также приводят к разгерметизации таких соединений.

11.7. РАСЧЕТЫ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

При конструировании герметичных изделий возникают две задачи: расчет усилия обжатия, обеспечивающего герметичность соединения, например корпуса и крышки (с прокладкой между ними), и расчет утечки газа через соединение.

Расчет усилия обжатия [7]

Отсутствие обоснованных математических моделей разгерметизации разъемных соединений не позволяет точно определить давление обжатия с учетом свойств среды, материала прокладок и характеристики микрогеометрии их поверхности. Поэтому получили распространение эмпирические формулы для определения давления обжатия (табл. 11.5). Они справедливы только в том диапазоне изменения параметров, в котором ставились эксперименты.

Таблица 11.5

Формулы для расчета давления обжатия, обеспечивающего герметизацию разъемного соединения

Тип соединения, характеристики и источник	Формула	Примечание
Фланцевое [8]	$q = \frac{C + K}{\sqrt{2 h \sqrt{b}}}$	Коэффициенты C и K определяются в зависимости от материала прокладки, имеющей ширину b и высоту y
Фланцевое с прокладкой из пластмассы [9]	$q = AP^{\lambda} b^m h^n$	P — давление среды, при котором обеспечивается герметичность, A, λ, m, n — коэффициенты, зависящие от материала прокладки
Фланцевое с прокладкой из фторопласта [10]	$\tau = 2,86 P$	
Фланцевое с кольцевыми прокладками из резины [10]	$q = A_2 K E^S;$ $K = \frac{h_2 - h_1}{d - h_1},$ <p>когда соединение работает при высоких температурах;</p> $K = \frac{h_3 - h_1}{d - h_1},$ <p>когда соединение работает при низких температурах;</p> $K = \frac{(h_2 - h_1)(h_3 - h_1)}{(d - h_1)^2}$ <p>когда соединение работает при низких и высоких температурах</p>	A_2 — коэффициент, зависящий от твердости резины, d — исходный диаметр кольца, h_1 — толщина кольца в сжатом состоянии, h_2 — толщина кольца после разгрузки при заданной высокой температуре, h_3 — толщина кольца после разгрузки при заданной низкой температуре, S — постоянная, E — модуль упругости резины
Фланцевое с зубчатой прокладкой [11]	$q = 4\sigma_T$	σ_T — предел текучести материала прокладки
Фланцевое с плоской металлической прокладкой [11]	$q = \left(1 + 0,32 \frac{b}{h}\right) \sigma_T;$	Для ответственных соединений, работающих при высоком давлении
Фланцевое с прокладками из резины средней твердости [11]	$q = 0,4 \left(1 + \frac{b}{2h}\right) E$	
Фланцевое с прокладками из паронита [12]	$q = \frac{42 + 7 P}{h^{0,6} b^{0,3}};$	b и n , см, P и q , кгс/см ²
Фланцевое с прокладками из мягкой резины [12]	$q = \frac{6,3 + 0,19 P}{h^{0,65}}$	

Зная необходимое усилие обжатия q [13], можно определить усилие затяжки соединения, например винтами, стягивающими уплотнительную прокладку между крышкой и корпусом.

Расчет утечки

При расчете утечки (скорости нагекания) через уплотнение принимаются две модели. Одна из них — утечка через круглые капилляры, другая — ламинарное течение через плоскую щель (формула Пуазейля). Расчеты, сделанные по этим моделям, расходятся с практикой, так как последние не учитывают такие факторы, как контактное давление, характеристики микрогеометрии поверхности, а также физико-механические свойства материалов уплотняемых деталей и т. д.

Между тем не все факторы в одинаковой степени влияют на утечку, поэтому многие авторы для каждого случая обрабатывали результаты эксперимента и получали эмпирические формулы, расчеты по которым дают хорошую сходимость с практически данными

Средняя статистическая высота щели δ_x и контактное давление P_K , обеспечивающее нормальное уплотнение прокладки, связаны соотношением [14]:

$$\delta_x = e^{-P_K/R}, \quad (11.4)$$

где R — параметр, характеризующий способность материала к уплотне-

нию микронеровностей поверхности.

Утечка через уплотнение из эластомера равна

$$Q = C_0 B r e^{-3P_K/R} \quad (11.5)$$

Проводимость (утечка на единицу перепада давления и периметра уплотняемой поверхности B):

$$C = C_0 e^{-3P_K/R} \quad (11.6)$$

Здесь C_0 — проводимость при отсутствии внедрения прокладки в микронеровности уплотняемой поверхности.

Формулы (11.4)...(11.6) справедливы для газов, не создающих облитерацию, которая уменьшает утечку за счет зарастивания щели

Параметр R можно определить из экспериментальных графиков (рис. 11.30)

Утечка газа через зазор между уплотнительной прокладкой и фланцами для лучших эластомеров колеблется в пределах $8 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-6}$ Па · см³/с ($8 \cdot 10^{-8} \dots 4 \cdot 10^{-11}$ атм · см³/с) на 1 см длины прокладки и зависит от ее материала и температуры.

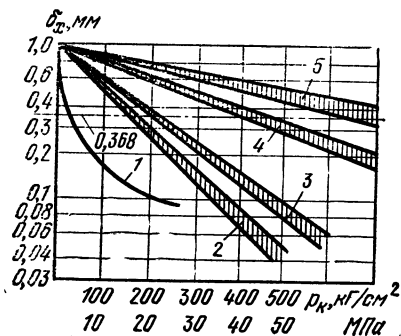
Массовый расход газа через неплотности стыка герметичного соединения [7]:

$$Q = \frac{\pi h_0^3 (P_i^3 - P_a^3)}{4 K, t^2 R T \eta \ln r_a / r_b} \times \\ \times \frac{S_m^4}{(S_m^2 + 2\pi^2 R_a^2)^2} \times \\ \times \left[1 - r^\beta H_{mi}^{1-\beta} \left(\frac{S \pi P_K}{2 K_3 b_1} \right)^{2\beta} \right]^3,$$

где P_i — давление газа в изделии; P_a — давление окружающей среды; R — газовая постоянная; h_0 — средняя высота щели при отсутствии контактного давления на стыке; K_0 — постоянная Козени, зависящая от формы поперечного сечения щели (для круглой щели $K_0 = 2$); t — коэффициент извилистости ($t = \sqrt{2}$); η — вязкость уплотняемой среды (газа); T — абсолютная температура; r_a, r_b — соответственно наружный и внутренний радиусы уплотнительных поверхностей; H_{mi} ($i=1,2$) — наибольшая высота неровностей профиля

Рис. 11.30. Значения параметра R для различных уплотнительных материалов:

1 — резина на основе неопрена, 2 — фторопласт, 3 — свинец, 4 — золото, 5 — медь



уплотнительных поверхностей; S_m — средний шаг неровностей профиля (ГОСТ 2789—73); R_a — среднее арифметическое отклонение профиля; $\beta = (2\nu + 1)^{-1}$ — коэффициент про-

порциональности; $I = \sum_{i=1}^2 \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}$ —

коэффициент, характеризующий физико-механические свойства материала уплотнительных поверхностей; μ_i — коэффициент Пуассона материала; E_i — модуль упругости материала; r — средний радиус закругления вершин микронеровностей; b_1 и ν — суммарные параметры опорных кривых контактирующих уплотнительных поверхностей;

$K_s = \frac{\Gamma(2,5) \Gamma(\nu + 1)}{\Gamma(\nu + 1,5)}$ — параметр опорных кривых; Γ — гамма-функция

Требование высокой степени герметичности микросборок, например, корпусов полупроводниковых приборов и ИС неразрывно связано с обеспечением их надежности и долговечности

В результате негерметичности внутрь корпуса может попасть влага и коррозионно-активные вещества, а также посторонние частицы, которые вызовут повреждения отдельных элементов микросборки или короткое замыкание

Герметичность корпусов микросборок очень высокая и массовый расход может достигнуть величины $10^{-8} \dots 10^{-9}$ см³/с [15]. Укажем для сравнения, что через отверстие диаметром 10 мкм расход газа составляет 5×10^{-3} см³/с. При уменьшении диаметра отверстия до 0,1 мкм расход газа снижается на четыре порядка и составляет $5 \cdot 10^{-7}$ см³/с. Это вызывает большие трудности в выборе методов и средств для проверки герметичности микросборок, особенно в массовом производстве. Из существующих методов контроля герметичности [16] наибольшее распространение получил газовый (при помощи гелиевого течеискателя)

Как показала практика, утечка корпусов микросборок зависит не только от давления индикаторного газа, которым производят испытание, времени приложения этого давления, интервала времени после снятия давления, но и от величины внутреннего

(свободного) объема испытуемого на герметичность корпуса

Для точной оценки утечки гелия по результатам измерений можно использовать формулу [15]:

$$R = \frac{LR}{P_a} \left(\frac{M_a}{M} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{Lt_1}{VP_a} \times \left(\frac{M_a}{M} \right)^{1/2} \right] \right\} \exp \left[-\frac{Lt_2}{UP_a} \left(\frac{M_a}{M} \right)^{1/2} \right],$$

где R — измеренная утечка, атм \times см³/с; L — эквивалентная стандартная утечка, атм \cdot см³/с; M , M_a — молекулярный вес соответственно воздуха и индикаторного газа; t_1 — время пребывания под давлением; t_2 — время выдержки перед измерением после снятия давления; U — объем корпуса, см³

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1975. — 345 с.
2. Гольдштейн Л. Г. Конструкторские способы герметизации аппаратуры. — Л.: Энергия, 1967. — 284 с.
3. Рот А. Вакуумные уплотнения. — М.: Энергия, 1971. — 463 с.
4. Гареев Б. М., Яманова Л. В., Волков В. А., Ивлиев М. Н. Герметизация полимерными материалами в радиоэлектронике. — М.: Энергия, 1974.
5. Фридман Е. И. Герметизация радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1978. — 360 с.
6. Фефер А. И., Герценштейн В. С. Определение качества конструкции герметичной аппаратуры. — Электронная техника. Серия 8. Управление качеством и стандартизация, 1975, вып. 7 (37)
7. Сажин С. Г., Лемберский В. Б. Автоматизация контроля герметичности изделий массового производства. — Горький: Волго-Вятское изд-во, 1977. — 175 с.
8. Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. — М.: Машиностроение, 1972. — 211 с.
9. Шупляк И. А.; Таганов М. И.; Кириллов В. М. Исследования уплотняющей способности про-

- кладок из полимерных материалов. — Изв вузов СССР. Сер. Химия и химическая технология. 1965, № 4.
10. Протопопов В. Б. Уплотнения судовых фланцевых соединений. Л.: Судостроение, 1966.
 11. Долгинов Л. Ш., Прокопов В. К.; Самсонов Ю. А. Расчет и конструирование фланцевых соединений судовых трубопроводов и сосудов — Л.: Судостроение, 1972.
 12. Бурков В. В., Лебедев В. И.; Мухаметшин Х. Х. Исследование герметичности соединений с паронитовыми и резиновыми прокладками. — Химия и нефтяное машиностроение, 1970, № 1
 13. Решетов Д. Н. Детали машин. — М.: Машиностроение, 1974, — 434 с.
 14. Кондаков Л. А. Уплотнение гидравлических систем. — М. Машиностроение, 1972. — 239 с
 15. 14th Ann Proc. Reliab. Physics 1976, — Las-Vegas, April, 1976, p. 256—262.
 16. ГОСТ Испытания изделий машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования: Проект. — 1978.

12. ЗАЩИТА ОТ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Список аббревиатур

А — амортизатор (ы)
 В — вибрации
 Вл — влажность относительная
 СА — система амортизации
 У — удар (ы)
 УЛ — ускорения линейные
 ЦЖ — центр жесткости (блока, РЭА)
 ЦТ — центр тяжести (блока, РЭА)

Обозначения и индексы

ξ — амплитуда или прогиб (пригибы по координатным осям обозначаются z, x, y)
 ν — частота
 K — коэффициент
 t — длительность
 N — число (ударов, амортизаторов)
 a — связанный с перегрузкой (напр. ξ_a — прогиб А до упора при воздействии УЛ)
 бл — относящийся к блоку
 вб — вибрационный
 воз — возбуждения
 доп — допустимый
 и — импульсный
 лн — линейный (при воздействии УЛ)
 осн — основания
 рез — резонансный
 стц — стационарный (статический)
 уд — ударный
 0 (нуль) — собственное значение
 . (точка) — заданное значение

мах, \min — максимальный, минимальный
 Σ — суммарный (напр., K_{Σ} — суммарная жесткость всех А данной СА)

12.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [1...15]*

На конструкцию РЭА могут воздействовать внутренние и внешние динамические силы, причиной которых являются работающие электродвигатели привод антенны, различные электромеханические преобразователи, транспортировка, сейсмические, взрывные и иные внешние механические силы.

Параметры механических воздействий

Гармонические вибрации (В): частота ν (Гц), амплитуда ξ (мм), ускорение a (см/с², или g).

Ударные нагрузки (У): число одиночных ударов или их серия (обычно оговаривают максимальное число U/N , мин⁻¹), длительность ударного импульса $t_{\text{и}}$, мс, и его форма, ударные перегрузки, мгновенная скорость при ударе $v_{\text{уд}}$, мм/с, перемещение соударяющихся тел s , мм.

* Составители В. Б. Карпушин, Р. Г. Варламов.

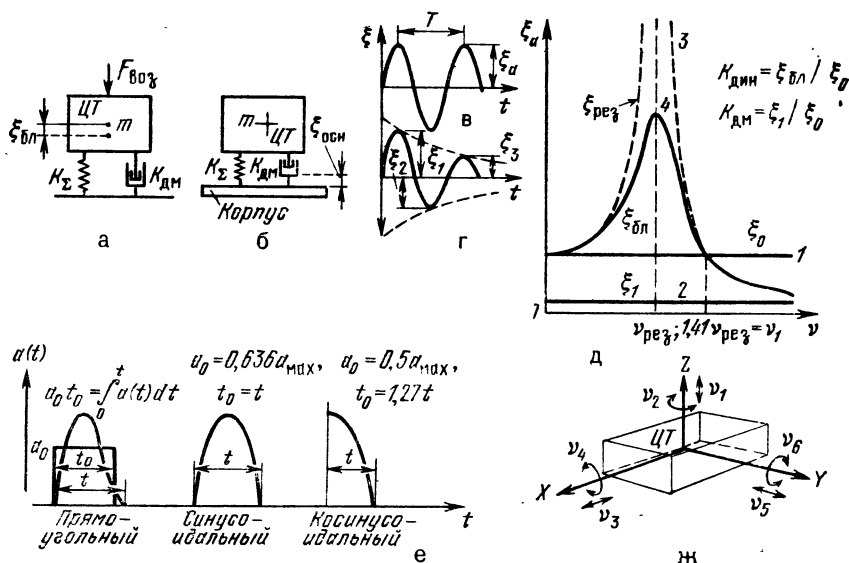


Рис. 12.1. Общие характеристики динамических воздействий:

а — система с силовым возбуждением (источник возмущающей силы $F_{\text{воз}}$ находится внутри РЭА); б — система с кинематическим возбуждением (источник $F_{\text{вс}}$ — колебания корпуса носителя); в — периодические ($\xi_a = f(v)$) и г — затухающие ($\xi_i = f(t)$) с логарифмическим декрементом затухания $\Phi = \ln(\xi_n/\xi_{n+1})$ колебания с периодом $T = 1/v$; д — поведение системы при отсутствии в ней резонансных и демпфирующих свойств: когда $\xi_{\text{вс}}(v) = \text{const}$, то $\xi_{\text{осн}}(v) = \text{const}$ (1), при отсутствии резонансных свойств, но при заметном демпфировании $K_{\text{ДМ}}(v) = \text{const}$ и $\xi_{\text{вс}}(v) = \text{const}$ будет $\xi_{\text{осн}} < \xi_{\text{вс}}$ (2), при наличии резонансных свойств и $K_{\text{ДМ}} = 0$ (3), при реальных условиях, когда $K_{\text{ДМ}} \neq 0$ и $K_{\text{ДМ}} > 1$ защита от динамических воздействий возможна при $v \gg (2 \dots 5) v_{\text{рез}}$ и невозможна при $v = (0 \dots 1,41) v_{\text{рез}}$ (4); е — схема построения эквивалентного ударного импульса амплитудой $a(t)$ и длительностью t_0 ; ж — схема возникновения связанных резонансных колебаний на частотах $v_1 \dots v_6$ (центр координат в геометрическом центре идеализированной одновомассовой системы в виде твердого тела)

Линейные ускорения (УЛ): ускорение (см/с^2 или g), длительность $t_{\text{дн}}$ (с), знак воздействия ускорения, $+a$, $-a$.

Возникающие при В, У и УЛ перегрузки или ускорения оценивают соответствующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} K_{\text{вб}} &= 4 \cdot 10^{-3} \xi v^2; & K_{\text{уд}} &= 6,4 \cdot 10^{-4} v v; \\ K_{\text{лн}} &= 4 \cdot 10^{-3} r_{\text{вр}} n_{\text{об}}^2. \end{aligned} \quad (12.1)$$

Частота в выражении для $K_{\text{уд}}$ равна $v = 0,159 \sqrt{K_{\text{ам}}/m}$

(где $K_{\text{ам}}$ — жесткость, Н/мм; m — масса, кг), $r_{\text{вр}}$ — радиус вращения, мм, $n_{\text{об}}$ — частота равномерного вращательного движения, Гц. Справедливо также соотношение

$$K_{\text{уд}} \approx 0,005 v_{\text{уд}}/s.$$

РЭА — сложная многомассовая пространственная система со связями различной жесткости и демпфирования, поэтому, чтобы ее полностью описать, требуется составить множество уравнений состояния, анализ и решение которых весьма затруднительны. В практике оценочных инженерных расчетов рассматривают эквивалентные колебательные системы с одной степенью свободы и сосредоточенной в ЦТ массой, связанной с опорой или вибрирующей платформой (носителем), элементом с общей жесткостью K_{Σ} и коэффициентом демпфирования $K_{\text{ДМ}}$.

Если источник возмущающей силы $F_{\text{воз}}$ находится внутри РЭА, то говорят о системе с силовым возбуждением, если источник внешний (например, колебания корпуса носи-

теля), то говорят о системе с кинематическим возбуждением (рис. 12.1).

При анализе ударных воздействий определяют эквивалентную частоту ν_0 и параметры эквивалентного ударного импульса, схема построения которого показана на рис. 12.1, е. Для уменьшения действия В и У РЭА устанавливают на амортизаторах (А) или применяют демпфирующие материалы.

Воздействие УЛ эквивалентно увеличению массы блока и при значительной длительности воздействия требует увеличения прочности конструкции, потому что А от УЛ не защищают.

Так как даже идеализированная одномассовая система (твердое тело) имеет в общем случае шесть степеней свободы (рис. 12.1, ж) и столько же связанных резонансных частот ν_{0i} ($\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_6$), то по принятой методике рассматривают шесть раздельных эквивалентных систем для каждой степени свободы.

При конструировании РЭА необходимо стремиться к тому, чтобы система амортизации (СА) имела минимальное число ν_{0i} связанных форм колебаний и чтобы они находились вне заданного диапазона $\Delta\nu$ действующих вибраций, не имели близких друг к другу значений, а коэффициент динамичности не превышал допустимых значений.

Расчет СА включает в себя еще определение сил реакции амортизаторов R_i и величин статического прогиба ξ_{0i} , по которым с учетом возможного влияния дестабилизирующих факторов выбирают нужный типоразмер А.

В статически определимой СА из трех А ($N_{ам} = 3$) не расположенных на одной прямой, силы R_i не зависят от упругих свойств А и однозначно определяются из трех уравнений статики.

В практических СА по конструктивным соображениям $N_{ам} = 4$ и более, поэтому СА являются статически неопределимыми, так как на R_i накладывается $N_{ам} - 3$ дополнительных условий при заданном расположении точек крепления.

Кроме этого, различают линейные (прогиб А пропорционален нагрузке) и нелинейные (прогиб А не пропорционален нагрузке) СА.

12.2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АМОРТИЗАЦИИ [8...11] *

Схемы однонаправленного нагружения и действия сил используются в простейших статически определенных или статически неопределимых СА, в которых возможно действие возмущающих сил и перемещение РЭА только в одном направлении: вдоль оси А.

Основные определяемые параметры: $\xi_{бл}^{max}$, m , $K_{дин}$, ν_0 , $K_{ам}$

Для приближенного определения максимального смещения блока ($\xi_{бл}^{max}$) необходимо знать m , a , параметры ξ_a , ν , K_{Σ} , $\xi_{бл}$ и проверить применимость следующей формулы:

$$\xi_{бл}^{max} = 0,25a/\nu^2. \quad (12.2)$$

Условие применимости: $K_{\Sigma} \ll \ll 0,102 m (2\pi\nu)^2$ — результат расчета $\xi_{бл}^{max} < \xi_{бл}$ (см § 12.9, пример 1).

Если $\xi_{бл}^{max} > \xi_{бл}$ и нельзя увеличить зазор, то требуемую массу определяют из условия: $m = = 250 m K_{вб}/\xi_{бл} \nu^2$ (см. § 12.9, пример 2)

Для определения значений $K_{дин}$, ν_0 и $K_{ам}$ необходимо знать m , ν_1, \dots, ν_6 и коэффициенты $K_{вб1}, \dots, K_{вб6}$. Кроме того, СА должна обладать незначительным демпфированием (что свойственно большинству СА). Числом А задаются исходя из конструктивных требований

Схема расчета

Зная $K_{вб}$, находим

$$K_{динi} = K_{вб}/K_{вбi} \quad (12.3)$$

и частоту

$$\nu_0 = \nu_i \sqrt{K_{динi}/(1 + K_{динi})}, \quad \nu_i/\nu_0 = K_{\nu}. \quad (12.3a)$$

С помощью найденных коэффициентов вычисляем коэффициенты демпфирования:

силовое возбуждение

$$K_{дм} = \sqrt{\{(1 - K_{\nu}^2)^2 - K_{дин}^{-2}\}/4K_{\nu}^2}, \quad (12.4)$$

* § 12.2...12.6. составил В. Б. Карпушин.

кинематическое возбуждение

$$K_{\text{дм}} = \sqrt{\{K_{\text{дин}}^2(1 - K_v^2)^2 - 1\}/4K_v^2} \times (1 - K_{\text{дин}}^2). \quad (12.5)$$

По известным значениям $K_{\text{дм}}$ и K_v (12.3) находим реальные значения коэффициента динамичности $K_{\text{дин}}$ СА:

1) $K_{\text{дм}} = 0$, силовое и кинематическое возбуждение

$$K_{\text{дин}} = 1/(K_v^2 - 1) \text{ при } v \neq v_0,$$

$$K_{\text{дин}} = \infty \text{ при } v = v_0; \quad (12.6)$$

2) $K_{\text{дм}} > 0$, силовое возбуждение

$$K_{\text{дин}} = 1/\sqrt{4K_{\text{дм}}^2 K_v^2 + (1 - K_v^2)^2},$$

$$K_{\text{дин}} = 1/2K_{\text{дм}}; \text{ при } v = v_0, K_v = 1; \quad (12.7)$$

3) $K_{\text{дм}} \neq 0$, кинематическое возбуждение

$$K_{\text{дин}} = \sqrt{(1 + 4K_v^2 K_{\text{дм}}^2)/\{(1 - K_v^2)^2 + 4K_v^2 K_{\text{дм}}^2\}}. \quad (12.8)$$

По заданным $K_{\text{вб}i}$ и $K_{\text{дин}i}$ из (12.3) находим расчетное значение $K_{\text{вб}}$ и сравниваем с заданным. Если требования задания удовлетворяются, то определяем K_{Σ} , Н/см:

$$K_{\Sigma} = 0,392mv_0^2. \quad (12.9)$$

Задаввшись $N_{\text{ам}}$, вычисляем $K_{\text{ам}i} = K_{\Sigma}/N_{\text{ам}}$ и выбираем подходящий тип А (см. § 12.9, пример 3).

Для статически определимой однонаправленной схемы с тремя опорными А (рис. 12.2, а) их реакции равны

$$R_1 = 9,81 m (x_2 y_3 - x_3 y_2) / \Delta;$$

$$R_2 = 9,81 m (x_1 y_3 - x_3 y_1) / \Delta;$$

$$R_3 = 9,81 m (x_1 y_2 - x_2 y_1) / \Delta;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \end{vmatrix}. \quad (12.10)$$

Общее условие: $\sum R_i = 9,81 m$;
 $\sum R_i x_i = 0$; $\sum R_i y_i = 0$; $\sum R_i x_i y_i = 0$;

$\Delta \neq 0$ (т. е. проекции точек крепления в плоскости основания xu не лежат на одной прямой)

Для СА с двумя опорными и одним кольцевым А (рис. 12.2, б): $R_1 = R_2 = 4,9 m$; $R_3 = 0$.

В случае статически неопределимых схем расположения А число дополнительных условий $N_{\text{дп}} = N_{\text{ам}} + N_{\text{пр}} - 3$, где $N_{\text{пр}}$ — число координат дополнительных точек крепления А, выбранных произвольно.

Так как всегда можно произвольно задавать $N_{\text{пр}} - 3$ реакций и определять три остальные из уравнений статики, то при четырех А вместо одного из дополнительных усло-

вий $\sum R_i x_i y_i = 0$ можно задавать одну из реакций. Выбранная схема СА правильна, если все реакции положительные. После определения реакций по (12.10) и учета дополнительных условий дальнейший расчет и выбор А в статически неопределимой СА производится так же, как и в статически определимой. При этом ЦЖ А (точка приложения

результатирующей силы $\sum R_i$) должен находиться на одной вертикали с ЦТ РЭА, что при несимметричном расположении А требует выполнения условий: $\sum K_{\text{ам}i} x_i = 0$; $\sum K_{\text{ам}i} y_i = 0$.

Расчетные схемы и формулы даны в табл. 12.1, пример расчета — в § 12.9 (пример 4).

Схемы пространственного нагружения и действия сил

В СА пространственного нагружения и действия сил можно использовать только такие типы А, которые гарантируют работу по осям X, Y, Z и имеют данные по $K_{\text{ам}x}$, $K_{\text{ам}y}$, $K_{\text{ам}z}$ или $K_{\text{ам}}^x$, $K_{\text{ам}}^y$, $K_{\text{ам}}^z$ (АВД, АКСС, АПН, АСД, АР, АТ). Наиболее сложная часть расчета таких СА — определение R_i . А выбирают по методике схем однонаправленного нагружения, но с учетом всех направлений действия сил.

В пространственных СА при статическом расчете А определяют не N , а $3N$ реакций — R_{ix} , R_{iy} , R_{iz} ,

Таблица 12.1

Расчетные схемы и формулы для линейных СА

	<p>(1)</p> $R_1 \dots R_4 = G_{0\Delta} (\Delta_1 / \Delta \dots \Delta_4 / \Delta), \Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4;$ $\Delta_1 = x_2 x_4 y_3 (y_4 - y_2) + x_2 x_3 y_4 (y_2 - y_3) + x_3 x_4 y_2 (y_3 - y_4);$ $\Delta_2 = -x_1 x_4 y_3 (y_4 - y_1) - x_1 x_3 y_4 (y_1 - y_3) - x_3 x_4 y_1 (y_3 - y_4);$ $\Delta_3 = x_1 x_4 y_2 (y_4 - y_1) + x_1 x_2 y_4 (y_1 - y_2) + x_2 x_4 y_1 (y_2 - y_4);$ $\Delta_4 = -x_1 x_3 y_2 (y_3 - y_1) - x_1 x_2 y_3 (y_1 - y_2) - x_2 x_3 y_1 (y_2 - y_3);$
	<p>(2)</p> $R_1 = R_4, K_3 = R_3, \delta_{\text{кп } 2,3} = 0;$ $R_{1,4} = 0,5 G_{0\Delta} a_2 / (a_1 + a_2);$ $R_{2,3} = 0,5 G_{0\Delta} a_1 / (a_1 + a_2);$ $\delta_{\text{кп } 1,4} = R_1 / K_{\text{ам } 1} - R_2 / K_{\text{ам } 2}$
	<p>(3)</p> $R_1 = G_{0\Delta} a_2 b_2 / (a_1 + a_2) (b_1 + b_2), \quad R_2 = G_{0\Delta} a_1 b_2 / (a_1 + a_2) (b_1 + b_2),$ $R_3 = G_{0\Delta} a_1 b_1 / (a_1 + a_2) (b_1 + b_2), \quad R_4 = G_{0\Delta} a_2 b_1 / (a_1 + a_2) (b_1 + b_2)$ <p>или при $R_4 = R_0$: $R_1 = (G_{0\Delta} - R_0) a_2 / (a_1 + a_2),$</p> $R_2 = (G_{0\Delta} - R_0) (a_1 b_2 - a_2 b_1) / (a_1 + a_2) (b_1 + b_2), \quad R_3 = (G_{0\Delta} - R_0) b_1 / (b_1 + b_2).$
	$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 0,25 G_{0\Delta}, \quad y_3 = \{y_2 (x_3 + 2x_2 + x_1) + y_1 (x_3 + x_2 + 2x_1)\} / (2x_3 + x_2 + x_1).$ $x_4 = -(x_3 + x_2 + x_1), \quad y_4 = \{y_2 (x_2 - x_3) + y_1 (x_1 - x_3)\} / (2x_3 + x_2 + x_1)$ <p>(4)</p>

(5)

$$R_1 = \frac{1}{\alpha^2 \Delta} \begin{vmatrix} \alpha x_2 - \beta & \alpha x_3 - \beta & \alpha x_4 - \beta \\ \alpha y_2 - \gamma & \alpha y_3 - \gamma & \alpha y_4 - \gamma \\ \alpha y_3 x_2 - \delta & \alpha y_3 x_3 - \delta & \alpha y_4 x_4 - \delta \end{vmatrix};$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha^2 \Delta} \begin{vmatrix} \alpha x_1 - \beta & \alpha x_3 - \beta & \alpha x_4 - \beta \\ \alpha y_1 - \gamma & \alpha y_3 - \gamma & \alpha y_4 - \gamma \\ \alpha y_1 x_1 - \delta & \alpha y_3 x_3 - \delta & \alpha y_4 x_4 - \delta \end{vmatrix};$$

$$R_3 = \frac{1}{\alpha^2 \Delta} \begin{vmatrix} \alpha x_1 - \beta & \alpha x_2 - \beta & \alpha x_4 - \beta \\ \alpha y_1 - \gamma & \alpha y_2 - \gamma & \alpha y_4 - \gamma \\ \alpha y_1 x_1 - \delta & \alpha y_2 x_2 - \delta & \alpha y_4 x_4 - \delta \end{vmatrix};$$

$$R_4 = \frac{1}{\alpha^2 \Delta} \begin{vmatrix} \alpha x_1 - \beta & \alpha x_2 - \beta & \alpha x_3 - \beta \\ \alpha y_1 - \gamma & \alpha y_2 - \gamma & \alpha y_3 - \gamma \\ \alpha y_1 x_1 - \delta & \alpha y_2 x_2 - \delta & \alpha y_3 x_3 - \delta \end{vmatrix};$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & x_4 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 & y_4 - y_1 \\ y_3 x_2 - y_1 x_1 & y_3 x_3 - y_1 x_1 & y_4 x_4 - y_1 x_1 \end{vmatrix}.$$

При $R_1 \dots R_6 = 0, 167 G_{6n}$ неизвестные координаты x_1, x_2, y_1 будут:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_3 (y_3 - y_2) + x_4 (y_4 - y_2) + x_5 (y_5 - y_2) + x_6 (y_6 - y_2) / (2y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6); \\ x_2 &= -(x_3 + x_4 + x_5 + x_6) - \{x_3 (y_3 - y_2) + x_4 (y_4 - y_2) + x_5 (y_5 - y_2) + x_6 (y_6 - y_2)\} / (2y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6); \\ y_1 &= -(y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6). \end{aligned}$$

При $a_1 = a_2$ и одинаковой свободной высоте $\xi_{стц} = \xi_{стц} - b_1 \varphi$;

$$\xi_{стц} = G_{6n} \sum l_i^2 K_{ам i} / \sum K_{ам i} \sum l_i^2 K_{ам i} - (\sum l_i K_{ам i})^2;$$

$$\varphi = G_{6n} \sum l_i K_{ам i} / \{ \sum K_{ам i} \sum l_i^2 K_{ам i} - (\sum l_i K_{ам i}) \}; \quad \varphi = 0 \text{ при } \sum K_{ам i} l_i = 0$$

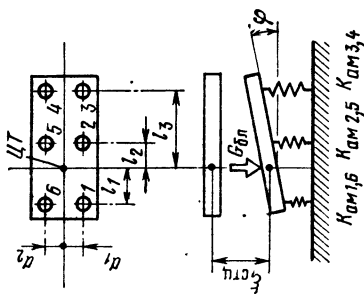


Таблица 12.2

Расчетные схемы и формулы для пространственных СА

Восемь амортизаторов. Заданы все координаты и R_8

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = a; \quad x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = -b; \quad \delta = -(y_5 z_5 R_5 + y_6 z_6 R_6 + y_7 z_7 R_7 + y_8 z_8 R_8);$$

$$R_1 = \frac{1}{\Delta_1} \begin{vmatrix} y_2 & y_3 & y_4 \\ z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix}; \quad R_2 = \frac{1}{\Delta_1} \begin{vmatrix} y_1 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_3 & z_4 \end{vmatrix};$$

$$R_3 = \frac{1}{\Delta_1} \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_4 \end{vmatrix}; \quad R_4 = \frac{1}{\Delta_1} \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix};$$

(1)

$$R_5 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \beta & 1 & 1 \\ \gamma & y_6 & y_7 \\ \theta & z_6 & z_7 \end{vmatrix}; \quad R_6 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & \beta & 1 \\ y_5 & \gamma & y_7 \\ z_5 & \theta & z_7 \end{vmatrix}; \quad R_7 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \beta \\ y_5 & y_6 & \gamma \\ z_5 & z_6 & \theta \end{vmatrix};$$

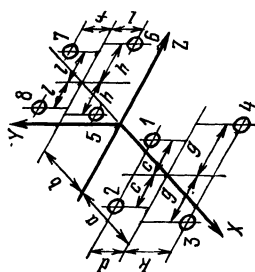
$$\Delta = \begin{vmatrix} y_6 - y_6 & y_7 - y_6 \\ z_6 - z_6 & z_7 - z_6 \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 & y_4 - y_1 \\ y_{12} - y_{11} & y_{13} - y_{11} & y_{14} - y_{11} \\ y_{22} - y_{21} & y_{23} - y_{21} & y_{24} - y_{21} \end{vmatrix};$$

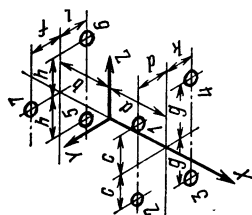
$$\alpha = G_{6\Delta}/b(a+b); \quad \beta = G_{6\Delta}/a(a+b) - R_8; \quad \gamma = -y_8 R_8; \quad \theta = -z_8 R_8; \quad \delta = l\{-Ae + 2R_8(l+f)\};$$

При $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = a; \quad x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = -b;$

$y_1 = y_2 = d; \quad y_3 = y_4 = -k; \quad y_5 = y_6 = -e; \quad y_7 = y_8 = f; \quad z_1 = -z_2 = c; \quad z_4 = -z_3 = q; \quad z_6 = -z_5 = h;$
 $z_7 = -z_8 = l; \quad A = G_{6\Delta}/a(a+b); \quad \alpha = G_{6\Delta}/b(a+b); \quad \beta = A - R_8; \quad \gamma = -fR_8; \quad \theta = lR_8; \quad R_8 \text{ — дано};$
 $R_5 = \{A(e l + h f) - 2R_8 l(e+f)\}/\{2h(e+f)\}; \quad R_6 = \{A(h l + e l) + 2R_8 h(e+f)\}/\{2h(e+f)\};$
 $R_7 = \{2A e h + 2R_8 h(e+f)\}/\{2h(e+f)\}; \quad R_1 = (\alpha c^i + \delta)/\{2c(d+k)\}; \quad R_2 = (\alpha c k - \delta)/\{2c(d+k)\};$
 $R_3 = (\alpha g d + \delta)/\{2g(d+k)\}; \quad R_4 = (\alpha g d - \delta)/\{2g(d+k)\}.$

При равном нагружении $R_i = 0,125 G_{6\Delta}; \quad a = b; \quad d = k; \quad e = f; \quad d = y_1 = y_7; \quad -d = y_3 = y_4;$
 $-e = y_5 = y_6; \quad e = y_7 = y_8; \quad c = z_1 = -z_2; \quad g = z_4 = -z_3; \quad h = z_6 = -z_5; \quad l = z_7 = -z_8.$





Семь амортизаторов. Заданы все координаты

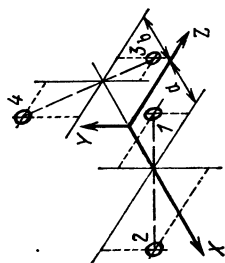
$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = a; \quad x_5 = x_6 = x_7 = -b;$$

Неизвестные R_i определяем из (1) при $R_8 = 0$. При симметричном расположении R_i определяем из (1) при $R_8 = 0$, $l = 0$ и $\delta = 0$. При $R_i = 0,143 G_{6д}$ и $a = 0,75 b$ имеем $y_1 = y_2 = d$; $y_3 = y_4 = -d$; $y_5 = y_6 = -e$; $y_7 = 2e$; $z_1 = -z_2 = c$; $z_4 = -z_3 = g$; $z_6 = -z_5 = h$; $z_7 = 0$. (2)

Четыре амортизатора. Задана часть координат

$$x_1 = x_2 = a; \quad x_3 = x_4 = -b; \quad z_2, \quad y_3, \quad z_3, \quad y_4, \quad z_4, \quad R_1 = ?; \quad R_2 = ?; \quad R_3 = ?; \quad R_4 = ?; \quad y_1 = ?; \quad z_1 = ?; \quad y_2 = ? \quad (3)$$

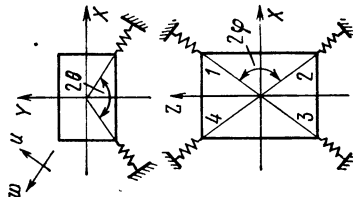
Определяем: $y_1 = -\beta y_3 z_4 / \alpha z_2$; $y_1 / y_2 = z_1 / z_2 = -\lambda_1$; $y_3 / y_4 = z_3 / z_4 = -\lambda_2$; $R_1 = \alpha / (1 + \lambda_1)$; $R_2 = \alpha \lambda_1 / (1 + \lambda_1)$; $R_3 = \beta / (1 + \lambda_2)$; $R_4 = \beta \lambda_2 / (1 + \lambda_2)$; $\alpha = G_{6д} b / (a + b)$; $\beta = G_{6д} a / (a + b)$; λ_1 — задают; $\lambda_2 = -\alpha \lambda_1 y_3 z_2 / \beta y_4 z_3$.



Четыре амортизатора, расположенные под углом

Если $R_{v1} = R_{v2} = R_{v3} = R_{v4} = 0$, то осевые R_{w1} и поперечные K'_{ui} будут равны:

$$R_{w1} = R_{w2} = R_{w3} = R_{w4} = 0,25 G_{6л} \cos \theta \cos \varphi, \quad (4)$$

$$R_{v1} = R_{v2} = R_{v3} = R_{v4} = 0,25 G_{6л} \sin \theta \cos \varphi.$$


которые должны удовлетворять уравнениям:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N R_{ix} &= 9,81 m_x; \quad \sum_{i=1}^N R_{iy} = 9,81 m_y; \\ \sum_{i=1}^N R_{iz} &= 9,81 m_z; \quad \sum_{i=1}^N (R_{ix} y_i - \\ &- R_{iy} x_i) = 0; \quad \sum_{i=1}^N (R_{iy} z_i - R_{iz} y_i) = 0; \\ \sum_{i=1}^N (R_{iz} x_i - R_{ix} z_i) &= 0, \end{aligned} \quad (12.11)$$

где m_i — компоненты массы по осям X , Y и Z , а x_i , y_i и z_i — координаты точки крепления к блоку i -го А.

Практическое значение имеют только статически неопределимые СА, при отыскании R_i в которых накладываются $3N-6$ дополнительных условий. При наличии в СА плоскостей симметрии дополнительными условиями будет равенство R_i симметрично расположенных А.

Действие одной возмущающей силы $F = F_0 \sin 2 \pi \nu t$, приложенной к точке блока с координатами x_F , y_F , z_F , заменяется системой трех сил F_{0x} , F_{0y} , F_{0z} , приложенных к ЦТ блока, и трех моментов M_{0x} , M_{0y} , M_{0z} :

$$F_{0x} = F_0 \cos \alpha; \quad F_{0y} = F_0 \cos \beta;$$

$$F_{0z} = F \cos \gamma;$$

$$M_{0x} = F_{0z} y_F - F_{0y} z_F; \quad M_{0y} = F_{0x} z_F - \\ - F_{0z} x_F; \quad M_{0z} = F_{0y} x_F - F_{0x} y_F.$$

При этом амплитуды вибраций ЦТ блока (мм) и число вращательных колебаний будут:

$$\xi_{0x} \approx 25 F_{0x} / m \nu_0^2; \quad \xi_{0y} \approx 25 F_{0y} / m \nu_0^2;$$

$$\xi_{0z} \approx 25 F_{0z} / m \nu_0^2; \quad \varphi_{0x} = M_{0x} / J_{0x} \omega_0^2;$$

$$\varphi_{0y} = M_{0y} / J_{0y} \omega_0^2; \quad \varphi_{0z} = M_{0z} / J_{0z} \omega_0^2,$$

а рекомендуемое значение $K_v \geq 4$.

Чтобы избежать высокочастотных собственных вращательных колебаний блока (при больших расстояниях от А до ЦТ блока), следует соблюдать условия

$$\left(\sum_{i=1}^N K_{ам i} x_i^2 \right) / K_{ам \Sigma} = J_{0y} / m;$$

$$\left(\sum_{i=1}^N K_{ам i} y_i^2 \right) / K_{ам \Sigma} = J_{0x} / m.$$

Определив величину статических деформаций А (x_i стд = $R_{ix} / K_{ам x}$ и т. д.), проводят выравнивание их по трем осям, используя прокладки

или смещение оси А в плоскости крепления

Для облегчения условий работы СА следует уменьшать расстояние между ЦЖ и ЦТ блока и использовать симметричное расположение А. Для ряда характерных схем пространственного нагружения в табл. 12.2 приведены расчетные формулы (см. также § 12 9, пример 5).

12.3. РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ РЭА НА АМОРТИЗАТОРАХ [8...11]

Полностью симметричные системы амортизации

Условия полной симметрии СА (рис. 12.3, а): $a = 0$; $\Sigma b = 0$; $\Sigma c = 0$. При этом R_i принимаются параллельными соответствующим осям координат, начало которых проходит через ЦТ, который лежит в геометрическом центре блока, а главные оси инерции блока совпадают с осями координат.

В этом случае все частоты ν_0 находятся в узком диапазоне, что является преимуществом такой СА. Общее частотное уравнение распадается на шесть простых вида $\omega^2 = -NK_{ам}/m = 0$, из которого определяются частоты в продольном ν_{01} , поперечном ν_{02} и вертикальном ν_{03} направлениях, продольной ν_{04} и поперечной ν_{05} качки, рыскания ν_{06} :

$$\nu_{01} = \sqrt{0,025 K_x / m};$$

$$\nu_{02} = \sqrt{0,025 K_y / m};$$

$$\nu_{03} = \sqrt{0,025 K_z / m};$$

$$\nu_{04} = \sqrt{0,025 K_x \Sigma C^2 / J_x};$$

$$\nu_{05} = \sqrt{0,025 K_z \Sigma B^2 / J_y};$$

$$\nu_{06} = \sqrt{0,025 (K_x \Sigma A^2 + K_y \Sigma B^2) / J_z},$$

(12.11)

в которых J , K , ΣA^2 и ΣB^2 равны:

$$J_x = 0,083 m (A^2 + C^2);$$

$$J_y = 0,083 m (A^2 + B^2);$$

$$J_z = 0,083 m (B^2 + C^2); \quad K_i^2 = 4 K_i;$$

$$\sum_{i=1}^N A^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2; \quad \sum_{i=1}^N B^2 = \sum_{i=1}^N B_i^2 \dots$$

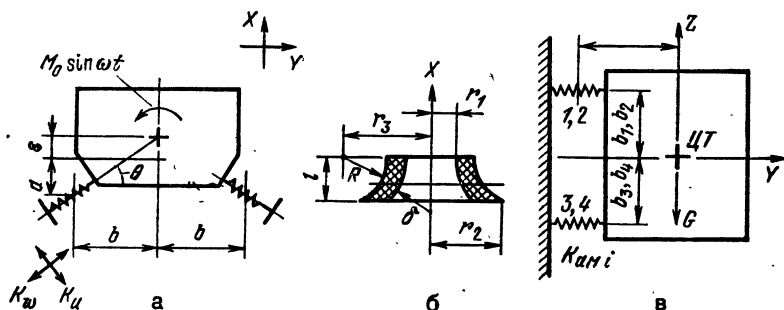
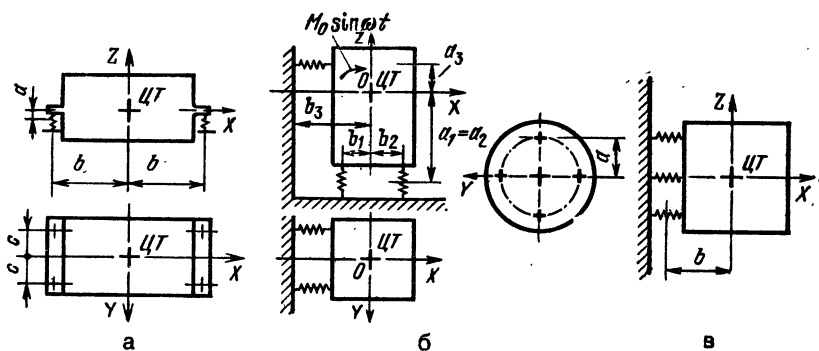
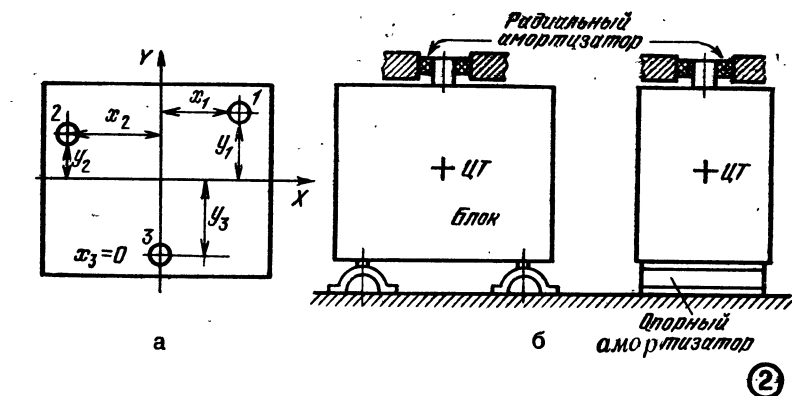


Рис. 12.2. Статически определяемая однонаправленная схема СА с тремя опорными А (а), с двумя опорными и одним кольцевым А (б)

Рис. 12.3. Схемы СА с двумя (а, в) и одной (б) плоскостями симметрии

Рис. 12.4. Система амортизации с наклонным расположением амортизаторов (а), размеры резиновых втулок (б), СА с боковым расположением амортизаторов (в)

Системы амортизации, симметричные относительно двух вертикальных плоскостей

Определяющее условие (рис. 12.3, а): $a \neq 0$, $\Sigma b = 0$, $\Sigma c = 0$.
Условие симметрии

$$\sum_{i=1}^N K_{iz} c_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N K_{iz} c_i = 0;$$

$$\sum_{i=1}^N K_{iy} b_i = 0; \quad \sum_{i=1}^N K_{iy} b_i = 0.$$

В этом случае $\omega_i = 2\pi\nu_i$ и частоты независимых вертикальных и связанных продольных колебаний и продольной качки равны:

$$\omega^2 = \omega_1^2; \quad \omega^2 = 0,5 \{(\omega_2^2 + \omega_3^2) \pm \sqrt{(\omega_2^2 - \omega_3^2)^2 + 4K_a K_b}\}, \quad (12.12)$$

а независимых колебаний рыскания и связанных поперечных колебаний и боковой качки:

$$\omega^2 = \omega_4^2; \quad \omega^2 = 0,5 \{(\omega_5^2 + \omega_6^2) \pm \sqrt{(\omega_5^2 - \omega_6^2)^2 + 4K_e K_f}\}$$

где

$$\omega_1 = K_x/m; \quad \omega_2 = K_y/m;$$

$$\omega_3 = (K_y \Sigma A^2 + K_x \Sigma B^2)/J_z; \quad \omega_4 = K_z/m;$$

$$\omega_5 = (K_z \Sigma B^2 + K_y \Sigma C^2)/J_z;$$

$$\omega_6 = (K_x \Sigma C^2 + K_z \Sigma A^2)/J_y;$$

$$K_a = K_y \Sigma A/m; \quad K_b = K_y \Sigma A/J_z; \quad (12.13)$$

$$K_e = K_z \Sigma A/m; \quad K_f = K_z \Sigma A/J_y.$$

Для выполнения условий симметричности относительно двух вертикальных плоскостей необходимо обеспечить равномерность весовой нагрузки элементов по горизонтальной плоскости блока (см. § 12.9, пример 6).

Системы амортизации с одной плоскостью симметрии

Плоскость симметрии XOZ и оси X , Y , Z являются главными центральными осями инерции CA (рис. 12.3, б). Симметричные формы колебаний состоят из двух поступательных перемещений по осям X и Z и одного вращения вокруг оси. Несимметричные формы колебаний состоят из поступательного перемещения по оси Y и двух вращений вокруг осей X и Y .

Три собственные частоты при симметричных формах равны:

$$\omega_{1,2,3}^2 = y_{1,2,3} - 0,33 B/A;$$

$$y_1 = -2r \cos 0,33 \varphi;$$

$$y_2 = -2r \cos (60^\circ - 0,33 \varphi); \quad 1$$

$$y_3 = 2r \cos (60^\circ + 0,33 \varphi); \quad \cos \varphi = q/r^3;$$

$$r = \pm \sqrt{|P|};$$

$$P = 0,33 C/A - 0,11 B^2/A^2; \quad q = 0,037 B^3/A^3 - 0,166 BC/A^2 + 0,5 D/A.$$

Знак r должен совпадать со знаком q .

$$A = \beta_{55} \beta_{11}^2; \quad B = -\alpha_{55} \beta_{11}^2 -$$

$$-\beta_{11} \beta_{55} (\alpha_{11} + \alpha_{33}),$$

$$C = \alpha_{55} \beta_{11} (\alpha_{33} + \alpha_{11}) + \alpha_{11} \alpha_{33} \beta_{55} - \beta_{11} (\alpha_{15}^2 + \alpha_{35}^2);$$

$$D = \alpha_{33} \alpha_{15}^2 + \alpha_{11} \alpha_{35}^2 - \alpha_{11} \alpha_{33} \alpha_{55};$$

$$\alpha_{11} = \Sigma K_x; \quad \alpha_{22} = \Sigma K_y; \quad \alpha_{33} = \Sigma K_z;$$

$$\alpha_{15} = \Sigma K_x z; \quad \alpha_{55} = -\Sigma K_x yz;$$

$$\alpha_{44} = \Sigma (K_z y^2 + K_y z^2);$$

$$\alpha_{55} = \Sigma (K_x z^2 + K_z x^2); \quad \alpha_{34} = \Sigma K_z y;$$

$$\alpha_{66} = \Sigma (K_x y^2 + K_y x^2);$$

$$\alpha_{16} = -\Sigma K_x y; \quad \alpha_{24} = -\Sigma K_y z;$$

$$\alpha_{26} = \Sigma K_y x; \quad \alpha_{35} = -\Sigma K_z x;$$

$$\alpha_{45} = -\Sigma K_z xy; \quad \alpha_{46} = -\Sigma K_y xy;$$

$$\beta_{11} = G/g; \quad \beta_{44} = J_x; \quad \beta_{55} = J_y; \quad \beta_{66} = J_z;$$

$$\beta_{56} = -J_{yz}; \quad \beta_{45} = -J_{xy}; \quad \beta_{46} = -J_{xz};$$

K_x , K_y , K_z — коэффициенты жесткости амортизаторов, J_x , J_y , J_z , J_{xy} , J_{xz} , J_{yz} — моменты инерции и центробежные моменты инерции блока относительно осей X , Y , Z , проходящих через его ЦТ.

Три другие собственные частоты равны:

$$\omega_{4,5,6}^2 = y_{4,5,6} - 0,33 B_1/A_1;$$

$$y_4 = -2r_1 \cos 0,33 \varphi_1;$$

$$y_5 = 2r_1 \cos (60^\circ - 0,5 \varphi_1);$$

$$y_6 = 2r_1 \cos (60^\circ + 0,33 \varphi_1);$$

$$\cos \varphi_1 = q_1/r_1^3; \quad r_1 = \pm \sqrt{|P_1|};$$

$$P_1 = 0,33C_1/A_1 - 0,11B_1^2/A_1^2;$$

$$q_1 = 0,037B_1^3/A_1^3 - 0,166B_1C_1/A_1^2 +$$

$$+ 0,5D_1/A_1.$$

Знак r_1 должен совпадать со знаком q_1

$$A_1 = \beta_{11} \beta_{44} \beta_{66};$$

$$B_1 = -(\alpha_{55} \beta_{11}^2 + \alpha_{33} \beta_{11} \beta_{55} +$$

$$+ \alpha_{11} \beta_{11} \beta_{55});$$

$$C_1 = \alpha_{33} \beta_{11} \alpha_{55} + \alpha_{11} \alpha_{55} \beta_{11} +$$

$$+ \alpha_{11} \alpha_{33} \beta_{55} - \beta_{11} \alpha_{15}^2 - \alpha_{35}^2 \beta_{11});$$

$$D_1 = \alpha_{33} \alpha_{15}^2 + \alpha_{11} \alpha_{35}^2 - \alpha_{11} \alpha_{33} \alpha_{55}.$$

Консольная схема амортизации. СА имеет две плоскости симметрии ZX и XY, оси XYZ являются главными центральными осями инерции (рис. 12.3, в).

Если

$$\alpha_{15} = \alpha_{16} = \alpha_{24} = \alpha_{34} = \alpha_{45} = \alpha_{46} =$$

$$= \alpha_{56} = \beta_{45} = \beta_{46} = \beta_{56} = 0,$$

то собственные частоты системы определяют по формулам:

$$\omega_1^2 = \alpha_{11}/\beta_{11}; \quad \omega_2^2 = \alpha_{44}/\beta_{44}; \quad \omega_1 \text{ и}$$

ω_2 — круговые частоты колебаний вдоль и вокруг оси X,

$$\omega_{3,4}^2 = (\beta_{11} \alpha_{55} + \beta_{55} \alpha_{33} \pm$$

$$\pm \sqrt{(\beta_{11} \alpha_{55} + \beta_{55} \alpha_{33})^2 +$$

$$+ 4\beta_{11} \beta_{55} (\alpha_{35}^2 - \alpha_{33} \alpha_{55})}) / 2\beta_{11} \beta_{55},$$

$$\omega_{5,6}^2 = (\beta_{11} \alpha_{66} + \beta_{66} \alpha_{22} \pm$$

$$\pm \sqrt{(\beta_{11} \alpha_{66} + \beta_{66} \alpha_{22})^2 +$$

$$+ 4\beta_{11} \beta_{66} (\alpha_{24}^2 - \alpha_{22} \alpha_{66})}) / 2\beta_{11} \beta_{66},$$

$\omega_{3,4,5,6}$ — круговые частоты сложных колебаний в плоскостях XZ и XY

Система амортизации с наклонным расположением амортизаторов

Угол наклона θ А выбирается таким, чтобы равнодействующие опорных R_i проходили через ЦТ блока (рис. 12.4, а), что приводит к развязке поступательных и вращательных колебаний, и увеличивает надежность крепления системы на сдвиг.

Жесткости в направлении осей X и Y

$$K_x = 4(K_u \sin^2 \theta + K_w \cos^2 \theta);$$

$$K_y = 4(K_w \sin^2 \theta + K_u \cos^2 \theta),$$

K_u, K_w — жесткости каждого А в направлении главных осей.

Круговые собственные частоты поступательных колебаний вдоль осей x и y:

$$\omega_1 = \sqrt{K_x Ng/G}, \quad \omega_2 = \sqrt{K_y Ng/G}.$$

Собственные частоты вращательных колебаний вокруг осей X и Y:

$$\tilde{\omega}_3 = \sqrt{\Sigma (K_x y^2 + K_y x^2) / J_z},$$

$$\tilde{\omega}_4 = \sqrt{\Sigma (K_x y^2 + K_y z^2) / J_y}.$$

Собственные частоты сложных колебаний в плоскости XY:

$$\omega_{5,6}^2 = (\beta_{11} \alpha_{55} + \beta_{55} \alpha_{11} \pm$$

$$\pm \sqrt{(\beta_{11} \alpha_{55} + \beta_{55} \alpha_{11})^2 +$$

$$+ 4\beta_{11} \beta_{55} (\alpha_{15}^2 - \alpha_{11} \alpha_{55})}) / 2\beta_{11} \beta_{55}.$$

Частоты собственных колебаний нелинейных упругих элементов

Определяются для резиновых А, работающих на сжатие, резиновых втулок с коническими и кривыми образующими.

Для резиновых А, работающих на сжатие:

$$v_0 = 0,159 \sqrt{\beta E s g / G h},$$

где β — коэффициент увеличения жесткости, учитывающий влияние закрепленных торцов и зависящий от формы поперечного сечения детали, E — модуль упругости при малых деформациях, при расчете амортизаторов используется динамический модуль упругости резины (рис. 12.5), s — площадь поперечного сечения, h — высота недеформированной детали, G — вес блока

Приближенное значение коэффициента $\beta \approx 1 + \alpha \Phi$, где $\Phi = 0,25 d/h$ — для цилиндрических деталей с диаметром d и высотой h , $\Phi = 0,5 ab/(ah + bh)$ — для образцов прямоугольной формы со сторонами

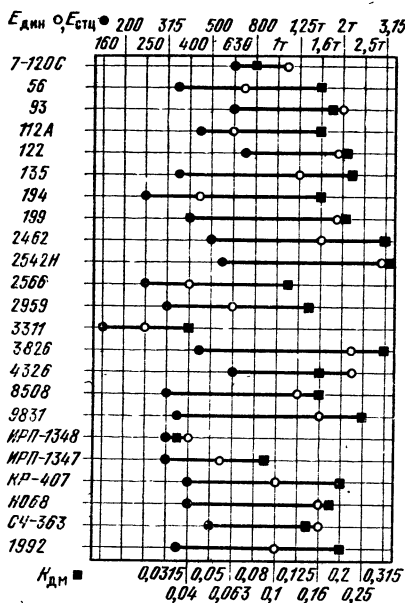


Рис. 12.5. Округленные значения коэффициента демпфирования $K_{дм}$, динамического ($E_{дин}$) и статического $E_{стц}$ модулей упругости резины

a и b при высоте h , $\alpha = 0,12 \dots 0,15$ — для несмазанных поверхностей при трении резины о сталь.

Для конических резиновых втулок с постоянной толщиной δ стенок (при условии $\delta \geq 0,4 c$)

$$v_{0i} = 0,159 K_i (b - c) \sqrt{E/\rho b l},$$

где b — радиус средней окружности большого торца, c — радиус средней окружности малого торца, l — высота втулки, E и ρ — модуль упругости и плотность резины,

$$\lambda = r / (l + r); \quad r = cl / (b - c).$$

Корни частотного уравнения упругого конуса с конической втулки $y_1(K)$ $J_0(\lambda K)$ — $J_1(K)$ $y_0(\lambda K)$ — $= 0$ для $\lambda = 0,8 \dots 0,1$ следующие:

λ	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
0,8	6,57	18,95	31,47	44,03	56,58
0,6	2,60	7,16	11,83	16,53	21,24
0,4	1,24	3,23	5,29	7,37	9,45
0,2	0,51	1,25	2,01	2,78	3,56
0,1	0,24	0,57	0,91	1,25	1,59

Для резиновых втулок с образующими в виде дуг окружностей (рис. 12.4, б)

$$v_{0i} = 0,159 v_i ad / e R,$$

где $d = \sqrt{0,5 \cdot r_3 R (\Delta + 0,25 \Delta^2) - \delta (2R + \delta)}$; $e = \sqrt{r_3 R (\Delta + 0,25 \Delta^2) - \delta (2R + \delta)}$; $\Delta = \delta (2R + \delta) / R^2$; $a = \sqrt{E/\rho}$; v_i при выполнении неравенства $2,47 u_0^2 < v_i^2 < (2,47 u_0^2 + 1)$, где $u_0 = e l R / d$; r_3 — расстояние между осью втулки и центром образующей дуги. Это неравенство ограничивает сверху и снизу величину, пропорциональную квадрату искомого v_0 .

Для усеченного конуса из резины

$$v_{0i} = 0,159 u_i \sqrt{E/\rho} / l,$$

величина u_i определяется из графического решения трансцендентного уравнения $\operatorname{tg} u = -r u / l$, $r = cl / (b - c)$; b , c и l — соответственно диаметры нижнего и верхнего торца и высота амортизирующего конуса.

Требуемые при расчетах статические $E_{стц}$ и динамические $E_{дин}$ модули упругости при сжатии резиновых элементов с сухими опорными поверхностями (пригодные для A с привулканизированными к металлическим пластинам резиновыми элементами) даны на рис. 12.5. При смазанных опорных поверхностях значения модулей упругости уменьшаются в два раза. Для резины динамический модуль сдвига $G_{дин} \approx 0,33 E_{дин}$.

Для A с коническими стальными пружинами $v_0 \approx 0,159 \sqrt{c / y_0}$, где $c = g K (H_0 - \lambda_n)^2 / m$; $\lambda_n = 0,25 [1 + (r_1 / r_2)^2] (1 + r_1 / r_2) H_0$; λ_n — координата границы между линейным и нелинейным участками упругой характеристики пружины, r_2 — наибольший радиус рабочих витков, r_1 — наименьший радиус этих витков, H_0 — высота пружины в свободном состоянии, i — число рабочих витков,

$$K = 0,0625 G d^4 / i (r_2^2 + r_1^2) (r_2 + r_1),$$

G — модуль сдвига материала пружины, d — диаметр проволоки, y_0 — высота статически равновесного положения малого торца пружины под действием суммарной статической силы.

12.4. Расчет системы амортизации на ударные нагрузки

Для равночастотных А с экспоненциальной пружины при минимальной статической нагрузке F_0 : $v_0 = 0,159 \sqrt{(q/P) \cdot (dF/dx)}$; $F = F_0 \exp(x/\lambda - 1)$ — нагрузка, F_0 — начальная нагрузка, x — деформация, λ — начальный прогиб.

В общем случае, если известно аналитическое выражение силовой характеристики $F(x)$ нелинейного амортизатора, то $K = dF/dx$ и v_0 :

$$v_0 \approx 15,8 \sqrt{G_{\text{бл}} (dF/dx)},$$

где $G_{\text{бл}}$ — вес амортизируемого прибора.

12.4. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АМОТИЗАЦИИ НА УДАРНЫЕ НАГРУЗКИ [8...11]

Исходные параметры для расчета следующие: $G_{\text{бл}}$, $a_{\text{бл}}$, $K_{\text{уд}}$, $a(t)$, $\xi_{\text{доп}}$, K_i . Действительный ударный импульс представляют эквивалентным, считая, что он действует в направлении одной из осей координат СА, аппарата перемещается поступательно в направлении удара и деформация А происходит в пределах линейного участка их характеристик.

Последовательно определяют параметры ξ_{max} , $K_{\text{уд}}^{\text{max}}$, $K_{\text{дин}}^{\text{уд}}$.

Параметры a_0 и $t_{\text{н}}$ эквивалентного импульса находят из рис. 12.1, д. Максимальная деформация А в направлении удара при слабом демпфировании и длительном ударе ($t_{\text{н}} > 0,5/v$)

$$\xi_{\text{max}} = 2a_0/\omega^2,$$

при коротком ($t_{\text{н}} < 0,5/v$)

$$\xi_{\text{max}} = a_0 \sqrt{2(1 - \cos \omega t_{\text{н}})}/\omega^2,$$

где $\omega^2 = K_{\Sigma}/m$ — квадрат условной частоты возбуждения, $K_{\Sigma} = \Sigma K_i$ суммарная жесткость А, K_i — статическая жесткость i -го А в направлении удара.

При этом $\xi_{\text{max}} < \xi_{\text{доп}}$.

Максимальные $a_{\text{бл}}$ и $K_{\text{уд}}$ амортизированного блока:

$$a_{\text{бл}} = \omega^2 \xi_{\text{max}}; K_{\text{уд}}^{\text{max}} = a_{\text{бл}}/g \approx 0,001 a_{\text{бл}} [\text{см}/\text{с}^2].$$

Коэффициент передачи удара без демпфирования:

$$K_{\text{уд}} = a_{\text{бл}}/a_0 = 2 \text{ при } t_{\text{н}} < 0,5/v$$

и

$$K_{\text{уд}} = \sqrt{2(1 - \cos \omega t_{\text{н}})} \text{ при } t_{\text{н}} \ll 0,5/v. \quad (12.14)$$

При длительном импульсе амортизация не защищает РЭА от удара, а, наоборот, усиливает ударные нагрузки на блок максимум в два раза.

При кратковременном импульсе ударные нагрузки, передаваемые на блок, тем меньше, чем меньше длительность импульса по сравнению с периодом свободных колебаний $T_0 = 2\pi/\omega_0$ блока.

Например, при $t_0 = \pi/6\omega$ из формулы (12.14) следует, что $K_{\text{уд}} = 0,52$, т. е. амортизация будет в два раза уменьшать ударные ускорения на блоке при заданной длительности импульса $t_{\text{н}}$.

Для уменьшения ударных ускорений с помощью А необходимо выполнять условие $t_0 < 0,25 t_{\text{н}}$.

Для предохранения РЭА от больших перемещений СА должна иметь упругие ограничители хода с нелинейной характеристикой. При этом:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{max}} &= (\xi_a \omega^2 - \sqrt{\omega^2 a_0^2 t_0^2 - \xi_a^2 \omega_1^2 \omega_2^2})/\omega^2, \\ \omega^2 &= g(K_{\Sigma 1} + K_{\Sigma 2})/m; \\ a_{\text{бл}} &= \omega^2 \xi_{\text{max}} - \omega^2 \xi_a; \\ \omega_1^2 &= K_{\Sigma 1}/m; \quad \omega_2^2 = K_{\Sigma 2}/m, \end{aligned} \quad (12.15)$$

где $K_{\Sigma 1}$, $K_{\Sigma 2}$ — суммарные жесткости СА с ограничителями, ξ_a — максимальный прогиб А до ограничителей, a — постоянное ускорение.

А с линейными характеристиками защищают РЭА от вибраций и кратковременных У ($t_0 < 0,008$ с), но при этом получают большие прогибы ξ , из-за чего увеличива-

ются габариты. А с нелинейной характеристикой при действии тех же нагрузок имеют меньшие габариты, но эффективность виброизоляции с помощью таких А также понижается. Поэтому целесообразно выбирать А из условия защиты от наиболее опасных вибрационных или ударных нагрузок

12.5. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ НА ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРЕНИЯ [8...11]

Исходные параметры для расчета следующие: G , $a(t)$, t_0 , K . При расчете допускают, что $a(t)$ изменяется по прямоугольному закону, длительность УЛ t_0 , $a_0 = \text{const}$ (рис. 12.1, д). Последовательно определяют величины ξ_{\max} , $a_{\text{бл}}^{\max}$, $K_{\text{лн}}$

Расчет СА при линейной характеристике амортизаторов

Максимальная деформация А:

$$\xi_{\max} = (2a_0/\omega_1^2) \sin \pi (t_0/T), \quad (12.16)$$

где $\omega_1^2 = K_{\Sigma}/m$, $T = 2\pi/\omega_1$.

Максимальное ускорение $a_{\text{бл}}^{\max} = 2a_0 \sin \pi (t_0/T)$.

Коэффициент передачи ускорения $K_{\text{лн}}^{\min} = a_{\text{бл}}^{\max}/a_0 = 2 \sin \pi (t_0/T)$. (12.17)

При $t_0 < 0,17 T$ из (12.17) получаем $K_{\text{лн}}^{\min} < 1$, т. е. СА защищает РЭА от УЛ только при малой длительности УЛ. При $t_0 > 0,17 T$ $1 < K_{\text{лн}} < 2$, и максимальная деформация согласно (12.16) будет $\xi_{\text{бл}}^{\max} \leq 2a/\omega_1^2$.

(Например, при $a_0 = 19620$ мм/с² и $\omega_1^2 = 4000$ с⁻² $\xi_{\max} \cong 2 \times 19620/4000 = 9,8$ мм и $a_{\text{бл}}^{\max} = \omega_1^2 \xi_{\max} = 39240$ мм/с², т. е. $K_{\text{лн}} = 2$.)

Таким образом, при длительных УЛ СА не только не защищает РЭА, а даже усиливает действующие ускорения, так как ξ_{\max} достигает неконструктивных размеров и может служить причиной разрыва А.

12. Защита от динамических воздействий

Для уменьшения прогиба ξ применяют упругие ограничители с нелинейной характеристикой.

Расчет СА при нелинейной характеристике амортизаторов

Максимальная деформация А:

$$\xi_{\max} = (a\omega_2^2 - a_{\text{бл}} - \sqrt{a_{\text{бл}}^2 - 2a\omega_2^2 a_{\text{бл}} - a^2 \omega_1^2 \omega_2^2})/\omega_2^2,$$

где $a_{\text{бл}}^{\max}$ определяется по формуле (12.15), a — прогиб А до упора.

Например, для данных примера 6 (§ 12.9), не налагая ограничений на длительность t_0 , по формулам (12.16) и (12.17) находим $\xi_{\max} = -0,85$ см, $a_{\text{бл}} = 3826$ см/с², $K_{\text{лн}} = 1,95$.

А с нелинейной характеристикой при действии длительных постоянных ускорений имеют меньшую деформацию (ограничивается ход), но при этом увеличиваются ускорения, действующие на РЭА, которые резко возрастают в момент удара аппаратуры об ограничители.

12.6. РАСЧЕТ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ [2, 8...11]

Расчетная модель виброизолированного объекта представляет собой линейную колебательную систему с одной степенью свободы, имеющую затухание. Ниже рассмотрен расчет СА при вертикальных случайных колебаниях, однако все формулы и рекомендации могут быть применены и для расчета СА при колебаниях основания по горизонтальным направлениям.

Случайные колебания основания характеризуются средним квадратическим перемещением b_0 [мм], а также параметрами α и β [с⁻¹], которые входят в корреляционную функцию вида:

$$R(t) = b_0^2 e^{-\alpha |t|} \times (\cos \beta t + \alpha/\beta \sin \beta |t|), \quad \alpha \leq \beta.$$

При проектировании СА для защиты РЭА от случайных вибраций, помимо b_δ , α и β [с⁻¹], необходимо знать параметры предельных вибраций РЭА по ТЗ.

Уровень колебаний виброизолированного объекта задается в виде одного из следующих критериев:

$a_\delta^{\text{доп}}$ — предельное среднее квадратическое ускорение колебаний центра тяжести виброизолированной установки, $v_\delta^{\text{доп}}$ — предельная средняя квадратическая скорость колебаний центра тяжести, $\xi_\delta^{\text{доп}}$ — предельное среднее квадратическое перемещение центра тяжести.

Расчетные значения критериев:

$$a_{\text{оп}}^{\text{доп}} = b_\delta \Omega^2 \sqrt{M_c(u)/N(u)}, \quad (12.18)$$

$$v_\delta^{\text{доп}} = b_\delta \Omega \sqrt{M_v(u)/N(u)}, \quad (12.19)$$

$$\xi_\delta^{\text{доп}} = b_\delta \sqrt{M_\xi(u)/N(u)}, \quad (12.20)$$

где $\Omega = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$, а множители $M_c(u)$, $M_v(u)$, $M_\xi(u)$ и $N(u)$ в зависимости от особенностей конструкций СА записываются следующим образом:

а) амортизаторы пружинные, резиновые и комбинированные без демпферов:

$$\begin{aligned} M_c(u) &= u^4 r + f u^5, \quad M_v(u) = u^4 r + f u^3, \\ M_\xi(u) &= 4 f u^3 r^2 + (u^4 + s u^2) f + f u, \\ N(u) &= 4 u^2 r^3 + 4 f (u^3 + u) r^2 + \\ &+ (u^4 + 2 q u^2 + 1) r; \end{aligned}$$

б) амортизаторы с демпферами вязкого трения:

$$\begin{aligned} M_c(u) &= 16 f u^3 D^4 + 4 (s u^4 + u^2) D^3 + \\ &+ 4 f u^5 D^2 + u^4 D + f u^5, \\ M_v(u) &= 4 u^2 D^3 + 4 f u^3 D^2 + u^4 D + f u^3, \\ M_\xi(u) &= 4 u^2 D^3 + 4 f (u^3 + u) D^2 + \\ &+ (u^4 + s u^2) D + f u, \\ N(u) &= 4 u^2 D^3 + 4 f (u^3 + u) D^2 + \\ &+ (u^4 + 2 q u^2 + 1) D, \end{aligned}$$

где γ_B — коэффициент неупругого сопротивления,

$$r = 1/\sqrt{1+4/\gamma_B^2},$$

D — относительный коэффициент затухания, определяемый по формуле

$$\begin{aligned} D &= 1/\sqrt{1+4\pi^2/\psi^2} \cong \\ &\cong 1/\sqrt{1+40/K_{\text{дм}}^2} \end{aligned}$$

ψ — логарифмический декремент колебаний,

$$\begin{aligned} j &= \alpha/\Omega; \quad s = 4f^2; \quad 2q = s - 2; \\ u &= \omega_z/\Omega. \end{aligned}$$

На рис. 12.6 приведены оптимальные значения относительных коэффициентов затухания $D_{\delta c}$, $D_{\delta v}$ и $D_{\delta a}$ — наименьшие значения перемещения (скорости, ускорения) виброизолированного объекта обеспечиваются при следующих соотношениях параметров:

α/β	$f = \alpha/\Omega$
1	0,70711
0,5	0,44721
0,2	0,19612
0,1	0,09950
0,05	0,04994
0,02	0,01999
0,01	0,00999

Для предварительной оценки эффективности амортизации при случайных колебаниях основания можно пользоваться графиками рис. 12.6, на которых приведены коэффициенты динамичности (кривые 2, 3)

$$\text{по смещению } K_{\text{дин}}^\xi = \xi_\sigma/b_\sigma, \quad (12.21)$$

$$\text{по скорости } K_{\text{дин}}^v = v_\sigma/b_\sigma \Omega \quad (12.22)$$

$$\text{и ускорению } K_{\text{дин}}^a = a_\sigma/b_\sigma \Omega. \quad (12.23)$$

На рис. 12.6 даны две группы значений $K_{\text{дин}}$: для А с демпферами вязкого трения (значения $K_{\text{дин}}^\xi$, $K_{\text{дин}}^v$ и $K_{\text{дин}}^a$ вычислены при $D_\delta = D_\delta^{\text{опт}}$, кривая 2) и для резиновых или комбинированных А с большим коэффициентом неупругого сопротивления (значения $K_{\text{дин}}^\xi$, $K_{\text{дин}}^v$ и $K_{\text{дин}}^a$ вычислены при $\gamma_B = 0,22$, кривая 3). Им соотнесены значения $D_\delta^{\text{опт}}$, кривая 1.

Виброизоляцию рассчитывают в следующем порядке.

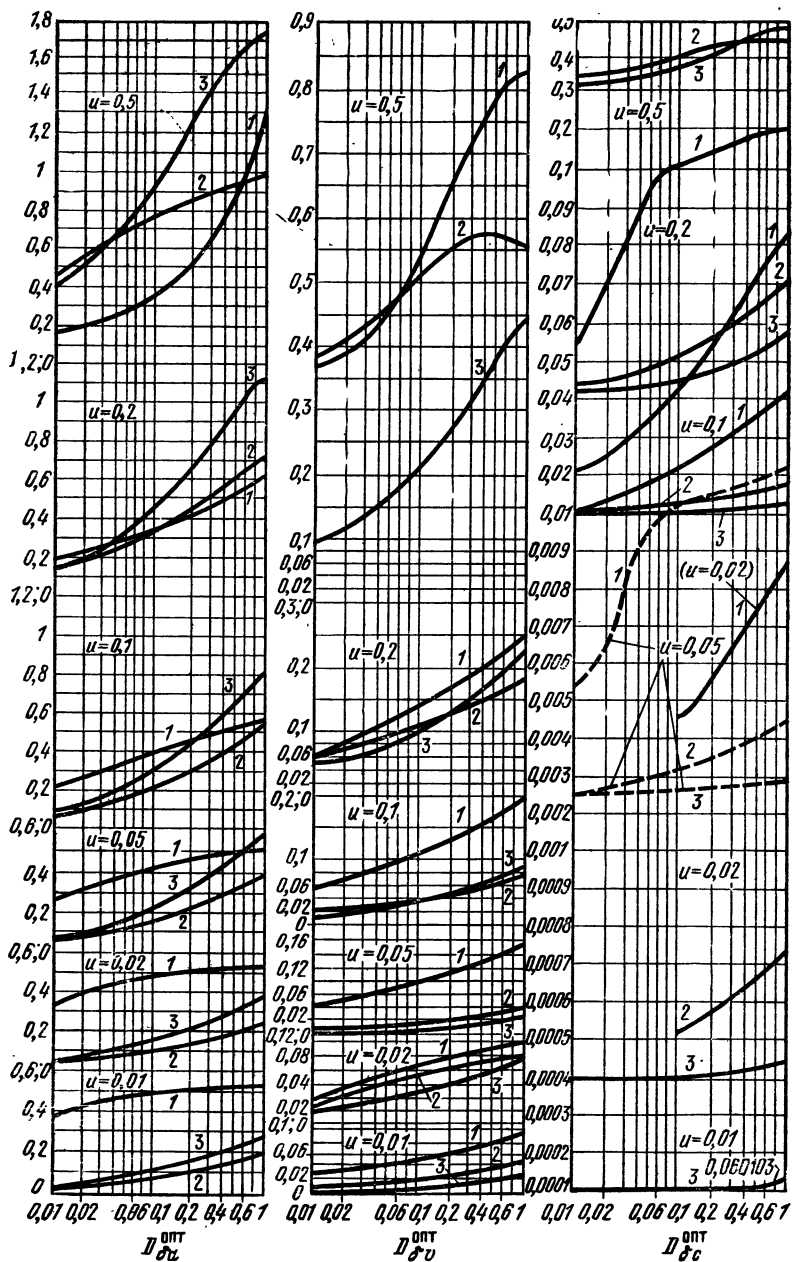


Рис. 12.6. Оптимальные значения относительных коэффициентов затухания $D_{\delta a}^{opt}$, $D_{\delta v}^{opt}$ и $D_{\delta c}^{opt}$ при значениях $D_{\delta\xi}^{opt}$

(кривые 1), с коэффициентами $K_{дин}$ при $D_{\delta} = D_{\delta}^{opt}$ (кривые 2) и при $\gamma = 0.22$ (кривые 3), $u = 0.01 \dots 0.5$

Из рис. 12.6 и формул (12.21)... (12.23) задаются значением u , исходя из условия, чтобы расчетные значения ξ_0 , v_0 или a_0 не превышали соответствующих предельных величин, при горизонтальных колебаниях основания вместо ω_z задаются значением ω_x (или ω_y).

Определяют конструктивные характеристики, число и расположение А. При этом, если значение $\omega_z/2\pi$ ($\omega_x/2\pi$ или $\omega_y/2\pi$) выше 5 Гц, то целесообразно использовать резиновые или комбинированные А с возможно более высоким коэффициентом неупругого сопротивления; если $\omega_z/2\pi$ ($\omega_x/2\pi$, $\omega_y/2\pi$) ниже 5 Гц, то имеет смысл применить пружинные амортизаторы с демпферами вязкого трения.

Уточняют значение ω_z (ω_x или ω_y), конструктивные характеристики, число и расположение демпферов и их $K_{\text{дм}}$ (рис. 12.6).

Определяют характеристики колебаний виброизолируемого объекта, вызванные случайными колебаниями основания по формулам (12.18)...(12.20).

Если виброизолируемый объект является источником $F_{\text{воз}}$, определяют амплитуду перемещения ЦТ ξ_0 объекта под воздействием неуравновешенных переменных сил.

Проверяют выполнение условий:

$$\sqrt{a_0^2 + 0,5\omega_0^4 \xi_0^2} \leq a_0, \quad (12.24)$$

или

$$\sqrt{v_0^2 + 0,5\omega_0^4 \xi_0^2} \leq v_0 \quad (12.25)$$

$$\sqrt{\xi_0^2 + 0,5 \xi_0^2} \leq \xi_0. \quad (12.26)$$

При невыполнении этих условий уменьшают $K_{\text{ам}}$ или увеличивают массу основания и весь расчет начинают с уточнения D_0 ; $K_{\text{ам}}$ уменьшают, если первое слагаемое в подкоренном выражении в формулах (12.24)...(12.26) больше второго, в противном случае увеличивают массу постаментов.

12.7. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АМОРТИЗАТОРОВ [5...14] *

Сводные данные А приведены на рис. 12.7 габаритные чертежи — на рис. 12.8. Области целесообразного применения А определяются сравнением условий эксплуатации с конкретными параметрами.

Втулочные двойные АВД

В качестве упруго-демпфирующего материала используется резина марки ИРП-1348 (ТУ 38.005.116—73). А предназначены для защиты РЭА в трех направлениях при $a = 4905 \text{ мм/с}^2$, $v_0 = 80 \dots 240 \text{ Гц}$, $K_{\text{дин}} = 1,4 \dots 4,4$, ударная прочность 30000 У при $a = 11772 \text{ мм/с}^2$, $t_{\text{н}} = 50 \dots 200 \text{ мс}$, срок гарантии 10,5 лет, гарантийная наработка 225 ч

Амортизаторы АВД

Типоразмер	G_{max}	K_x	K_y	K_z
	Н	кН/см		
АВД-0,75	7,36	4,32	1,92	4,32
АВД-1,5	14,7	4,86	10,04	3,8
АВД-2,2	21,6	10,1	35,2	19,7
АВД-3	29,4	20,4	58	52,5
АВД-6	58,9	54	138	127

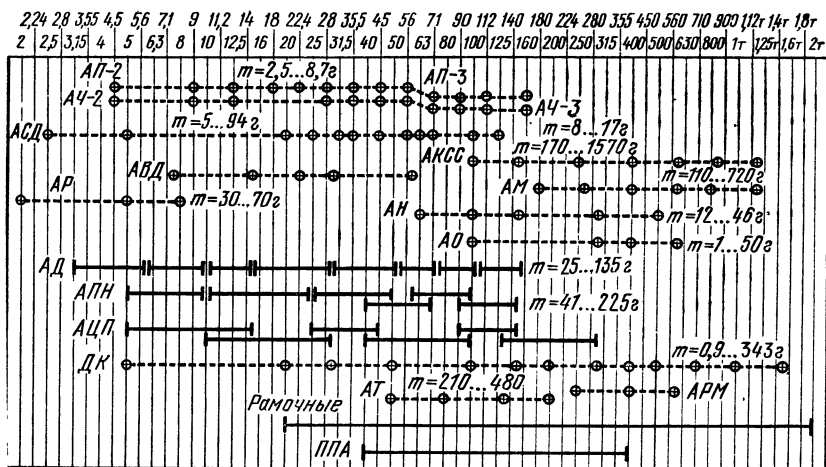
Втулочные малогабаритные амортизаторы

Конструкция А состоит из упруго-демпфирующего элемента (из резины) и развальцованной калиброванной стальной втулки. Номинальная нагрузка в вертикальном и горизонтальном направлениях 25 Н.

Корабельные сварные амортизаторы со страховкой

Устанавливаются на горизонтальных, наклонных и вертикальных

* Составители В. Б. Карпушин, Р. Г. Варламов.



а

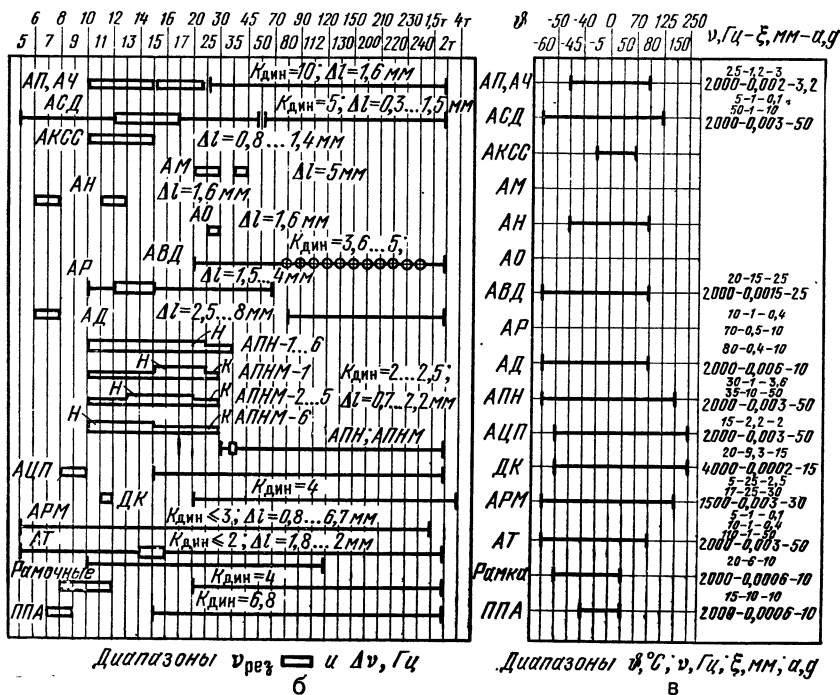


Рис. 12.7. Сводные данные амортизаторов по значениям нагрузок (а), диапазонам рабочих и резонансных частот (б) и условиям работы (в)

плоскостях. В случае разрушения резинового массива РЭА остается соединенной с основанием амортизатора. Могут быть выполнены из маслостойкой резины. При пространственном нагружении используются для защиты от ударов и виброизоляции. Разновидность АКСС-И обладает меньшими статическими и динамическими жесткостями, чем АКСС-М.

Амортизаторы АКСС-М

Типоразмер	$G_{\text{ном}}$	$K_{\text{ам}}^B$	$K_{\text{ам}}^r$
	Н	Н/см	
АКСС-10	98	1177	1079
АКСС-15	147	1668	1471
АКСС-25	245	2747	2452
АКСС-40	392	3531	3139
АКСС-60	588	4218	3728
АКСС-85	834	5984	5297
АКСС-120	1177	9025	8142

Нелинейные ДК

Обладают высокими значениями определяющих параметров, упруго-демпфирующий элемент выполнен из МР (металлической проволоочной резины). Обеспечивают защиту от вибраций и ударов, действующих под любым углом к оси амортизатора.

Амортизаторы ДК

Типоразмер	$G_{\text{пред. Н}}$	$K_{\text{ам}}^B$, Н/см
ДК-1	4,9	59
ДК-1-2	19,6	98,1
ДК-1-3	29,4	137,3
ДК-11-1	49	196,2
ДК-11-2	98,1	245,3
ДК-11-3	147,2	294,3
ДК-111-1	196,2	441,5
ДК-111-2	294,3	490,5
ДК-111-3	392,4	824
ДК-IV-2	490,5	735,8
ДК-IV-3	686,7	1569,6
ДК-V-1	981	1962
ДК-V-2	1471,5	3924

тизатора. Нелинейность характеристик определяется обратной квадратичной зависимостью динамической жесткости от амплитуды колебаний, $K_{\text{дм}} 0.4...0.5$, $K_{\text{дин}} 3.5...4$.

Опорные амортизаторы

А выполнены в виде опорных ножек, работающих на сжатие. Используются в основном для лабораторной РЭА и для укладочных ящиков, имеют малые размеры и вес. Виброзащита начинается с частоты $\nu = 35$ Гц при $\theta = 288...308$ К и $\xi_{\text{ам}}$ до 0,5 мм.

Амортизаторы АО

Типоразмер	$G_{\text{ном. Н}}$	$K_{\text{ам}}^B$, Н/см
АО-10	98	638
АО-30	294	1815
АО-40	392	2453
АО-60	589	3630

Пружинно-поролоновые амортизаторы

А состоит из двух металлических планок, между которыми расположен упруго-демпфирующий элемент. Он выполнен из поролона, в его окнах находятся стальные пружины сжатия. Требуют меньшего объема, чем другие аналогичные, так как работают по всей площади. А не нормализованы, нагрузка 40...400 Н, $K_{\text{дин}} 6...8$ на $\nu = 7...9$ Гц и $K_{\text{дин}} = 0,01$ на $\nu = 100$ Гц. Защищает от У при $a \leq 14715$ мм/с² и $t_{\text{п}} = 100$ мс. Длительность надежной работы до 2000 ч.

Пружинные с воздушным демпфированием АД

Используется фасонная стальная пружина, в которой при увеличении нагрузки «выключаются» нижние витки, что увеличивает жесткость и позволяет получить равночастотность амортизатора при изменении нагрузки. Для демпфирования используется резиновый баллончик

с калиброванным отверстием для прохода воздуха, что обеспечивает $K_{\text{дм}} 0,06...0,5$. Кроме защиты от вибраций, обеспечивают защиту от У вдоль оси (при $a = 3900 \text{ мм/с}^2$ и $t_{\text{н}} 5...15 \text{ мс}$) в 2,8 раза. Вибропрочность в вертикальном направлении $\Gamma = 300 \text{ ч}$. В горизонтальном направлении не работают.

Амортизаторы АД

Типоразмер	$G_{\text{ном}}$ Н	$K_{\text{ам}}$ Н/см
АД-0,6	3...6	11,8
АД-1,02	6...10	19,6
АД-1,5	10...15	19,6
АД-3,0	15...30	39,2
АД-5,0	30...50	68,7
АД-7,0	50...70	88,3
АД-10	70...100	117,7
АД-15	100...150	186,4

Амортизаторы пространственного нагружения АПН (АПНМ)

Предназначены для работы в широком диапазоне v . Вл. при пониженном давлении. Для АПНМТ (тропическое исполнение) гарантируется работа в условиях солнечной радиации, плесневых грибов, солевого тумана. Значение $K_{\text{дин}}$ зависит от характера нагружения (нормального Н и консольного К). Вибропрочность 1500 ч на протяжении 7 лет, ударная прочность 10000 У при $a = 11800 \text{ мм/с}^2$, $t_{\text{н}} = 10...15 \text{ мс}$ (АПН) и 200...400 мс (АПНМ, АПНМТ). Линейные ускорения пер-

Амортизаторы АПН

Типоразмер	$G_{\text{ном}}$ Н	$K_{\text{ам}}$ Н/см
АПН-1	4,9...9,8	68,7
АПН-2	9,8...24,5	137,3
АПН-3	19,6...49	225,6
АПН-4	39,2...68,7	323,3
АПН-5	58,9...98,1	490,5
АПН-6	88,3...147,2	588,6

пендикулярно и по оси амортизатора до 14715 мм/с^2 (АПН) и до 24500 мм/с^2 (АПНМ, АПНМТ).

Рамочные пружинно - поролоновые

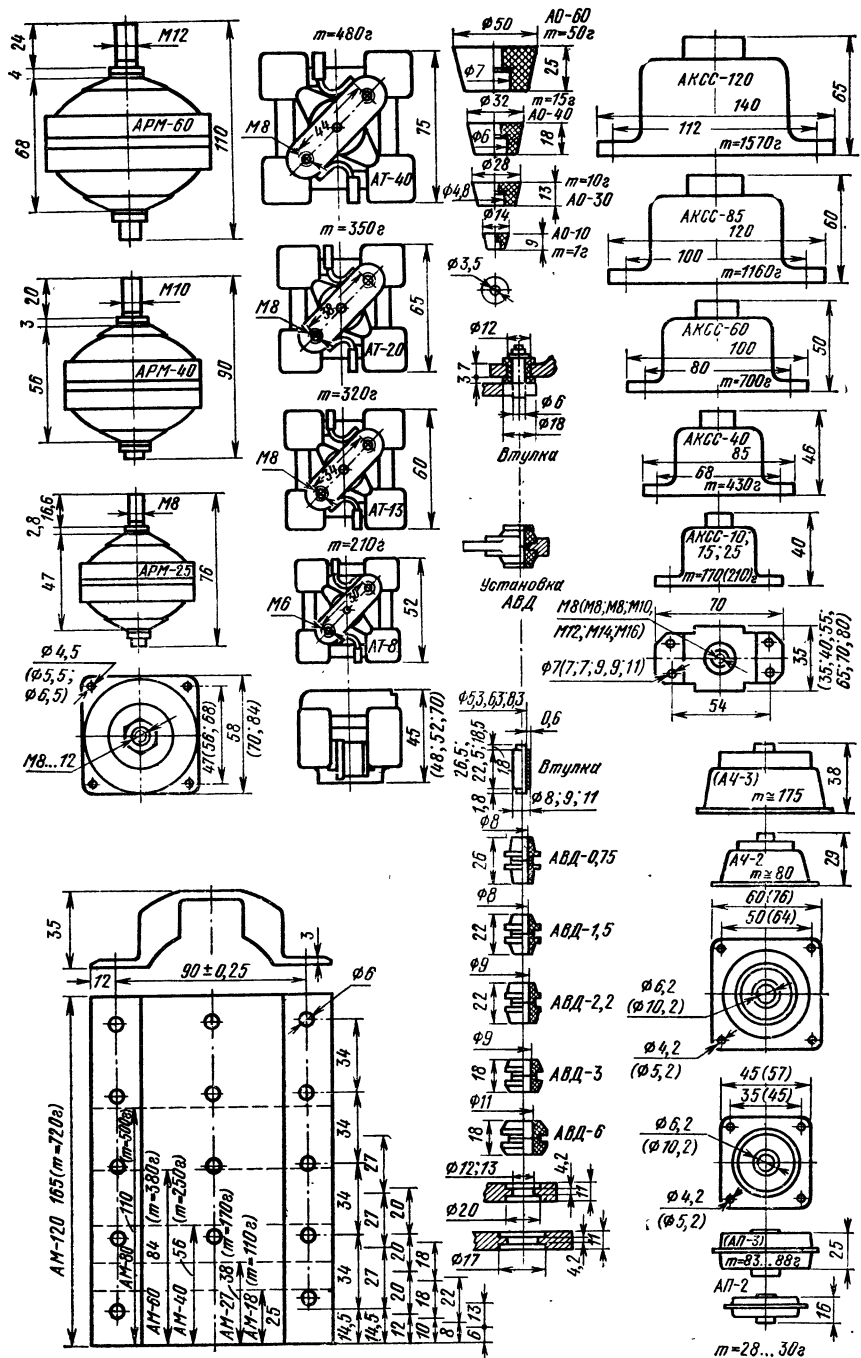
Конструктивно выполнены в виде двух плоских металлических рамок, между которыми располагается упруго-демпфирующий элемент из морозостойкого поролона ПОПУ-ЭМ-1 (ТУ-В-84-67), в окнах поролоновой подушки находятся стальные пружины сжатия. А не нормализованы, применяются для нагрузок 20... 2000 Н, $K_{\text{дин}} 2...4$ на $v_0 8...12 \text{ Гц}$ и $K_{\text{дин}} 0,1$ на $v 100 \text{ Гц}$. Защищают от У при $a = 14715 \text{ мм/с}^2$ и $t_{\text{н}} = 500 \text{ мс}$.

Резино-металлические АП и АЧ

Выпускаются по ГОСТ 11679—65 из резины марок 1847 или 2959-1 со стальной или латунной арматурой. А линейные, $K_{\text{дм}} = 0,1$ и практически не зависят от v . Резины марок 1847 и 2959-1 плохо переносят солнечную радиацию (через 20 ч воздействия поверхность резинового массива покрывается трещинами). При $\theta = 243 \text{ К}$ повышаются жесткость и $v_{\text{рез}}$, упругость уменьшается на 50%, однако при $\theta = 213 \text{ К}$ А непригодны для виброизоляции. После хранения в течение 6 мес жесткость увеличивается на 15%. Вибропрочность 40 50 ч при $a = 9810 \text{ см/с}^2$ и $v = 50 \text{ Гц}$ ударная прочность 10000 У при $a = 3875...5542 \text{ см/с}^2$ и 60 уд/мин и $t_{\text{н}} = 10...20 \text{ см}$. Срок службы 2 года, $t_{\text{хр}} = 3$ года. Применение резины марки ИРП-1379 (ВТУ-ИРП-38-19-91-65) улучшает параметры амортизаторов: ударная прочность увеличивается до 30000 ударов при $a = 14715 \text{ мм/с}^2$, 40 80 уд/мин и $t_{\text{н}} = 50...100 \text{ мс}$, срок службы 5,5 лет, $t_{\text{хр}} = 10$ лет.

Пример условного обозначения амортизатора АП серии 2 ($G_{\text{max}} 7,6 \text{ Н}$) со стальной арматурой: амортизатор АП-2-1,8-II ГОСТ 11679-75; (для латунной арматуры АП-2-1,8-ПЛ ГОСТ 11677—75).

Пример условного обозначения амортизатора АЧ серии 3 ($G_{\text{max}} 88 \text{ Н}$): амортизатор АЧ-3-9-II ГОСТ 11679—65.



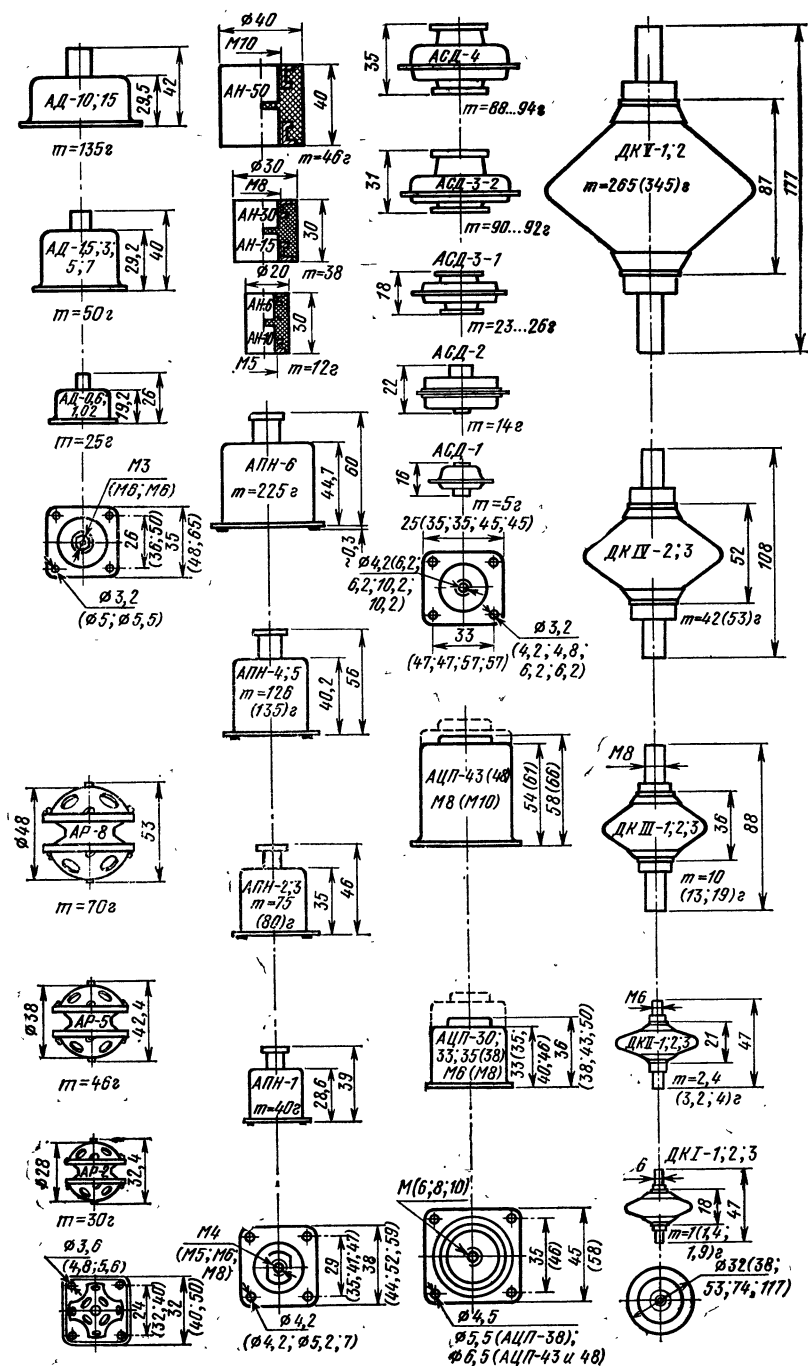


Рис. 12.8. Габаритные чертежи и масса амортизаторов

Амортизаторы АП

Типоразмеры	Группа резины	G_{max}	$K_{ам}^B$	$K_{ам}^r$
		Н	Н/см	
АП-2-0,45	I	4,4	24,5	142
АП-2-0,9	II	8,8	55,9	181
АП-2-1,35	I	13,2	78,5	210
АП-2-1,8	II	17,6	112,8	251
АП-2-2,25	I	22	130	300
АП-2-2,7	II	26,5	169	335
АП-2-3,6	II	35,3	224	471
АП-2-4,5	II	44	280	588
АП-2-5,4	II	53	336	687
АП-3-6,75	II	66	417	1226
АП-3-9	II	88	559	1373
АП-3-11,35	II	110	687	1570
АП-3-15,75	II	154	942	2099

Резинометаллические амортизаторы АСД

В качестве упруго-демпфирующего материала используется резина марки ИРП-1354 на основе силиконового каучука (ТУ 37005.1166-73). Могут выпускаться в тропическом исполнении (группа В по ГОСТ 15150-65). Вибропрочность 72 ч, ударная прочность 10 000 ударов при $a = 5886 \text{ мм/с}^2$ и $t_{и} = 500 \text{ мс}$ (многократные удары) и 10 ударов при $a = 49050 \text{ мм/с}^2$ и $t_{и} = 700 \text{ мс}$ (одиночные удары).

Линейные ускорения до 98100 мм/с^2 выдерживаются 3 мин. Срок гарантии 10 лет, гарантированная наработка $t = 500 \text{ ч}$. При хранении требуют защиты от солнечной радиации, попадания масла, бензина, керосина, газов и других разрушающих резину веществ

Рожковые амортизаторы АР

А представляют собой 10-рожек-вые упруго-демпфирующие элементы из резины марки 2959-1 с вулканизированными фигурными

Амортизаторы АЧ

Типоразмер	Группа резины	G_{max}	$K_{ам}^B$	$K_{ам}^r$
		Н	Н/см	
АЧ-2-0,45	I	4,4	28	100
АЧ-2-0,9	II	8,8	56,8	177
АЧ-2-1,35	I	13,2	85,3	177
АЧ-2-2,7	II	26,5	135	177
АЧ-2-3,6	II	35,3	279	177
АЧ-2-4,5	II	44	284	177
АЧ-2-5,4	II	53	333	177
АЧ-3-6,75	II	66	412	120
АЧ-3-9	II	88	559	120
АЧ-3-11,35	II	110	696	710
АЧ-3-15,75	II	154	912	710

Амортизаторы АСД

Типоразмер	Тип	Серия	$G_{\text{пав}}$	$K_{\text{ам}}^{\text{в}}$	$K_{\text{ам}}^{\text{г}}$
			Н	Н/см	
АСД 1-0,25	1	—	2,45	25	100
АСД 2-0,5	2	—	4,9	25	100
АСД 3-1-2	3	1	19,6	115	228
АСД 3-1-2,5	3	1	24,5	133	255
АСД 3-1-3	3	1	29,4	172	342
АСД 3-1-3,5	3	1	34,3	228	480
АСД 3-2-4,5	3	2	44	286	600
АСД 3-2-5,5	3	2	54	343	700
АСД 3-2-6	3	2	59	343	700
АСД 3-2-6,5	3	2	64	425	1250
АСД 3-2-7,5	3	2	74	425	1250
АСД 4-10	4	—	98	570	1400
АСД 4-12	4	—	118	700	1600

гайками и сферическими металлическими фланцами. Предназначены для равномерной защиты от вибраций, действующих под любым углом к плоскости установки РЭА. Остаточная деформация после приложения утроенной нагрузки 15%. Виброзащита начинается с частоты $\nu = 20$ Гц при $\theta = 288...308$ К и $\xi = 1$ мм. При пониженной температуре — с частоты 30 Гц.

Амортизаторы с регулируемой резонансной частотой АРМ

В конструкцию А входит набор алюминиевых фланцев с вкладышами из нержавеющей стали, упруго-демпфирующие элементы из материала МР и стяжной болт для регулировки $\nu_{\text{рез}}$. Сохраняют ра-

ботоспособность при действующих вдоль оси амортизатора ударах до $a = 58860$ мм/с² и $t_{\text{и}} = 50$ мс и линейных ускорениях 98100 мм/с² любого направления. $K_{\text{дин}} = 3$, при $a = 58860$ мм/с² ударные ускорения увеличиваются в 2...2,5 раза, диапазон регулировки $\nu_{\text{рез}}$ до 2 раз при $\nu_{\text{рез}} = 15...20$ Гц

Скобочные амортизаторы АМ

Частоты собственных колебаний $\nu_{\text{в}} = 20...30$, $\nu_{\text{г}} = 35...45$ Гц. Для А характерны малая вибропрочность и значительный разброс параметров. Однако благодаря простоте конструкции, малому весу, значительному прогибу и большим нагрузкам находят широкое применение.

Амортизаторы АР

Типоразмер	$G_{\text{ном}}^1$, Н	$K_{\text{ам}}^1$, Н/см	$G_{\text{ном}}^2$, Н	$K_{\text{ам}}^2$, Н/см	$G_{\text{ном}}^3$, Н	$K_{\text{ам}}^3$, Н/см
АР-2	19,6	9,8	29,4	19,6	19,6	12,8
АР-5	49	24,5	68,7	34,3	39,2	15,7
АР-8	78,5	19,6	98	32,4	58,9	19,6

Примечание. Верхние индексы 1, 2, 3 обозначают параметры соответственно при растяжении, сжатии и сдвиге.

Амортизаторы АРМ

Типоразмер	G_{\max}	$K_{\text{ам}}^B$
	H	$H/\text{см}$
АРМ-25	245,3	2250
АРМ-40	392,4	3600
АРМ-60	588,6	5400

Амортизаторы АМ

Типоразмер	$G_{\text{ном}}^B$	$G_{\text{ном}}^r$	$K_{\text{ам}}^B$	$K_{\text{ам}}^r$
	H		$H/\text{см}$	
АМ-18	176	265	353	530
АМ-27	265	392	530	785
АМ-40	392	589	785	1177
АМ-60	589	883	1177	1766
АМ-80	785	1177	1570	2354
АМ-120	1177	1766	2354	3532

Амортизаторы АН

Типоразмер	$G_{\text{ном}}^*$	$K_{\text{ам}}^B$	$K_{\text{ам}}^r$
	H	$H/\text{см}$	
АН-6	59	392	91
АН-10	98	638	147
АН-15	147	932	245
АН-30	294	1815	451
АН-50	490	3041	785

* При растяжении.

Амортизаторы АЦП

Типоразмер	$G_{\text{ном}}$	$K_{\text{ам}}^B$
	H	$H/\text{см}$
АЦП-30-0,6/10	4,9...14,7	40
АЦП-33-2/10	9,8...29,4	60
АЦП-35-3/9	24,5...44,1	140
АЦП-38-7/9	39,2...98,1	280
АЦП-43-12/9	88,3...147,2	480
АЦП-48-20/10	127,5...294,3	880

Стерженьковые амортизаторы (АН)

Работают на изгиб и сжатие, имеют малые размеры и вес, просты в изготовлении. Частоты собственных колебаний $\nu_B = 11...13$, $\nu_r = 6...8$ Гц. Виброзащита начинается с частоты $\nu 15$ Гц при $\theta = 288...308$ К и с $\nu 40$ Гц при $\theta = 223$ К и $\xi_{\text{вб}}$ до 0,5 мм. Недостаток: малая прочность крепления привулканизированных гаек.

Тросовые амортизаторы

Упруго-демпфирующий элемент выполнен из отрезка стального троса. Работоспособны в тропических условиях при Вл 100% и $\theta = 313$ К, воздействию солнечной радиации, плесневых грибов, морского (солевого) тумана.

Типоразмер	$G_{\text{ном}}^B$	$G_{\text{ном}}^r$	$K_{\text{ам}}^B$	$K_{\text{ам}}^r$
	H		$H/\text{см}$	
АТ-8	49	78,5	392,4	245,3
АТ-13	78,5	127,5	588,6	441,5
АТ-20	127,5	196,2	981	686,7
АТ-40	196,2	392,4	1668	981

Выдерживают многократные U с $a = 14715$ мм/с² и $t_{\text{ц}} = 50...100$ мс, одиночные с $a = 490500$ мм/с² и $t_{\text{ц}} = 5...20$ мс, действующие вдоль оси амортизатора. Уменьшают ударные ускорения в 1,5 раза, выдерживают линейные ускорения $a = 14715$ мм/с² в любом направлении, $K_{\text{дин}} = 2$.

Срок хранения и гарантированный срок безотказной работы — 10 лет при длительности надежной работы 2000 ч

Цельнометаллические амортизаторы
однонаправленного действия (АЦП)

Хорошо противостоят агрессивным средам и ионизирующим излучениям имеют неограниченный срок хранения, так как упруго-демпфи-

рующийся элемент выполнен из материала МР. Выдерживают U с ускорением $a = 14715 \text{ мм/с}^2$ при $t_n = 100 \text{ мс}$.

12.8. ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ ВИБРОПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ РЭА [1, 5, 13, 15]*

Элемент конструкции представляют в виде упрощенной модели, для которой определяют частоту ν_0 , смещение $\xi_{\text{расч}}$ и усилия. Различают балочные элементы (кронштейны, детали крепления, большинство ЭРЭ) и пластинчатые (монтажные платы и т. п.)

Последовательность и ограничения расчетов

Порядок выполнения оценочных расчетов следующий:

1. Выбор расчетных моделей элементов конструкции
2. Определение собственной частоты ν_0 для модели
3. Определение смещения на частоте ν_0 : $\xi_{\text{расч}} = 250 K_{\text{вб}}/\nu_0$.
4. Определение смещения

$$\xi_0 = K_{\text{див}} \xi_{\text{расч}},$$

где $K_{\text{див}} = 1/[(1 - K_z^2) + K_z^2 e^2]^{0,5}$, а e — показатель затухания. При малом e и $K_v \approx 1$ (околорезонансная область)

$$K_{\text{див}} \approx 1/e = \pi/\psi.$$

где ψ — логарифмический декремент затухания (для элементов из стеклотекстолита равен $\psi \approx 0,2$)

5. Определение нагрузки, испытываемой элементом при ξ_0 , $M_{\text{изг}}$, и напряжений от действия $M_{\text{изг}}$.

6. Сравнение полученных значений предела выносливости σ_{-1} с пределом прочности материала: $\sigma_{-1} = (0,2 \dots 0,4) \sigma_{\text{пр}}$.

Если из расчета выясняется, что вибропрочность конструкции РЭА недостаточна, то вводят добавочные крепления, ребра жесткости, отбортовки, замкнутые коробчатые конструкции. Можно использовать конструкционные материалы с хо-

рошими демпфирующими свойствами (например, магниевые сплавы) либо специальные демпфирующие покрытия. Все расчетные соотношения составлены для худшего случая воздействия вибраций перпендикулярно длинной оси или плоскости элемента

Расчетные модели элементов конструкции РЭА

Расчет балочных конструкций. К балочным элементам относят упругие тела призматической формы, высота (толщина) которых мала по сравнению с длиной. Концы могут быть жестко заземлены (прогиб и угол поворота равны нулю), оперты (прогиб и $M_{\text{изг}}$ в опоре равен нулю), свободны ($M_{\text{изг}}$ и перерезывающая сила равна нулю). Сварку и пайку приравнивают к жесткому заземлению, винтовое крепление относят (с запасом) к опоре, а при большом числе винтов — к заземлению $\nu_0 = 0,159 \alpha \sqrt{EI/ml^2}$.

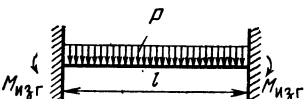
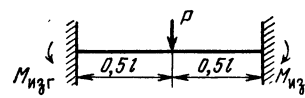
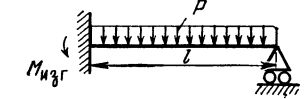
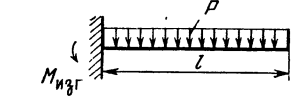
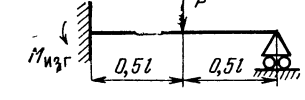
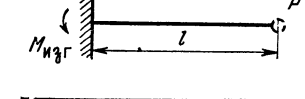
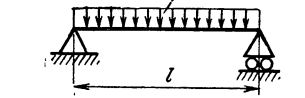
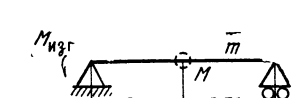
Значения ν_0 максимальных прогиба z_{max} и момента M_{max} даны в табл. 12.3, в которой E — модуль упругости, Па; J — момент инерции, м^4 ; l — длина, м; M и m — масса, кг; m' — погонная масса, кг/м; P — сила, Н. Значения модуля упругости E в Па для некоторых материалов следующие: алюминий — 70 ГПа, гетинакс — 10 ГПа, керамика — 200 ГПа, магний — 40 ГПа, сталь — 200 ГПа, стеклотекстолит — 30 ГПа.

Расчет площади S , статического момента W и момента инерции J (они не зависят от материала) характерных сечений можно выполнить по формулам табл. 12.4

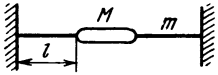
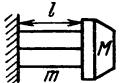
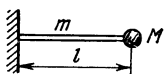
Расчет пластин с распределенной и смешанной нагрузками. К элементам пластинчатой формы относят упругие тела призматической формы, высота (толщина) которых мала по сравнению с размерами оснований. Крепление пластин к опоре может быть жестким или подвижным. Жесткое крепление (нет угловых и линейных перемещений): пайка, зажим и в некоторых случаях прижатие или крепление винтами. Шарнирная опора (нет линейного перемещения, но возможен поворот по опертой стороне); направляющие и в

* Составитель И. А. Орловская.

Расчетные схемы балочных элементов и формулы

Эскиз	z_{\max}	$M_{\text{изг}}^{\max}$	v_0
	$0,0026 Pl^3/EJ$	$0,083 Pl$	$3,53 \sqrt{EJ/l^4 m}$
	$0,0052 Pl^3/EJ$	$0,125 Pl$	$2,21 \sqrt{EJ/(M+0,74m)l^3}$
	$0,0054 Pl^3/EJ$	$0,125 Pl$	$2,47 \sqrt{EJ/l^4 m}$
	$0,125 Pl^3/EJ$	$0,5 Pl$	$0,56 \sqrt{EJ/l^4 m}$
	$0,0091 Pl^3/EJ$	$0,187 Pl$	
	$0,33 Pl^3/EJ$	Pl	$0,55 \sqrt{EJ/(M+0,24m)l^3}$
	$0,013 Pl^3/EJ$	$0,125 Pl$	$1,58 \sqrt{EJ/l^4 m}$
	$0,021 Pl^3/EJ$	$0,25 Pl$	$1,1 \sqrt{EJ/l^3 M}$ $M_1 = M + 0,485 ml$

Расчет v_0 элементов

Эскиз	элемент	$M_{\text{изг}}^{\text{max}}$	v_e
	С, R, диод	—	$0,78\sqrt{EJ/(M+0,74m)l^3}$
	МФУ, ИС, транзистор	—	$0,55 \times \sqrt{EJ/(M+0,37km)l^3}$ k — число выводов
	Реле, контакт	—	$0,55\sqrt{EJ/(M+0,24m)l^3}$

некоторых случаях закрепление винтами или разъемом. Свободная сторона пластины допускает линейные и угловые перемещения. К пластинчатым элементам приложена распределенная нагрузка, сосредоточенная из-за большой плотности монтажа встречается редко.

Собственная частота пластин с распределенной нагрузкой:

$$v_0 = 0,159K_\alpha \sqrt{D/m''}/a^2,$$

где K_α вычисляется по формулам табл. 12.5, a и b — длина и ширина платы, $D = 0,09 Eh^3$ — жесткость платы, h — толщина, $m'' = G/abg$ — распределенная по площади масса, (G — вес платы с ЭРЭ, g — ускорение свободного падения).

Для пластин с числом точек крепления $n=4, 5$ или 6 [16]:

$$v_0 = 1,57(A + 1/b^2) \sqrt{D/m''},$$

где $A = 1/a^2$ ($n=4$), $A = 4/(a^2 + b^2)$ ($n=5$) и $A = 0,25/a^2$ ($n=6$).

Если масса m сосредоточена в центре платы, а по площади распределена масса m'' , то

$$v_0 = 0,159K_\alpha \sqrt{D/m''(1 + 4M/m''ab)}/a^2$$

где K_α выбирается из табл. 12.5

Расчет пластинчатых элементов с ребрами жесткости. Для пластинча-

того шарнирно опертого по контуру элемента с ребрами жесткости:

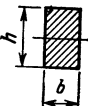
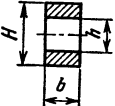
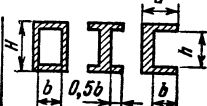

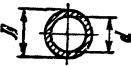
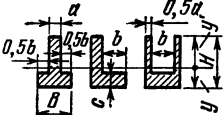
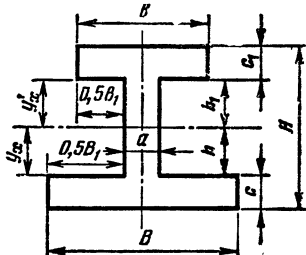

$$v_0 = \sqrt{\frac{2,47B_1 g [1 + (r+1) a^3 \times B/(p_1+1)b^3 B_1 + (\alpha_1/\{p+1\})(a^2/b^2 + 1)^2]}{b^3 q_1 [1 + (r+1)q/(p+1) \times q_1 + G/(p+1)q]}}$$

при наличии ребер жесткости только по оси X















$$v_0 = \sqrt{\frac{2,47B_1 \{1 + [\alpha_1 b^3 \times (a^2/b^2)]/a^3(r+1)\}}{a^3 q [1 + G/(r+1)q]}}$$



















где B — жесткость ребер, параллельных оси X ($B = EJ$), E — модуль упругости материала ребра по оси X , J — момент инерции сечения ребра по оси X ; B_1 — жесткость ребер, параллельных оси Y ($B_1 = EJ_1$, J_1 — момент инерции сечения ребра по оси Y); q — вес одного ребра, параллельного оси X ($q = S\gamma a$, S — площадь сечения ребра, γ — удельный вес материала ребра, a — длина ребра или сторона пластины); q_1 — вес одного ребра, параллельного оси Y ; S_1 — площадь сечения ребра, b — длина ребра или сторона пластины); r — число ребер, параллельных оси X ; p — число ребер, параллель-

Сечения балочных элементов и формулы для определения параметров






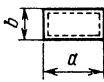
					
S	bh	$b(H-h)$	$BH - bh$	$0,785 D^2$	$0,785 (D^2 - d^2)$
J	$\frac{83bh^3}{1000}$	$\frac{83(H^3 - h^3)b}{1000}$	$\frac{83(BH^3 - bh^3)}{1000}$	$0,05D^4$	$0,05 (D^4 - d^4)$
W	$0,17 bh^2$	$\frac{17(H^3 - h^3)b}{100H}$	$\frac{83(BH - bh^3)}{1000H}$	$0,1 D^3$	$\frac{D^4 - d^4}{10D}$
					
S	$aH + bo$	$bc_1 + a(h + h_1) + Bo$	$\delta(a + b)$		
J	$0,33(By_x^3 - bh^3 + ay_x'^3);$	$0,33 (By_x^3 - B_1h^3 + by_x'^3 - b_1h_1^3);$	$0,33 [\delta(h - y_x)^3 + ay_x^3 - d(y_x - \delta)^3];$		
W	$y_x = \frac{0,5(aH^2 + bc^2)}{aH + bo};$ $y_x' = H - y_x$	$y_x = 0,5[aH^2 + B_1c^2 + b_1c_1 \times (2H - c_1)]; (aH + B_1c + b_1c_1)$	$y_x = \frac{0,5(h^2 + d\delta)}{h + d}$		

Эскизы закрепления пластин

Эскизы	$K\alpha$	Эскизы	$K\alpha$
	$9,87 (1 + a^2/b^2)$		$3,52 \sqrt{1 + 2,48 a^2/b^2 + a^4/b^4}$
	$9,87 \sqrt{1 + 2,33 a^2/b^2 + 2,44 a^4/b^4}$		22,37
	$15,42 \sqrt{1 + 0,95 a^2/b^2 + 0,41 a^4/b^4}$		$22,37 a^2/b^2$
	$9,87 \sqrt{1 + 2,57 a^2/b^2 + 5,14 a^4/b^4}$		3,52
	$22,37 \sqrt{1 + 0,48 a^2/b^2 + 0,19 a^4/b^4}$		$3,52 a^2/b^2$
	$15,42 \sqrt{1 + 1,11 a^2/b^2 + a^4/b^4}$		15,42
	$22,37 \sqrt{1 + 0,57 a^2/b^2 + 0,47 a^4/b^4}$		$15,42 a^2/b^2$

	$15,42 \sqrt{1+1,19 \frac{a^3}{b^2}+2,1 \frac{a^4}{b^4}}$		$3,52 \sqrt{1+5,56 \frac{a^2}{b^2}+19,2 \frac{a^4}{b^4}}$
	$22,37 \sqrt{1+0,61 \frac{a^3}{b^2}+a^4/b^4}$		$15,42 \sqrt{1+0,29 \frac{a^2}{b^2}+0,05 \frac{a^4}{b^4}}$
	$3,52 \frac{a}{b}$		$3,52 \sqrt{1+1,58 \frac{a^2}{b^2}}$
	$9,87 \frac{a^2}{b^3}$		$3,52 \sqrt{1,58 \frac{a^2}{b^2}+a^4/b^4}$
	9,87		$22,37 \sqrt{0,1 \frac{a^2}{b^2}+a^4/b^4}$
	$9,87 \sqrt{0,43 \frac{a^2}{b^2}+a^4/b^4}$		$22,37 \sqrt{1+0,1 \frac{a^2}{b^2}}$
	$9,87 \sqrt{1+0,43 \frac{a^2}{b^2}}$		$15,42 \sqrt{0,34 \frac{a^2}{b^2}+a^4/b^4}$
	$3,52 \sqrt{1+5,97 \frac{a^2}{b^2}+40,5 \frac{a^4}{b^4}}$		$15,42 \sqrt{1+0,34 \frac{a^2}{b^2}}$
	$22,37 \sqrt{1+0,14 \frac{a^2}{b^2}+0,02 \frac{a^4}{b^4}}$		a — длинная сторона b — короткая сторона

Эскизы закрепления ортотропных пластин

Эскиз	Коэффициент α
	$\sqrt{4,5 \left(\frac{b}{a}\right)^4 + 2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + 4,5 \frac{D_2}{D_1}}$
	$\sqrt{4,5 \left(\frac{b}{a}\right)^4 + 4 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + 7 \frac{D_2}{D_1} - 2 \sqrt{5,5 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{b}{a}\right)^4 + \left(\frac{D_k}{D_1}\right)^2 + 4,25 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k D_2}{D_1^2}}}$
	$\sqrt{1,44 \left[\left(\frac{b}{a}\right)^4 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + \frac{D_2}{D_1} \right]}$
	$\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^4 + 2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + 4,5 \frac{D_2}{D_1}}$
	$\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^4 + 4 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + 7 \frac{D_2}{D_1} - 2 \sqrt{5,5 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{b}{a}\right)^4}} \times \sqrt{\frac{D_k}{D_1} + 4,25 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k D_2}{D_1^2}}$
	$\sqrt{1,1 \left(\frac{b}{a}\right)^4 + 2,09 \left(\frac{b}{a}\right)^2 \frac{D_k}{D_1} + \frac{D_2}{D_1}}$

ных оси Y ; $\alpha_1 = aD/B_1$; G — вес всей плиты.

Расчет ортотропных и круглых пластин. Ортотропные пластины имеют неодинаковые упругие свойства по осям координат. Для них

$$\nu_0 = 1,57\alpha \sqrt{D_1/m''/b^2},$$

где α — коэффициент, учитывающий характер закрепления (табл. 12.6), b — сторона пластины, m'' — масса, распределенная по площади пласти-

ны, D_1 , D_2 , D_3 , D_k — жесткости пластин, а E_1 , E_2 , G — модули растяжения и сдвига в осевых направлениях, μ_1 , μ_2 — коэффициенты Пуассона в направлениях ортотропии

$$D_1 = 0,083 E_1 h^3/(1-\mu_1\mu_2),$$

$$D_2 = 0,083 E_2 h^3/(1-\mu_1\mu_2),$$

$$D_3 = D_2\mu_1 + 2D_k,$$

$$D_k = 0,083 Gh^3.$$

Для круглых пластин (жестко закрепленных по контуру)

$$\nu_0 = 1,63 \sqrt{D/m''/R^2} \text{ [Гц]},$$

где R — радиус пластины, D — жесткость $D=0,09 Eh^3$, m'' — распределенная по площади масса пластины, $m'' = 0,318 m/R^2$.

Для приближенного определения частоты собственных колебаний ЭЛ конструкции, представленного балочной или пластинчатой моделью, можно пользоваться формулой Гейгера [15]

$$\nu_0 \approx 0,5/\sqrt{z} \text{ [Гц]},$$

где z — прогиб, м.

12.9. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ *

1. Приближенное определение $\xi_{6л}^{\max}$

Дано: $m = 16$ кг, $a = 1,2$ г ($a = 1,2 \cdot 981 = 1177,2$ см/с²), $\nu = 15$ Гц, $K_{\Sigma} = 486$ Н/мм, $\xi_{6л} = 2$ мм. Условие применимости формулы (12.2) $K_{\Sigma} \ll 0,102 m (2\pi\nu)^2$, $486 \ll 0,102 \times 16 (2 \cdot \pi \cdot 15)^2 = 14496$ Н/мм; $\xi_{6л}^{\max} = 0,25 a/\nu^2 = 0,25 \cdot 1177,2/225 = 1,308 < 2$, $\xi_{6л}^{\max} < \xi_{6л}$ — СА будет работать нормально.

2. Определение требуемой массы

Дано: $m = 8$ кг, $a = 1$ г ($a = 981$ см/с²), $\nu = 8$ Гц, $K_{\Sigma} = 486$ Н/мм, $\xi_{6л} = 2$ мм.

Условие применимости приближенной формулы (12.2): $K_{\Sigma} \ll 0,102 m (2\pi\nu)^2$; $486 \ll 0,102 \times 8 (2\pi 8)^2 = 2062$,

$$\xi_{6л}^{\max} = 0,25 a/\nu^2 = 0,25 \cdot 981/64 \cong 3,83 > 2.$$

Для соблюдения условия $\xi_{6л}^{\max} < \xi_{6л}$ необходимо иметь $m = 250 m/\xi_{6л}\nu^2 = 250 \cdot 8/2 \cdot 64 = 15,625$, т. е. требуемая масса почти вдвое больше, чем имеющаяся.

* Составители Р. Г. Варламов, В. Б. Карпушин, И. А. Орловская.

3. Определение коэффициентов

$K_{\text{дин}}$, ν_0 и $K_{\text{ам}}$

Дано: $m = 6$ кг, $\nu_1 \dots \nu_2 = 20 \dots 50$ Гц при $K_{вб1} \dots K_{вб2} = 2 \dots 4$, $K_{вб} = 0,6$; демпфирование незначительное, возбуждение кинематическое.

По формуле (12.3) находим

$$K_{\text{дин}} = K_{вб}/K_{вбi} = 0,6/(2 \dots 4) = 0,3 \dots 0,15.$$

По формуле (12.3а) имеем

$$\nu_0 = \nu_i \sqrt{K_{\text{дин}i}/(1 + K_{\text{дин}i})};$$

$$\nu = 20 \text{ Гц}, \nu = 50 \text{ Гц},$$

$$\nu_0 = 20 \sqrt{0,3/(1 + 0,3)} = 4,62 \text{ Гц},$$

$$\nu_0 = 50 \sqrt{0,15/(1 + 0,15)} = 18,06 \text{ Гц},$$

$$K_{\nu} = \nu_i/\nu_0; K(20) = 20/4,62 = 4,33,$$

$$K(50) = 50/18,06 = 2,77.$$

По формуле (12.5) находим

$$\begin{aligned} K_{\text{дм}} &= \sqrt{\{K_{\text{дин}}^2(1 - K_{\nu}^2)^2 - 1\}/4K_{\nu}^2 \times} \\ &\times (1 - K_{\text{дин}}^2) = \sqrt{\{0,3^2(1 - 4,33^2)^2 - 1\}/4 \cdot 4,33^2(1 - 0,3^2)} = \\ &= 0,645 (20 \text{ Гц}), \\ &\sqrt{\{0,15^2(1 - 18,06^2)^2 - 1\}/4 \times} \\ &\times 10,82^2(1 - 0,15^2) = 0,812 (50 \text{ Гц}). \end{aligned}$$

Вычисляем коэффициент динамичности (12.8)

$$\begin{aligned} K_{\text{дин}} &= \sqrt{(1 + 4K_{\nu}^2 K_{\text{дм}}^2)/\{(1 -} \\ &- K_{\nu}^2)^2 + 4K_{\nu}^2 K_{\text{дм}}^2\}} = \sqrt{(1 + 4 \cdot 4,33^2 \times} \\ &\times 0,645^2)/\{(1 - 4,33^2)^2 +} \\ &+ 4 \cdot 4,33^2 \cdot 0,645^2\}} = 0,305 (20 \text{ Гц}), \\ &\sqrt{(1 + 4 \cdot 10,82^2 \cdot 0,812^2)/\{(1 -} \\ &- 10,82^2)^2 + 4 \cdot 10,82^2 \cdot 0,812^2\}} = \\ &= 0,15 (50 \text{ Гц}). \end{aligned}$$

По заданным $K_{вб1} = 2$, $K_{вб2} = 4$, $K_{\text{дин}} = 0,305$, $K_{\text{дин}} = 0,15$ находим расчетное значение

$$K_{вб} = K_{\text{дин}}/K_{вбi} = 0,305/2 =$$

$$= 0,1525 (20 \text{ Гц});$$

$$0,15/4 = 0,0375 (50 \text{ Гц}).$$

Полученные значения меньше заданного $K_{\text{вб}} = 0,6$ и согласно (12.9) получаем $K_{\Sigma} = 0,392 \text{ мв}^2 = 0,392 \cdot 6 \cdot 4,62^2 = 50,2 \text{ Н/см}$

Для четырех А $K_{\text{ам}i} = K_{\Sigma}/4 = 50,2/4 = 12,55 \text{ Н/см}$. Подходит А типа АД-0,6 ($K_{\text{ам}} = 11,8 \text{ Н/см}$, нагрузка на 4 А 12...24 Н)

4. Расчет и подбор А с учетом координат их расположения

Дано: $m = 22 \text{ кг}$, схема расположения А дана в табл. 12.1: $a_1 = 200 \text{ мм}$, $a_2 = b_1 = 100 \text{ мм}$, $b_2 = 60 \text{ мм}$ ($x_1 = 200 \text{ мм}$, $y_1 = 100 \text{ мм}$, $x_2 = -100 \text{ мм}$, $y_2 = 100 \text{ мм}$, $x_3 = -100 \text{ мм}$, $y_3 = -60 \text{ мм}$, $x_4 = 200 \text{ мм}$, $y_4 = -60 \text{ мм}$), $v_1 \dots v_2 = 50 \text{ 200 Гц}$. Выбрать тип А и определить $K_{\text{дин}}$. Определяем реакции по формулам (3) табл. 12.1:

$$R_1 = 22 \cdot 9,81 \frac{100 \cdot 60}{(200 + 100)(100 + 60)} = 26,98 \text{ Н},$$

$$R_2 = 22 \cdot 9,81 \frac{200 \cdot 60}{(200 + 100)(100 + 60)} = 53,95 \text{ Н},$$

$$R_3 = 22 \cdot 9,81 \frac{200 \cdot 100}{(200 + 100)(100 + 60)} = 89,92 \text{ Н},$$

$$R_4 = 22 \cdot 9,81 \frac{100 \cdot 100}{(200 + 100)(100 + 60)} = 44,96 \text{ Н}.$$

Проверяем соблюдение дополнительного условия с учетом знаков координат заменой a_i и b_i на $\pm x_i$ и $\pm y_i$:

$$\sum_4 R_i x_i y_i = 26,98 \cdot 200 \cdot 100 + 53,95 \cdot (-100) \cdot 100 + 89,92 \cdot (-100) \cdot (-60) + 44,96 \cdot 200 \cdot (-60) = 0.$$

Переходим к выбору типа амортизаторов. По условиям нагружения можно использовать АПН-3 (Г 19,6...49 Н, $K_{\text{ам}}^B 225,6 \text{ Н/см}$) АПН-4 (Г 39,2...68,7 Н, $K_{\text{ам}}^B 323,3 \text{ Н/см}$), АПН-5 (Г 58,9...98,1 Н, $K_{\text{ам}}^B 588,6 \text{ Н/см}$) и еще один АПН-3.

Определяем статические прогибы А по формуле

$$z_{i \text{ стп}} = R_i / K_{\text{ам}}^B i:$$

$$z_{1 \text{ стп}} = 26,98 / 225,6 = 0,119 \text{ см} \cong 1,2 \text{ мм},$$

$$z_{2 \text{ стп}} = 53,95 / 323,3 = 0,167 \cong 1,7 \text{ мм},$$

$$z_{3 \text{ стп}} = 89,92 / 588,6 = 0,153 \cong 1,5 \text{ мм},$$

$$z_{4 \text{ стп}} = 44,96 / 225,6 = 0,199 \cong 2 \text{ мм}.$$

Определяем толщину компенсирующих прокладок, положив $\delta_{\text{кп}1} = 0$. Тогда $\delta_{\text{кп}2} = z_{2 \text{ стп}} - z_{1 \text{ стп}} = 1,7 - 1,2 = 0,5 \text{ мм}$, $\delta_{\text{кп}3} = z_{3 \text{ стп}} - z_{1 \text{ стп}} = 1,5 - 1,2 = 0,3 \text{ мм}$, $\delta_{\text{кп}4} = z_{4 \text{ стп}} - z_{1 \text{ стп}} = 2 - 1,2 = 0,8 \text{ мм}$.

Определим $K_{\Sigma} = K_{\text{ам}1} + K_{\text{ам}2} + K_{\text{ам}3} + K_{\text{ам}4} = 225,6 + 323,3 + 588,6 + 225,6 = 1363,1 \text{ Н/см}$. а по ней и формуле (12.9)

$$v_0 = 1,6 \sqrt{K_{\Sigma} / m} = 1,6 \sqrt{1363,1 / 22} = 13 \text{ Гц}.$$

На частоте $v_1 = 50 \text{ Гц}$ ($K_v = 50 / 12,6 = 3,97$), полагая $K_{\text{дм}} = 0$ (12.6), находим

$$K_{\text{дин}} = 1 / (K_v^2 - 1) = 1 / (3,97^2 - 1) = 0,068.$$

Зная $K_{\text{дин}}$ и требование ТЗ, можно определить пригодность полученной СА для заданных условий эксплуатации.

5. Выбор амортизатора и расчет толщины прокладок при пространственной схеме нагружения

Дано: $m = 7 \text{ кг}$, размеры блока $A \times B \times G = 0,42 \times 0,12 \times 0,28 \text{ м}$, ЦТ совпадает с геометрическим центром, расстояние от нижней плоскости блока до основания выбираем равным $0,03 \text{ м}$, схема симметрична относительно плоскости XOZ : $x_1 = -x_2 = x_3 = x_4 = 0,11 \text{ м}$, $y_1 = y_2 = y_3 = y_4 = h = 0,06 + 0,03 = 0,09 \text{ м}$; $z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = 0,18 \text{ м}$.

Из задания и условий симметричности следует: $R_{1x} = R_{2x} = R_{3x} = R_{4x} = 0$; $R_{1y} = R_{2y}$; $R_{3y} =$

$= R_{4y}$; $R_{12} = R_{22}$; $R_{3z} = R_{4z}$, а отсюда из системы уравнений (12.11), в которой $\sum^4 R_{ix} = 0$; $\sum^4 (R_{ix} y_i - R_{iy} x_i) \equiv 0$ и $\sum^4 (R_{ix} z_i \equiv R_{iz} \times x_i) \equiv 0$, получим только три исходных уравнения для определения четырех реакций: $\sum^4 R_{iy} = 0$; $\sum^4 R_{iz} = m_z g$; $\sum^4 (R_{iy} z_i - R_{iz} y_i) = 0$, что требует дополнительного четвертого условия $R_{1z} = R_{3z}$.

Тогда

$$\begin{aligned} R_{1z} &= R_{2z} = R_{3z} = R_{4z} = mg/4 = \\ &= 7 \cdot 9,81/4 = 17,17 \text{ Н}, \\ R_{1y} &= R_{2y} = -mgh/4b = \\ &= -7 \cdot 9,81 \cdot 0,09/4 \cdot 0,18 = -8,58 \text{ Н}; \\ R_{3y} &= R_{4y} = 8,58 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Подходящим типом А будет АСД 3-1-2 с допустимой нагрузкой 19,6 Н, $K_{x,y} = 115 \text{ Н/см}$, $K_z = 228 \text{ Н/см}$.

Определяем статические прогибы А:

$$\begin{aligned} z_{1\text{стц}} &= z_{2\text{стц}} = z_{3\text{стц}} = z_{4\text{стц}} = \\ m_z g/4K_{\text{ам}z} &= 7 \cdot 9,81/4 \cdot 228 = 0,075 \text{ см}, \\ y_{1\text{стц}} &= y_{2\text{стц}} = -mgh/4bK_{\text{ам}y} = \\ &= -7 \cdot 9,81 \cdot 9/4 \cdot 18 \cdot 115 = -0,075 \text{ см}, \\ y_{3\text{стц}} &= y_{4\text{стц}} = 0,075. \end{aligned}$$

Определяем $\delta_{\text{кп}}$ для А 3 и 4:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{кп}} &= y_{3\text{стц}} - y_{1\text{стц}} = mgh/2bK_{\text{ам}y} = \\ &= 7 \cdot 9,81 \cdot 9/2 \cdot 18 \cdot 115 = 0,149 \text{ см} \cong \\ &\cong 1,5 \text{ мм}. \end{aligned}$$

6. Определение шести собственных частот

Дано (см. рис. 12.3, а): $m = 32 \text{ кг}$, $N = 4$, А типа АСД 3-2-7,5 с $K_z = 425 \text{ Н/см}$ и $K_x = K_y = 1250 \text{ Н/см} = 125000 \text{ Н/м}$, размеры блока $A \times B \times C = 0,8 \times 0,42 \times 0,28 \text{ м}$, точки крепления А + + 0,08 м и В — 0,08 м.

Проверяем симметричность установки амортизаторов:

$$\begin{aligned} -A1 &= -A2, \quad A3 = A4; \quad B1 = \\ &= B4, \quad -B2 = -B3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum^4 A_i &= -0,88 - 0,88 + 0,88 + 0,88 = \\ &= 0, \quad \sum^4 B_i = 0,34 - 0,34 - 0,34 + \\ &+ 0,34 = 0. \end{aligned}$$

Условие симметричности соблюдается, можно использовать упрощенные формулы (12.12). Вычисляем J , K , $\sum A^2$ и $\sum B^2$:

$$\begin{aligned} J_x &= 0,083 \text{ м} (A^2 + C^2) = 0,083 \times \\ &\times 32 (0,8^2 + 0,28^2) = 1,908 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, \\ J_y &= 0,083 \text{ м} (A^2 + B^2) = 0,083 \times \\ &\times 32 (0,8^2 + 0,42^2) = 2,168 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, \\ J_z &= 0,083 \text{ м} (B^2 + C^2) = 0,083 \times \\ &\times 32 (0,42^2 + 0,28^2) = 0,677 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, \\ K_z^\Sigma &= 4K_z = 4 \cdot 42500 = 170\,000 \text{ Н/м}, \end{aligned}$$

$$K_{xy}^\Sigma = 4K_{xy} = 4 \cdot 125\,000 = 500\,000 \text{ Н/м},$$

$$\sum^4 A^2 = \sum^4 0,88^2 = 3,098,$$

$$\sum^4 B^2 = \sum^4 0,34^2 = 0,462.$$

Определяем шесть значений ν_{0i} . Частоты в продольном и поперечном направлениях $\nu_{01} = \nu_{02} =$
 $= \sqrt{0,025 K_{x,y}/m} =$
 $= \sqrt{0,025 \cdot 500\,000/32} = 19,8 \text{ Гц},$
 в вертикальном направлении

$$\begin{aligned} \nu_{03} &= \sqrt{0,025 K_z/m} = \\ &= \sqrt{0,025 \cdot 170\,000/32} = 12 \text{ Гц}, \end{aligned}$$

частота продольной качки

$$\begin{aligned} \nu_{04} &= \sqrt{0,025 K_x \sum A^2/J_x} = \\ &= \sqrt{0,025 \cdot 500\,000 \cdot 3,098/1,908} = \\ &= 142 \text{ Гц}, \end{aligned}$$

боковой качки

$$\begin{aligned} \nu_{05} &= \sqrt{0,025 K_z \sum B^2/J_y} = \\ &= \sqrt{0,025 \cdot 170\,000 \cdot 0,462/2,168} = 30 \text{ Гц}, \end{aligned}$$

рыскания $\nu_{06} =$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{0,025 (K_x \sum A^2 + K_y \sum B^2)/J_z} = \\ &= \sqrt{0,025 (500\,000 \cdot 3,098 + 500\,000 \cdot 0,462)/0,677} = 187 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

7. Определение $\xi_{\text{бл}}^{\text{max}}$, $a_{\text{бл}}^{\text{max}}$ и $K_{\text{уд}}$

Блок, установлен на А с упругими ограничителями хода и без них, нагрузка ударная.

Дано: $m = 24$ кг, $K_{\text{ам1}} = 700$ Н/см $= 70000$ Н/м, $K_{\text{ам2}} = 6000$ Н/см $= 600\,000$ Н/м, $z = 0,3$ см $= 0,003$ м, $a = 20$ г $(196,2 \text{ м/с}^2)$, $t_{\text{и}} = 0,01$ с.

Последовательно определяем:

$$\begin{aligned}\omega^2 &= (K_{\text{ам1}} + K_{\text{ам2}})/m = \\ &= (70\,000 + 60\,000)/24 = 27917 \text{ с}^{-2}, \\ \omega_1^2 &= K_{\text{ам1}}/m = 70\,000/24 = 2917 \text{ с}^{-2}, \\ \omega_2^2 &= K_{\text{ам2}}/m = 600\,000/24 = 25\,000 \text{ с}^{-2}, \\ \xi_{\text{бл}}^{\text{max}} &= \\ &= (z\omega_2^2 - \sqrt{\omega^2 a^2 t_{\text{и}}^2 - z^2 \omega_1^2 \omega_2^2})/\omega^2 = \\ &= 0,003 \cdot 25\,000 = \\ &= \sqrt{27916,7 \cdot 196,2^2 \cdot 0,01^2} \rightarrow \\ &\rightarrow 0,003 \cdot 2916,7 \cdot 25000 / 27916,7 = \\ &= -0,009 \text{ м} = -0,9 \text{ см}, \\ a_{\text{бл}}^{\text{max}} &= \omega^2 \xi_{\text{бл}}^{\text{max}} - \omega_2^2 z = \\ &= 27\,916,7 \cdot (-0,009) - 25\,000 \cdot 0,003 = \\ &= -326,25 \text{ м/с}^2 \approx -33g, \\ K_{\text{уд}}^{\text{max}} &= a_{\text{бл}}^{\text{max}}/a = 33/22 = 1,5.\end{aligned}$$

При отсутствии ограничителей

$$\begin{aligned}\xi_{\text{бл}}^{\text{max}} &= \\ &= (-\sqrt{\omega^2 a^2 t_{\text{и}}^2 - z^2 \omega_1^2})/\omega^2 = \\ &= (-\sqrt{27916,7 \cdot 196,2^2 \cdot 0,01^2} \rightarrow \\ &\rightarrow -0,003 \cdot 2916,7)/27916,7 = \\ &= -0,0363 \text{ м} \approx -3,63 \text{ см}, \\ a_{\text{бл}}^{\text{max}} &= \omega_1^2 \xi_{\text{бл}}^{\text{max}} = 2916,7 \cdot (-0,0363) = \\ &= -105,88 \text{ м/с}^2 \approx -10g, \\ K_{\text{уд}}^{\text{max}} &= a_{\text{бл}}^{\text{max}}/a = 10/20 = 0,5.\end{aligned}$$

Таким образом, при жестких А и малом ходе перегрузка при ударе возрастает. Если есть возможность увеличить ход, то возможно уменьшение перегрузки.

8. Расчет на вибропрочность

Дано: элемент конструкции в виде кронштейна (схема 4, табл. 12.4), $m = 0,035$ кг, $l = 0,06$ м, материал сплав АМц, $E = 70$ ГПа, $\Delta v = 5 \dots 2000$ Гц при $a = 1 \dots 10$ г. Сечение элемента конструкции в виде равнополочного уголка $\delta = 0,0015$ м и $a = 0,01$ м.

Погонная масса

$$m' = 0,035/0,06 = 0,583 \text{ кг/м}.$$

Момент инерции сечения

$$J_x = 0,166 \delta a^3 = 0,166 \cdot 0,0015 \times \times 0,01^3 = 2,49 \cdot 10^{-10} \text{ м}^4.$$

Частота собственных колебаний

$$\begin{aligned}v_0 &= 0,56 \sqrt{FJ/m'/l^2} = \\ &= 0,56 \sqrt{0,7 \cdot 10^{11} \cdot 2,49 \cdot 10^{-10}} \rightarrow \\ &\rightarrow 0,83/0,06^2 = 850 \text{ Гц}.\end{aligned}$$

Коэффициент вибрационной перегрузки

$$\begin{aligned}K_{\text{вб}} &= v_0 a_{\text{max}}/v_{\text{max}} = \\ &= 850 \cdot 10/2000 = 4,25,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{амплитуда } \xi &= 250 K_{\text{вб}}/v^2 = 250 \times \\ &\times 4,25/850^2 = 0,00147 \text{ мм}\end{aligned}$$

Для сплава АМц $\psi \approx 0,1$ и $K_{\text{дин}} = \pi/\psi = 3,14/0,1 = 31,4$. Отсюда $\xi_0 = \xi K_{\text{дин}} = 0,00147 \cdot 31,4 = 0,0462$ мм.

Определяем усилие из формулы $z = 0,125 P l^3 / EJ$, полагая $z = \xi_0$:

$$P = 8EJ\xi_0/l^3 = 8 \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 2,49 \times \times 10^{-10} \cdot 0,0462 / 0,06^3 = 29,82 \text{ Н}.$$

Изгибающий момент от этой силы

$$\begin{aligned}M &= 0,5 P l = 0,5 \cdot 29,82 \cdot 0,06 = \\ &= 0,8946 \text{ Н} \cdot \text{м}, \\ \text{напряжение:}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= M/W = 0,8946/3,57 \cdot 10^{-10} = \\ &= 0,250 \cdot 10^{10} = 250 \cdot 10^7 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Для материала АМц $\sigma_{-1} = 7 \times \times 10^7$ Па, что существенно меньше напряжений, возникающих при резонансе.

Изменим схему закрепления на вариант табл. 12.1. В этом случае v_0 возрастает в 6,25 раза $(3,5/0,56 =$

$= 6,25$) и будет равна $6,25 \cdot 850 = 5312,5$ Гц.

В этом случае частота ν_0 находится вне диапазона действующих на РЭА частот, резонансные явления не возникнут и нет необходимости продолжать расчет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев И. В., Тимофеев П. Г. Колебания упругих систем в авиационных конструкциях и их демпфирование. — М.: Машиностроение, 1965.
2. Бидерман В. О., Сухова Н. А. Определение сдвиговой жесткости сжатых резиновых амортизаторов. — Известия вузов СССР. Сер. Машиностроение, 1966, № 4.
3. Борьба с шумом/Под ред. Е.А. Юдина. — М.: Стройиздат, 1964.
4. Большаков Б. В., Николин Д. П. А. с. № 198839 (СССР). — Оpubл. в Б. И. 1967, № 4.
5. Вайнберг Д. В. Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин. — Киев: Будивельник, 1973.
6. Варламов Р. Г. Компонировка радиоэлектронной аппаратуры. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Сов. радио, 1975.
7. Вольперт Э. Г. Динамика амортизаторов с нелинейными уп-

ругими элементами. — М.: Машиностроение, 1972.

8. Ильинский В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий. — М.: Энергия, 1970.
9. Иорис Ю. И. Виброметрия. — М.: Машгиз, 1963.
10. Карпушин В. Б. Вибрация и удары в радиоаппаратуре. — М.: Сов. радио, 1971.
11. Карпушин В. Б. Виброшумы радиоаппаратуры. — М.: Сов. радио, 1977.
12. Колосовский М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем. — М.: Наука, 1966.
13. Коненков Ю. К., Ушаков И. А. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках. — М.: Сов. радио, 1975.
14. Круковский П. С. Особенности упругих и демпфирующих свойств эластичного пенополиуретана. — Вибрационная техника /МДНТП. — М., 1968.
15. Орловская И. А. Расчет частот собственных колебаний плат радиотехнических блоков. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 1967, вып. 7.
16. Пузиков А. А., Кузьмич А. Н. Определение частот и форм собственных колебаний четырехопорных печатных плат малогабаритных ЦВМ. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 1967, вып. 3.

13. ЗАЩИТА РЭА ОТ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Список аббревиатур

АМ — аппаратная машина
Вл — влажность относительная
ЕК — естественная конвекция
ЕВ — естественная вентиляция
ИС — микросхема интегральная
КК — кассетная конструкция
МС — микросборка
ОР — определяющий размер
НЗ — нагретая зона
ПВ — принудительная вентиляция
ППП — полупроводниковый прибор

ПЦ — принудительная циркуляция
ПЦТ — принудительная циркуляция с теплообменником
РС — радиация солнечная
РЭТ — радиационно-эффективная температура
СО — система охлаждения
СОТР — система обеспечения теплового режима
СТ — система термостабилизации среднеинтервальная
СхТ — тепловая схема
ТСР — тепловое сопротивление
ТСТ — термостат, узкоинтервальная система термостабилизации

ЭФТ — эффективная температура
 ЭЭТ — эквивалентно-эффективная температура

Основные обозначения

S — площадь поверхности, м^2
 V — объем, м^3
 b, δ — толщина, м
 l, L — длина, м
 h, H — высота, м
 λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
 C — удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
 α — коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
 r — тепловое сопротивление, $\text{К}/\text{Вт}$
 σ — тепловая проводимость, $\text{Вт}/\text{К}$
 θ — температура, К
 $\Delta\theta$ — разность температур, К
 Φ — перегрев (перепад температур объекта и окружающей среды), К
 Φ — поток тепловой энергии или рассеиваемая РЭА мощность, Вт
 q — удельный тепловой поток (по поверхности — $\text{Вт}/\text{м}^2$, по объему — $\text{Вт}/\text{м}^3$)
 G — поток жидкости или газа (массовый — $\text{кг}/\text{с}$, объемный — $\text{м}^3/\text{с}$)
 g — удельный поток жидкости или газа (массовый — $\text{кг}/\text{ч} \cdot \text{кВт}$)

13.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные законы теплообмена и их применение для расчета тепловых режимов РЭА *

С позиций теплофизики РЭА представляет собой устройство, преобразующее электрическую энергию источников питания в тепловую [4]. Тепловая модель РЭА может быть представлена физическим телом со множеством источников и стоков тепла в виде резисторов, транзисторов, ЭВП, ИС и различных (теплопроводных и теплоизолирующих) элементов конструкции. Такая тепловая модель требует особого подхода к созданию методов расчета тепловых режимов РЭА и к выбору конструктивных мер по обеспечению нормальных тепловых режимов.

Перенос тепла от горячего тела к холодному (или к окружающей среде) происходит за счет теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Теплопроводность — это процесс обмена тепловой энергией между находящимися в соприкосновении телами или частями тел, обусловленный взаимодействием молекул и атомов этих тел. Конвекцией называется перенос энергии макрочастицами газа или жидкости. Конвекция может быть естественной (в результате действия сил тяготения) и вынужденной (за счет действия агрегатов, создающих перемещение газа или жидкости). Перенос тепла излучением происходит посредством электромагнитных волн.

Для описания всех трех видов теплообмена можно использовать следующее соотношение:

$$\Phi = \alpha S \Delta\theta, \quad (13.1)$$

где α — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (для теплопроводности α_T , для конвекции α_K , для излучения α_L); S — площадь поверхности теплообмена, м^2 ; $\Delta\theta$ — перепад температур между двумя изотермическими поверхностями в теле или между двумя телами (1,2): в том случае, когда рассматривается перепад температур между телом (1) и средой (2), этот параметр называют перегревом Φ .

Расчет теплообмена аппарата в целом, когда действуют одновременно два или три процесса переноса тепла между множеством тел сложной геометрической формы, непосредственно по выражению (13.1) практически невозможен из-за больших методических и математических трудностей. Это является одной из причин применения для тепловых расчетов приближенных аналитических, численных и графоаналитических методов, физического и математического моделирования и методов аналогий.

Теплопроводность. После подстановки $\alpha_T = \lambda/\delta$ в (13.1) получим для плоской стенки

$$\Phi = \lambda S \Delta\theta / \delta, \quad (13.2)$$

где Φ — тепловой поток, отводимый за счет теплопроводности, Вт ; λ —

* Составитель В. И. Киселев

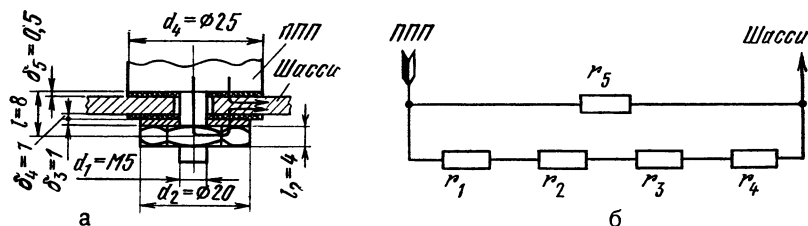


Рис. 13.1. Конструктивная (а) и электротепловая (б) схемы установки ППП на шасси

коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); S — поверхность, через которую осуществляется перенос тепла за счет теплопроводности, м²; $\Delta\theta$ — перепад температур между изотермическими поверхностями, К; δ — толщина стенки, м.

При расчетах переноса тепла (особенно за счет теплопроводности) часто по аналогии с переносом электрического заряда пользуются понятиями тепловой проводимости σ и теплового сопротивления r :

$$\sigma = \lambda S / \delta, \quad r = \delta / \lambda S. \quad (13.3)$$

Значения λ для характерных материалов и оценочных расчетов следующие:

Материал	λ , Вт/(м · К)
Алюминий	200
Гетинакс	0,17
Латунь	105
Медь	380
Слюда	0,5
Сталь малоуглеродистая	45
Текстолит	0,27

При точных расчетах необходимо учитывать зависимость λ от температуры [3, 21, 24, 37].

Пример 1. Вычислить r_{Σ} крепежного соединения от ППП к шасси (рис. 13.1, а). Винт крепления, шайба и гайка изготовлены из стали (λ_1), изоляционные шайбы — из текстолита (λ_2).

Решение. Так как между винтом крепления и шасси есть воздушный зазор, то Φ имеет два пути: от ППП

через верхнюю шайбу в шасси и от ППП через винт крепления, гайку и две шайбы в шасси. Эквивалентная тепловая схема для r_{Σ} показана на рис. 13.1, б.

Определяем r_i (размеры по рис. 13.1, а). Для винта крепления

$$r_1 = 4l_1 / \pi d_1^2 \lambda_1 = 4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} / \pi \times \times 0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 45 = 9,05 \text{ К/Вт};$$

для гайки (при расчете по [14]) $S = \pi \cdot 0,25 d_2 l_2$, при этом длина пути теплового потока $\delta_2 = 0,5 l_2 + 0,25 d_2 + 0,5 l_2 = l_2 + 0,25 d_2$, $r_2 = (0,4 + 0,5) \cdot 10^{-3} / \pi \cdot 0,25 \times \times 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,4 \cdot 10^{-2} \cdot 45 = 3,17 \text{ К/Вт};$

для шайбы

$$r_3 = 4\delta_3 / \pi (d_2^2 - d_1^2) \lambda_1 = 4 \cdot 0,1 \times \times 10^{-2} / \pi (2^2 - 0,5^2) \cdot 10^{-4} \cdot 45 = 0,075 \text{ К/Вт};$$

для нижней изоляционной шайбы

$$r_4 = 4 \delta_4 / \pi (d_4^2 - d_1^2) \lambda_2 = 4 \times \times 0,1 \cdot 10^{-2} / \pi (2,5^2 - 0,5^2) \cdot 0,27 \times \times 10^{-4} = 7,86 \text{ К/Вт};$$

для верхней изоляционной шайбы

$$r_5 = 4\delta_5 / \pi (d_4^2 - d_1^2) \lambda_2 = 4 \cdot 0,05 \times \times 10^{-2} / \pi (2,5^2 - 0,5^2) \cdot 0,27 \cdot 10^{-4} = 3,93 \text{ К/Вт}.$$

Определяем суммарное тепловое сопротивление крепежного соединения:

$$r_{\Sigma} = (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) r_5 / (r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5) = (9,05 + 3,17 + 0,075 + 7,86) \cdot 3,93 / (9,05 + 3,17 + 0,075 + 7,86 + 3,93) = 3,32 \text{ К/Вт}.$$

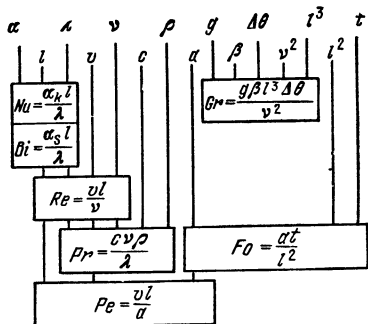


Рис. 13.2. Основные критерии и определяющие их параметры

Конвекция. Конвективный коэффициент теплообмена α_k является функцией многих параметров. С учетом этого выражение (13.1) может быть представлено следующим образом:

$$\Phi = f(\theta_c, \theta_{ст}, q, v, OP, \rho, \nu, c_p, \lambda, \beta, g, a) S \Delta \theta, \quad (13.4)$$

где Φ — тепловой поток за счет конвекции, Вт; $\theta_{ст}$ — температура стенки (поверхности кожуха и т. п.), К; θ_c — температура среды, К; q — удельный тепловой поток за счет конвекции, Вт/м²; v — скорость движения жидкости (газа), участвующей в конвективном теплообмене, м/с; OP — определяющий размер для тела характерной формы (высота стенки, диаметр шара или цилиндра и т. п.) и для конкретного вида конвективного теплообмена, м; ρ — плотность среды (обычно воздуха), кг/м³; ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; c_p — удельная теплоемкость среды при постоянном давлении Дж/(м · К); λ — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м · К); β — коэффициент объемного расширения среды (для газов $1/\theta_c \approx 1/273 = 0,00366$ 1/К); g — ускорение силы тяжести, м/с²; a — коэффициент температуропроводности жидкости (газа), м²/с.

Решение такого уравнения весьма сложно, поэтому, основываясь на методах теории подобия и моделирования, математическую связь между множеством определяющих α_k параметров обычно представляют в виде соотношения, состоящего из

двух-пяти критериев: Nu , Gr , Pr и т. д. Тогда для случая естественной конвекции уравнение (13.4) примет вид

$$\Phi = f(Nu, Gr, Pr) S \Delta \theta, \quad (13.5)$$

где Nu , Gr и Pr — обобщенные безразмерные параметры, называемые критериями Нуссельта, Грасгофа и Прандтля. Смысл их — в приведении уравнения (13.4) к алгебраическому виду с меньшим числом членов. Кроме этих критериев, в практике расчета теплообмена РЭА используются критерии: Рейнольдса (Re), Пекле (Pe), Фурье (Fo) и Био (Bi). Схема их составления показана на рис. 13.2.

Физический смысл указанных безразмерных критериев следующий: Nu — характеризует соотношение интенсивностей конвективного теплообмена и теплопроводности в пристеночном слое жидкой или газообразной среды; Re — характеризует соотношение сил инерции и трения в потоке теплоносителя; Pr — характеризует физические свойства среды; Pe является мерой отношения конвективного и молекулярного переноса тепла в потоке среды; Gr — характеризует соотношение подъемной и вязкой сил при свободной конвекции в потоке жидкости (или газа); Fo — характеризует скорость изменения температурного поля тел во времени; Bi — устанавливает связь между полем температур твердого тела и условиями теплообмена на его поверхности. В этом критерии, в отличие от критерия Nu , λ — коэффициент теплопроводности твердого тела (в Nu λ — коэффициент теплопроводности среды).

Наиболее сложной частью решения уравнений вида (13.5) является определение взаимозависимости критериев.

Для большинства случаев теплообмена в РЭА связь между критериями выражается степенным критерияльным уравнением [28]

$$Nu = c Re^q Pr^m Gr^n K_{доп}, \quad (13.6)$$

где c , q , m , n — числовые безразмерные величины, соответствующие определенному виду и режиму движения среды и некоторому диапазону изменения определяющих парамет-

13.1. Общие положения

ров; $K_{\text{доп}}$ — коэффициент, учитывающий влияние дополнительных факторов, таких, как направление теплового потока, кривизна канала и т. п. Значения этих величин получены в результате обобщения больших количества экспериментальных данных и приведены в табл. 13.1 и на рис. 13.3.

Окружающей средой для большей части РЭА является воздух. Значения* физических параметров сухого воздуха на уровне моря (101 кПа):

θ, K	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\rho, \text{Дж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
223	2,04	9,2	1013	1,58	12,7
273	2,44	13,3	1005	1,29	18,8
293	2,59	15,1	1005	1,21	21,4
333	2,90	19	1005	1,06	27,2
373	3,21	23,1	1009	0,95	33,6

Пример 2. РЭА работает в условиях естественной конвекции воздуха в неограниченном объеме (объем, где расположена РЭА, намного больше объема РЭА) и на уровне моря. Вычислить комплекс критериев $\text{Gr} \times \text{Pr}$, если определяющий размер $l = 0,3 \text{ м}$, $\Delta\theta = 50 \text{ K}$ ($\theta_c = 273 \text{ K}$); составить критериальное уравнение и вычислить α_k .

Решение Вычисляем

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\theta_c + \theta_{\text{ст}}}{2} = \\ &= \frac{\theta_c + (\theta_c + \Delta\theta)}{2} = 298, \\ \text{Gr} \cdot \text{Pr} &= \frac{g \beta l^3 \Delta\theta \rho}{\nu \lambda} = \\ &= \frac{9,81 \cdot 0,00366 \cdot 0,3^3 \cdot 50 \cdot 1005 \cdot 1,21}{15,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}} = \\ &= 1,5 \cdot 10^8. \end{aligned}$$

Из табл. 13.1 для случая, когда $\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 1,5 \cdot 10^8$, определяем, что ре-

жим движения среды турбулентный. при этом $s = 0,135$, $m = n = 0,33$. Тогда из (13,6) получаем

$$\text{Nu} = 0,135 \text{Pr}^{0,33} \text{Gr}^{0,33}$$

После подстановки исходных параметров в уравнения для критериев получим

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,135 \lambda l^{-1} (c_{\text{пр}} \beta g \Delta\theta l^3 \lambda^{-1} \nu^{-1})^{0,33} = \\ &= 0,135 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3^{-1} (1005 \times \\ &\times 1,21 \cdot 0,00366 \cdot 9,81 \times 50 \cdot 0,3^3 \times \\ &\times 2,59^{-1} \cdot 15,1^{-1} \cdot 10^6)^{0,33} = \\ &= 5,82 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}. \end{aligned}$$

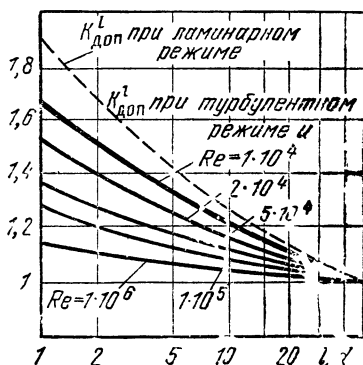
При вынужденной конвекции газа (жидкости) определяющий параметр для α_k скорость движения

$$v = G_m / S_p = G_v / S, \quad (13.7)$$

где G_m и G_v — массовый и объемный расходы теплоносителя; S — свободная для прохода теплоносителя площадь поперечного сечения канала.

На скорость движения теплоносителя в РЭА влияют: степень заполнения РЭА элементами, статическое давление теплоносителя на входе в аппарат, плотность теплоносителя, характер внутренней поверхности канала. При некруглом поперечном сечении канала оперируют с понятием гидравлического или эквивалентного диаметра d_r ($d_{\text{гидр}}$), равного отношению $4S/\Pi$, где Π — периметр сечения [6, 19]

Рис. 13.3. Зависимость коэффициентов $K_{\text{доп}}^I$ для критериального уравнения (13.6) от $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ в ламинарном и турбулентном режимах



* Более полные данные приведены в [3, 24, 37].

Значения c , q , m , n , $K_{\text{доп}}$ в уравнении (13.6) для часто встречающихся в РЭА случаев теплоотдачи [24.28]

c	q	m	n	K _{доп}	Диапазон изменения определяющих критериев	Определяющий размер l, определяющая температура θ
Естественная конвекция						
1,18	0	0,125	0,125	1	$1 \cdot 10^{-3} < GrPr < 5 \cdot 10^2$	Для вертикальных плит, цилиндров $l=h$ (высота), для горизонтальных цилиндров $l=d$ (диаметр), для горизонтальных плит $l=L_1$ (меньшая сторона); $\theta=\theta_{ср}=0,5(\theta_{ст}+\theta_c)$
0,54	0	0,25	0,25	1	$5 \cdot 10^2 < GrPr < 2 \cdot 10^7$	
0,135	0	0,33	0,33	1	$1 \cdot 10^{13} > GrPr > 2 \cdot 10^7$	
Вынужденное движение среды в каналах произвольного сечения						
0,15	0,33	0,43	0,1	$K_{доп}^q \cdot K_{доп}^l$ $K_{доп}^q = \left(\frac{Pr_c}{Pr_{ст}}\right)^{0,25}$ $K_{доп}^l$ — по рис. 13.3 [21]	$GrPr > 8 \cdot 10^5$ $Re < 2200$	$l=d_0, \theta=\theta_c, d_0=4S/\Pi$ S — площадь поперечного сечения, Π — периметр поперечного сечения канала
0,0225	0,8	0,4	0	$1-6 \cdot 10^5 / (Re^{1,2})$	$4 \cdot 10^3 < Re < 10^4, 0,6 < Pr < 140;$	$l=d_0, \theta=\theta_c$
0,023	0,8	0,4	0	$K_{доп}^l$ рис. 13.3 [21]	$10^4 < Re < 2 \cdot 10^6, 0,6 < Pr < 100;$	»
Вынужденное обтекание плоской поверхности						
0,66	0,5	0,43	0	$(Pr_c/Pr_{ст})^{0,25}$	$Re < 4 \cdot 10^4; 0,5 < Pr < 100;$	$l=L, \theta=\theta_c$
0,037	0,8	0,43	0	»	$Re > 4 \cdot 10^4$	»
Вынужденное обтекание тел различной формы (пластина, цилиндр, шар)						
0,8	0,5	0	0	1	$10 < Re < 1 \cdot 10^6, Pr \approx 0,7$ (воздух)	$\theta=\theta_c, l=L$ (длина вертикальной стенки по потоку), $l=1,57 d$ (d — диаметр цилиндра, шара), $l=a+b$ (a, b — стороны сечения бруска)

Если имеется сложный теплообмен (например, твердая стенка, омываемая с двух сторон газом или жидкостью, или две твердые стенки, между которыми находится газ или жидкость), то используется понятие удельной тепловой проводимости, которую для приведенных случаев называют коэффициентом теплопередачи и определяют для твердой разделяющей стенки

$$k = (1/\alpha_{к1} + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_{к2})^{-1}, \quad (13.8)$$

для воздушной прослойки

$$k = K_N K_A [6,25 - 5,25 (1 + \delta/l)^{-1,67}] \times [(\theta_1 - \theta_2)/\delta]^{0,25}, \quad (13.9)$$

где коэффициент K_N равен 1,0 (для вертикальной ориентации прослойки) и 1,3 (для горизонтальной ориентации прослойки); коэффициент K_A зависит от температуры $\theta = 0,5 (\theta_1 + \theta_2)$ и при $\theta = 273 \dots 333$ К находится в пределах $0,63 \dots 0,56$ [14, 15]. Это уравнение может быть использовано при $2,5 \cdot 10^5 \leq Gr \cdot Pr \leq 1 \cdot 10^8$ и $0,2 \leq \delta/l \leq 0,8$.

Изменение давления окружающей газообразной среды в пределах $1,3 \times 10^2 \dots 10^6$ Па при естественной конвекции в неограниченном объеме и соблюдении условия $Gr \cdot Pr = 500 \dots 2 \cdot 10^7$ учитывается с помощью выражения:

$$\alpha_{кр} = \alpha_{к0} (p/p_0)^{0,5}, \\ k_p = k_0 (p/p_0)^{0,5}, \quad (13.10)$$

где $\alpha_{кр}$, k_p — коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи в прослойке при давлении p ; $\alpha_{к0}$, k_0 — при нормальных условиях ($\theta_0 = 293$ К, $p = 1,01 \cdot 10^5$ Па, Вл 50%, $\rho = 1,21$ кг/м³) [3, 37].

Тепловое излучение. Формула (13.1) после подстановки выражения для коэффициента теплообмена α_d принимает вид:

$$\Phi = \epsilon_{пр} \varphi_{1,2} f(\theta_1, \theta_2) S \Delta \theta, \quad (13.11)$$

где $\epsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты (в оценочных расчетах пластины можно принять: для алюминия с гладкой поверхностью $\epsilon_{пр} = 0,03$, для сильно окисленного алюминия 0,14, для дюралюминия Д16 0,25, для силуминового литья 0,14, для лаков и масляных красок разных

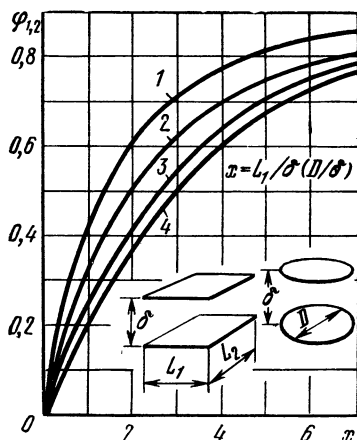


Рис. 13.4. Значения коэффициента облученности $\varphi_{1,2}$

1 — полосы ($L_2/L_1 \geq 1$), 2 — прямоугольники ($L_2/L_1 = 2$), 3 — квадраты ($L_2 = L_1$), 4 — круги

цветов $0,78 \dots 0,94$); $\varphi_{1,2}$ — коэффициент облученности, показывающий, какая часть энергии, излучаемой телом 1, попадает на тело 2 (рис. 13.4), $f(\theta_1, \theta_2)$ — функция, устанавливающая связь между температурами тела 1 и 2 при излучении; эта функция может быть определена по приближенной формуле $f(\theta_1, \theta_2) \approx 0,227 [0,005(\theta_1 + \theta_2)]^3$ Вт/(м² · К). (Более точные зависимости и справочные данные приведены в [3, 14, 15, 37]).

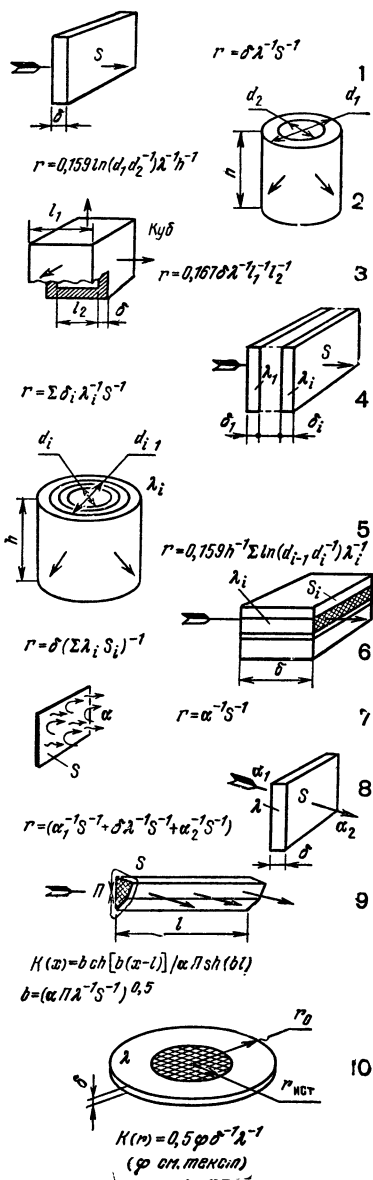
Пример 3. Два тела в виде прямоугольных пластин из дюралюминия Д16 $S = 0,02$ м², $L_1 = 0,1$ м, $\delta = 0,05$ м, $\Delta \theta = 60$ К ($\theta_1 = 350$ К, $\theta_2 = 290$ К) находятся в режиме лучистого теплообмена. Определить тепловой поток Φ , передаваемой от пластины 1 к пластине 2.

Решение. $\epsilon_{пр} = 0,25$, $\varphi_{1,2} = 0,5$ (из рис. 13.4). Вычислим

$$f(\theta_1, \theta_2) \approx 0,227 [0,005 \cdot (350 + 290)]^3 = 7,44;$$

$$\Phi = 0,25 \cdot 0,5 \cdot 7,44 \cdot 0,02 \cdot 60 = 1,11 \text{ Вт.}$$

В общем случае при сложном теплообмене расчет начинают с построения эквивалентной тепловой схемы, отражающей различные спо-

Рис. 13.5. Формулы для расчета r и K

собы передачи тепла и включающей элементы с различными теплофизическими характеристиками. Затем составляется уравнение, аналогичное (13.1)

При проведении тепловых расчетов, кроме тепловых проводимостей σ и тепловых сопротивлений $r = 1/\sigma$, пользуются тепловыми коэффициентами $K(x)$ (аналог r) и $\sigma(x)$ (аналог σ). Их отличие от r и σ в том, что значения тепловых коэффициентов зависят от пути теплового потока x . Для облегчения вычисления r и $K(x)$ на рис 13.5 даны схемы и расчетные формулы для характерных случаев. При определении теплового коэффициента одиночного источника тепла K_r размером $d_{ист}$, расположенного на пластине с размером d_0 , необходимо найти дополнительный критерий $\varphi = \varphi(d_{ист}/d_0, \gamma)$ где $\gamma = [(\alpha_1 + \alpha_2)(d_0^2/4\lambda\delta)]^{1/2}$, α_1, α_2 — коэффициенты теплообмена с различных сторон пластины.

Если $\gamma d_{ист}/d_0 \leq 0,2$, то

$$\varphi = 0,318 \times \frac{\ln(2d_0/\gamma d_{ист}) + 2/\gamma^2 - 0,577}{1 - (d_{ист}/d_0)^2};$$

если $\gamma = 0 \dots 1$, $d_{ист}/d_0 \leq 0,6$ то

$$\varphi = 0,64 \times \frac{\lg(d_0/\gamma d_{ист}) + 1/\gamma^2 - 0,25}{1 - (d_{ист}/d_0)^2};$$

если $d_{ист}/d_0 < 0,02$, то при $\gamma > 2$
 $\varphi = 0,15 + 0,73 \lg(d_0/\gamma d_{ист})$.

Электротепловая аналогия *

Уравнения теплопроводности и электропроводности можно представить в идентичной форме [25]:

$$\begin{aligned} \text{а) } \frac{\partial \theta}{\partial t} &= a \nabla^2 \theta, \\ \text{б) } \frac{\partial \varphi}{\partial t} &= \frac{1}{r_i C_i} \nabla^2 \varphi, \end{aligned} \quad (13.12)$$

где θ и φ — обобщенные силы тепловой (температура) и электрической (потенциал) природы, a — температуропроводность, $1/r_i C_i$ — «потен-

* Составитель Ю. А. Гаврилов.

диалопроводность», имеющая смысл электрической постоянной времени.

Если $a = 1/r_i C_i$, а также масштабы времени электрических и тепловых явлений одинаковы, то уравнения (13.12а) и (13.12б) — тождественны. Это позволяет моделировать тепловое поле на электрических моделях [22]. Достижения в области теории электрических цепей позволяют в значительной степени упрощать решение сложных задач. По аналогии с электрическими цепями, состоящими из электрических элементов, можно строить тепловые цепи, основой которых являются источники теплового потока и температуры, тепловые сопротивления и теплоемкости (рис. 13.6). Тепловые схемы (СхТ) графически интерпретируют процесс теплообмена и состоят из активных (источники теплового потока и температуры) и пассивных (тепловые сопротивления, проводимости и теплоемкости) элементов [9], могут быть линейными (когда параметры элементов СхТ не зависят от температуры) и нелинейными. В линейных СхТ производится суммирование тепловых сопротивлений и проводимостей при параллельном и последовательном соединениях, замена соединений «звезда» на «треугольник» и наоборот, замена распределенных параметров сосредоточенными и т. п., так как существует аналогия форм записи основных законов:

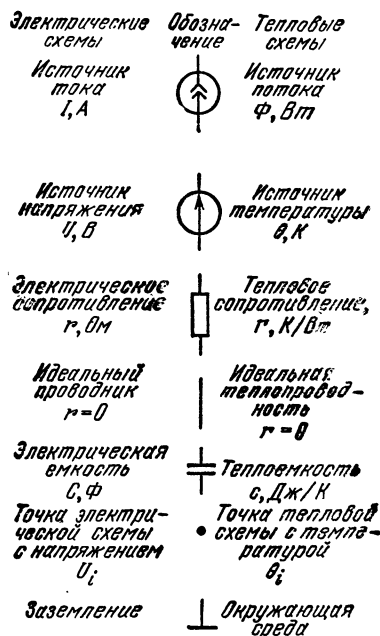


Рис. 13.6. Электротепловые аналогии в их обозначениях

В СхТ не используются аналогия индуктивности и не учитывается закон Джоуля—Ленца (как в электрических цепях), ибо в них не отражен процесс преобразования тепловой энергии в энергию какого-либо другого вида. Активные элементы в СхТ являются идеальными источниками теплового потока или температурного напора (источники температуры), имеющими бесконечно большое или бесконечно малое сопротивление r . Использование активных элементов в схемах позволяет отразить граничные условия задачи, а также учесть наличие внутренних источников или стоков тепла. На рис. 13.7 представлены восемь характерных элементарных СхТ с сосредоточенными параметрами и случаи их применения. Варианты а и г отличаются от б и д соединением точек, имеющих одинаковую температуру. Введение емкости C (показана пунктиром) позволяет учитывать в СхТ нестационарные тепловые режимы.

Законы электрических цепей	Законы тепловых цепей
<p>Закон Ома $I = U/r_i$</p> <p>1-й закон Кирхгофа $\sum I_i = 0$ 2-й закон Кирхгофа $U = \sum I_i r_i$ $\sum U_i = \sum I_i r_i$ Уравнение нестационарного электрического тока в цепи при заряде емкости $I = C_i dU/dt$</p>	<p>Закон Фурье, Ньютона-Рихмана, Стефана-Больцмана $\Phi = \Delta\theta/r$ Аналог 1-го закона Кирхгофа $\sum \Phi = 0$ Аналог 2-го закона Кирхгофа $\Delta\theta = \sum \Phi r$ $\sum \Delta\theta = \sum \Phi r$ Уравнение нестационарного температурного потока в теле при нагревании (охлаждении) $\Phi = Cd\theta/dt$</p>

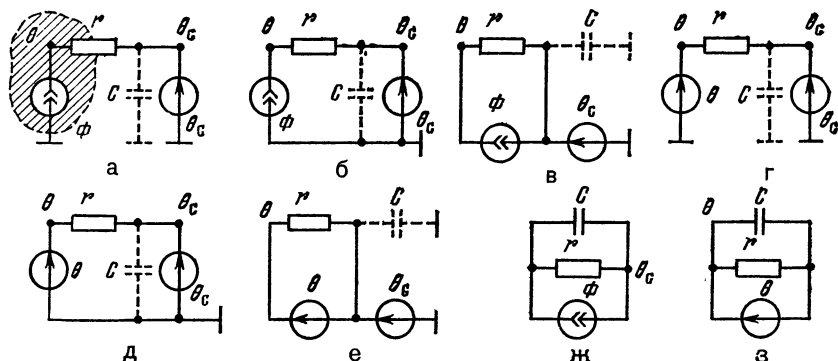


Рис. 13.7. Тепловые схемы тел с внутренними источниками тепла:

$\theta = f(\Phi, r, \theta_c)$ (а...е); $\Phi = f(\theta, \theta_c, r)$ (з...е); $\theta = f(\Phi, r)$ (ж); $\Phi = f(\theta, r)$ (а...е); $r = f(\Phi, \theta)$ (ж)

Рассмотрим две характерные СхТ с распределенными параметрами и их последовательные преобразования. Теплопередача через ребро или стержень постоянного сечения может быть представлена в виде тепловой схемы, рис. 13.8, а, на которой $r' = 1/\lambda\Pi$, $\sigma' = \alpha S$ (λ — коэффициент теплопроводности, S — площадь поперечного сечения ребра или стержня, Π — периметр этого сечения, α — коэффициент теплоотдачи). Граничные условия учитываются параметрами Φ , θ_c и $r = 1/\alpha S$, которые учитывают теплоотдачу с торца.

Введем сопротивление $Z_c = (r'/\sigma')^{0,5}$ и проводимость $y = (r'\sigma')^{0,5}$ и после замены схемы рис. 13.8, а эквивалентным четырехполюсником [20, 27] найдем параметры Т- или П-образного эквивалентного четырехполюсника:

$$Y_0 = \text{sh}(yl)/Z_c, \quad Z = \text{ch}(yl - 1) \times Z_c/\text{sh}(yl);$$

$$Z_0 = Z_c \text{sh}(yl), \quad Y = \text{ch}(yl - 1)/Z_c \text{sh}(yl). \quad (13.13)$$

В результате СхТ (рис. 13.8, б) может быть преобразована к виду рис. 13.8, в, а для полубесконечного ребра или стержня ($l \rightarrow \infty$) — к виду рис. 13.8, з.

Нестационарная теплопередача плоской стенки (рис. 13.9, а) может быть представлена с помощью

элементов $r'dx$ и $c'dx$, где $r' = 1/\lambda$, $c' = \rho c_{уд}$ (ρ — плотность, $c_{уд}$ — удельная теплоемкость материала стенки). После замены схемы рис. 13.9, а эквивалентным четырехполюсником и выполнения преобразований, аналогичных выполненным при преобразовании рис. 13.8, а в рис. 13.8, в, получим окончательный вариант СхТ в виде рис. 13.9, б с учетом граничных условий на поверхности в виде θ_{c1} , θ_{c2} , r_1 и r_2 .

В общем случае последовательность преобразования конструкции РЭА в тепловую модель, а затем в СхТ, покажем на примере кассетной конструкции. Кассеты трех типов (рис. 13.10, а) охлаждаются потоками воздуха за счет принудительной вентиляции. Заменяем эти кассеты пластинами таких же размеров с коэффициентами λ_x , λ_y , λ_z и Φ эквивалентными реальным кассетам (рис. 13.10, б), с адиабатическими сечениями посередине каждого тела. Пренебрегая изменением температур по оси z , с достаточной для практики точностью получим [8, 9]:

$$r_y = \delta/\lambda_y bl; \quad r_\alpha = 1/\alpha_\kappa bl;$$

$$r_\Pi = 1/\alpha_\Pi bl; \quad r_\Pi = 1/\alpha_\Pi bl;$$

$$r_G = 1/\sigma_G; \quad \sigma_G = c\rho G_V,$$

где l , b — размеры кассет по осям x и y ; α_κ , α_Π , α_Π — коэффициенты конвективного теплообмена, излучения и теплоотдачи в окружающую

среду r_G — тепловое сопротивление, учитывающее расход и теплофизические параметры воздуха (c_p — теплоемкость, ρ — плотность, G_V — объемный расход воздуха). Граничные условия на схеме рис. 13.10 отражены $\theta_{вх}$ и θ_c , а наличие внутренних источников тепла в кассете Φ .

Если $0,1/\lambda_{xb\delta} > (r_G)^2 r_\alpha$, что обычно выполняется, то можно пренебречь теплопроводностью кассет в направлении движения воздуха и заменить составленную на основании СхТ систему дифференциальных уравнений на систему алгебраических уравнений, при этом с погрешностью расчета $\Delta = 5 \dots 10\%$. Таким образом СхТ позволяет оценивать средние температуры кассет в РЭА.

Аналогичную по структуре СхТ можно построить для расчета перегревов нагретой зоны, корпуса, воздуха в отсеках РЭА. При этом сначала составляется тепловая модель конструкции РЭА (рис. 13.11, а), а затем СхТ (рис. 13.11, б). В подобных СхТ при расчетах r между нагретой зоной, корпусом и воздухом необходимо учитывать реальную площадь теплоотдающих поверхностей.

Тепловая модель и принципы теплового расчета РЭА *

Конструкции РЭА представляют собой системы тел с сосредоточенными источниками и стоками тепла. Получить аналитические решения в задачах теплообмена таких систем весьма сложно. Чтобы обеспечить возможность математического анализа, переходят от реальных конструкций к некоторым условным понятиям, заменяя эти конструкции тепловыми моделями [14, 15].

В конструкциях РЭА с шасси источники тепла размещаются в пространстве с обеих сторон шасси, в РЭА кассетной конструкции — с одной или с обеих сторон плат (рис. 13.12). Это пространство, заполненное теплоотсеивающими элементами, называют нагретой зоной (НЗ). Реальное теплоотдающее про-

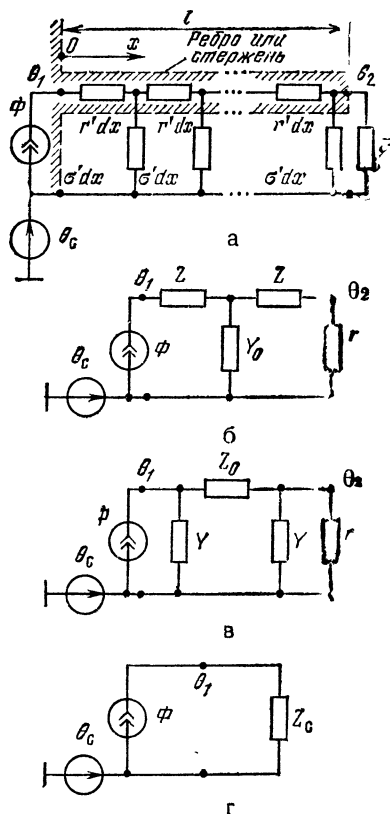


Рис. 13.8. Исходная тепловая схема ребра или стержня с постоянным поперечным сечением (а), ее преобразование (б, в) и окончательный вариант (г)

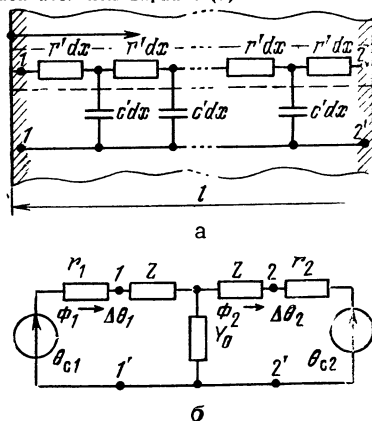


Рис. 13.9. Исходная тепловая схема плоской стенки (а) и ее тепловая схема (б)

* Составители В. И. Киселев и В. Ф. Чукин.

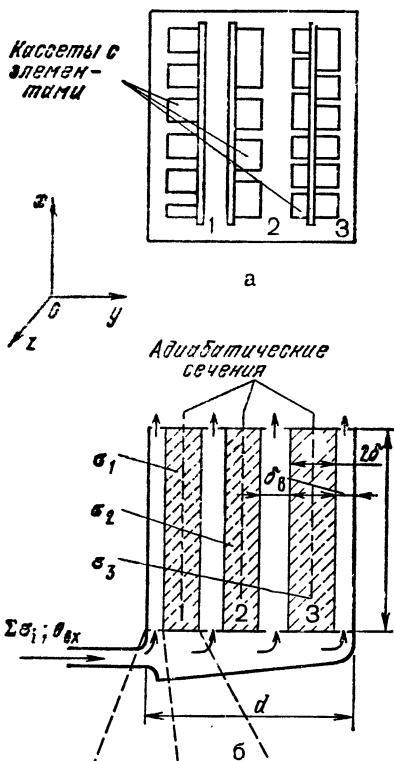
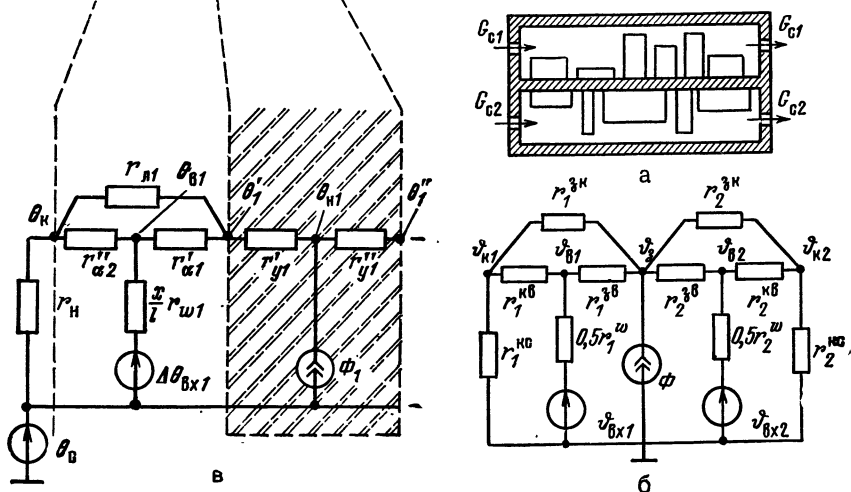


Рис. 13.10. Схематическое изображение конструкции РЭА с тремя кассетами (а), ее тепловая модель (б) и часть тепловой схемы для одной кассеты (в)

странство обычно имеет весьма неравномерное расположение источников тепла. Среднеповерхностная температура и перегрев поверхности этого пространства обозначаются соответственно θ_3 и θ_3 . В тепловой модели реальная поверхность НЗ заменяется изотермической поверхностью S_3 (рис. 13.13, а) некоторого прямоугольного параллелепипеда с той же температурой и перегревом θ_3, θ_3 и с равномерно распределенными источниками тепла. Это — изотермическая поверхность эквивалентной НЗ (рис. 13.13, б). В РЭА кассетной конструкции эквивалентная НЗ определяется для каждой платы отдельно. Причем если источники тепла заметно изменяются по высоте платы или условия теплообмена одной части платы резко отличаются от условий теплообмена другой части этой же платы, то проводят более подробную разбивку, как это показано на рис. 13.13, в, д, е. Поверхность кожуха S_K в тепло-

Рис. 13.11. Схематическое изображение конструкции РЭА с крупными элементами на шасси (а) и ее тепловая схема (б)



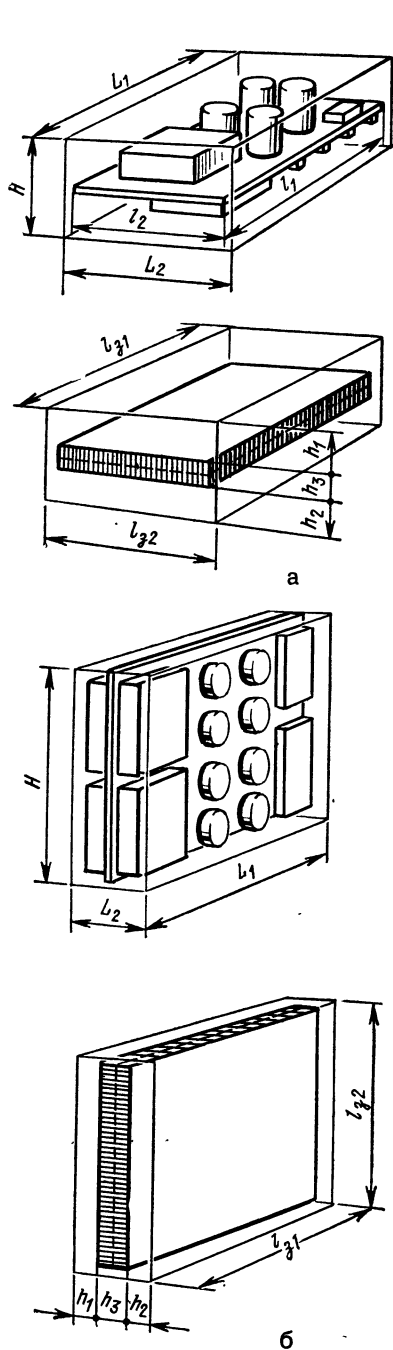


Рис. 13.12. Схемы построения нагретых зон РЭА с шасси горизонтальной (а) и вертикальной (б) ориентации

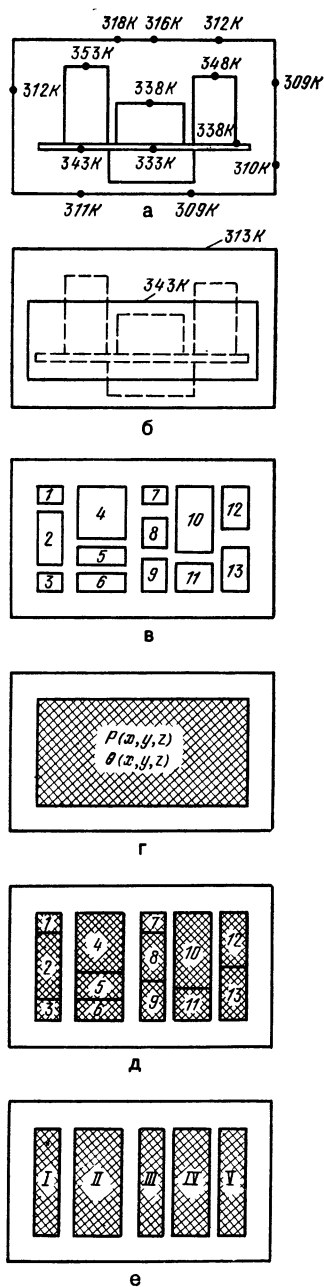


Рис. 13.13. Расположение элементов в РЭА с шасси и их температуры (а), нагретая зона и температура ПЗ (б), расположение элементов на плате (в) и нагретая зона платы (г), разбивка нагретой зоны платы на отдельные части (д, е)

вой модели также заменяется изотермической поверхностью, имеющей среднюю температуру и перегрев θ_K , θ_K . В результате введения тепловых моделей и понятия эквивалентной НЗ становится возможным математическое описание процессов теплообмена РЭА и создание инженерных методик тепловых расчетов.

Геометрические размеры НЗ для РЭА с шасси определяются следующим образом (рис 13.12, а, б): ширина $l_{31} \approx L_1$; длина $l_{32} \approx L_2$; высота $h_3 = K_{\text{зап}} H$, где L_1 , L_2 , H — ширина, длина и высота РЭА, $K_{\text{зап}} = \Sigma V_{\text{эл}} / V_{\text{РЭА}}$ — коэффициент заполнения объема РЭА элементами. Геометрические размеры НЗ для одной платы РЭА касетной конструкции $l_{31} \approx l_1$; $l_{32} \approx l_2$; $h_3 = K_{\text{зап}} b + b_{\text{п}}$, где l_1 , l_2 — ширина и длина платы; b — шаг расположения плат относительно друг друга в РЭА, $b_{\text{п}}$ — толщина платы.

После определения геометрических параметров НЗ (или нескольких НЗ), а также кожуха рассчитывают температурное поле РЭА. Расчет проводится в три этапа.

Первый этап. Определение тепловых характеристик кожуха и НЗ. Для РЭА с одной зоной

$$\theta_K = \theta_K - \theta_c = r_{\text{Кс}} \Phi, \quad (13.14)$$

$$\Delta \theta = \theta_3 - \theta_K = r_{\text{зк}} \Phi. \quad (13.15)$$

Для j -й НЗ в РЭА имеющей m зон,

$$\theta_{3j} - \theta_K = r_{\text{зк}j} \Phi_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{m-1} r_{\text{зк}ij} \Phi_i, \quad (13.16)$$

где θ_K — средняя температура поверхности кожуха, К; θ_c — температура среды, К; θ_3 — средняя температура НЗ, К; $r_{\text{Кс}}$ — тепловое сопротивление кожух—среда, К/Вт; $r_{\text{зк}}$ — тепловое сопротивление зона—кожух, К/Вт; Φ — полная рассеиваемая РЭА мощность (тепловой поток), Вт; θ_{3j} — средняя температура j -й НЗ, К; $r_{\text{зк}j}$ — тепловое сопротивление НЗ — кожух, К/Вт; $r_{\text{зк}ij}$ — тепловое сопротивление между i -й НЗ и кожухом, К/Вт; $\Phi_j = \Phi - \sum_{i=1, i \neq j} \Phi_i$; Φ_i — мощности теп-

ловых потерь j - и i -й НЗ. Вт. Тепловая характеристика для кожуха в этом случае определяется по формуле (13.14).

Второй этап. Определение тепловых характеристик поверхностей узлов и элементов РЭА:

$$\theta_{js} - \theta_{jc} = r_{jc} \Phi_j \quad (13.17)$$

где θ_{js} — температура поверхности j -го узла или элемента, К; θ_{jc} — температура среды, окружающей j -й узел или элемент, К; r_{jc} — тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен от поверхности j -го узла или элемента к окружающей их среде, К/Вт; Φ_j — рассеиваемая мощность j -го узла или элемента РЭА, Вт.

Третий этап. Определение тепловых характеристик отдельных областей внутри узлов или элементов, например, p — n -перехода в транзисторе по уравнению, аналогичному (13.17). Так, тепловая характеристика p — n -перехода транзистора может быть определена следующим образом:

$$\theta_{\text{п}} - \theta_{js} = r_{\text{пс}} \Phi_j,$$

где $\theta_{\text{п}}$ — температура p — n -перехода; θ_{js} — температура поверхности корпуса j -го транзистора; $r_{\text{пс}j}$ — внутреннее тепловое сопротивление переход—корпус j -го транзистора, К/Вт. Для ряда конструкций РЭА разработаны упрощенные графо-аналитические методики, позволяющие быстро определять тепловые характеристики РЭА на всех трех этапах [15]. При необходимости одновременной оценки тепловых характеристик элементов РЭА и их надежности используют вероятностный подход [34].

Расчет теплового режима РЭА на основании использования тепловых моделей можно выполнять как при естественной, так и при вынужденной конвекции газообразной (например, воздушной) или жидкой среды. В последнем случае используется дополнительно уравнение теплового баланса

$$\Phi_c = c G_m (\theta_{\text{с вых}} - \theta_{\text{с вх}}), \quad (13.18)$$

где Φ_c — тепловой поток, который воспринимается охлаждающей средой, c — удельная теплоемкость среды, G_m — массовый расход среды; $\theta_{\text{с вых}}$ и $\theta_{\text{с вх}}$ — температура среды на выходе и входе в РЭА.

Из уравнения (13.18) определяют расход среды.

Соответствующие инженерные методики тепловых расчетов РЭА и ее элементов даны в § 13.2 ... 13.5.

Основные физические эффекты и классификация систем обеспечения теплового режима (СОТР)*

Для интенсификации теплообмена в конструкциях РЭА применяют вынужденную конвекцию вместо естественной, заменяют (по мере возможности) СОТР с газообразным теплоносителем на СОТР с жидким теплоносителем, а также используют различные сопровождающиеся поглощением тепла физические эффекты: адиабатическое расширение или дросселирование газов, вихревое разделение газовых потоков, кипение жидкостей, термохимическое разложение или плавление твердых тел, эффект термоэлектрического охлаждения.

При адиабатическом расширении газа с помощью сопел, расширительных турбин, цилиндра с поршнем и т. п. отвод тепла тем больше, чем больше: разница давлений за расширителем и перед ним, показатель адиабаты и теплоемкость газа. Такие устройства находят широкое применение в авиации [7].

При дросселировании газов (эффект Джоуля—Томпсона) эффективность отвода тепла меньше, чем при адиабатическом расширении. Определяющими параметрами являются: эффект дросселирования (который зависит от свойств газа) и перепад давлений в дросселе.

Вихревое разделение газового потока на холодный и горячий (эффект Ранка) используется в конструкциях, называемых вихревыми трубами. Эффективность вихревых труб, применяемых для охлаждения, тем выше, чем больше разность давлений, показатель адиабаты и коэффициент, характеризующий эффект охлаждения данного газа. Эффект от использования вихревого разделения газа увеличивается там, где есть источники сжатого воздуха (например, на летательных аппаратах), так как габариты и масса вихревых труб малы.

При кипении и испарении жидкостей количество поглощаемого тепла пропорционально массе и теплоте испарения жидкости. Например, испарение 1 л воды требует $2,26 \times 10^6$ Дж (при нормальном давлении и температуре 373 К), что эквивалентно отводу 628 Вт рассеиваемой мощности в течение 1 ч.

При термохимическом разложении твердое вещество выделяет газообразные продукты, что обеспечивает отвод тепла, особенно при кратковременной работе РЭА. Например, разложение 1 кг двууглекислого аммония практически эквивалентно испарению 1 л воды (при нормальном давлении и температуре 343 К). В системах с расплавлением рабочего вещества используют парафин и его производные, сплавы типа Вуда, церезины и прочие вещества, температура плавления которых 313 ... 333 К.

В термоэлектрических устройствах в месте спая двух различных проводников происходит поглощение или (при изменении направления движения тока) выделение тепла. Преимущество таких устройств — в возможности реверсирования, однако они имеют значительную массу и энергопотребление. Эффективность термоэлектрических устройств зависит от качества используемых материалов спая и пропорциональна квадрату температуры холодного спая. Однокаскадные термобатареи обеспечивают $\Delta\theta = 30 \dots 50$ К, трехкаскадные $\Delta\theta = 80 \dots 100$ К, но со значительно худшими (чем у однокаскадных батарей) энергетическими показателями. Такие устройства обычно применяют для термостатирования малых по объему и тепловыделению узлов и блоков РЭА, требующих высокой стабильности температуры (кварцевые генераторы и другие устройства).

В современных СОТР используют различные сочетания устройств, основанных на перечисленных физических эффектах, которые обеспечивают нормальный тепловой режим как отдельных элементов, так и РЭА в целом.

Так как современная сложная РЭА чаще всего требует не только отвода тепла ($\theta_{РЭА} \leq \theta_{доп}$), но и обеспе-

* Составитель В. И. Киселев.

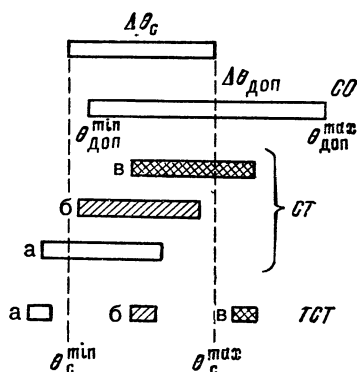


Рис. 13.14. Классификация СОТР по соотношению $\Delta\theta_{\text{доп}}$ и $\Delta\theta_{\text{с}}$.

ТСТ и СТ: a — холодные, b — среднетемпературные, θ — горячие. Для СО $\Delta\theta_{\text{доп}}$ до нескольких десятков градусов, для СТ — от нескольких единиц до десятков градусов, для ТСТ — от сотых долей до нескольких единиц градусов

чения работы РЭА в заданном интервале температур $\Delta\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{доп}}^{\text{max}} - \theta_{\text{доп}}^{\text{min}}$, то приходится использовать СОТР, которые решают три основные задачи: внутреннюю (нагревание или охлаждение элементов РЭА), внешнюю (обеспечение теплообмена СОТР с окружающей средой) и транспортную (перенос тепла внутри РЭА и СОТР). При этом изменение температуры окружающей РЭА и СОТР среды происходит в пределах $\theta_{\text{с}}^{\text{min}} \dots \theta_{\text{с}}^{\text{max}}$. Таким образом, СОТР могут быть разделены на три группы: системы охлаждения (СО) для элементов и узлов, с широкоинтервальным значением $\Delta\theta_{\text{доп}}$, системы термостабилизации (СТ) со среднеинтервальным значением $\Delta\theta_{\text{доп}}$ и термостаты (ТСТ) или системы термостабилизации с узкоинтервальным значением $\Delta\theta_{\text{доп}}$ (рис. 13.14)

При разработке СОТР необходимо учитывать [6]: вид, параметры, особенности конструкции и режима работы РЭА и объекта, где размещена РЭА; параметры окружающей среды; массу, габариты и энергопотребление СОТР; удобство и стоимость эксплуатации СОТР; наличие серийных или опытных разработок теплообменных устройств, их элементов, рабочих веществ и их стоимость; срав-

нительную эффективность и степень изученности способов теплопередачи.

Классификация СОТР приведена на рис. 13.15.

13.2. СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕДВИЖНОЙ НАЗЕМНОЙ РЭА *

Общие положения

Передвижная наземная РЭА устанавливается в кузовах (фургонах) каркасного типа на самоходных шасси или прицепах с колесным или гусеничным ходом. Для обеспечения нормальной эксплуатации РЭА и комфортных условий человеку-оператору стенки и крышу кузова выполняют из фанеры, армированного пенопласта или алюминиевого листа, пол — из досок, армированного пенопласта или алюминиевых листов. Люки, двери и окна кузовов делают с термоуплотнениями. Для создания нормального теплового режима в кузове используют отопительные, вентиляционные и кондиционирующие установки.

Совокупность кузова, шасси или прицепа, РЭА и вспомогательного оборудования называют аппаратной машиной (АМ). Особенностью АМ является наличие температурного фона внутри кузова за счет теплового деления РЭА, вспомогательного оборудования, операторов (в обслуживаемых АМ) и за счет солнечной радиации (РС). Так как АМ может работать в разных климатических условиях, то, кроме внутренних и внешних источников теплового деления, необходимо совместно с ними учитывать и параметры внутренней (в кузове) и внешней (окружающей) среды.

Для оценки степени комфортности систем вентиляции и кондиционирования [5, 7] используют понятия эквивалентно-эффективной, эффективной и радиационно-эффективной температур. Эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ) применяется для оценки одновременно

* Составители Ю. Г. Володин, Г. В. Малюков.

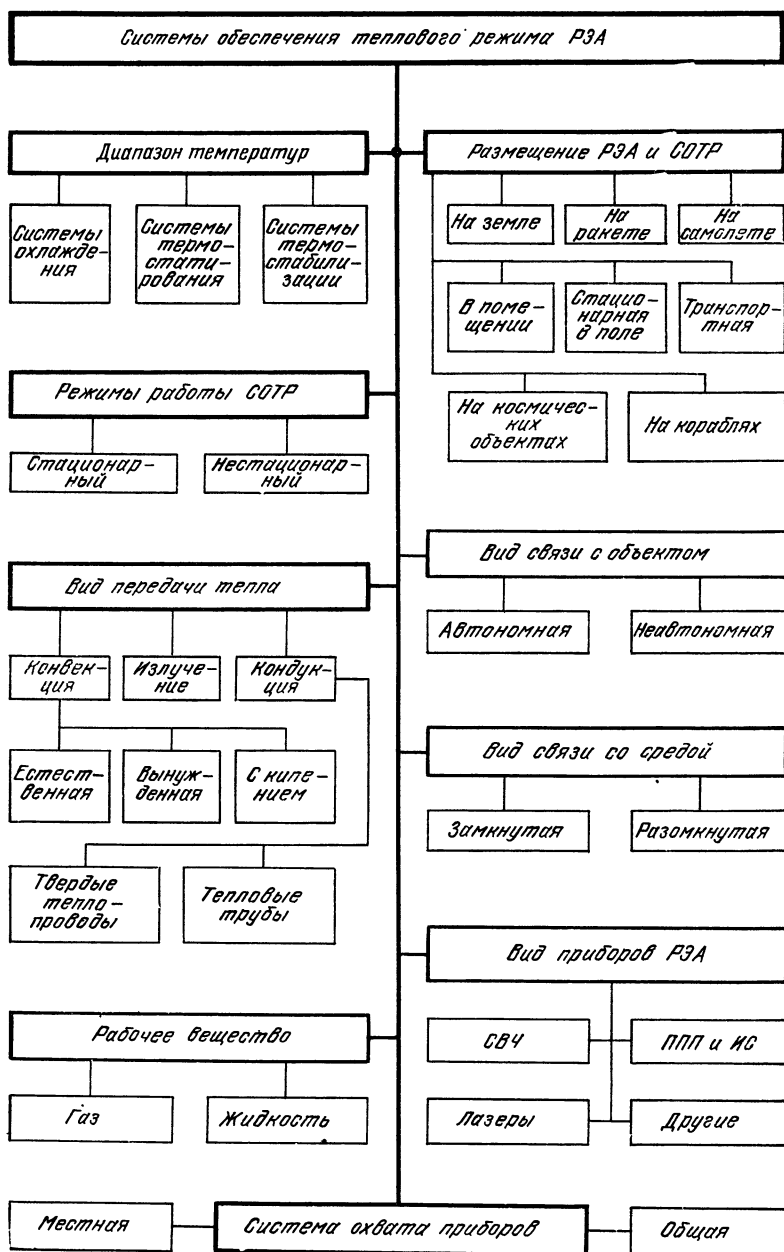


Рис. 13.15. Классификация СТР по характерным группам параметров

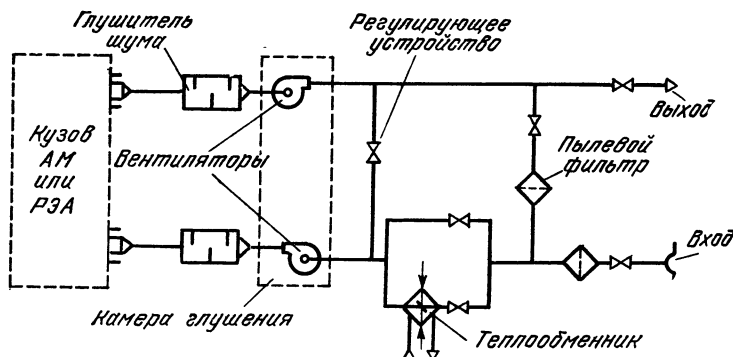


Рис. 13.16. Принципиальная схема воздушной СОТР

го влияния на человека-оператора температуры, скорости и относительной влажности (Вл) воздуха. Эффективная температура (ЭТ) используется при оценке влияния температуры и Вл спокойного воздуха. За ЭТ принимают температуру насыщенного воздуха, который обладает такой же охлаждающей способностью, как и воздух с заданными значениями температуры и влажности. Радиационно-эффективная температура (РЭТ) применяется для оценки одновременного воздействия температуры воздуха и излучения окружающих человека нагретых поверхностей.

За основу многих СОТР для АМ принята схема, показанная на рис. 13.16. Она может работать как приточно-вытяжная, приточная, вытяжная с открытым и замкнутым контуром и в режиме рециркуляции. Одновременная работа приточного и вытяжного вентиляторов обеспечивает приточно-вытяжной режим работы; их раздельная работа — приточный или вытяжной режим. При заборе воздуха из окружающей среды и его выбросе система работает с открытым, а при циркуляции охлаждающего воздуха только внутри системы — с закрытым контуром. Возможны режимы рециркуляции (с частичным выбросом воздуха в окружающую среду) и с двойным контуром. Выбор той или иной схемы определяется требованиями создания нормального теплового режима АМ, при котором температура внутри

РЭА и температура воздуха в АМ не должны превышать норм ТУ. Кроме того, температура и скорость движения воздуха, температуры поверхностей, окружающих обслуживающий персонал (в обслуживаемых АМ), и разность радиационной температуры и температуры воздуха в кузове АМ соответствуют медико-техническим нормам ТУ.

Тепловой режим аппаратной машины

Для оценки теплового режима АМ необходимо знать температуру воздуха или поверхности (кузова, корпуса РЭА и ее элементов) в любой точке АМ. Определение температур проводят по общей методике [14, 15], по которой последовательно рассчитывают: 1) средние температуры нагретой зоны и воздуха внутри АМ, внутренней и наружной поверхностей кузова АМ; 2) средние температуры нагретых зон, воздуха и кожухов блоков РЭА; 3) температуры поверхностей элементов и воздуха вокруг них. Нагретая зона АМ представляет совокупность конструкций РЭА и вспомогательного оборудования, устанавливаемых внутри АМ. Нагретая зона характеризуется мощностью Φ_z , рассеиваемой всеми источниками тепла, средней температурой θ_{zv} , поверхностью S_{zv} , омываемой воздушными потоками, и поверхностью S_{zk} , участвующей в теплообмене за счет излучения со стенками АМ.

Тепловой поток НЗ

$$\Phi_3 = \sum_n \Phi_i + \Phi_{ок} - \Phi_{вл} - \Phi_{вц}, \quad (13.19)$$

где n — число отдельных устройств РЭА (стоек, блоков, пультов и т. п.), каждое из которых рассеивает тепловой поток Φ_i , Вт; $\Phi_{ок}$ — тепловой поток солнечного излучения, проходящий через остекленные поверхности кузова АМ, Вт; $\Phi_{вл}$ и $\Phi_{вц}$ — тепловые потоки, отводимые локальными и централизованными вентиляционными системами, Вт.

Так как РЭА и дополнительные устройства с локальными и централизованными вентиляционными системами часть своих тепловых потоков выделяют в кузов, в котором, кроме того, могут работать и операторы, то воздушный поток нагревается не только за счет Φ_3 , но и за счет дополнительного теплового потока

$$\Phi_в = \Phi_{дп} + \Phi_{оп}, \quad (13.20)$$

где $\Phi_{дп}$ — тепловой поток от РЭА и дополнительных устройств, Вт; $\Phi_{оп}$ — тепловой поток от операторов, Вт.

Рассматривая охлаждающий воздушный поток через кузов АМ в виде стока тепловой энергии, можно записать:

$$\Phi_{ст} = G_v c_p \rho (\theta_{вых} - \theta_{вх}), \quad (13.21)$$

где $\Phi_{ст}$ — тепловой поток стока, Вт; G_v — объемный расход охлаждающего воздуха, проходящего через кузов АМ, м³/с; c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг · К); ρ — плотность воздуха, кг/м³; $\theta_{вых}$ и $\theta_{вх}$ — температуры воздуха на входе и выходе СОТР кузова АМ, К.

Среднеобъемная температура воздуха в кузове АМ

$$\theta_в = 0,5 (\theta_{вых} + \theta_{вх}), \quad (13.22)$$

тогда тепловой поток стока определяется так

$$\Phi_{ст} = \sigma_w (\theta_в - \theta_{вх}), \quad (13.23)$$

где σ_w — тепловая проводимость между источниками тепла в кузове АМ и потоком охлаждающего воздуха

Для оценки средних температур НЗ, воздуха, внутренней и наружной поверхностей стенок кузова АМ используют систему уравнений

$$\begin{aligned} \Phi_в &= \sigma_{ав} (\theta_в - \theta_в) + \sigma_{зк} (\theta_в - \theta_{кв}), \\ \sigma_w (\theta_в - \theta_{вх}) &= \sigma_{ав} (\theta_в - \theta_в) + \\ &+ \sigma_{кв} (\theta_{кв} - \theta_в) + \Phi_в, \\ \sigma_{кв} (\theta_{кв} - \theta_в) &= \sigma_{зк} (\theta_в - \theta_{кв}) + \\ &+ \sigma_{из} (\theta_{кн} - \theta_{кв}), \\ \Phi_{рс} &= \sigma_{кс} (\theta_{кн} - \theta_с) + \\ &+ \sigma_{из} (\theta_{кн} - \theta_{кв}), \end{aligned} \quad (13.24)$$

где $\sigma_{ав}$ — тепловая проводимость за счет конвекции от НЗ к воздуху внутри АМ, Вт/К; $\sigma_{зк}$ — тепловая проводимость за счет излучения от НЗ к внутренней поверхности кузова АМ, Вт/К; $\sigma_{кв}$ — тепловая проводимость за счет конвекции от внутренней поверхности кузова к воздуху, Вт/К; $\sigma_{из}$ — тепловая проводимость, обусловленная теплопроводностью стенок кузова АМ, Вт/К; $\sigma_{кс}$ — полная тепловая проводимость от поверхности кузова АМ в окружающую среду, Вт/К; $\Phi_{рс}$ — тепловой поток, поступающий к кузову АМ от РС, Вт; $\theta_с$ — температура окружающей АМ среды, К; $\theta_{кв}$, $\theta_{кн}$ — температуры внутренней и наружной поверхностей кузова, К.

Так как тепловые проводимости в системе уравнений (13.24) являются нелинейными функциями температуры, то при решении этой системы используют метод последовательных приближений [15], представляя систему в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \theta_с + F_{3в} \theta_в + F_{3вх} \theta_{вх} + F_{3зс} \theta_{рс}, \\ \theta_в &= \theta_с + F_{1в} \theta_3 + F_{2в} \theta_{вх} + F_{3в} \theta_{рс}, \end{aligned} \quad (13.25)$$

$$\theta_{кв} = \theta_с + [\sigma_{зк} (\theta_в - \theta_с) + \sigma_{кв} (\theta_в - \theta_с) + a \Phi_{рс}] / \sigma_0,$$

$$\theta_{кн} = \theta_с + a (\theta_{кв} - \theta_с) + \Phi_{рс} 2 / \sigma_{из}$$

В уравнениях (13.25) приняты следующие обозначения

$$\begin{aligned} \Phi_{вх} &= \Phi_{вх} + \sigma_w (\theta_{вх} - \theta_с), \quad a = \\ &= (1 + \sigma_{кс} / \sigma_{из})^{-1}, \\ \sigma_0 &= a \sigma_{кс} + \sigma_{зк} + \sigma_{кв}, \\ \sigma_1 &= \sigma_{ав} + \sigma_{кв} \sigma_{зк} / \sigma_0. \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = \sigma_w + \sigma_{3B} + \sigma_{KB} - \sigma_{KB}^2 / \sigma_0. \quad (13.26)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{2B} + \sigma_{3K} - \sigma_{3K}^2 / \sigma_0$$

$$\sigma^2 = \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_1^2, \quad F_{1B} = \sigma_2 / \sigma^2, \quad F_{2B} = \\ = \sigma_1 / \sigma^2,$$

$$F_{3B} = a (F_{1B} \sigma_{3K} + F_{2B} \sigma_{KB}) / \sigma_0,$$

$$F_{1B} = \sigma_1 / \sigma^2, \quad F_{2B} = \sigma_2 / \sigma^2,$$

$$F_{3B} = a (F_{1K} \sigma_{3K} + F_{2B} \sigma_{KB}) / \sigma_0.$$

Расчет тепловых проводимостей производится по известным зависимостям [5, 14, 15]. При расчете $\sigma_{jB} = \alpha_{jB} S_{jB}$, $\sigma_{j3} = \alpha_{j3} S_{j3}$ и $\sigma_{jKB} = \alpha_{jKB} S_{jKB}$ (α_j — коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена j -го кожуха РЭА, S_j — соответствующие им поверхности кожухов). Рекомендуется при вычислениях α_{jB} полагать $\theta_j = \theta_0$ и $\theta_0 = \theta_w$, а при вычислении $\alpha_{j3} - \theta_1 = \theta_2 = \theta_3$, степень приведенной черноты $\epsilon_{пр12} = 0,885$ и коэффициент облученности $\phi_{12} = 1$. При вычислениях α_{jKB} полагают $\theta_1 = \theta_3$, $\theta_2 = \theta_{KB}$, $\epsilon_{пр12} = 0,885$ и $\phi_{12} = 1$.

Расчет тепловых потоков от солнечной радиации

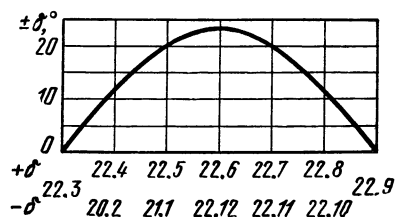
Для практических расчетов тепловых потоков от РС используют параметр, называемый интенсивностью солнечной радиации

$$I = I_{пр} + I_{рас} \quad (13.27)$$

где $I_{пр}$ и $I_{рас}$ — прямые и рассеянные потоки РС, Вт/м². I учитывают только при высоте Солнца $h > 5^\circ$:

$$I_{пр} = 1360 \sin h / (\sin h + 0,33), \quad (13.28)$$

Рис. 13.17. Зависимость склонения Солнца δ от времени года. Например, 22.03 и 22.09 $\delta = 0$, а 20.02 и 22.04 соответственно — $-11^\circ 30'$ и $+11^\circ 30'$



$I_{рас}$ при безоблачном небе для горизонтальной $I_{рас}^H$ и вертикальной $I_{рас}^B$ поверхностей принимают соответственно равным 60 и 30 Вт/м². Высота Солнца h определяется географической широтой места φ , склонением Солнца δ и часовым углом γ в градусах ($\gamma = 15t$, t — истинное местное время в часах, отсчитанное от полудня):

$$h = \arcsin (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \gamma). \quad (13.29)$$

Склонение Солнца изменяется в зависимости от даты и может быть оценено по рис. 13.17. Интенсивность прямых потоков РС для горизонтально и вертикально ориентированных поверхностей:

$$I_{пр}^H = I_{пр} \sin h, \quad I_{пр}^B = I_{пр} \cos h \times \sin (\alpha - x), \quad (13.30)$$

где x — угол, определяемый положением вертикальной поверхности относительно меридиана, град; $\alpha = \arcsin (\cos \delta \sin \varphi / \cos h)$ — азимут Солнца. Отсюда тепловой поток солнечной радиации

$$\Phi_{рс} = A_s / S_s, \quad (13.31)$$

где A_s — поглощательная способность поверхности по отношению к солнечным лучам. Для кузовов АМ принимается $A_s = 0,8 \dots 0,9$.

В связи с тем, что ориентация кузова АМ по отношению к Солнцу может быть произвольной (рис. 13.18), реальные площади частей кузова можно заменить эквивалентной поверхностью $S_{ЭК}$ в виде ориентированной перпендикулярно лучам Солнца и воспринимающей такой же $\Phi_{рс}$, как и все вместе взятые поверхности кузова АМ. При этом

$$S_{ЭК} = S'_1 + S'_2 + S'_3, \\ S'_1 = (S_6 + S_c \sin \psi) \cos \alpha \cos h, \quad (13.32)$$

$$S'_2 = S_T \sin \alpha \cos h,$$

$$S'_3 = (S_{кр} + S_c \cos \psi) \sin h,$$

где S_6 , S_T , $S_{кр}$, S_c — соответственные площади боковой и торцевой сте-

нок, крыши и скоса кузова ψ — угол наклона скосов крыши к горизонтальной плоскости. Максимальное значение $S_{\text{ЭК}}^{\text{max}}$ будет тогда, когда $\alpha = \alpha_{\text{max}}$ и $h = h_{\text{max}}$, где

$$\alpha_{\text{max}} = \arccos [(S_0 + S_c \sin \psi) / \sqrt{(S_0 + S_c \sin \psi)^2 + S_r^2}],$$

$$h_{\text{max}} = \arctg [(S_{\text{кр}} + S_c \cos \psi) / \sqrt{(S_0 + S_c \sin \psi)^2 + S_r^2}], \quad (13.33)$$

откуда из (13.31) окончательно получаем:

$$\Phi_{\text{РС}} = A_s [I_{\text{пр}} S_{\text{ЭК}}^{\text{max}} \cos(h - h_{\text{max}}) + I_{\text{рас}}^r (S_r + 0,5 S_b)], \quad (13.34)$$

где S_r и S_b — горизонтальные и вертикальные поверхности кузова АМ. Расчет $I_{\text{пр}}^{\text{max}}$ (предельный случай воздействия РС) ведется для календарной даты: июль, 12 ч. 30 мин. После подстановки этих значений в (13.29) получим

$$h_{\text{max}} = \arcsin (0,4 \sin \psi + 0,91 \times \cos \psi) \quad (13.35)$$

При этом пренебрегаем РС, отраженной от поверхности земли и окружающих предметов и проникающей внутрь кузова АМ через остекленные поверхности принимаем $A_s = 0,85$.

Максимальное значение теплового потока, пропускаемого через остекление кузова

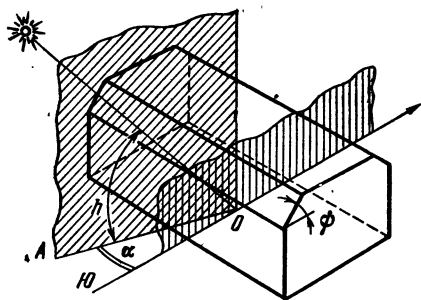


Рис. 13.18. Азимутальный α и угол высоты h Солнца, определяющие облученность кузова АМ; ψ — угол скоса

$$\Phi_{\text{ОК}}^{\text{max}} = (0,85 + 0,08 \alpha_{\text{КВ}} / \alpha_{\text{КН}}) I_{\text{пр}} \times S_{\text{ЭК ОК}}^{\text{max}} \cos(h - h_{\text{max}}), \quad (13.36)$$

где $\alpha_{\text{КВ}}$ и $\alpha_{\text{КН}}$ — полные коэффициенты теплообмена внутренней и наружной поверхностей окон; $S_{\text{ЭК ОК}}^{\text{max}}$ — часть $S_{\text{ЭК}}^{\text{max}}$, равная сумме всех остекленных поверхностей кузова. Завешивая окна плотным белым материалом, можно уменьшить $\Phi_{\text{ОК}}$ на 30..40%. Тепловой поток от РС, поступающий через стенки кузова,

$$\Phi_{\text{РС С}} = \Phi_{\text{РС}} k / \alpha_{\text{КВ}}, \quad (13.37)$$

где k — коэффициент теплопередачи кузова АМ (как у плоской стенки, рис. 13.5)

Для характерных типов кузовов, размеры которых приведены в таблице, данные для расчетов $\Phi_{\text{РС}}$ следующие:

тип кузова	Длина, мм	Ширина, мм	Высота по оси, мм	Высота по борту, мм	ψ , град	$\alpha_{\text{ЭК макс}}$, м	$\alpha_{\text{макс}}$, град	$i_{\text{макс}}$, град	$S_{\text{р}}$, м ²	$S_{\text{в}}$, м ²	$S_{\text{вн мин}}$, м ²	$S_{\text{ЭК макс}}$, м ²
№ 1	457	2460	1870	1495	52	13,1	27	46	10,8	22,9	9,8	0,91
№ 2	4060	2310	1870	1570	56	11,0	26	45	9,0	22,4	8,6	0,70
№ 3	3740	2310	1870	1570	55	10,8	31	44	7,5	21,2	8,1	0,68

Примеры расчетов тепловых потоков и температур кузова аппаратной машины

Пример 4. Определить максимальный тепловой поток от солнечной радиации $\Phi_{рс}$, воспринимаемый наружными поверхностями кузова № 1 без окон. Склонение Солнца $\delta = 20^\circ$, время местное — 12 ч. 30 мин, место расположения кузова (φ) — 40° северной широты.

Решение. Определяем высоту Солнца по (13.29):

$$h = \arcsin [\sin 40^\circ \sin 20^\circ + \cos \times 40^\circ \cos 20^\circ \cos 15 (12,5 - 12)] = 69^\circ.$$

Интенсивность солнечной радиации рассчитывается по (13.28):

$$I_{пр} = 1360 \sin h / (\sin h + 0,33) = 1004,8 \text{ Вт/м}^2,$$

по размерам кузова № 1 из таблицы вычисляем

$$S_6 = 6,83; \quad S_T = 4,38; \quad S_{кр} = 8,56 \text{ и } S_c = 2,17,$$

а затем по (13.33) находим максимальную высоту Солнца:

$$h_{\max} = \arctg [(8,56 + 2,17 \times \cos 52^\circ / \sqrt{(6,83 + 2,17 \sin 52^\circ)^2 + 4,38^2})] = 45,88^\circ.$$

По данным таблицы $S_{эк}^{\max}$, S_r , S_v и расчетным данным h , h_{\max} и $I_{рас} = 60 \text{ Вт/м}^2$ с учетом формулы (13.34) вычисляем

$$\Phi_{рс} = 0,85 [1004,8 \cdot 13,1 \times \cos (69 - 45,88) + 60(10,8 + 0,5 \times 22,9)] = 11424,6 \text{ Вт}$$

Пример 5. Определить максимальный тепловой поток солнечной радиации, вносимый внутрь кузова № 1 через остекленные поверхности.

Решение. Вычисление выполняем по (13.36), подставляя значения $I_{пр}$, h , h_{\max} из примера 4, а $S_{эк}^{\max}$ из данных таблицы для кузова № 1. Отношение коэффициентов тепло-

обмена принимаем $\alpha_{кв}\alpha_{кн} = 0,35$. Тогда имеем:

$$\Phi_{ок}^{\max} = 0,878 \cdot 1004 \cdot 0,91 \times \times \cos (69 - 45,88) = 733,3 \text{ Вт}.$$

Пример 6. Определить общий тепловой поток солнечной радиации, поступающий внутрь кузова № 1, с учетом потока через остекленную поверхность. Исходные данные взять из примеров 4 и 5. Коэффициенты теплопередачи и теплообмена наружной поверхности кузова берем $k = 1,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ и $\alpha_{кн} = 14 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$

Решение. По формуле (13.37) вычислим $\Phi_{рс} = 11424,6 \cdot 1,1/14 = 897,6 \text{ Вт}$. Общий тепловой поток

$$\Phi_{рс\Sigma} = \Phi_{рс} + \Phi_{ок}^{\max} = 897,6 + 738,3 = 1635,9 \text{ Вт}.$$

Пример 7. Определить температуры нагретой зоны θ_z , воздуха θ_v , внутренней $\theta_{кв}$ и наружной $\theta_{кн}$ поверхностей кузова № 1 без окон при наружной температуре $\theta_c = 303 \text{ К}$ и воздействии солнечной радиации. Тепловой поток от РЭА $\Phi = 3230 \text{ Вт}$, РЭА обслуживается пятью операторами $\Phi_{оп} = 5 \cdot 150 = 750 \text{ Вт}$, для охлаждения используется воздух от кондиционера с расходом $G_v = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}$ и температурой на входе $\theta_{вх} = 293 \text{ К}$. Значения $\Phi_{вл} = 1000 \text{ Вт}$ (по заданию); $\Phi_{рс} = 11424,6 \text{ Вт}$ (из примера 4); поверхности НЗ $S_{зв} = 29 \text{ м}^2$; $S_{эк} = 27 \text{ м}^2$, $S_{кв} = 44,2 \text{ м}^2$ и $S_{кн} = 46,6 \text{ м}^2$; полная тепловая проводимость кузова (по заданию) $\sigma_{кв} = 95 \text{ Вт/К}$ $\Phi_{дп} = \Phi_{ок} = \Phi_{вц} = 0$.

Решение. В первом приближении принимаем:

$$\alpha_{кн к} + \alpha_{кн л} = 7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \\ \alpha_{зв} = 4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad \alpha_{эк} = 6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \\ \text{и } \alpha_{кв} = 3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

Вычисляем σ_i

$$\sigma_{зв} = 4 \cdot 29 = 116 \text{ Вт/К}, \\ \sigma_{эк} = 6 \cdot 27 = 162 \text{ Вт/К}, \\ \sigma_{кв} = 3 \cdot 44,2 = 133 \text{ Вт/К}, \\ \sigma_{кн} = 7 \cdot 46,6 = 326 \text{ Вт/К}.$$

Тепловая проводимость σ_w стока тепла определяется по формуле (13.23). Значение ρ принимаем при

$$\theta_{вх} = 393 \text{ К, т. е. } \rho = 1,2 \text{ кг/м}^3, \\ C_p = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \text{ Тогда } \sigma_w = \\ = 2 \cdot 0,278 \cdot 1000 \cdot 1,2 = 667 \text{ Вт/К.}$$

Согласно (13.26) имеем

$$\Phi_{в w} = 1000 + 667 \cdot (293 - 303) = \\ = -5670 \text{ Вт,}$$

$$a = 1/(1 + 326/95) = 0,226,$$

$$\sigma_0 = 0,226 \cdot 326 + 162 + 133 = \\ = 369 \text{ Вт/К}$$

$$\sigma_1 = 116 + 133 \cdot 162/369 = 174 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma_2 = 667 + 116 - 133 \cdot 133/369 = \\ = 868 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma_3 = 116 + 162 - 162 \cdot 162/369 = \\ = 207 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma^2 = 868 \cdot 207 - 174^2 = 1,5 \times \\ \times 10^5 \text{ (Вт/К)}^2,$$

$$F_{13} = 868/1,5 \cdot 10^5 = 5,77 \cdot 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{23} = 174/1,5 \cdot 10^5 = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{33} = 0,226 (5,77 \cdot 10^{-3} \cdot 162 + \\ + 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 133)/369 = 0,65 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{1B} = 174/1,5 \cdot 10^5 = 0,116 \cdot 10^{-4} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{2B} = 207/1,5 \cdot 10^5 = 0,136 \cdot 10^{-4} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{3B} = 0,226 (0,116 \cdot 10^{-4} \cdot 162 + \\ + 0,136 \cdot 10^{-4} \cdot 133)/369 = 0,225 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт.}$$

По формулам (13.25) рассчитываем температуры в первом приближении:

$$\theta_3^I = 319 \text{ К, } \theta_B^I = 313 \text{ К, } \theta_{кв}^I = \\ = 322 \text{ К, } \theta_{кн}^I = 339 \text{ К}$$

Второе приближение. Определим по известным соотношениям коэффициенты теплообмена во втором приближении:

$$\alpha_{кн к} + \alpha_{кн л} = 9,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К,}$$

$$\alpha_{зк} = 4,33 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К, } \alpha_{зв} = \\ = 2,68 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К, } \alpha_{кв} = 3,22 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К.}$$

Рассчитываем тепловые проводимости во втором приближении:

$$\sigma_{зв} = 2,68 \cdot 29 = 77,7 \text{ Вт/К, } \sigma_{зк} = \\ = 4,33 \cdot 27 = 116,9 \text{ Вт/К, } \sigma_{кв} = \\ = 3,22 \cdot 44,2 = 142,3 \text{ Вт/К, } \sigma_{кк} = \\ = 9,9 \cdot 46,6 = 461,3 \text{ Вт/К.}$$

По (13.26) имеем во втором приближении:

$$\Phi_{в w} = -5670 \text{ Вт (из первого приближения), } a = 1/(1 + 550/95) = \\ = 0,147,$$

$$\sigma_0 = 0,147 \cdot 550 + 116,9 + \\ + 142,3 = 340 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma_1 = 77,7 + 142,3 \cdot 116,9/340 = \\ = 126,6 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma_2 = 667 + 77,7 + 142,3 - 142,3 \times \\ \times 142,3/340 = 827 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma_3 = 77,7 + 116,9 - 116,9 \times \\ \times 116,9/340 = 154,4 \text{ Вт/К,}$$

$$\sigma^2 = 827 \cdot 154,4 - 126,6 \cdot 126,6 = \\ = 11,2 \cdot 10^4 \text{ (Вт/К)}^2,$$

$$F_{13} = 827/11,2 \cdot 10^4 = 7,38 \cdot 10^{-3}, \\ \text{К/Вт,}$$

$$F_{23} = 126,6/11,2 \cdot 10^4 = 1,13 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{33} = 0,47 (7,38 \cdot 10^{-3} \cdot 116,9 + \\ + 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 142,3)/340 = 1,41 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{1B} = 126,6/(11,2 \cdot 10^4) = 1,13 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт,}$$

$$F_{2B} = 154,4/(11,2 \cdot 10^4) = 1,38 \times \\ \times 10^{-3}, \text{ К/Вт,}$$

$$F_{зв} = 0,147 (1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 116,9 + \\ + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 142,3)/340 = 0,142 \times \\ \times 10^{-3} \text{ К/Вт.}$$

По (13.25) рассчитываем температуры во втором приближении:

$$\theta_3^{II} = 303 + 7,38 \cdot 10^{-3} \cdot 2,23 \times \\ \times 10^3 - 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 5,67 \times \\ \times 10^3 + 1,41 \cdot 10^{-3} \cdot 13,5 \cdot 10^3 = \\ = 332 \text{ К,}$$

$$\theta_{\text{в}}^{\text{II}} = 303 + 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 2,23 \times \\ \times 10^3 - 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 5,67 \times 10^3 + \\ + 0,142 \cdot 10^{-3} \cdot 13,5 \cdot 10^3 = 301,6 \text{ К},$$

$$\theta_{\text{кв}}^{\text{II}} = 303 + [116,9 \cdot (332 - 303) + \\ + 142,3 (301,6 - 303) + 0,147 \times \\ \times 13,5 \cdot 10^3] / 340 = 318,2 \text{ К},$$

$$\theta_{\text{кн}}^{\text{II}} = 303 + 0,147 (318 - 303) + \\ + 0,147 \cdot 13,5 \cdot 10^3 / 95 = 326 \text{ К}.$$

Так как значения температур в первом и втором приближениях отличаются мало, то в качестве конечного результата расчетов могут быть приняты их среднеарифметические значения. Окончательно имеем

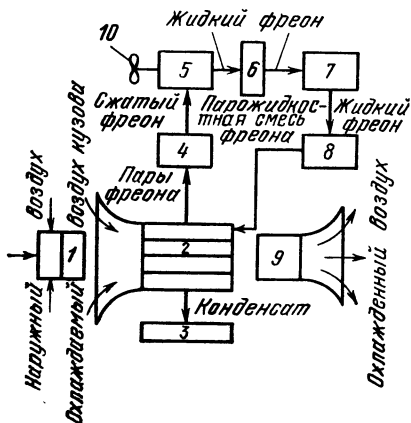
$$\theta_{\text{с}} = 325,5 \text{ К}, \quad \theta_{\text{в}} = 307,3 \text{ К}, \quad \theta_{\text{кв}} = \\ = 320,1 \text{ К}, \quad \theta_{\text{кн}} = 332,5 \text{ К}.$$

Выбор кондиционера

Применение кондиционеров для АМ связано с увеличением тепловыделения РЭА, сужением диапазона допустимых температур, необходимостью работы в окружающей среде

Рис. 13.19. Схема работы кондиционера:

1 — фильтровентиляционная установка кузова; 2 — воздухоохладитель; 3 — сборник конденсата; 4 — компрессор; 5 — конденсатор; 6 — ресивер; 7 — осушитель с фильтром; 8 — терморегулирующий вентиль; 9 — вентилятор воздухоохладителя (воздух кузова); 10 — вентилятор конденсатора (наружный воздух)



с температурой и другими параметрами, превышающими допустимые для операторов АМ. Поэтому кондиционер должен обеспечивать: 1) нормальные тепловые режимы РЭА и ее элементов; 2) температуру, влажность, скорость газовый состав и степень очистки от пыли воздуха внутри АМ по нормам комфортных условий для операторов; 3) герметичность и минимальный уровень электромагнитных помех внутри кузова АМ. Таким требованиям соответствуют автономные кондиционеры с холодильными машинами на фреоне (рис. 13.19) в рециркуляционном режиме с добавлением наружного воздуха, которые используются в обслуживаемых АМ [5].

Последовательность выбора кондиционера следующая. Составляем схему теплового, влажностного и воздушного балансов для работы в летний период и определяем составляющие полного теплового потока $\Phi_{\text{вн}}$ внутри кузова: тепловой поток, вносимый в кузов извне и тепловой поток внутренних источников. Эти параметры должны быть определены с большой точностью. Заниженное значение $\Phi_{\text{вн}}$ приводит к перегрузке и повышению температуры в кузове АМ, а следовательно, к увеличению энергопотребления массы и стоимости кондиционера.

Упрощенное уравнение теплового баланса кузова АМ без учета тепловых потоков, рассеиваемых операторами, освещением и т. п.:

$$\Phi_{\text{вн}} = \Phi_{\text{дп}} + \Phi_{\text{рс}} + \Phi_{\text{ог}}, \quad (13.38)$$

где $\Phi_{\text{ог}}$ — тепловой поток, поступающий в кузов АМ через ограждение за счет разности наружной и внутренней температуры. После преобразования уравнение (13.38) имеет вид:

$$G_{\text{в}} c_p (\theta_{\text{в}} - \theta_{\text{во}}) = \Phi_{\text{дп}} + \Phi_{\text{рс}} + \\ + kS (\theta_{\text{с}} - \theta_{\text{в}}), \quad (13.39)$$

где $G_{\text{в}}$ — расход воздуха через воздухоохладитель; $\theta_{\text{во}}$ — температура воздуха на выходе из воздухоохладителя; k и S — коэффициент теплопередачи и поверхность теплопередачи кузова АМ.

Под *холодопроизводительностью* кондиционера понимают тепловой поток, поглощенный кондиционером из

воздуха, проходящего через его охладитель при условии, что в кондиционируемом кузове сохраняется постоянно установившаяся температура.

Холодопроизводительность кондиционера, работающего в режиме рециркуляции без подмешивания наружного воздуха и без конденсации влаги в воздухоохладителе,

$$\Phi_{\text{кнд}} = K_{\text{рв}} k_{\text{во}} S_{\text{во}} \Delta\theta_{\text{лог}}, \quad (13.40)$$

где $K_{\text{рв}}$ — коэффициент рабочего времени (при непрерывной работе $K_{\text{рв}} = 1$); $k_{\text{во}}$ — коэффициент теплопередачи поверхности воздухоохладителя, $S_{\text{во}}$ — теплопередающая поверхность воздухоохладителя, $\Delta\theta_{\text{лог}}$ — средняя логарифмическая разность температур воздуха и хладагента кондиционера

Значения холодопроизводительности для кондиционеров даны для следующих номинальных значений: $\theta_{\text{с}} = 308 \text{ К}$ (35°С), Вл в кузове 50%, $\theta_{\text{в}} = 298 \text{ К}$. При выборе кондиционера проводится расчет температуры наружного воздуха $\theta_{\text{с расч}}$. Полагая, что левая часть уравнения (13.39) равна $\Phi_{\text{кнд}}$, получим:

$$\theta_{\text{с расч}} = \theta_{\text{в}} + (\Phi_{\text{кнд}} - \Phi_{\text{дп}} - \Phi_{\text{рс}}) / kS. \quad (13.41)$$

Холодопроизводительность кондиционера, работающего в режиме рециркуляции с подмешиванием наружного воздуха и с конденсацией влаги в воздухоохладителе,

$$\Phi_{\text{кнд}} = \Phi_{\text{сух}} + \Phi_{\text{влж}}, \quad (13.42)$$

где $\Phi_{\text{сух}}$ и $\Phi_{\text{влж}}$ — тепловые потоки для охлаждения сухого воздуха и конденсации влаги из воздуха. В этом режиме для охлаждения аппаратуры затрачивается только холодопроизводительность $\Phi_{\text{сух}}$

Уравнение (13.41) для расчетной температуры имеет вид:

$$\theta_{\text{с расч}} = \theta_{\text{в}} + (\Phi_{\text{кнд}} - \Phi_{\text{влж}} - \Phi_{\text{дп}} - \Phi_{\text{рс}}) / kS. \quad (13.43)$$

Сравнение полученных результатов $\theta_{\text{с расч}}$ с паспортными данными позволяют оценить пригодность кондиционера. При этом, если $\theta_{\text{с расч}} \approx \theta_{\text{с}}$, то кондиционер выбран правильно; если $\theta_{\text{с расч}} > \theta_{\text{с}}$, то кондиционер выбран с запасом и $K_{\text{рв}} < 1$, а его экономичность, масса и стои-

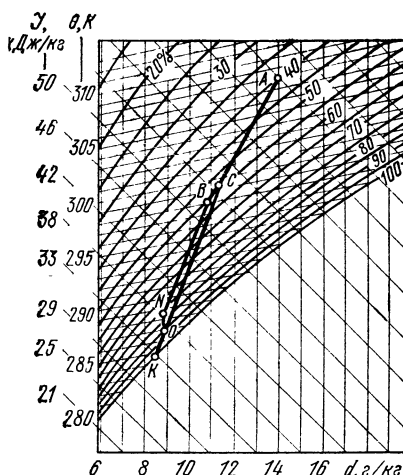


Рис. 13.20. t - d диаграмма влажного воздуха для давления 101 кПа (760 мм рт. ст.)

мость выше, чем в случае $\theta_{\text{с расч}} \approx \theta_{\text{с}}$, если $\theta_{\text{с расч}} < \theta_{\text{с}}$, то кондиционер выбран неправильно. Окончательный выбор кондиционера выполняется с использованием t - d диаграммы, показывающей взаимосвязь основных параметров воздуха при заданном давлении (рис. 13.20).

Вычислив составляющие по уравнению баланса $\Phi_{\text{кнд}} = \Phi_{\text{влж}}$, можно определить требуемую холодопроизводительность кондиционера, которая должна сохраняться при внешних условиях $\theta_{\text{с}} = 323 \text{ К}$ и Вл 40% (внутри кузова АМ при этом $\theta_{\text{в}} = 308 \text{ К}$, Вл 50%). После этого проверяется изменение параметров воздуха при прохождении его через воздухоохладитель. Рассмотрим такую методику расчета на примере.

Пример 8. Кондиционер работает при атмосферном давлении 101 кПа с расходом воздуха $G_{\text{в}} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$. При этом в кузове $\theta_{\text{в}} = 298 \text{ К}$, Вл 55%, тепло- и влагосодержание воздуха $\theta_{\text{в}} = 52,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ и $d_{\text{в}} = 10,8 \text{ г/кг}$, плотность $\rho_{\text{в}} = 1,185 \text{ кг/м}^3$. Для нормального функционирования операторов через фильровентиляционную установку (рис 13.21) подается наружный воздух $G_{\text{с}}^2 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Параметры наружного воздуха: $\theta_{\text{с}} = 303 \text{ К}$, Вл 55%, $\theta_{\text{с}} = 71,5 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, $d_{\text{с}} = 14,1 \text{ г/кг}$, $\rho_{\text{с}} = 1,146 \text{ кг/м}^3$.

Решение Примем, что из полного расхода воздуха кондиционера $G_D = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ для его большей части, идущей на охлаждение кузова АМ, $G_D^B = 900 \text{ м}^3/\text{ч}$ параметры воздуха соответствуют параметрам воздуха в АМ, а его меньшей части (операторы) $G_C^A = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ — параметрам наружного воздуха. Масса смешиваемых сухих частей воздуха $m_B = 1,185 \cdot 900 = 1065 \text{ кг}$ и $m_C = 1,146 \cdot 100 = 114,6 \text{ кг}$, а их отношение $n = 1065/114,6 = 9,3$

На диаграмме $\mathcal{T}-d$ (рис. 13.20) наносим точки А и В, соответствующие d_C и d_B , и соединяем их прямой АВ — линией смешения, на которой на расстоянии $AB/(n+1) = AB/10,3 \approx 0,1AB$ от точки В отмечаем точку С. Эта точка будет характеризовать свойства смеси наружного и внутреннего воздуха: $\theta_{CM} = 229 \text{ К}$, $W_{CM} = 53\%$, $\mathcal{I}_{CM} = 54,5 \times 10^3 \text{ Дж/кг}$, $d_{CM} = 11,2 \text{ г/кг}$.

Наружный воздух, проходя через воздухоохладитель кондиционера, должен понизить свою температуру и влагосодержание до заданных значений, которым соответствует точка О $\mathcal{T}-d$ диаграммы, что позволяет определить тепло- и влагосодержание воздуха на выходе из кондиционера:

$$\mathcal{I}_{\text{кнд}} = \mathcal{I}_{CM} - \Phi_{\text{кнд}}/\rho_V G_D,$$

$$d_0 = d_B - W_{\text{вл}}/\rho_V G_D,$$

где $\Phi_{\text{кнд}}$ — холодопроизводительность кондиционера (суммарный тепловой поток в кузове с учетом вентилятора кондиционера), $W_{\text{вл}}$ — ко-

личество влаги, выделяемое операторами. Полагая $\Phi_{\text{кнд}} = 6100 \text{ Вт}$, $\rho_V = 1,166 \text{ кг/м}^3$ (плотность воздуха при температуре смешивания), получим $\mathcal{I}_0 = 54,5 \cdot 10^3 - 6100 \times 3,6 \cdot 10^3/(1,185 \cdot 1000) = 49,35$ и для пяти операторов $W_{\text{вл}} = 5 \times 185 = 925 \text{ г/ч}$, $d_0 = 10,8 - 925/(1,185 \cdot 1000) = 10,02 \text{ г/кг}$.

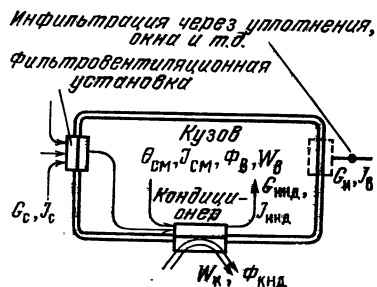
Точка О лежит в области, соответствующей состоянию водяного пара. Соединив точки С и О и продолжив прямую до пересечения с кривой Вл 100%, найдем точку К, которая определяет температуру холодной стенки воздухоохладителя. Таким образом, по $\mathcal{T}-d$ -диаграмме можно определить параметры кондиционера и наглядно представить процессы изменения состояния воздуха: линия АСВ — смешение наружного воздуха с воздухом кузова в зоне всасывания воздухоохладителя, линия СО — охлаждение воздуха в воздухоохладителе, линия ОН — подогрев воздуха в вентиляционной системе, линия НВ — нагрев и увлажнение воздуха в кузове.

Примеры характерных СОТР для кузова аппаратных машин

Рассмотрим четыре характерные конструктивно-компоновочные схемы СОТР, показанные на рис. 13.22 ... 13.25 для кузовов АМ № 1 ... 4. В кузове АМ № 1 (рис. 13.22) располагается РЭА, представляющая собой многоблочные шкафы, одиночные приборы и пульты. Для РЭА используются встроенные локальные вентиляторы (1). Вентилятор пульта предназначен для обдува оператора.

Входное отверстие (2) закрыто сеткой № 6 в один слой (пылевой фильтр грубой очистки). На входе и выходе пылевого фильтра тонкой очистки (3) (размеры $690 \times 590 \times 470 \text{ мм}$, масса 21 кг) находятся два дополнительных фильтра грубой очистки $640 \times 590 \text{ мм}$ (4) и два осевых вентилятора (5). Для уменьшения уровня шума вентиляционная камера (6) оклеена внутри шумопоглощающим материалом. Выходные отверстия (7 и 8) так же, как и входное (2), закрыты сеткой № 6 и могут снаружи закрываться гермокрышками.

Рис. 13.21. Схема распределения тепловых и массовых потоков в кузове



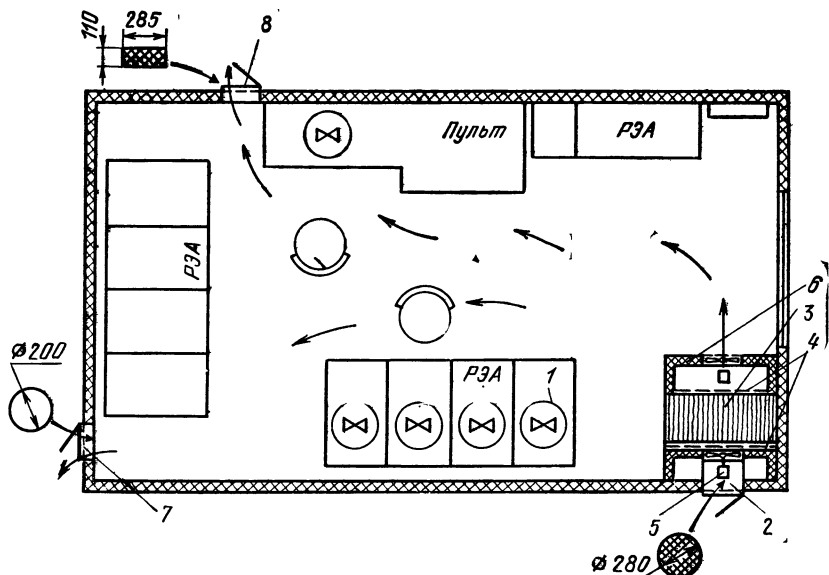


Рис. 13.22. Конструктивно-компоновочная схема СОТР в кузове № 1 (вид сверху, разрез)

В кузове № 2 (рис. 13.23) располагается РЭА, выполненная аналогичным образом. Входное (1) и выходное (2 и 3) отверстия и вентиляционная камера (4) выполнены аналогично устройствам кузова № 1. Воздух из (4) распределяется по кузову с помощью воздуховода (5) и отверстий в нем (6) с регулируемыми заслонками по объему кузова. Большая, чем в кузове № 1, мощность вентиляторов потребовала большей звукоизоляции вентиляционной камеры (4) (камера глушения выполнена из досок толщиной 25 мм, оклеенных поролоном толщиной 30 мм (7)). Фильтр тонкой очистки (8) расположен над центробежным вентилятором (9). Между фильтром (8) и вентилятором (9) находится диффузор (10) с регулирующей заслонкой (11).

В кузове № 3 (рис. 13.24) располагается РЭА, выполненная в основном в унифицированных шкафах, основания которых приспособлены для установки на надколесную нишу кузова № 1. Верхняя и нижняя части унифицированных шкафов в со-

стыкованном состоянии образуют части воздуховодов (1), соединяемых внешним воздуховодом (2) с дроссель-клапанами (3) в единую систему. Входное (4), выходные (5, 6 и 7) отверстия и вентиляционная камера (8) аналогичны используемым в кузове № 2. Данная система СОТР может работать в двух режимах: 1) охлаждающий воздух из входного отверстия (4) проходит только через РЭА и выбрасывается в атмосферу; 2) часть охлаждающего воздуха поступает внутрь кузова. Для обеспечения избыточного давления внутри кузова и создания нормальных условий работы операторам кузова № 1...3 снабжены дополнительно отопительными и общепромышленными вентиляционными устройствами.

В кузове № 4 (рис. 13.25) располагается РЭА, выполненная в виде одноблочных устройств, устанавливаемых на столах и стеллажах, СОТР герметична, поэтому входных и выходных отверстий в кузове нет, а нормальный режим работы РЭА и операторов обеспечивается за счет кондиционера (1) холодопроизводи-

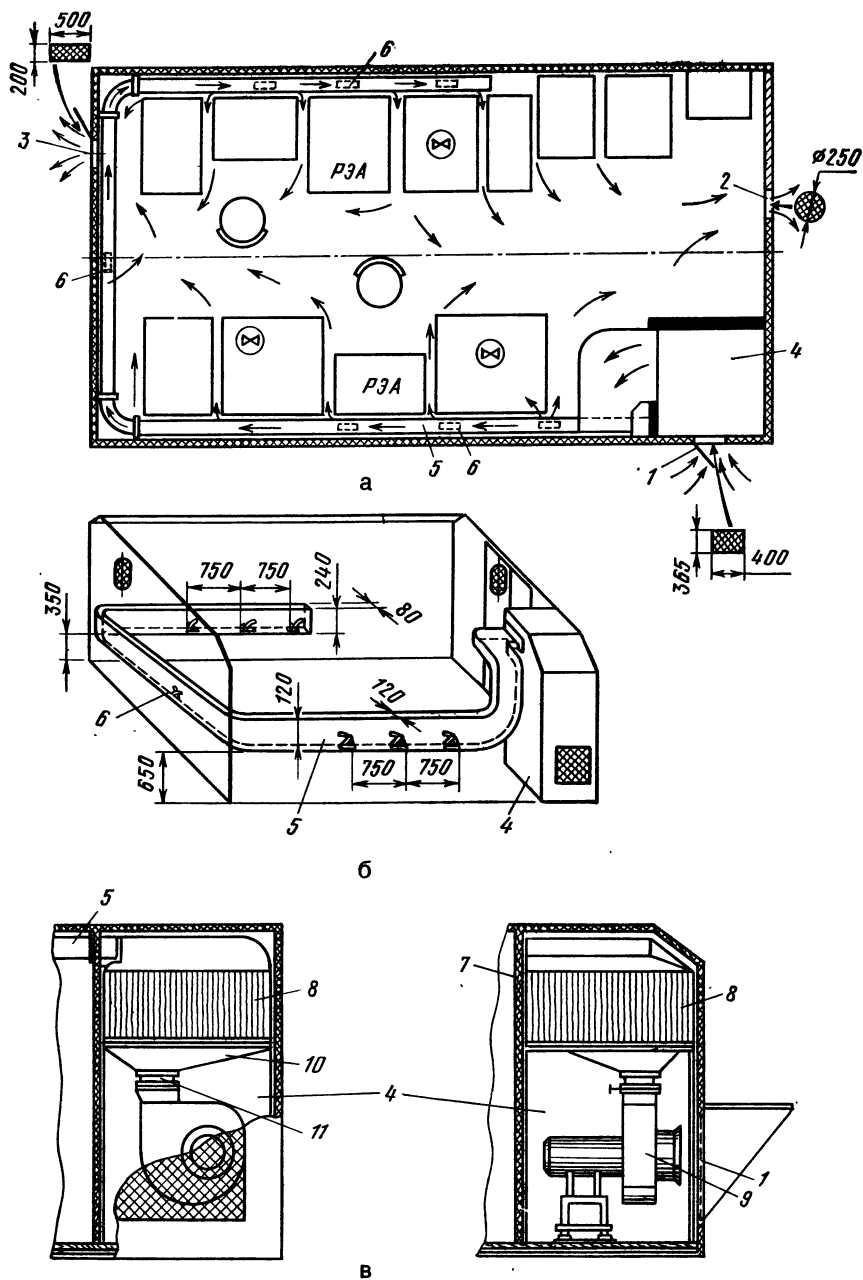


Рис. 13.23. Конструктивно-компоновочная схема СОТР в кузове № 2:

а — вид сверху (разрез), б — пространственное изображение, в — вентиляционная камера в разрезе

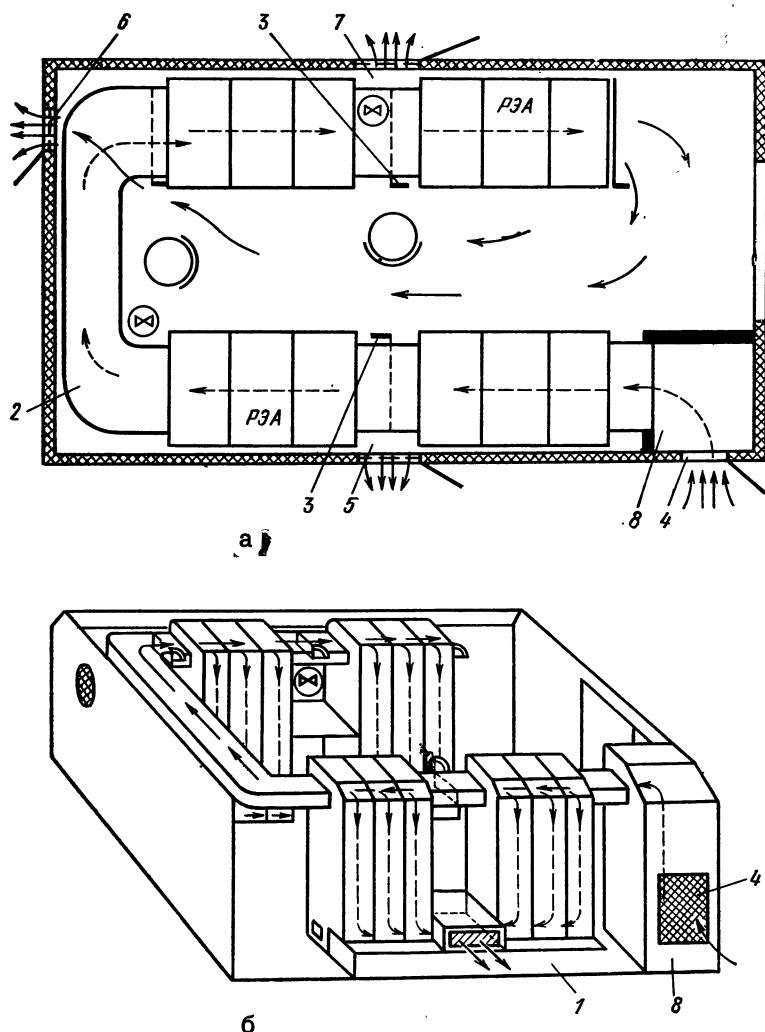


Рис. 13.24. Конструктивно-компоновочная схема СОТР в кузове № 3:
 а — вид сверху (разрез), б — пространственное изображение

тельностью 6,1 кВт, меньшая часть которого ($0,25 \text{ м}^3$) располагается в кузове, а большая ($0,31 \text{ м}^3$) — вне его.

К выходу воздухонапорного агрегата кондиционера (2) подсоединен укрепленный на потолке кузова воздухопровод (3) с отверстиями. Их шар расположения уменьшается с удалением от напорного агрегата (2),

что обеспечивает равномерность подачи воздуха. На задней стенке кузова расположен осевой вентилятор (4), перемешивающий воздух внутри кузова, маломощные центробежные вентиляторы (5) располагаются в теплонагруженных зонах РЭА и обеспечивают их нормальный режим. Имеется возможность использования двух нагревателей (6) с $\Phi_{\Sigma} = 6,4 \text{ кВт}$.

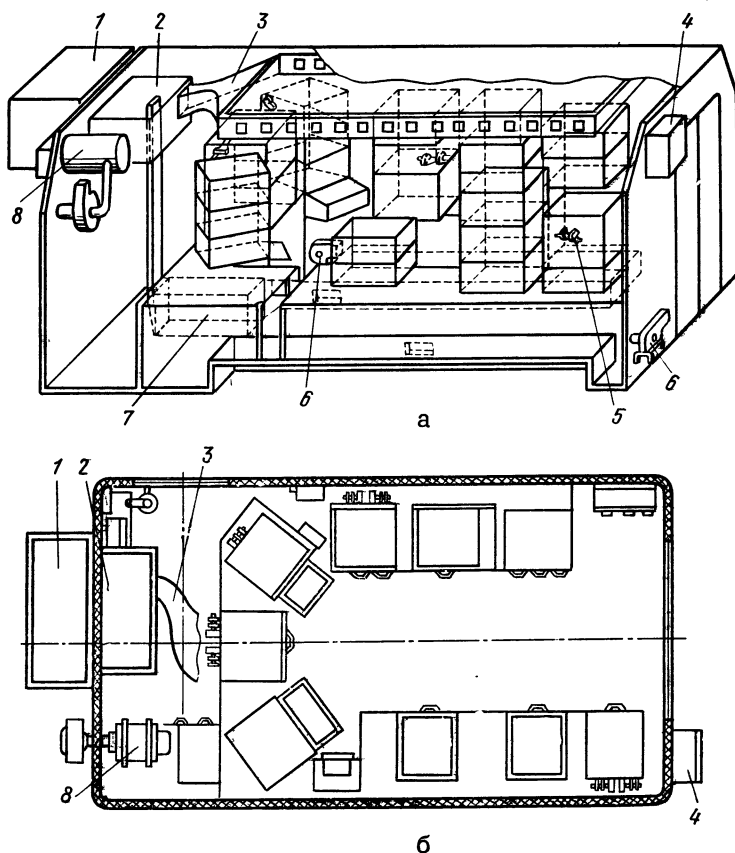


Рис. 13.25. Конструктивно-компоновочная схема СОР в кузове № 4:
а — пространственное изображение, б — вид сверху, разрез

Общепромышленные отопительная (7) и вентиляционная (8) установки обеспечивают нормальные условия работы операторов. Сводные данные рассмотренных СОР приведены в табл. 13.2. Все рассмотренные СОР обеспечивают высокую степень очистки воздуха, поступающего из окружающей среды, имеют невысокий уровень акустических шумов. СОР для кузова № 4 обладает повышенной (по сравнению с СОР кузовов № 1...3) стоимостью. Основными характеристиками СОР являются коэффициенты мощности, массы и объема, которые представляют собой отношения:

$$K_p = P_{\text{СОР}} / \Phi_{\text{АМ}},$$

$$K_m = M_{\text{СОР}} / M_{\text{АМ}},$$

$$K_v = V_{\text{СОР}} / V_{\text{куз}}, \quad (13.44)$$

Где $P_{\text{СОР}}$, $M_{\text{СОР}}$ и $V_{\text{СОР}}$ — потребляемая мощность, масса и объем СОР; $\Phi_{\text{АМ}}$, $M_{\text{АМ}}$ — полный тепловой поток и масса РЭА, вспомогательного оборудования и операторов в кузове АМ; $V_{\text{куз}}$ — внутренний объем кузова АМ. Значения этих коэффициентов представлены в табл. 13.2.

Приведенные данные могут быть использованы на стадии эскизного проектирования для предварительного выбора схемы СОР. Подробные данные по конструированию и расчету СОР для передвижной наземной РЭА изложены в [5].

Таблица 13.2

Сводные данные СОТР кузовов аппаратных машин

Особенности конструкция и параметры	Тип кузова АМ			
	1	2	3	4
Возможность создания вентилируемых отсеков для различных конструкций кузовов и РЭА	Есть	Есть	Нет	Нет
Возможность обеспечения пониженной температуры (по сравнению с окружающей)	Нет	Нет	»	Есть
Возможность надежной защиты от температуры в кузове проникновения в кузов вредных жидких, паро- и газообразных веществ из окружающей среды	»	»	»	»
Необходимость использования обслуживающего персонала высокой квалификации	»	»	Нет	»
Возможность обеспечения воздухо-распределения по объему кузова и группам РЭА	»	Есть	Есть	Нет
Зависимость температуры в кузове от температуры окружающей среды	Есть	»	»	»
Характеристики примененных вентиляторов (расход воздуха (м³/ч) × Xнапор (Па):				
300×60 (осевого типа)	4	2	Нет	Нет
700×120 (осевого типа)	2	Нет	»	»
2200×240 (осевого типа)	Нет	»	»	1
60×120 (центробежного типа)	»	»	»	7
100×150 (центробежного типа)	»	»	»	2
1500×600 (центробежного типа)	»	1	1	Нет
Кондиционер	»	Нет	Нет	Есть
Мощность, потребляемая СОТР, Вт	113	1539	1550	3519
Масса СОТР (без воздухопроводов), кг	14	81,2	79,6	279
Объем СОТР (для № 4 только внутри кузова), м³	0,062	0,244	0,233	0,25
Максимальный расход воздуха в СОТР (для кузова № 3, даны два режима), м³/ч	700	1700	1700	200
Допустимая мощность рассеивания РЭА (кВт) при отсутствии (числитель) и воздействия РС (знаменатель), при перегреве $\theta_a - \theta_c$				
2,5 К	1,0/0,3	2,7/1,6	4,0/2,9	4,1/3,1
4 К	1,8/1	4,3/3,2	5,5/4,4	6,4/5,4
5 К	2,2/1,4	5,5/4,4	6,5/5,4	7,8/6,8
Второй режим работы СОТР в кузове № 3 при перегреве $\theta_a - \theta_c$				
2,5 К			4,5/3,4	
4 К			7,0/5,9	
5 К			8,5/7,4	
Коэффициент мощности K_p	0,1...0,48	0,27... 0,55	0,18... 0,38	0,78
Коэффициент массы K_m	0,05... 0,06	0,07... 0,11	0,07... 0,08	0,06
Коэффициент объема K_v	0,03	0,07	0,07	0,02

13.3. ТЕРМОСТАТЫ *

Общие положения

В инженерной практике термостатом (ТСТ) называется устройство, которое, находясь в среде с меняющейся в широком интервале температур, обеспечивает внутри некоторого объема с помещенным в него объектом термостатирования заданную температуру (узкий интервал изменения температуры) в течение длительного времени. При этом объект термостатирования может быть пассивным (без источников тепловой энергии) и активным.

Конструктивно термостат (рис. 13.26, а) состоит из камеры (1) с объектом термостатирования (2), источника или стока тепловой энергии (3), теплоизолирующей оболочки (4) с защитным кожухом (5). Элементы конструкции, а также электрические соединения (6) являются тепловыми мостами (связями) объекта термостатирования с камерой и окружающей средой. Для контроля температуры внутри камеры устанавливается датчик (7) с контрольными и исполнительными устройствами (8), которые управляют источником или стоком тепловой энергии. Наличие

* Составители Н. А. Ярышев, Л. Б. Андреева.

управляющих устройств с регуляторами температуры — характерная черта активных термостатов.

Для выравнивания поля температур в рабочей зоне ТСТ его камеру выполняют из хорошо проводящего тепло материала, нагревательные или холодильные элементы располагают по стенкам камеры равномерно, используют внутри камеры конвекцию среды, применяют снаружи камеры вещество с постоянной температурой плавления и т. д.

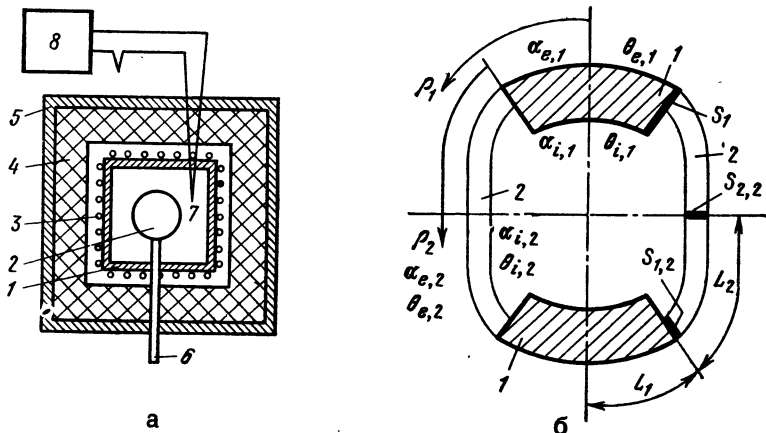
При проектировании ТСТ необходимо обеспечить: 1) заданные температуры в рабочем объеме или объекте, 2) точность термостатирования, 3) допустимую неравномерность поля температур в объекте или в объеме камеры, 4) нормальную работу при изменении внешних тепловых потоков, 5) допустимую мощность источников или стоков тепла, 6) необходимое время выхода на заданный режим, 7) заданные массу и объем.

При разработке конструкций ТСТ рекомендуется:

— равномерно распределять по объему активного объекта источники тепловой энергии (если требуется обеспечить одинаковую точность термостатирования по всему объему);

— электрические и механические связи объекта выполнять из материалов с большим тепловым сопротивлением, располагать их (по воз-

Рис. 13.26. Схематическое изображение термостата



можности) на изотермических поверхностях, применять тепловые компенсаторы;

— выбирать форму камеры в виде шара, цилиндра или куба с надежным тепловым контактом конструкций. Для выравнивания поля температур в камере и уменьшения колебаний температуры в процессе регулирования ее стенки должны быть массивными, выполнены из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и большой теплоемкостью. Однако для сокращения времени установления рабочей температуры теплоемкость камеры должна быть минимальна, поэтому для удовлетворения обоих условий необходимо выбрать материал с высоким коэффициентом температуропроводности (например, алюминий);

— обеспечить равномерное температурное поле нагревателя и использовать хорошо проводящие тепло электроизоляционные материалы;

— для оболочки термостата применять теплоизоляцию с малым коэффициентом теплопроводности (например, пенопласт, фетр, стекловолокно, войлок) или создавать вакуумную прослойку;

— для уменьшения теплоотдачи от термостата в окружающую среду помещать ТСТ в кожух, выполненный из тонкого листового металла с малым коэффициентом излучения и с хорошей обработкой поверхности (полировкой).

При последующем тепловом расчете и оптимизации конструкции ТСТ выполняют:

1 Расчет стационарного режима (выбор размеров, теплофизических параметров материалов, мощности нагревателя и т. п.).

2. Оценку неравномерности поля температур в объекте и камере.

3 Анализ стационарного и нестационарного тепловых режимов термостатируемого объекта по отношению к камере ТСТ и окружающей среде для уменьшения статических ошибок ТСТ

4 Расчет нестационарного теплового режима (определение теплоинерционных свойств объекта, элементов и ТСТ в целом; расчет переходного процесса и влияния изменения внешних условий на точность термостатирования; получение уравнений ди-

намики ТСТ, объекта и датчика температуры)

5 Анализ работы электрической схемы автоматики для стабилизации температуры

6. Расчетно-экспериментальное моделирование геометрических, теплофизических, статических и динамических характеристик ТСТ

7 Оптимизацию конструкции с учетом типовых решений.

Последовательность теплового расчета термостата

Рассмотрим последовательность теплового расчета ТСТ [43], тепловая модель которого показана на рис. 13.26, а

1. На основании исходных данных уточняем геометрические и теплофизические параметры объекта термостатирования: объем V_1 , площадь наружной поверхности $S_{1,2}$, ортогональные линейные размеры $2L_1$, $2L_2$ и $2L_3$, эффективный коэффициент теплопроводности λ_1 , среднюю удельную теплоемкость c_1 и среднюю плотность ρ_1 .

2. Определяем геометрические и теплофизические параметры каждой из оболочек: площади внутренней $S_{j,1}$ и наружной $S_{j,2}$ поверхностей, а также объемы $V_{j,1}$ и $V_{j,2}$, ограниченные соответствующими поверхностями $S_{j,1}$ и $S_{j,2}$, объем оболочки $V_j = V_{j,2} - V_{j,1}$, эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{j,эф}$, удельную теплоемкость c_j , плотность ρ_j . В значении величины λ_j для газообразных и жидких прослоек должны быть учтены конвекция и излучение [14]. При расчете $\lambda_{j,эф}$ необходимо найти эффективную толщину j -й прослойки $\delta_{j,эф}$ по формуле [42]:

$$\delta_{j,эф} = (V_{j,2}/S_{j,2}) (n_j + 1) (1 - S_{j,2} V_{j,1}/S_{j,1} V_{j,2}), \quad (13.45)$$

где

$$n_j = \frac{\lg(S_{j,2}/S_{j,1})}{\lg(S_{j,1} V_{j,2}/S_{j,2} V_{j,1})}.$$

Температуры стенок, ограничивающих j -ую прослойку, в первом приближении выбирают ориентировочно, а затем уточняют их значения методом последовательных приближений.

3. Определяем геометрические и теплофизические параметры тепловых мостов: площадь поперечного сечения F_i , толщину δ_i , эквивалентный радиус $R_i^{\text{эк}} = \sqrt{F_i/\pi}$ и коэффициенты теплопроводности λ_i .

4. Находим определяющие размеры элементов ТСТ: $L_1 = 0,254 \sqrt{S_{1,2}}$ для объекта термостатирования,

$$L_j = (V_{j,2}/S_{j,2}) (n_j + 1) \times \\ \times (1 - V_{j,1} S_{j,2}/V_{j,2} S_{j,1}) \quad (13.46)$$

для оболочек.

5. Находим геометрические характеристики элементов ТСТ:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= L_1 S_{1,2}/V_1, \\ f_{1,1} &= 0,3 [1 + 0,33 \Phi_1], \\ \Phi_{j,1} &= L_j S_{j,1}/V_j, \quad \Phi_{j,2} = L_j S_{j,2}/V_j, \\ \eta_j &= S_{j,1}/(S_{j,1} + S_{j,2}), \\ f_{j,1} &= 0,5 [1 - 0,167 (\Phi_{j,1} - \Phi_{j,2})], \\ f_{j,2} &= 0,3 [1 - 0,22 \Phi_{j,1} + 0,33 \Phi_{j,2}]. \end{aligned} \quad (13.47)$$

6. Выявляем все тепловые воздействия, которым подвержена рассматриваемая система (источник внутреннего тепловыделения в объекте Φ_1 , нагреватель мощностью Φ_n , температура окружающей среды θ_c , источник энергии q_c , распределенный по наружной поверхности ТСТ и др.).

7. Рассчитываем тепловую проводимость объект—среда:

$$\sigma_{1c} = 1/r_{1c} = (1/\sigma_b + 1/\sigma_\lambda + \\ + 1/\sigma_c)^{-1}, \quad (13.48)$$

где

$$\sigma_b = 2\lambda_b S_{1,2} S_{из,1}/L_b (S_{1,2} + S_{из,1})$$

— тепловая проводимость воздушной прослойки между объектом и камерой;

$$\sigma_\lambda = 2\lambda_{из2} S_{из,1} S_{из2}/L_{из2} (S_{из,1} + S_{из2})$$

— тепловая проводимость камера—кожух (теплоизоляции);

$$\sigma_c = \alpha_c S_{кж,2} \quad (13.49)$$

— тепловая проводимость кожух—окружающая среда

Коэффициент теплообмена α_c вначале выбирается ориентировочно, а затем, после определения температуры наружной поверхности ТСТ,

следует уточнить его значение и при необходимости повторить расчет методом последовательных приближений. Собственная проводимость объекта $\sigma_1 = 2\lambda_1 S_{1,2}/L_1$.

8. Определяем минимальную мощность нагревателя, которая обеспечит требуемую температуру стабилизации в стационарном режиме при заданных значениях параметров тепловых воздействий: $\theta_{c\text{ ст}}, q_{c\text{ ст}}, q_{b1\text{ ст}}$.

Вид расчетной формулы зависит от того, температура какого элемента должна быть стабилизирована. Если в качестве температуры стабилизации $\theta_{c\text{ ст}}$ задана температура поверхности объекта θ_{1S} , т. е. $\theta_{c\text{ ст}} = \theta_{1S}$, то полная мощность нагревателя камеры

$$\begin{aligned} \Phi_n &= q_{b\text{ к ст}} V_k = \sigma_{1c} [\theta_{1S} - \theta_{c\text{ ст}} - \\ &- q_{c\text{ ст}}/\alpha_c - (1 + \sigma_{1c}/\sigma_b) \times \\ &\times V_1 q_{b1\text{ ст}}/\sigma_{1c}]. \end{aligned} \quad (13.50)$$

Если в качестве температуры стабилизации задана температура $\theta_{1,ц}$ в центре объекта, т. е. $\theta_{c\text{ ст}} = \theta_{1,ц}$, то

$$\begin{aligned} \Phi_n &= \sigma_{1c} [\theta_{1ц} - \theta_{c\text{ ст}} - q_{c\text{ ст}}/\alpha_c - \\ &- (1/\sigma_{1c} + 1/\sigma_b + 1/\sigma_1) V_1 q_{b1\text{ ст}}]. \end{aligned} \quad (13.51)$$

Если ТСТ должен поддерживать на заданном уровне температуру камеры $\theta_{c\text{ ст}} = \theta_k$, то

$$\begin{aligned} \Phi_n &= \sigma_{1c} [\theta_k - \theta_{c\text{ ст}} - q_{c\text{ ст}}/\alpha_c - \\ &- V_1 q_{b1\text{ ст}}/\sigma_{1c}]. \end{aligned} \quad (13.52)$$

При этом температура поверхности объекта будет выше температуры стабилизации (температуры камеры), причем

$$\Delta\theta_{1к} = \theta_{1S} - \theta_k = V_1 q_{b1\text{ ст}}/\sigma_b, \quad (13.53)$$

а температура в центре объекта

$$\theta_{1ц} = \theta_{1S} + V_1 q_{b1\text{ ст}}/\sigma_1$$

При конструировании ТСТ обычно предусматривают некоторое увеличение мощности нагревателя по сравнению с расчетной для возможности форсированного управления системой термостатирования.

9. Рассчитываем среднеповерхностные температуры в режиме стабилизации:

$$\theta_{1\text{СТ}} = V_1 (1 + \sigma_{1\text{С}}/\sigma_{\text{В}}) q_{\text{В1 СТ}}/\sigma_{1\text{С}} + \Phi_{\text{Н}}/\sigma_{1\text{С}} + \theta_{\text{С СТ}} + q_{\text{С СТ}}/\alpha_{\text{С}}$$

для поверхности объекта,

$$\theta_{\text{Н СТ}} = V_1 q_{\text{В1 СТ}}/\sigma_{1\text{С}} + \Phi_{\text{Н}}/\sigma_{1\text{С}} + \theta_{\text{С СТ}} + q_{\text{С СТ}}/\alpha_{\text{С}} \quad (13.54)$$

для камеры,

$$\theta_{\text{КЖ СТ}} = V_1 q_{\text{В1 СТ}} + \Phi_{\text{Н}}/\sigma_{\text{С}} + \theta_{\text{С СТ}} + q_{\text{С СТ}}/\alpha_{\text{С}}$$

для наружной поверхности ТСТ.

10. Оцениваем влияние тепловых связей на распределение температуры в ТСТ в режиме стабилизации, при этом тепловые сопротивления связей определяются по формуле $r_i = \delta_i/\lambda_i F_i$.

Тепловой поток связей при учете теплоотдачи с боковой поверхности и с торца связи определяется по формулам [40, 41] и по формуле

$$\Phi_i = [\theta_i - \theta] r_i,$$

где θ — температура среды или поверхности элементов ТСТ, с которыми осуществляется тепловая связь; θ_i — температура тепловой связи на границе раздела с элементами ТСТ.

Искажения температурных полей от каждой тепловой связи находятся в соответствии с выбранной тепловой моделью по следующим формулам:

для полупространства с локальным стоком тепла и адиабатической изоляцией поверхности

$$N(x/R, 0) = \begin{cases} 1 - 0,25 (x/R)^2 - \\ - 0,047 (x/R)^4 - \\ - 0,0195 (x/R)^6, \\ 0 \leq x/R \leq 1; \\ 0,5 (x/R) [1 + 0,125 \times \\ \times (x/R)^2 + 0,047 \times \\ \times (x/R)^4 + 0,0224 \times \\ \times (x/R)^6], x/R > 1 \end{cases}$$

где $N(1, 0) = 0,637$ при $x/R = 1$, $N(0, z/R) = \sqrt{(z/R)^2 + 1} - z/R$, $N(0, 0) = 1$ при $x/R = 0$. x, z — координаты поверхности и глубины полупространства; R — радиус теп-

ловой связи; $N = \pi \lambda R [\theta(x, z) - \theta_0]$ Φ_0 — безразмерная температура; θ_0 — начальная температура полупространства; для тонкослойных элементов ТСТ, в которых можно пренебречь перепадом температур по толщине, а температуру в зоне действия тепловой связи можно считать одинаковой, используется следующая формула:

$$\theta(x) - \theta_0 = \Phi_0 / I_0 (\mu \gamma) / 2\pi \lambda_0 \delta \mu_{1/1} (\mu),$$

где

$\mu = R \sqrt{(k_{01} + k_{02})/\lambda_0 \delta}$, k_{01}, k_{02} — коэффициенты теплопередачи от рассматриваемого элемента ТСТ к элементам (средам) 1, 2, имеющим соответственно температуры θ_1 и θ_2 ; δ — толщина элемента ТСТ; λ_0 — коэффициент теплопроводности материала элемента ТСТ, $\gamma = x/R$ — относительная координата; $\theta_0 = (k_{01}\theta_1 + k_{02}\theta_2)/(k_{01} + k_{02})$ — температура элемента ТСТ; $I_0(\mu \gamma)$ и $I_1(\mu)$ — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков.

Результирующее влияние тепловых связей на температурные поля элементов ТСТ находятся методом суперпозиции.

Если влияние тепловых связей приводит к тому, что в термостатируемом объекте или камере неравномерность распределения температур превышает допустимое отклонение от температуры стабилизации, то вносят изменения в конструкцию ТСТ. Так, например, увеличивают тепловые связи, изменяя их конструкции и материалы, уменьшают перепад температур по связям, вводя различные тепловые компенсаторы и т. д. После этого расчет повторяется.

11. Оцениваем величину «увода» среднеповерхностной температуры объекта из-за наличия тепловых связей объекта с камерой и окружающей средой в режиме стабилизации. Оценка включает: 1) расчет среднеповерхностной температуры объекта при наличии тепловых связей по формуле

$$\theta_{1\text{С}} = V_1 q_{\text{В1}}/\sigma_{\Sigma} + K\theta_{\text{Н}} + l\theta_{\text{С}}, \quad (13.55)$$

где

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\text{В}} + \sigma_{1\text{Н}} + \sigma_{1\text{С}};$$

$$K = (\sigma_{\text{В}} + \sigma_{1\text{Н}})/\sigma_{\Sigma};$$

$$l = \sigma_{1\text{С}}/\sigma_{\Sigma};$$

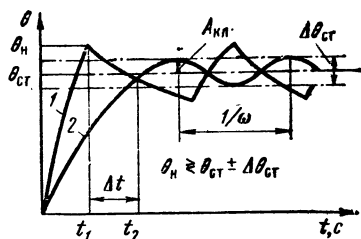


Рис. 13.27. График зависимости температуры нагревателя (1) и объекта термостатирования (2) от времени работы ТСТ при входе в режим стабилизации

$\sigma_{1к} = 1/r_{1к}$, $\sigma_{1с} = 1/r_{1с}$ — тепловые проводимости связей объекта с камерой и средой соответственно; θ_k — температура камеры, вычисленная по формуле (13.54); 2) сравнение результата расчета температуры по формулам (13.55) и (13.54) и определение численного значения величины «увода» $\Delta\theta_{1с}$. Если величина «увода» среднеповерхностной температуры объекта из-за наличия тепловых связей объекта с камерой и окружающей средой превышает допустимое отклонение от температуры стабилизации, то необходимо уменьшить его, например, за счет изменения конструкции и материала тепловых связей.

12. Анализируем нестационарный режим ТСТ. Для этого формулируются нестационарные уравнения теплообмена элементов ТСТ и объекта, а также уравнение динамики регулятора температуры. Для ТСТ, тепловые модели которых аналогичны представленной на рис. 13.26, а, уравнения для нестационарных среднеповерхностных температур камеры $\theta_k(S)$ и объекта $\theta_{1с}(S)$ в операторной форме имеют вид:

$$\theta_k(S) = Y_{kz_1}(S) Z_1(S) + Y_{kz_k}(S) \times Z_k(S) + Y_{kz_c}(S) Z_c(S), \quad (13.56)$$

$$\theta_{1с}(S) = Y_{1z_1}(S) Z_1(S) + Y_{1z_k}(S) \times Z_k(S) + Y_{1z_c}(S) Z_c(S). \quad (13.57)$$

где величины

$$Z_1(S) = V_1 q_{v1}(S) / \sigma_{1с};$$

$$Z_k(S) = \Phi_k(S) / \sigma_{1с};$$

$$Z_c(S) = \theta_c(S) + q_c(S) / \alpha_c.$$

есть обобщенная запись тепловых воздействий (изображение этих воздействий по Лапласу). Передаточные функции Y с соответствующими индексами определяют изменение температуры камеры или объекта при изменении того или иного теплового воздействия. По своей структуре передаточные функции являются дробно-рациональными полиномами, степень которых зависит от числа элементов ТСТ.

Решение системы динамических уравнений определяет все важнейшие нестационарные характеристики и режим работы ТСТ.

Пусковой режим ТСТ. При включении мощности нагревателя переходный процесс в ТСТ рассчитывается по приближенной формуле

$$\theta_k(t) = \theta_{кст}(1 - e^{-t/\epsilon_k}), \quad (13.58)$$

где

$$\theta_{кст} = \Phi_k / \sigma_{1с}.$$

Температура на поверхности объекта при включении регулятора может быть найдена по приближенной формуле

$$\theta_{1с}(t) = \theta_{ст}(1 - e^{-t/\epsilon_1}). \quad (13.59)$$

Показатели ϵ_k и ϵ_1 в (13.58) и (13.59) характеризуют тепловые инерционности собственно ТСТ и объекта, находящегося в нем.

Длительность переходного процесса (время выхода в заданный режим стабилизации)

$$t_2 = t_1 + \Delta t = -\epsilon_k \ln [(\theta_{кст} - \theta_{стаб}) / (\Phi_k / \sigma_{1с})] = \epsilon_1 \ln \{[\theta_{стаб} - \theta_{1с}(t_2)] / [\theta_{стаб} - \theta_{1с}(t_2)]\},$$

где $\theta_{кст}$ определяется по формуле (13.54), t_1 — время выключения нагревателя при температуре нагревателя θ_n (рис. 13.27). Время выхода в режим t_2 может быть уменьшено за счет включения большей мощности нагревателя.

Квазиустановившийся (автоколебательный) режим ТСТ — это такой режим, при котором колебания температуры внутри камеры с объектом термостатирования происходят в заданном узком интервале вследствие работы автоматической системы управления нагревателем. Выбор ка-

рактических регулятора и элементов ТСТ должен быть таким, чтобы амплитуда $A_{кл}$ и частота автоколебаний в зоне объекта не превышали допускаемых значений. Полагая, что амплитуда автоколебаний температуры камеры равна половине зоны нечувствительности к изменению температуры регулятора релейного типа, получим грубую оценку амплитуды автоколебаний A_1 температуры поверхности объекта:

$$A_1 \approx A_{кл} (1 + \omega^2 \varepsilon_1^2)^{-0,5}, \quad (13.60)$$

где ω — частота автоколебаний; ε_1 — показатель тепловой инерции объекта по отношению к камере ТСТ. Автоколебательный и переходный режимы малогабаритных нагревательных термостатов подробно рассмотрены в работах [11, 12].

Пример расчета ТСТ для кварцевого резонатора

Пример 9. Конструктивная схема ТСТ представлена на рис. 13.28, а его тепловая модель — на рис. 13.29. При этом число элементов ТСТ $k = 5$, число тепловых связей $n = 1$. Тепловые воздействия — окружающая среда и нагреватель ТСТ (объект тепла не выделяет).

Решение. 1. Геометрические и теплофизические параметры макета объекта термостатирования, выполненного из стали (ст. 10) равны

$$\begin{aligned} V_1 &= 5,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad S_{1,2} = 8,53 \times \\ &\times 10^{-3} \text{ м}^2, \quad 2L_1 = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \\ 2L_2 &= 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad 2L_3 = 6 \times \\ &\times 10^{-2} \text{ м}, \quad \lambda_1 = 58,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ c_1 &= 0,48 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \rho_1 = \\ &= 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

2. Геометрические и теплофизические параметры оболочек (рис. 13.29): для воздушной прослойки (2)

$$\begin{aligned} S_{2,1} &= 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad S_{2,2} = 20,4 \times \\ &\times 10^{-3} \text{ м}^2, \quad V_{2,1} = 5,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \\ V_{2,2} &= 18,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad V_2 = 13,2 \times \\ &\times 10^{-5} \text{ м}^3, \end{aligned}$$

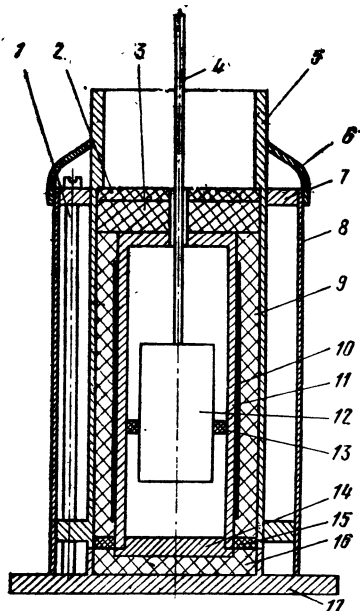


Рис. 13.28. Цилиндрический термостат: 1 — стойки, 2 — плата, 3 — теплоизоляция, 4 — провод (тепловая связь со средой), 5 — корпус, 6 — крышка, 7 — кольцо, 8 — кожух, 9 — теплоизоляция, 10 — нагреватель, 11 — камера, 12 — объект, 13 — кольцо, 14 — дно камеры, 15 — резиновое кольцо, 16 — теплоизоляционная прокладка, 17 — основание

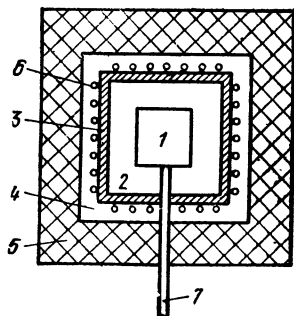


Рис. 13.29. Тепловая модель термостата: 1 — объект термостатирования, 2 — воздушная прослойка, 3 — камера, 4 — воздушная прослойка, 5 — теплоизоляция, 6 — нагреватель, 7 — провод (тепловая связь)

Для камеры (3) из алюминиевого сплава Д1

$$\begin{aligned} S_{3,1} &= 20,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad S_{3,2} = 28,4 \times \\ &\times 10^{-3} \text{ м}^2, \quad V_{3,1} = 18,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \\ V_{3,2} &= 32,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad V_3 = 13,2 \times \\ &\times 10^{-5} \text{ м}^3, \quad \lambda_3 = 180 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ c_3 &= 880 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \rho_3 = 2,7 \times \\ &\times 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad \delta_{\text{торц}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \\ \delta_{\text{бок}} &= 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad 2h_3 = 140 \times \\ &\times 10^{-3} \text{ м}, \quad R_3 = 27 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

для теплоизоляции (4) из пеноплас-
та ФК-20

$$\begin{aligned} S_{4,1} &= 28,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad S_{4,2} = 46,8 \times \\ &\times 10^{-3} \text{ м}^2, \quad V_{4,1} = 32,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \\ V_{4,2} &= 71,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad V_4 = 39,2 \times \\ &\times 10^{-5} \text{ м}^3, \quad \lambda_4 = 0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ c_4 &= 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \rho_4 = 0,1 \times \\ &\times 10^3 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

для воздушной прослойки (5)

$$\begin{aligned} S_{5,1} &= 46,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \quad S_{5,2} = \\ &= 77,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad V_{5,1} = 71,3 \times \\ &\times 10^{-5} \text{ м}^3, \quad V_{5,2} = 162 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \\ V_5 &= 90,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

В воздушных прослойках (2 и 5) необходимо учесть конвекцию и излучение. Найдем значения $\delta_2 \text{ эф}$ и $\delta_5 \text{ эф}$ по формуле (13.45):

$$\begin{aligned} V_{2,2}/V_{2,1} &= 3,28, \quad S_{2,2}/S_{2,1} = 2,39; \\ n_2 &= 2,74, \quad \delta_2 \text{ эф} = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ V_{5,2}/V_{5,1} &= 2,27, \quad S_{5,2}/S_{5,1} = 1,66, \\ n_5 &= 1,62, \quad \delta_5 \text{ эф} = 14,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

Для расчета $\lambda_2 \text{ эф}$ и $\lambda_5 \text{ эф}$ используем экспериментальные данные по определению температур элементов или выбираем значения этих температур ориентировочно. Пусть в рассматриваемом случае при $\theta_c = 293 \text{ К}$ принято $\theta_{1,2} = \theta_{3,1} = \theta_{\text{стаб}} = 343 \text{ К}$, $\theta_{5,1} = 323 \text{ К}$, $\theta_{5,2} = 303 \text{ К}$.

Тогда в результате вычислений получим

$$\begin{aligned} \epsilon_{2\text{н}} &= 1, \\ \lambda_2 \text{ эф} &= \lambda_2 = 2,97 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_2 &= 1,03 \text{ кг/м}^3, \quad c_2 = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ \epsilon_{5\text{н}} &= 1,4, \quad \lambda_5 \text{ эф} = \epsilon_{5\text{н}} \cdot \lambda_5 = 1,4 \cdot 2,76 \times \\ &\times 10^{-2} = 3,86 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \end{aligned}$$

$$\alpha_{5\text{л}} = 4,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

$$\begin{aligned} \lambda_5 \text{ эф} &= \lambda_5 \text{ эф} + \alpha_{5\text{л}} \delta_5 \text{ эф} = 3,86 \cdot 10^{-2} + \\ &+ 4,67 \cdot 1,42 \cdot 10^{-2} = 10,5 \times \\ &\times 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \end{aligned}$$

$$\rho_5 = 1,13 \text{ кг/м}^3, \quad c_5 = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

3. Геометрические и теплофизические параметры тепловой связи:

$$\begin{aligned} F_{\text{св}} &= 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad \delta_{\text{св}} = 5 \times \\ &\times 10^{-2} \text{ м}, \quad R_{\text{св}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad \lambda_{\text{св}} = \\ &= 180 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \text{ (сплав Д1)} \end{aligned}$$

4. Определяющие размеры элементов ТСТ:

$$\begin{aligned} L_1 &= 0,254 \cdot \sqrt{(8,53 \cdot 10^{-3})} = \\ &= 2,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{3,2}/V_{3,1} &= 1,7, \quad S_{3,2}/S_{3,1} = 1,39, \\ n_3 &= 1,66, \quad L_3 = 0,54 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ V_{4,2}/V_{4,1} &= 2,22, \quad S_{4,2}/S_{4,1} = 1,65, \\ n_4 &= 1,71, \quad L_4 = 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad L_2 = \\ &= 0,94 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad L_5 = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

5. Геометрические характеристики элементов (по формулам (13.47)):

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 0,347, \quad f_1 = 0,335, \quad \varphi_{2,1} = 0,607, \\ \varphi_{2,2} &= 1,45, \quad \eta_2 = 0,294, \quad f_{2,1} = 0,57, \\ f_{2,2} &= 0,40, \quad \varphi_{3,1} = 0,834, \quad \varphi_{3,2} = \\ &= 1,16, \quad \eta_3 = 0,418, \quad f_{3,1} = 0,53, \\ f_{3,2} &= 0,36, \quad \varphi_{4,1} = 0,775, \quad \varphi_{4,2} = \\ &= 1,28, \quad \eta_4 = 0,378, \quad f_{4,1} = 0,54, \\ f_{4,2} &= 0,38, \quad \varphi_{5,1} = 0,733, \quad \varphi_{5,2} = \\ &= 1,22, \quad \eta_5 = 0,376, \quad f_{5,1} = 0,54, \\ f_{5,2} &= 0,37. \end{aligned}$$

6. Тепловые проводимости элементов ТСТ (по формулам (13.49)):

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= 2\lambda_2 \text{ эф} S_{2,1} S_{2,2} / [L_2 (S_{2,1} + S_{2,2})] = \\ &= 2 \cdot 2,97 \cdot 10^{-2} \cdot 8,53 \cdot 10^{-3} \cdot 20,4 \times \\ &\times 10^{-3} / [0,94 \cdot 10^{-2} \cdot (8,53 + 20,4) \times \\ &\times 10^{-3}] = 0,38 \cdot 10^{-1} \text{ Вт/К}, \end{aligned}$$

13.3. Термостаты

$$\sigma_4 = 2\lambda_4 S_{4,1} S_{4,2} / [L_4 (S_{4,1} + S_{4,2})] = \\ = 2 \cdot 0,06 \cdot 28,4 \cdot 10^{-3} \cdot 46,8 \cdot 10^{-3} / [1,07 \times \\ \times 10^{-2} (28,4 + 46,8) \cdot 10^{-3}] = \\ = 0,198 \text{ Вт/К},$$

$$\sigma_5 = 2\lambda_{5 \text{ эф}} S_{5,1} S_{5,2} / L_5 (S_{5,1} + S_{5,2}) = \\ = 2 \cdot 10,5 \cdot 10^{-2} \cdot 46,8 \cdot 10^{-3} \cdot 77,7 \times \\ \times 10^{-3} / [1,42 \cdot 10^{-2} (46,8 + 77,7) \times \\ \times 10^{-3}] = 0,432 \text{ Вт/К}$$

Принимаем ориентировочно $\alpha_c = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, тогда

$$\sigma_c = \alpha_c S_{5,2} = 10 \cdot 77,7 \cdot 10^{-3} = \\ = 0,777 \text{ Вт/К},$$

$$\sigma_{1c} = (1/\sigma_2 + 1/\sigma_4 + 1/\sigma_5 + 1/\sigma_c)^{-1} = \\ = (0,038^{-1} + 0,198^{-1} + 0,432^{-1} + \\ + 0,777^{-1})^{-1} = 0,0286 \text{ Вт/К}.$$

Собственная проводимость объекта

$$\sigma_1 = 2\lambda_1 S_{1,2} / L_1 = 2 \cdot 58,6 \times \\ \times 8,53 \cdot 10^{-3} / (2,34 \cdot 10^{-2}) = \\ = 42,7 \text{ Вт/К}.$$

7. Минимальная мощность нагревателя (формулы (13.50) и (13.51)); при $\theta_{c \text{ ст}} = \theta_{1S} = 343 \text{ К}$,

$$\Phi_{\text{н ст}} = \sigma_{1c} (\theta_{1S} - \theta_{c \text{ ст}});$$

$$\text{при } \theta_{c \text{ ст}} = 293 \text{ К } \Phi_{\text{н ст}} = 1,43 \text{ Вт};$$

$$\text{при } \theta_{c \text{ ст}} = 213 \text{ К } \Phi_{\text{н ст}} = 3,72 \text{ Вт};$$

$$\text{при } \theta_{c \text{ ст}} = \theta_3 = 343 \text{ К } \Phi_{\text{н ст}} = (1/\sigma_4 + \\ + 1/\sigma_5 + 1/\sigma_c)^{-1} (\theta_{c \text{ ст}} - \theta_{c \text{ ст}});$$

$$\text{при } \theta_{c \text{ ст}} = 293 \text{ К } \Phi_{\text{н ст}} = 5,8 \text{ Вт};$$

$$\text{при } \theta_{c \text{ ст}} = 213 \text{ К } \Phi_{\text{н ст}} = 15,0 \text{ Вт}.$$

8. Среднеповерхностные температуры элементов ТСТ в стационарном режиме при $\theta_{c \text{ ст}} = 293 \text{ К}$ $\theta_{c1} = \theta_3 = 343 \text{ К}$ (формула (13.54)) (при этом $\theta_{1S \text{ ст}} = 343 \text{ К}$):

$$\theta_{4S} = \Phi_{\text{н ст}} (1/\sigma_5 + 1/\sigma_c) + \theta_{c \text{ ст}} = \\ = 5,8 [(4,32 \cdot 10^{-1})^{-1} + (7,77 \cdot 10^{-1})^{-1}] + \\ + 293 = 313,8 \text{ К}$$

для наружной поверхности теплоизоляции (формула (13.54));

$$\theta_{5S \text{ ст}} = \Phi_{\text{н ст}} / \sigma_c + \theta_{c \text{ ст}} = 5,8 \times \\ \times (7,77 \cdot 10^{-1})^{-1} + 293 = 300,4 \text{ К}$$

для наружной поверхности термостата.

Рассчитываем коэффициент теплообмена кожуха ТСТ

$$\alpha_c = \alpha_k + \alpha_l = 4,3 + 5,35 = \\ = 9,65 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Следовательно, выбор первоначального значения $\alpha_c = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ сделан достаточно точно и повторения расчета не требуется.

Аналогично оцениваются допущения, принятые в п. 2 при расчете $\lambda_{5 \text{ эф}}$.

9. Оценка локального влияния тепловой связи объекта с окружающей средой на распределение температур в объекте при

$$\theta_{c \text{ ст}} = 293 \text{ К}, \theta_{c \text{ ст}} = \theta_3 = 343 \text{ К}.$$

Тепловая связь моделируется стержнем, боковая поверхность которого теплоизолирована, объект условно представляется как полупространство с адиабатической изоляцией поверхности; тепловое сопротивление этой связи

$$r_{\text{св}} = \delta_{\text{св}} / (\lambda_{\text{св}} F_{\text{св}}) = 5 \cdot 10^{-2} / [180 \times \\ \times (3,14 \cdot 10^{-6})] = 88,5 \text{ К/Вт},$$

тепловой поток $\Phi_{\text{св}} = (343 - 293) / 88,5 = 0,56 \text{ Вт}$, искажение температурного поля в центре соприкосновения тепловой связи и объекта $\theta_{(0,0)} - \theta_0 = \Phi_{\text{св}} / \pi r_{\text{св}} \lambda_1 = 0,56 / (3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 58,6) = 3,04 \text{ К}$.

Для объекта, выполненного из сплава Д1, $\lambda_1 = 180 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\theta_{0,0} - \theta_0 = 0,99 \text{ К}$.

Пусть требуемая точность термостатирования $\pm 1 \text{ К}$. Для уменьшения искажающего влияния тепловой связи уменьшим радиус тепловой связи в три раза ($r_{\text{св}} = 0,33 \times 10^{-3} \text{ м}$, $F_{\text{св}} = 0,348 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) и повторим расчет: $r_{\text{св}} = 805 \text{ К/Вт}$, $\Phi_{\text{св}} = 0,062 \text{ Вт}$, $\theta_{(0,0)} - \theta_0 = 1,02 \text{ К}$.

В этом случае местная неравномерность практически не превышает допустимого отклонения от температуры термостатирования.

10. Оценка «увода» среднеповерхностной температуры объекта при $r_{\text{св}} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $\theta_c = 293 \text{ К}$.

$$\begin{aligned} \text{а) } \sigma_{\Sigma} &= \sigma_2 + \sigma_{\text{св}} = 0,038 + \\ &+ 1/805 = 0,039 \text{ Вт/К, } K = \sigma_2/\sigma_{\Sigma} = \\ &= 0,038/0,039 = 0,974. \quad t = \sigma_{\text{св}}/\sigma_{\Sigma} = \\ &= 0,032, \quad \theta_{1S} = 0,974 \cdot 343 + 0,032 \times \\ &\times 293 = 343,4 \text{ К,} \end{aligned}$$

б) $\Delta\theta_{1S} = 343 - 343,4 = -0,4 \text{ К}$.
«Увод» не превышает допустимого отклонения от температуры стабилизации.

Анализ нестационарного теплового режима для рассчитываемого ТСТ детально разработан в [11].

13.4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РЭА С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Общие положения *

Воздушное охлаждение является одним из основных способов обеспечения теплового режима современной теплонегруженной РЭА. Простота конструкции, надежность, удобство в эксплуатации и ремонте — основные преимущества систем воздушного охлаждения.

Если РЭА имеет герметичный кожух, то теплоотвод осуществляется либо благодаря только естественной конвекции (ЕК), либо за счет принудительной циркуляции, создаваемой встроенными внутрь кожуха вентиляторами (ПЦ), либо принудительной циркуляцией с продувом через охлаждающие теплообменники (ПЦТ).

Если кожух в РЭА негерметичен, то теплоотвод, кроме естественной конвекции, может быть осуществлен за счет естественной (ЕВ) или принудительной (ПВ) вентиляции. Во всех перечисленных способах охлаждения, схематически показанных на рис. 13.30, определенная часть тепловой энергии рассеивается также и излучением.

Многообразие конструктивно-компоновочных схем РЭА с воздушным охлаждением сводится к двум расчетным моделям (10): РЭА с шасси и РЭА кассетной конструкции (РЭА КК).

Рис. 13.30. Схемы воздушного охлаждения РЭА с шасси (а) и РЭА КК (б)

Тепловые режимы одноблочной РЭА

Расчетными параметрами при оценке тепловых режимов одноблочной РЭА являются следующие.

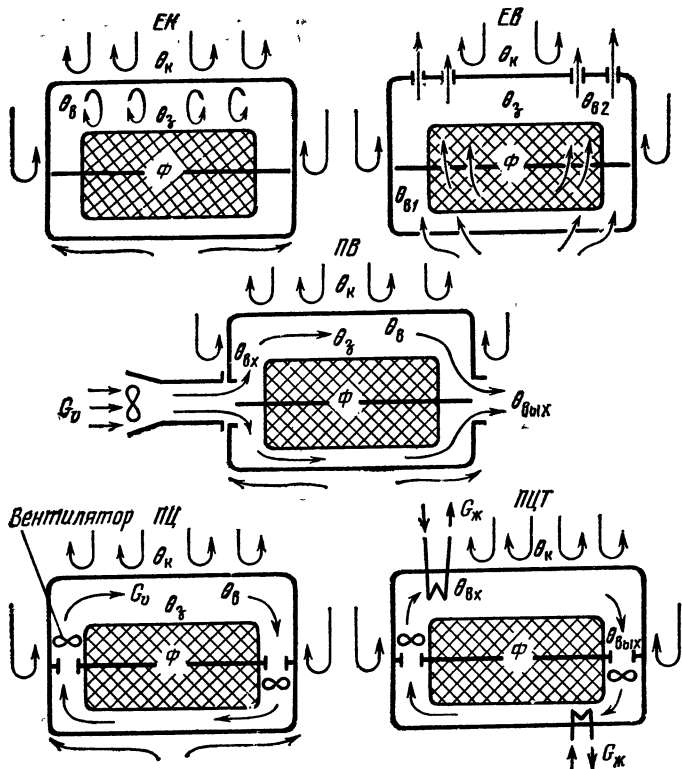
Для РЭА с шасси: $\theta_{\text{з доп}}$ и $\theta_{\text{в доп}}$ — предельно допустимые температуры внутренних поверхностей РЭА и воздуха внутри РЭА, К; Φ — тепловая мощность, рассеиваемая РЭА, Вт; G_v , G_m — объемный или массовый расход охлаждающего воздуха при наличии ПВ, м³/ч или кг/ч; V — объем РЭА, м³; $K_{\text{осн}}$ — коэффициент формы основания РЭА ($K_{\text{осн}} = L_1/L_2$, L_1 , L_2 — ширина и длина шасси); K_0 — коэффициент формы РЭА в целом ($K_0 = HV^{-1/3}$); $K_{\text{зап}}$ — коэффициент заполнения объема РЭА.

Для РЭА КК: $\theta_{\text{з доп}}$ и $\theta_{\text{в доп}}$ — предельно допустимые температуры поверхностей центральных плат РЭА и воздуха между ними, К; $\Phi_{\text{п}}$ — тепловая мощность, рассеиваемая каждой платой, Вт; $G_{\text{в п}}$, $G_{\text{м п}}$ — объемный или массовый расход охлаждающего воздуха, приходящийся на каждую плату при наличии ПВ м³/ч или кг/ч; m — количество плат в РЭА (или расстояние между смежными платами $b = L_1/m$); V , $K_{\text{осн}}$, K_0 , $K_{\text{зап}}$ — то же, что и для РЭА с шасси.

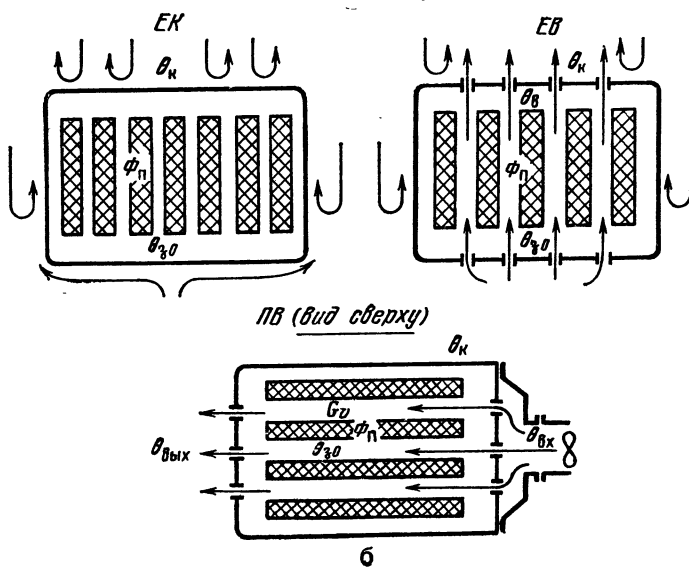
Основными параметрами, определяющими тепловой режим РЭА с шасси, являются среднеповерхностная температура НЗ [10, 14, 15] $\theta_{\text{з}}$ и средняя температура воздуха внутри аппарата $\theta_{\text{в}}$.

В РЭА КК наибольшая температура наблюдается на одной из центральных плат [10, 14, 15], поэтому в качестве определяющих параметров принимаются среднеповерхностная температура НЗ центральной платы $\theta_{\text{оз}}$ и средняя температура воздуха $\theta_{\text{ов}}$ между центральной платой и соседней. В РЭА с ПВ воздух, проходя через НЗ, постепенно нагревается и имеет наибольшую температуру на выходе из РЭА и на входе в теплообменник (для аппаратов с ПЦТ). Поэтому расчетными параметрами в этих случаях являются

* Составитель И. В. Глушицкий.



а



б

средняя температура воздуха на выходе из РЭА (для аппаратов с ПВ) и средняя температура воздуха на выходе из НЗ и на входе в теплообменник $\theta_{\text{вых}}^*$.

Предельно допустимую температуру для проектируемой РЭА необходимо определить заранее на основании анализа предельно допустимых температур элементов данной РЭА или требований по надежности. В ТУ на каждый элемент указывается предельно допустимая температура либо его поверхности ($\theta_{j \text{ доп}}$), либо окружающего элемент воздуха ($\theta_{j \text{ в доп}}$). В результате анализа предельно допустимых температур всех применяемых в данной РЭА элементов выделяется их наименьшее значение, которое затем принимается в качестве предельно допустимого для РЭА.

Таким образом, предельно допустимые температуры и перегревы следующие:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{з доп}} &= \{\theta_{j \text{ доп}}\}_{\min}, \quad \theta_{\text{в доп}} = \\ &= \{\theta_{j \text{ в доп}}\}_{\min}, \quad \theta_{\text{з доп}} = \{\theta_{j \text{ доп}}\}_{\min}, \\ \theta_{\text{в доп}} &= \{\theta_{j \text{ в доп}}\}_{\min} \text{ РЭА с шасси} \\ \theta_{\text{з доп}} &= \{\theta_{j \text{ доп}}\}_{\min}, \quad \theta_{\text{в доп}} = \\ &= \{\theta_{j \text{ в доп}}\}_{\min}, \\ \theta_{\text{з доп}} &= \{\theta_{j \text{ доп}}\}_{\min}, \quad \theta_{\text{в доп}} = \\ &= \{\theta_{j \text{ в доп}}\}_{\min} \text{ РЭА КК}\end{aligned}$$

Символ \min обозначает, что из множества значений параметра выбрано наименьшее.

При решении теплофизических задач по обеспечению теплового режима и выбору способа охлаждения РЭА должны соблюдаться следующие условия:

$$\theta_{\text{з}} < \theta_{\text{з доп}} \text{ или } \theta_{\text{в}} < \theta_{\text{в доп}} \quad (13.61)$$

для РЭА с шасси,

$$\theta_{\text{з}} < \theta_{\text{з доп}} \text{ или } \theta_{\text{в}} < \theta_{\text{в доп}} \quad (13.62)$$

для РЭА КК.

Решение этих задач может быть проведено с одновременной оценкой перегревов отдельных элементов θ_j или перегревов воздуха $\theta_{j \text{ в}}$. При этом условие нормального теплового режима рассматриваемого j -го элемента в РЭА формулируется следующим образом:

$$\theta_j < \theta_{j \text{ доп}} \text{ или } \theta_{j \text{ в}} < \theta_{j \text{ в доп}}. \quad (13.63)$$

Для РЭА КК проверка условия (13.63) производится для элементов, расположенных на центральных платах.

С учетом среднего квадратичного отклонения перегрева погрешности расчета σ [$\theta_{\text{расч}}$] или ошибки измерения в процессе эксперимента σ [$\theta_{\text{изм}}$] условия (13.61) — (13.63) могут быть записаны следующим образом:

$$\theta_{\text{расч}} + \sigma [\theta_{\text{расч}}] < \theta_{\text{доп}}$$

или

$$\theta_{\text{изм}} + \sigma [\theta_{\text{изм}}] < \theta_{\text{доп}}.$$

Анализ результатов расчетов и экспериментов разнообразных вариантов РЭА с различными геометрическими и теплофизическими данными показал, что введение в число тепловых параметров удельных величин позволяет связать их с перегревами с учетом способа охлаждения. Такие удельные величины для РЭА с шасси следующие:

удельный тепловой поток с единицы поверхности эквивалентной НЗ [10]

$$q_{\text{з}} = \Phi / S_{\text{з}}, \quad (13.64)$$

где

$$S_{\text{з}} = V^{2/3} (2/K_0 + 4K_{\text{всп}} K_1^{1/2}); \quad (13.65)$$

удельный объемный расход охлаждающего воздуха (на 1 кВт рассеиваемой в РЭА мощности)

$$g_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot 10^3 / \Phi \text{ [м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт})]. \quad (13.66)$$

При самых различных значениях исходных параметров вычисленные перегревы располагаются в доволь-

* Эти параметры получают в результате расчета теплового режима РЭА при выборе способа охлаждения и затем сравнивают их с предельно допустимыми значениями.

но узкой полосе в системе координат q_3 и θ_3 (или θ_B), что показано на рис. 13.31). Представленные зависимости соответствуют наиболее вероятным значениям перегревов, т. е. являются функциями $M[\theta] = f(q_3)$, где $M[\theta]$ — математическое ожидание перегрева. Для аппаратов с принудительной конвекцией положение функций $M[\theta] = f(q_3)$ на диаграммах зависит еще и от значения g_0 , при котором определялись эти зависимости.

Для РЭА с ПВ или ПЦТ зависимости $M[\theta] = f(q_3)$ построены для случаев (рис. 13.31), когда перегрев воздуха на входе в отсеки РЭА по отношению к среде отсутствует ($\theta_{вх} = \theta_{вх} - \theta_0 = 0$). Если $\theta_{вх} \neq 0$, следует воспользоваться рис. 13.32, при этом

$$\Delta\theta_3 = \theta_3 - \theta_{вх}, \quad \Delta\theta_{вх} = \theta_{вх} - \theta_{вх}. \quad (13.67)$$

Большинство значений перегревов θ располагаются в зоне $M[\theta] \pm \sigma[\theta]$ (рис. 13.31). Для РЭА с ЕК и ЕВ эта зона показана на рисунке. Значение $\sigma[\theta]$ для любого из рассмотренных способов охлаждения определяется следующим образом:

$$\text{для ЕК } \sigma[\theta_3] = 0,055 (q_3)^{0,75}, \\ \sigma[\theta_B] = 0,65 (q_3)^{0,35};$$

$$\text{для ЕВ } \sigma[\theta_3] = 0,05 (q_3)^{0,7}, \\ \sigma[\theta_B] = 0,14 (q_3)^{0,55};$$

$$\text{для ПВ или ПЦТ } \sigma[\theta_3] = (50 + 0,085q_3) g_v^{-0,66}, \quad \sigma[\theta_B] = (16 + 0,05q_3) g_v^{-0,66};$$

$$\text{для ПЦ } \sigma[\theta_3] = (12 + 0,035 \times q_3) g_v^{-0,33}; \quad \sigma[\theta_B] = (4 + 0,035 \times q_3) g_v^{-0,33}.$$

Для РЭА КК используются следующие удельные параметры: удельный тепловой поток с единицы поверхности эквивалентной НЗ плат

$$q_{3п} = \Phi_{3п} / S_{3п} \quad [\text{Вт/м}^2], \quad (13.68)$$

где

$$S_{3п} = 2S_{п} + 4(K_{зап} b + b_{п}) S_{п}^{1/2}, \quad (13.69)$$

$S_{п}$ и $b_{п}$ — площадь платы (с одной стороны), м^2 ; и ее толщина, м ;

— удельный объемный расход охлаждающего воздуха, определяемый формулой (13.66):

$$\text{— удельный объем, приходящий на одну плату,} \\ V_{п} = V/m \quad [\text{м}^3]. \quad (13.70)$$

Для РЭА с ЕК установлена связь между перегревами центральных плат, величиной $V_{п}$ и мощностью плат $\Phi_{п}$. На рис. 13.33 представлены кривые наиболее вероятных перегревов (математических ожиданий) $M[\theta_3]$, $M[\theta_0]$ в зависимости от $V_{п}$ и $\Phi_{п}$. Большинство значений перегревов располагается в зоне $M[\theta] \pm \sigma[\theta]$. На рис. 13.34 приведены зависимости средних квадратичных отклонений $\sigma[\theta] = f(V_{п}, \Phi_{п})$.

В РЭА с ЕВ тепловой режим в значительной мере определяется сечением перфорационных отверстий в крышке и дне кожуха, которые можно учесть, введя параметр $C_{п}$:

$$\theta_{0a} = C_{п} (\theta_{0a})_{ЕК}. \quad (13.71)$$

Вид зависимости параметра $C_{п}$ от коэффициента перфорации $K_{пер} = S_{вх} / S_{д}$ показан на рис. 13.35. При этом $S_{вх}$ — площадь отверстий в дне кожуха для входа охлаждающего воздуха, $S_{д}$ — площадь дна аппарата. При наиболее вероятных значениях $K_{пер} = 0,05 \dots 0,1$ параметр $C_{п} = 0,8 \dots 0,65$.

Тепловой режим РЭА с ПВ оценивается с использованием графиков $M[\theta] = f(g_v, q_{3п})$ (рис. 13.36), аналогичных рис. 13.32. Значения средних квадратичных отклонений перегревов определяются на рис. 13.37.

Представленные зависимости справедливы для РЭА со следующими параметрами:

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \leq V \leq 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, \\ 0,2 \leq K_0 \leq 1,3, \quad 10 \text{ Вт} \leq \Phi \leq 800 \text{ Вт}, \\ 0,1 \leq K_{зап} \leq 0,7, \quad 10 \text{ м}^3/\text{ч} \leq G_0 \leq 200 \text{ м}^3/\text{ч} \\ p = 101 \text{ кПа}, \quad \theta_0 = +333 \text{ К}, \quad (+60^\circ \text{C}) \\ K_{осн} = 1 \text{ для РЭА с шасси};$$

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \leq V \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, \\ 0,4 \leq K_0 \leq 1,4, \quad 1 \text{ Вт} \leq \Phi_{п} \leq 16 \text{ Вт}, \\ 3 \leq m \leq 50, \quad 0,1 \text{ м}^3/\text{ч} \leq G_{вп} \leq 10 \text{ м}^3/\text{ч}, \\ p = 101 \text{ кПа}, \quad \theta_0 = 333 \text{ К}; \quad K_{осн} = 1 \text{ для РЭА КК}.$$

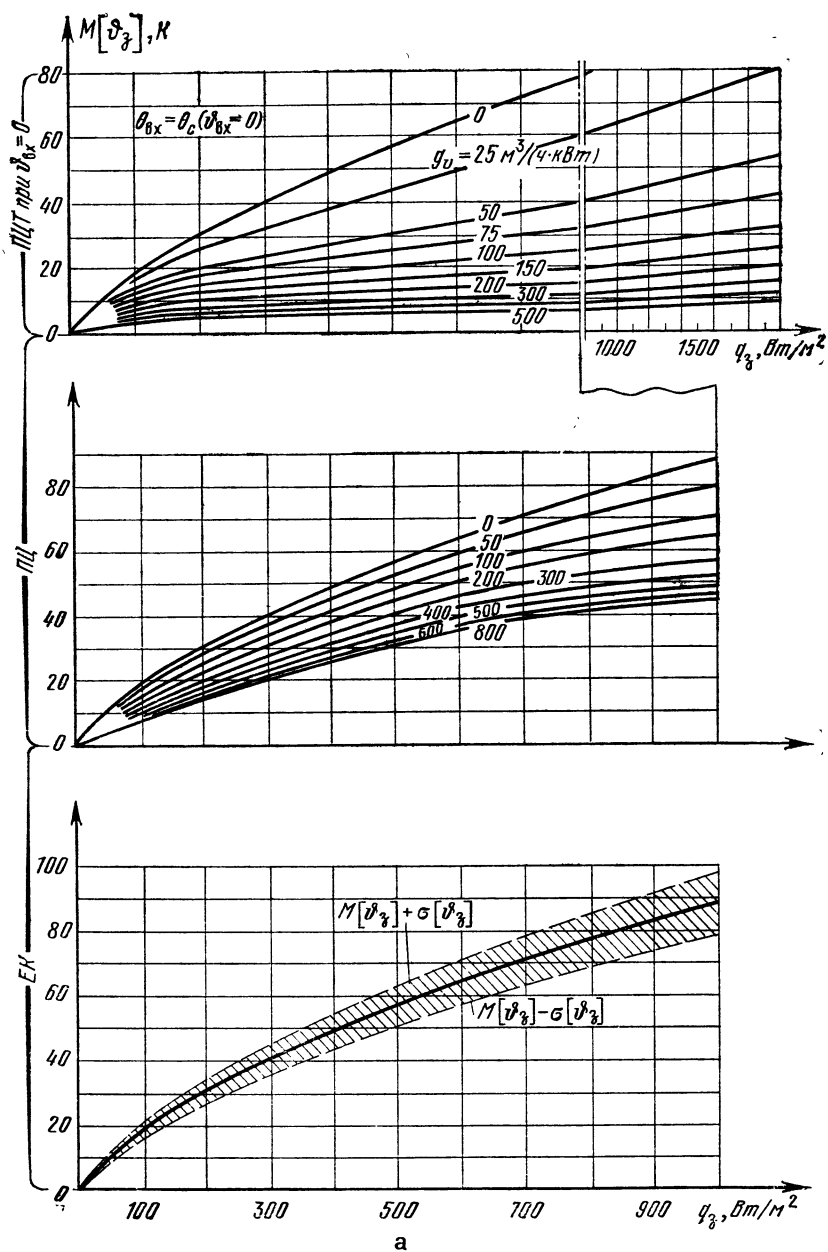
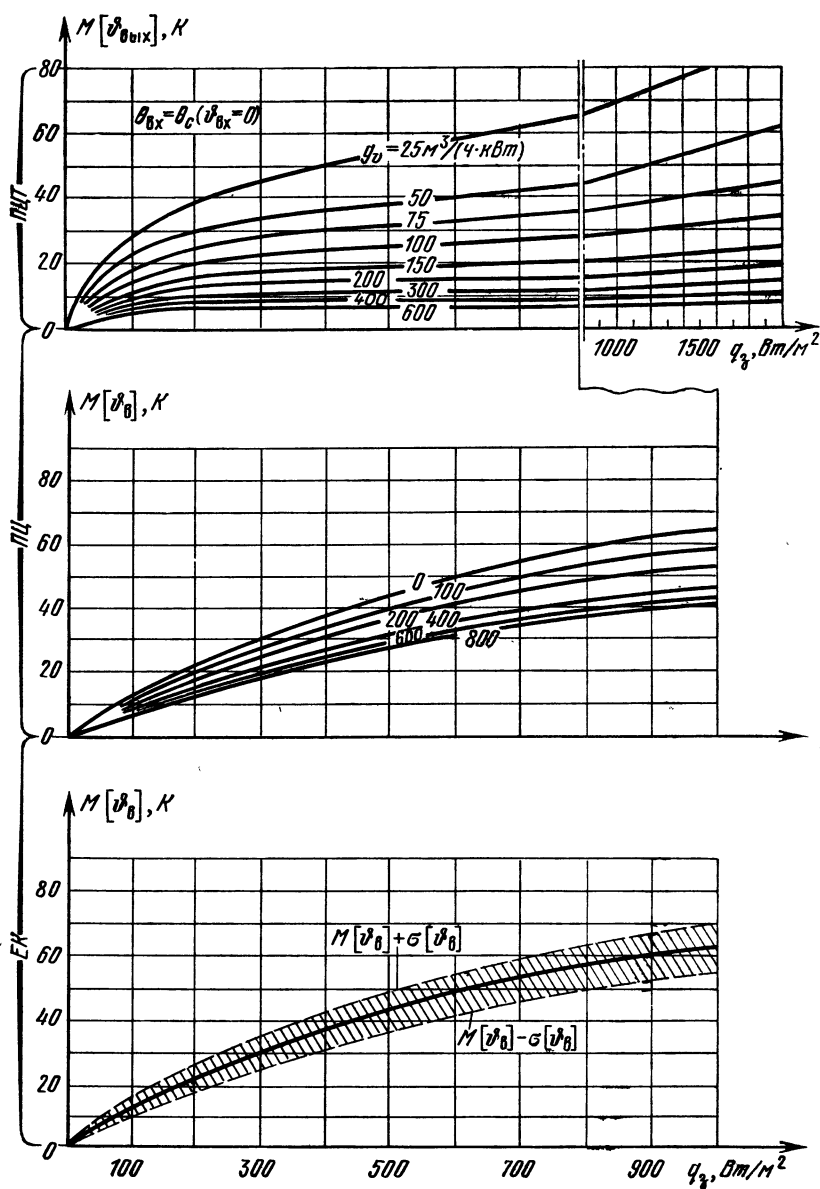
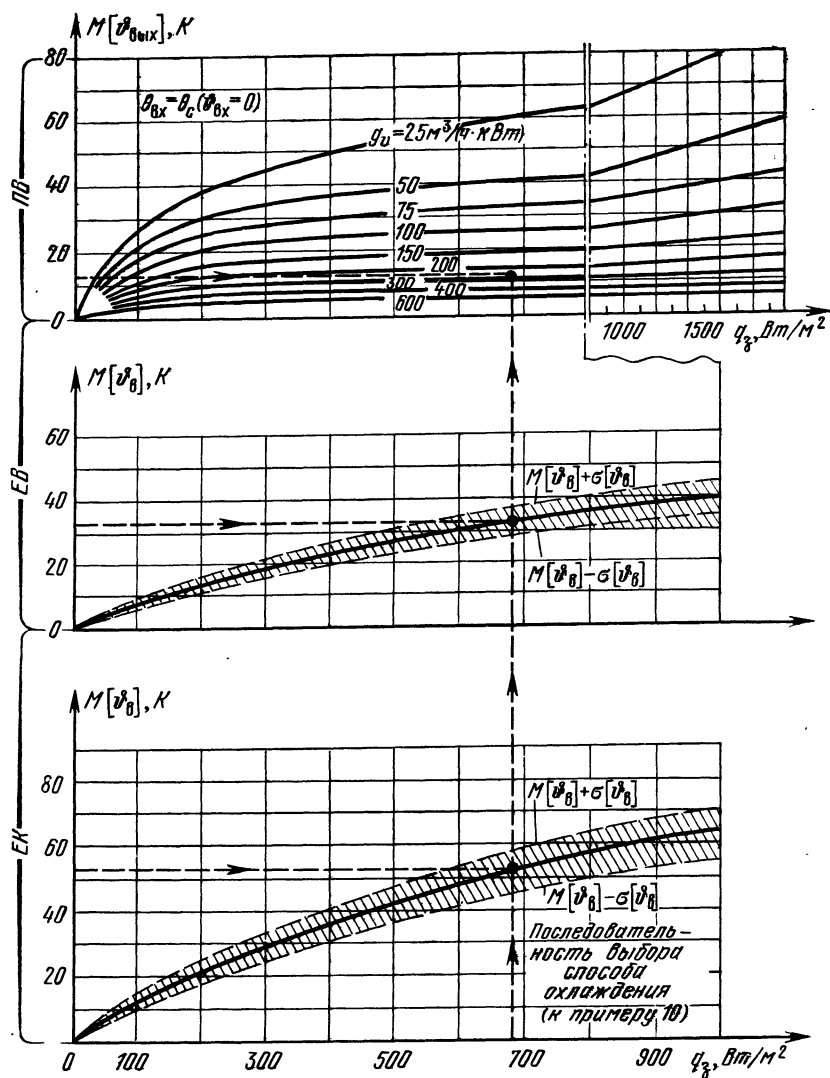
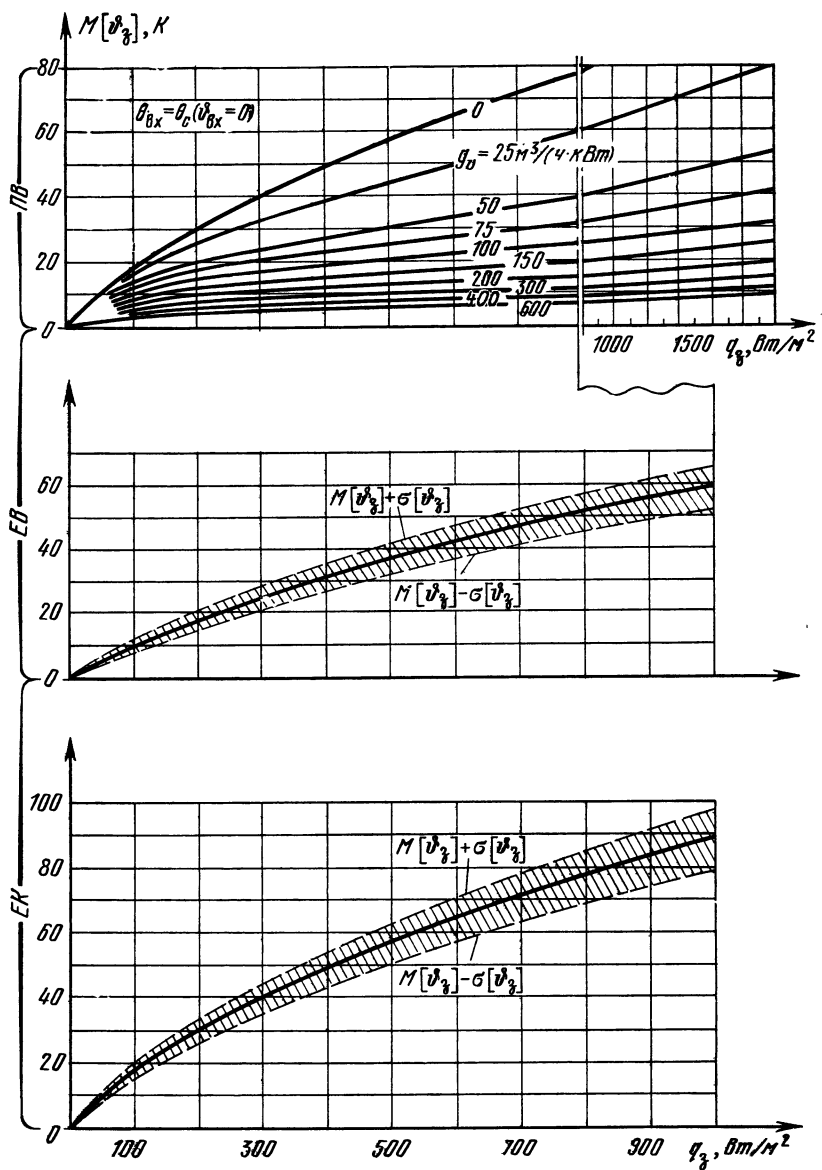


Рис 13.31. Графики для определения перегрева воздуха и НЗ в герметичной (а, б) и негерметичной (в, г) РЭА с шасси







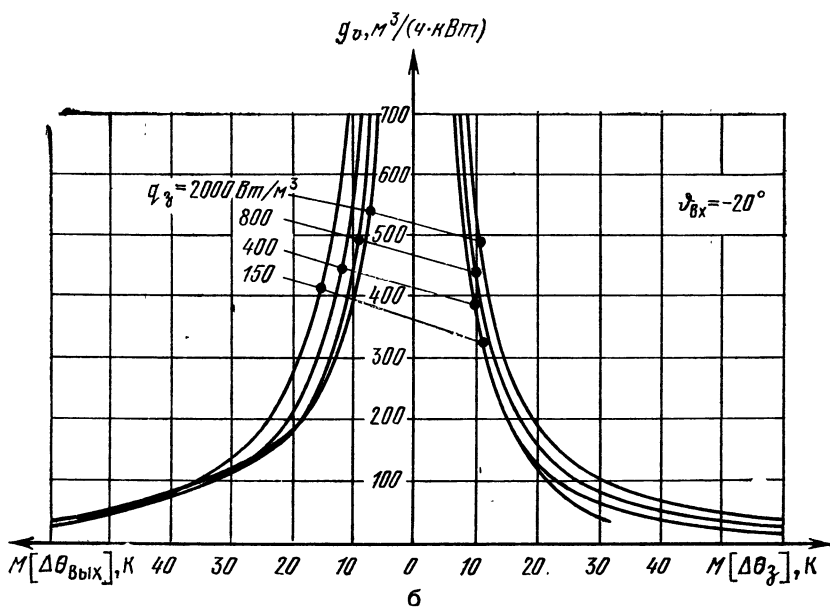
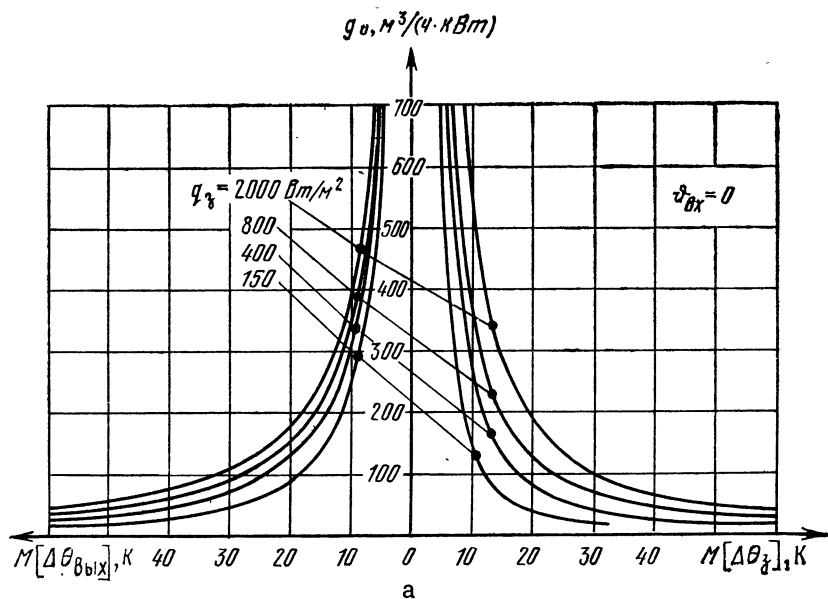
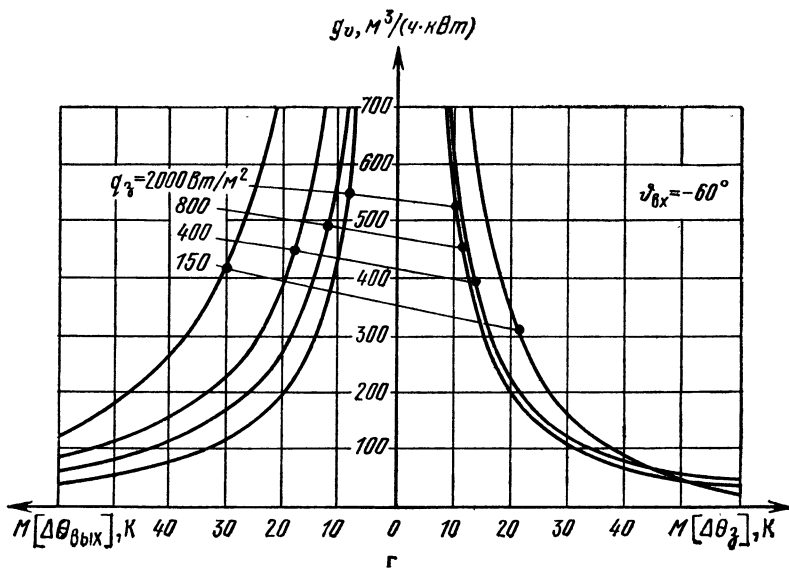
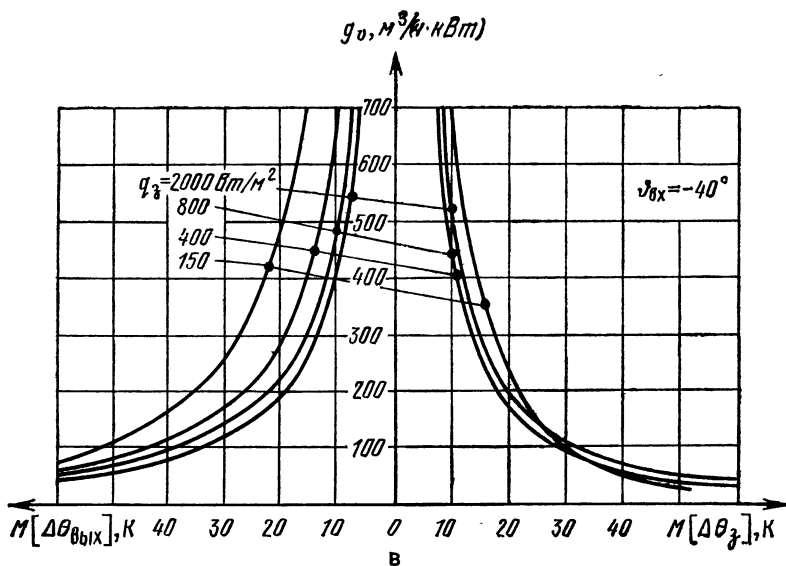
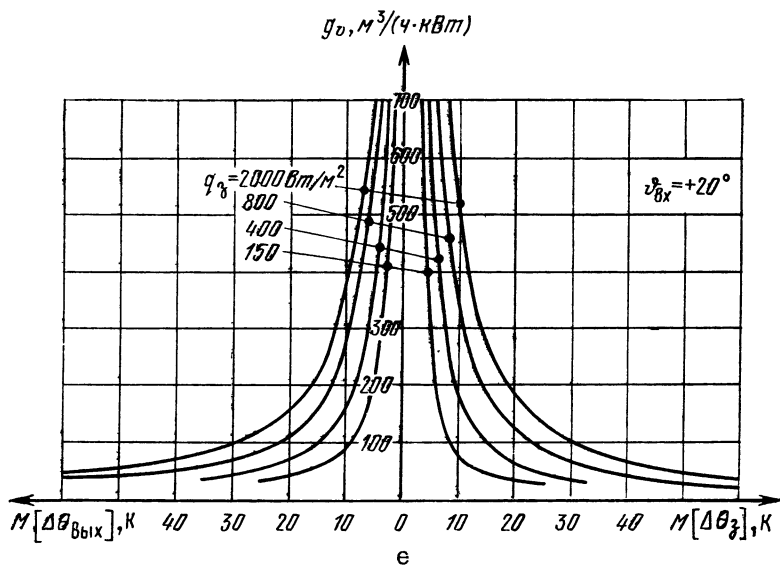
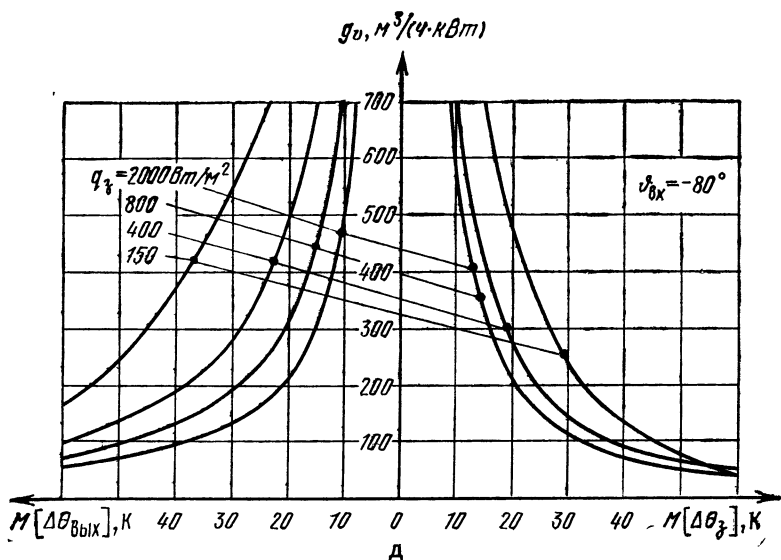


Рис. 13.32. Графики для определения перегрева воздуха и НЗ в РЭА с шасси (ПВ и ПЦТ)





При этом предполагалось, что у наружных и внутренних поверхностей РЭА степени черноты $\epsilon = 0,9$, приведенные степени черноты $\epsilon_{пр} = 0,82$, а принудительная конвекция наружных поверхностей кожуха отсутствует. Если исходные данные отличаются от указанных, то необходимо ввести поправки

$$\theta_3 = P_3 \theta_3^0, \quad \theta_B = P_B \theta_B^0, \quad (13.72)$$

где θ_3^0, θ_B^0 — значения перегревов, полученные для принятых условий; P_3, P_B — поправки для условий, отличающихся от принятых.

Поправки для температуры в РЭА с шасси:

$$\text{ЕК } P_3^0 = 2,464 - 0,44 \cdot 10^{-2} \theta_3,$$

$$P_B^0 \approx P_3^0,$$

$$\text{ЕВ } P_3^0 = 1,133 - 0,04 \cdot 10^{-2} \theta_3,$$

$$P_B^0 = 0,867 + 0,04 \cdot 10^{-2} \theta_3;$$

$$\text{ПЦ } P_3^0 = 1,933 - 0,28 \cdot 10^{-2} \theta_3,$$

$$P_B^0 = 2,115 - 0,335 \cdot 10^{-2} \theta_3;$$

$$\text{ПВ, ПЦТ } P_3^0 = 1,29 - 0,087 \times 10^{-2} \theta_3, \quad P_B^0 \approx P_3^0. \quad (13.73)$$

Поправки для температуры в РЭА КК:

$$\text{ЕК } P_3^0 = 2,464 - 0,44 \cdot 10^{-2} \theta_3,$$

$$P_B^0 \approx P_3^0;$$

$$\text{ПВ } P_3^0 = 1,29 - 0,087 \cdot 10^{-2} \theta_3,$$

$$P_B^0 = P_3^0.$$

Поправки при коэффициенте формы $K_{осн} \neq 1$ учитываются только при ПВ для РЭА с шасси ($P_3^k = 0,86 + 0,14 K_{осн}$) и РЭА КК ($P_3^k = K_{осн}^{0,13}, P_B^k = P_3^k$).

Поправки для давления, отличающегося от нормального (101 кПа), для РЭА с шасси и РЭА КК при ЕК, ЕВ и ПВ

$$P_3^p = (101/p)^{0,14}, \quad P_B^p = P_3^p, \quad (13.74)$$

для РЭА с шасси при ПЦ и ПЦТ

$$P_3^p = (101/p)^{0,12}, \quad P_B^p = P_3^p.$$

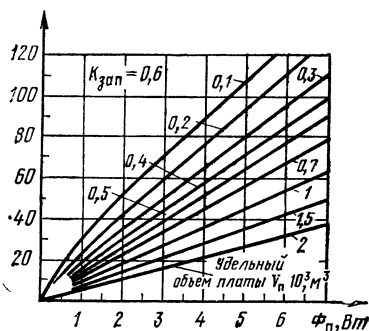
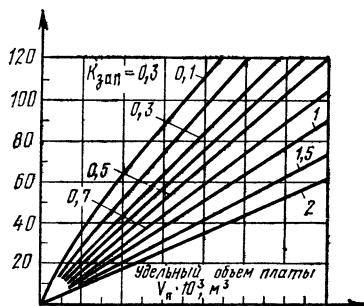
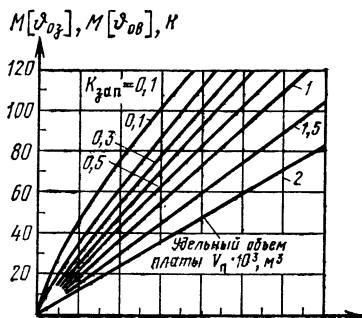


Рис. 13.33. Графики для определения перегревов воздуха и НЗ в РЭА КК с естественной конвекцией

При этом полагается, что существует постоянно массового расхода воздуха, определенного при $p = 101$ кПа (760 мм рт. ст.).

Пример 10. Произвести оценку теплового режима проектируемой негерметичной РЭА с шасси и выбрать способ охлаждения.

Дано: $V = 10,4 \cdot 10^{-3}$ м³, габаритные размеры $0,2 \times 0,4 \times 0,13$ м,

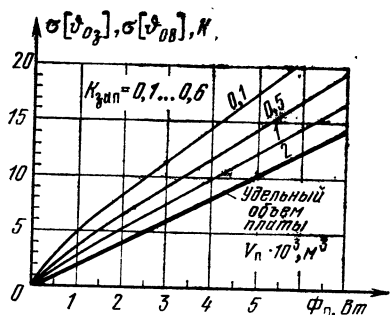


Рис. 13.34. Графики средних квадратичных отклонений перегревов для РЭА КК с естественной конвекцией

$\Phi = 120$ Вт, коэффициент заполнения $K_{зап} = 0,1$, максимальная температура окружающей среды 333 К ($+60^\circ$ С). Предельно допустимый перегрев воздуха в аппарате $\theta_{в доп} = 15$ К.

Решение. 1. Определяем

$$K_0 = H V^{-1/3} = 0,13 / (10,4 \times 10^{-3})^{1/3} = 0,595.$$

2. По (13.65) находим

$$S_3 = (10,4 \cdot 10^{-3})^{2/3} (2/0,595 + 4 \cdot 0,1 \cdot 0,595)^{1/2} = 0,175 \text{ м}^2.$$

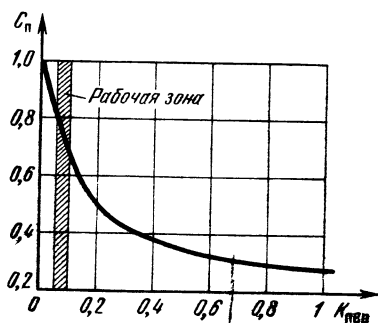
3. Вычисляем удельный тепловой поток нагретой зоны:

$$q_3 = \Phi / S_3 = 120 / 0,175 = 685 \text{ Вт/м}^2$$

4. По рис. 13.31, в определяем перегрев для РЭА с ЕК:

$$M[\theta_8] = 54 \text{ К. Сравниваем зна}$$

Рис. 13.35. График функции $C_n = f(K_{пер})$



чения $\theta_{в доп}$ и $M[\theta_8]$, убеждаемся, что условие нормального теплового режима при ЕК не обеспечивается.

5. По рис. 13.31, в определим математическое ожидание перегрева для РЭА с ЕВ: $M[\theta_8] = 33$ К. Сравнивая значения $\theta_{в доп}$ и $M[\theta_8]$, делаем заключение, что при ЕВ условие нормального теплового режима также не обеспечивается.

6. Определим возможность проектирования РЭА с ПВ. Для значения $q_3 = 685$ Вт/м² по рис. 13.31, в находим g_v , при котором будет выполняться условие нормального теплового режима: $\theta_{вых} \leq \theta_{в доп}$. С учетом того, что коэффициент запаса равен 0,9, имеем $\theta_{вых} = 0,9 \theta_{в доп} = 0,9 \cdot 15 = 13,5$ К. Тогда $g_v = 220$ м³/ч · кВт. Требуемый расход охлаждающего воздуха $G_v = 10^{-3} \cdot g_v \Phi = 10^{-3} \cdot 220 \cdot 120 = 26,4$ м³/ч. Среднее квадратичное отклонение $\sigma[\theta_{вых}]$, характеризующее погрешность проведенного расчета перегрева, вычисляем по формуле, приведенной на с.439.

$$\sigma[\theta_{вых}] = (16 + 0,05 \cdot 685) \times 220^{-0,66} = 1,4 \text{ К.}$$

7. Вывод. РЭА с указанными исходными данными может быть разработана только с применением ПВ. При этом для нормального теплового режима необходимо подавать в РЭА охлаждающий воздух в количестве не менее 26,4 м³/ч с температурой на входе в аппарат $\theta_{вх} = \theta_c$ ($\theta_c = 333$ К).

8. Если в процессе эксплуатации предполагается подавать охлажденный воздух с температурой $\theta_{вх} \neq \theta_c$, то для определения расхода воздуха следует воспользоваться рис. 13.32.

Найти расход воздуха для рассматриваемой РЭА, если

$$\begin{aligned} \theta_{вх} &= 293 \text{ К } (+20^\circ \text{ С}) \quad (\theta_{вх} = \\ &= -40 \text{ К}) \quad \text{По рис. 13.32, в для} \\ \text{значения } q_3 &= 685 \text{ Вт/м}^2 \text{ и } \Delta\theta_{вх} = \\ &= 53,5 \text{ К } (\Delta\theta_{вх} = \theta_{вх} - \theta_{вх} = \\ &= \theta_{вх} - \theta_{вх} = 13,5 + 40 = \\ &= 53,5 \text{ К}) \text{ получим } g_v = 70 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт}). \\ \text{Тогда } G_v &= 10^{-3} \cdot 70 \cdot 120 = 8,4 \text{ м}^3/\text{ч.} \end{aligned}$$

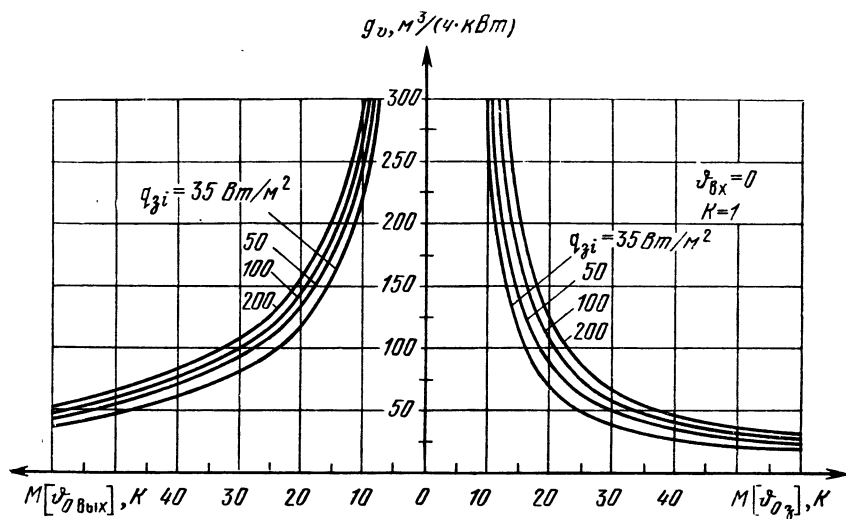


Рис. 13.36. График для определения перегревов НЗ в воздухе в РЭА КК с принудительной вентиляцией

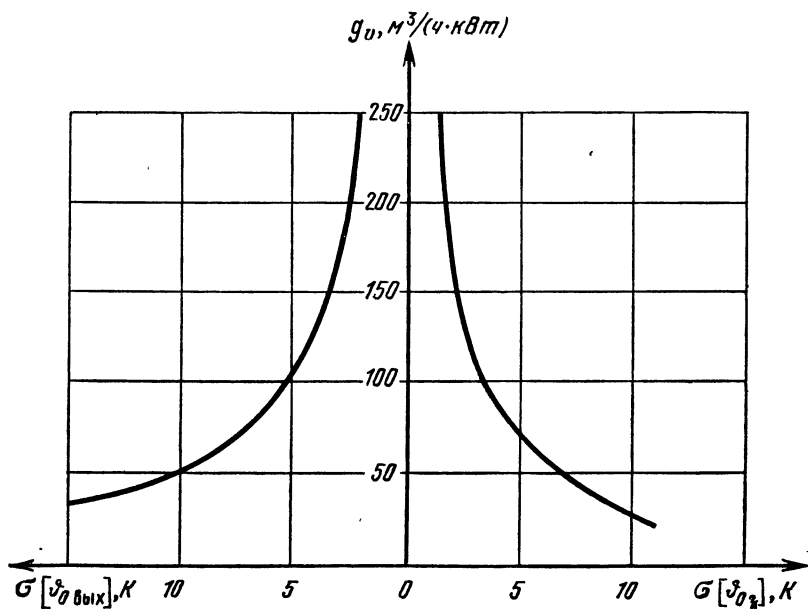


Рис. 13.37. График средних квадратичных отклонений перегревов РЭА КК с принудительной вентиляцией

Пример 11. Определить тепловой режим РЭА и выбрать способ охлаждения.

Дано: РЭА КК, $V = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (габаритные размеры $0,22 \times 0,25 \times 0,17$), габаритные размеры плат $0,23 \times 0,15 \text{ м}$, толщина плат $b_{\text{п}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\Phi = 84 \text{ Вт}$, $K_{\text{зап}} = 0,3$, количество плат в РЭА $m = 12$, максимальная температура окружающей среды $\theta_{\text{с}} = 333 \text{ К}$ ($+60^\circ \text{С}$), предельно допустимый перегрев НЗ центральных плат $\theta_{\text{оз доп}} = 15 \text{ К}$.

Решение. 1. Определяем

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi/m = 84/12 = 7 \text{ Вт.}$$

2. Вычисляем удельный объем плат: $V_{\text{п}} = 9,3 \cdot 10^{-3}/12 = 0,775 \times 10^{-3} \text{ м}^3$.

3. Рассчитываем $S_{\text{зп}}$ и $q_{\text{зп}}$ по формулам (13.68) и (13.69):

$$S_{\text{зп}} = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,15 + 4 \times (0,3 \cdot 0,22/12 + 2 \cdot 10^{-3}) \times \sqrt{0,23 \cdot 0,15} = 0,0746 \text{ м}^2,$$

$$q_{\text{зп}} = 7/0,0746 = 94 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Из рис. 13.33 по значениям $V_{\text{п}}$, $q_{\text{зп}}$ находим перегрев НЗ центральных плат для РЭА с ЕК; $M[\theta_{\text{оз}}] = 102 \text{ К}$.

Сравниваем это значение с предельно допустимым и убеждаемся, что условие нормального теплового режима при ЕК не обеспечивается.

5. Переходим к следующему типу конструкций РЭА с ЕВ. Выбираем коэффициент перфорации $K_{\text{пер}} = 0,05$, тогда коэффициент $C_{\text{п}} = 0,8$ (см. рис. 13.35) и перегрев НЗ центральных плат (формула (13.71)) $\theta_{\text{оз}} = 0,8 \cdot 102 = 81,5 \text{ К}$. Условие (13.62) также не выполняется.

6. Выбираем конструкцию РЭА с ПВ и $\theta_{\text{вх}} = 0$. Наибольший перегрев НЗ центральных плат с учетом того, что коэффициент запаса равен 0,9: $\theta_{\text{оз}} = 0,9$, $\theta_{\text{оз доп}} = 0,9 \times 15 = 13,5 \text{ К}$.

7. Определим поправку для случая, когда $K_{\text{осн}} = 1$ ($K_{\text{осн}} = 0,22 : 0,25 = 0,88$), $\Pi_3^{\text{к}} = K_{\text{осн}}^{0,13} = 0,88^{0,13} = 0,984$.

Поправка близка к единице, поэтому в дальнейшем она не учитывается.

По графику рис. 13.33 для $\theta_{\text{оз}} = 13,5 \text{ К}$ и $q_{\text{зп}} = 94 \text{ Вт/м}^2$ опреде-

ляем $g_{\text{в}} = 210 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт})$, а затем расход охлаждающего воздуха $G_{\text{в}} = 10^{-3} g_{\text{в}} \Phi_{\text{п}} = 10^{-3} \cdot 210 \times 84 = 17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Находим среднее квадратичное отклонение (см. рис. 13.34): $\sigma[\theta_{\text{оз}}] = 1,4 \text{ К}$.

8. Вывод: РЭА КК с указанными исходными данными может быть разработана только при использовании ПВ. Для обеспечения нормального теплового режима необходимо подавать в РЭА охлаждающий воздух в количестве не менее $17,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ с температурой на входе $\theta_{\text{вх}} = \theta_{\text{с}} \leq 333 \text{ К}$ ($+60^\circ \text{С}$).

Пример 12. Рассчитать объемный расход воздуха $G_{\text{в}}$, необходимый для обеспечения перегрева НЗ в вентилируемой РЭА с шасси.

Дано: $\theta_{\text{оз доп}} = 20 \text{ К}$, $V = 17,7 \times 10^{-3} \text{ м}^3$, габаритные размеры $0,26 \times 0,34 \times 0,2 \text{ м}$, $K_{\text{зап}} = 0,37$, $\Phi = 348 \text{ Вт}$, максимальная температура среды $\theta_{\text{с}} = 333 \text{ К}$ ($+60^\circ \text{С}$) $\theta_{\text{вх}} = 0$.

Решение. 1. Определяем

$$K_0 = 0,2/\sqrt[3]{17,7 \cdot 10^{-3}} = 0,767, K_{\text{осн}} = 0,26/0,34 = 0,765.$$

2. По формулам (13.65) и (13.64) находим

$$S_{\text{з}} = \sqrt[3]{(17,7 \cdot 10^{-3})^2} (2/0,767 + 4 \cdot 0,37 \sqrt{0,767}) = 0,265 \text{ м}^2,$$

$$q_{\text{з}} = 348/0,265 = 1313 \text{ Вт/м}^2.$$

3. Задаемся тремя произвольными значениями $G_{\text{в}}$:

$$G_{\text{в1}} = 18 \text{ м}^3/\text{ч}, G_{\text{в2}} = 36 \text{ м}^3/\text{ч}, G_{\text{в3}} = 108 \text{ м}^3/\text{ч}$$

и вычисляем $g_{\text{в}}$ по формуле (13.66):

$$g_{\text{в1}} = 47 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт}), g_{\text{в2}} = 94 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт}), g_{\text{в3}} = 282 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт}),$$

по рис. 13.32, а находим перегревы

$$\theta_{\text{з1}} = 47 \text{ К}, \theta_{\text{з2}} = 29 \text{ К}, \theta_{\text{з3}} = 14 \text{ К}.$$

4. Определяем поправку, учитывая форму аппарата:

$$\Pi_3^{\text{к}} = 0,86 + 0,14 \cdot 0,765 = 0,967.$$

С учетом поправки Π_3^K вычисляем перегревы

$$\vartheta_{31} = 0,967 \cdot 47 = 45,5 \text{ К},$$

$$\vartheta_{32} = 0,967 \cdot 29 = 28 \text{ К},$$

$$\vartheta_{33} = 0,967 \cdot 14 = 13,5 \text{ К}.$$

9. Строим график $G_v = f(\vartheta_3)$ (рис. 13.38), на котором для значения $\vartheta_3 = 0,9 \cdot \vartheta_{3 \text{ доп}} = 16 \text{ К}$ находим $G_v = 84 \text{ м}^3/\text{ч}$

Тепловые режимы отдельных элементов РЭА *

Определяя перегрев эквивалентной НЗ, конструктор получает необходимую информацию о тепловом режиме РЭА, достаточную только на этапе эскизного проектирования. На этапе технического проектирования необходимо знать температуру поверхности элементов, ибо температурное поле в реальной НЗ весьма неравномерно и температуры отдельных элементов могут существенно отличаться от среднего уровня эквивалентной НЗ.

Для оценки среднепервоверхностного перегрева отдельных элементов используется соотношение [10]:

$$\vartheta_j = \vartheta_3 (1 + A), \quad (13.75)$$

где A — коэффициент, показывающий превышение перегрева поверхности отдельного элемента над средним перегревом поверхности НЗ.

Значение A зависит от объема аппарата V , теплового сопротивления перехода элемент—поверхность шасси $r_{\text{пер}}$, расхода охлаждающего воздуха G_v (для аппаратов с ПВ), а также относительной нагрузки $K_{\text{отн}} = \Phi_j / \Phi$ (Φ_j — мощность, рассеиваемая j -м элементом).

Для различных способов охлаждения РЭА имеем:

$$\text{ЕК } M[A] = 25V^{0,33} \cdot r_{\text{пер}}^{0,45} K_{\text{отн}},$$

$$\sigma[A] = K_{\text{отн}},$$

$$\text{ЕВ } M[A] = 40(V \cdot r_{\text{пер}})^{0,33} K_{\text{отн}},$$

$$\sigma[A] = 1,2 K_{\text{отн}}, \quad (13.76)$$

$$\text{ПЦ } M[A] = 25V^{0,33} \cdot r_{\text{пер}}^{0,45} K_{\text{отн}},$$

$$\sigma[A] = (0,4 + 55,5V) K_{\text{отн}},$$

$$\text{ПВ, ПЦТ } M[A] = 5,55(G_v \times r_{\text{пер}})^{0,33} K_{\text{отн}}, \quad \sigma[A] = 3,4 K_{\text{отн}}.$$

* Составитель И. В. Глушицкий.

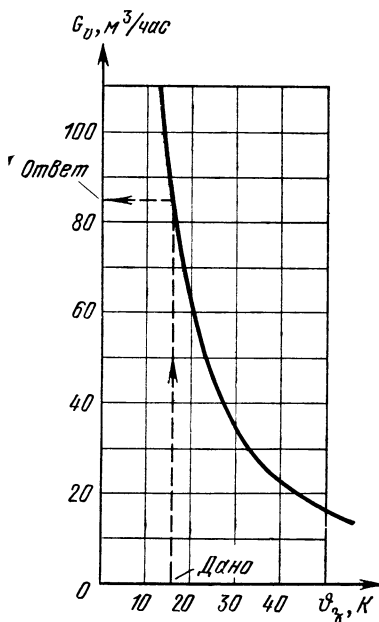


Рис. 13.38. График к примеру 12

Соотношения (13.76) справедливы для РЭА, теплофизические и геометрические параметры которой лежат в пределах, указанных ранее, при определении перегрева НЗ; кроме того, должны соблюдаться следующие условия:

$$0,005 \leq K_{\text{отн}} \leq 0,05,$$

$$0,5 \text{ К/Вт} \leq r_{\text{пер}} \leq 50 \text{ К/Вт},$$

количество теплонагруженных элементов в РЭА составляет 50 ... 100% от общего количества.

Среднее квадратичное отклонение для расчетной формулы (13.75) вычисляется с помощью соотношения:

$$\sigma[\vartheta_j] = \sigma[\vartheta_3] (1 + M[A]) + \sigma[A] (\sigma[\vartheta_3] + M[\vartheta_3]). \quad (13.77)$$

Пример 13. Произвести оценку тепловых режимов элементов для РЭА из примера 10.

Дано: предельно допустимый перегрев поверхности элементов $\vartheta_{\text{доп}} = 30 \text{ К}$, переходное сопротивление элемент—поверхность шасси $r_{\text{пер}} = 5 \text{ К/Вт}$, мощность, рассеиваемая элементом, $\Phi_j = 3 \text{ Вт}$.

Решение. 1. Из примера 10 имеем $q_a = 685 \text{ Вт/м}^2$ и $g_v = 220 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт})$.

По этим данным на графике, рис. 13.31, определяем перегрев НЗ $M[\theta_a] = 12 \text{ К}$, а затем среднее квадратичное отклонение по формуле, приведенной на с. 439: $\sigma[\theta_a] = (50 + 0,085 \times 685) 220^{-0,66} = 3,1 \text{ К}$.

2. Вычисляем $K_{отн} = 3/120 = 0,025$.

3. Определяем коэффициент A и среднее квадратичное отклонение $\sigma[A]$ по формулам [13.76]:

$$M[A] = 5,55 \cdot \sqrt[3]{26 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 0,025} = 0,706;$$

$$\sigma[A] = 3 \cdot 4 \cdot 0,025 = 0,085.$$

4. Вычисляем перегрев поверхности элемента и среднее квадратичное отклонение по формулам (13.75) и (13.77):

$$M[\theta_j] = 12(1 + 0,706) = 20,5 \text{ К};$$

$$\sigma[\theta_j] = 3,1 \cdot 1,706 + 0,085 \times$$

$$\times (3,1 + 12) = 6,6 \text{ К}.$$

5. Проверяем условия нормального теплового режима по (13.63) и убеждаемся, что это условие выполняется. Следовательно, в РЭА с ПВ обеспечивается нормальный тепловой режим работы рассматриваемого элемента.

Тепловые режимы многоблочной РЭА *

Оценка тепловых режимов принудительно вентилируемых стоек и шкафов РЭА, имеющих в своем составе два и более блоков, выполняется с использованием коэффициентного метода [15].

Исходные данные для расчета перегрева НЗ i -го блока в стойке следующие: 1) геометрические параметры корпуса стойки и НЗ; 2) Φ_i — мощность, рассеиваемая в i -м блоке; 3) $\theta_{вх\ i}$ — перегрев воздуха, поступающего в i -й блок; 4) θ_c — температура окружающей аппарат среды; 5) G_m — массовый расход воздуха через отсек, если блок состоит из нескольких отсеков.

* Составитель В. И. Киселев.

Средние геометрические параметры блоков определяются по следующим формулам.

Средний ОР блока

$$l_i = \frac{\sum_1^n l_j S_j}{\sum_1^n S_j}, \quad (13.78)$$

где l_j и S_j — длина траектории воздушного потока вдоль поверхности и площадь теплоотдающей поверхности j -го элемента, n — число элементов в i -м блоке. Площадь излучающих поверхностей НЗ

$$S_{зл\ i} = 2[L_1 L_2 + (L_1 + L_2)(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)], \quad (13.79)$$

где L_1 , L_2 — ширина и длина (в направлении потока) шасси i -го блока; \bar{h}_1 , \bar{h}_2 — средняя высота элементов, расположенных с одной и другой стороны шасси, определяемая по формуле:

$$\bar{h}_{1,2} = \frac{n_1(n_2)}{\sum_1^{n_1} h_j S_{0j}} \bigg/ \sum_1^{n_2} S_{0j}; \quad (13.80)$$

h_j и S_{0j} — высота и площадь основания j -го элемента, n_1 и n_2 — число элементов, расположенных соответственно с одной и с другой стороны шасси

Средняя площадь, свободная для прохода воздуха рассчитывается по формуле:

$$S_{б\ i} = L_1 L_2 (1 - K_{зап\ i}), \quad (13.81)$$

где $K_{зап\ i}$ — коэффициент заполнения объема i -го блока. Площадь $S_{з\ i}$ определяется как сумма площадей теплоотдающих поверхностей элементов и шасси, не занятого ими.

Температура $\theta_{вх\ i}$ входящего в i -й блок воздуха равна температуре воздуха, выходящего из предыдущего ($i-1$) блока, и находится из условия, что вся тепловая мощность $\Phi_{(i-1)}$ ($i-1$)-й НЗ идет на повышение тепло содержания воздуха, омывающего ее,

$$\theta_{вх\ i} = \theta_{вых\ (i-1)} = \theta_{вх\ (i-1)} + \Phi_{(i-1)} / c_p G_m. \quad (13.82)$$

Перегрев НЗ i -го блока в стойке определяется по формуле:

$$\theta_{zi} = \theta_{\Phi} K_{\theta_{\text{вх}i}} K_{G_m} K_{li} K_{s_{\text{кн}}} K_{s_{\text{эл}}} \times \\ \times K_{s_{\text{эл}}} K_{s_{\text{би}}} K_{\theta_c} \quad (13.83)$$

Входящие в формулу (13.68) коэффициенты можно определить по графикам, приведенным на рис. 13.39. Графики на рис. 13.39, 1–5 используются для определения нелинейных коэффициентов в следующих диапазонах изменения исходных параметров:

$$\Phi_i = 0 \dots 400 \text{ Вт},$$

$$G_m = 0,004 \dots 0,022 \text{ кг/с},$$

$$\theta_{\text{вх}i} = 0 \dots 50 \text{ К}, S_{\text{кн}i} = \\ = 0,05 \dots 0,25 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{эл}i} = 0,07 \dots 0,21 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{эл}i} = 0,1 \dots 0,4 \text{ м}^2, l_i = 0,02 \dots 0,08 \text{ м},$$

$$\theta_c = 273 \dots 343 \text{ К},$$

$$S_{\text{би}} = 0,005 \dots 0,025 \text{ м}^2.$$

Линейные коэффициенты при этом находят по формулам:

$$K_{\theta_{\text{вх}i}} = 0,99 + 0,014 \theta_{\text{вх}i},$$

$$K_{S_{\text{кн}}} = 1,09 - 0,6 S_{\text{кн}},$$

$$K_{\theta_c} = 1,02 - 0,7 \cdot 10^{-3} (\theta_c - 273),$$

$$K_{S_{\text{эл}}} = 1,09 - 0,61 S_{\text{эл}}. \quad (13.84)$$

Графики рис. 13.39, 6 ... 10 используются для определения нелинейных коэффициентов в других диапазонах изменения исходных параметров:

$$\Phi_i = 0 \dots 500 \text{ Вт},$$

$$G_m = 0,01 \dots 0,14 \text{ кг/с}, \theta_{\text{вх}i} = \\ = -10 \dots +16 \text{ К},$$

$$S_{\text{би}} = 0,01 \dots 0,09 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{эл}i} = 0,1 \dots 0,5 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{эл}i} = 0,3 \dots 1,3 \text{ м}^2,$$

$$l_i = 0,02 \dots 0,14 \text{ м}, \theta_c = 293 \dots 343 \text{ К}.$$

Линейные коэффициенты при этом равны:

$$K_{\theta_{\text{вх}}} = 1,00 + 0,038 \theta_{\text{вх}i},$$

$$K_{\theta_c} = 1,02 - 1 \cdot 10^{-3} (\theta_c - 273), \quad (13.85)$$

$$K_{S_{\text{эл}}} = 1,10 - 0,43 S_{\text{эл}}, K_{s_{\text{кн}}} = 1.$$

Средняя погрешность расчета перегревов НЗ многоблочной РЭА с ПВ не превышает $\pm 35\%$ по сравнению с опытными данными

Пример 14. Определить перегревы НЗ 1- и 2-го по ходу воздуха блоков стойки ЭЛ в каждом блоке располагаются на шасси с двух сторон. Шасси расположены вертикально и делят каждый блок на два отсека. Мощность, рассеиваемая каждым отсеком, $\Phi_i = 250 \text{ Вт}$. Геометрические параметры блоков и отсеков, определенные по формулам (13.78) ... (13.81), следующие:

Номера блока (отсека)	$S_{\text{эл}}^{\text{м}^2}$	$S_{\text{би}}^{\text{м}^2}$	$S_{\text{би}}^{\text{м}^2}$	$S_{\text{кн}}^{\text{м}^2}$	$l_0^{\text{м}}$
1 (1)	0,2	0,38	0,02	0,15	0,032
1 (3)	0,2	0,38	0,02	0,15	0,032
2 (2)	0,2	0,32	0,02	0,15	0,042
2 (4)	0,2	0,32	0,02	0,15	0,042

Температуры входящего в стойку воздуха и окружающей среды одинаковы: $\theta_{\text{вх}} = \theta_c = 313 \text{ К}$, $G_m = 0,044 \text{ кг/с}$ (через отсеки 1 и 2 $G_{m1,2} = 0,022 \text{ кг/с}$, через отсеки 3 и 4 $G_{m3,4} = 0,022 \text{ кг/с}$).

Решение. 1 По графикам рис. 13.39, 1 ... 5 и формулам (13.84) определяем коэффициенты, входящие в формулу (13.83) для отсека 1 стойки: $\theta_{\Phi} (250) = 54 \text{ К}$,

$$K_{\theta_{\text{вх}}} = 0,99 + 0,014 \cdot 0 = 0,99,$$

$$G_m (0,022) = 0,67,$$

$$K_{S_{\text{би}}} (0,02) = 1,07, K_{l_0} (0,032) = \\ = 0,95,$$

$$K_{S_{\text{кн}}} = 1,09 - 0,6 \cdot 0,15 = 1,0,$$

$$K_{S_{\text{эл}}} = 1,09 - 0,61 \cdot 0,2 = 0,97,$$

$$K_{S_{\text{эл}}} (0,38) = 0,86,$$

$$K_{\theta_c} = 1,0 - 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot (313 - 273) = \\ = 0,99.$$

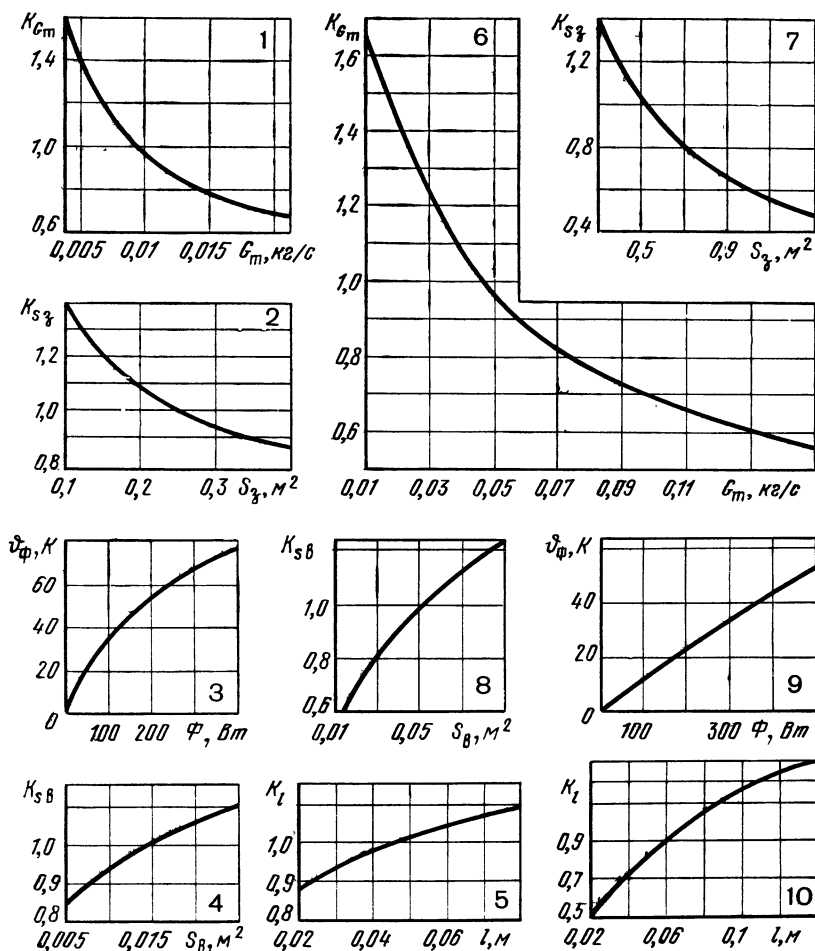


Рис. 13.39. Графики коэффициентов для определения температуры НЗ в многоблочной РЭА с принудительной вентиляцией

1...5) — $G_m < 0,02 \text{ кг/с}$, 6...10) — $G_m > 0,01 \text{ кг/с}$

2. Определяем перегрев НЗ от отсека 1:

$$\begin{aligned} \vartheta_{31} &= 54 \cdot 0,99 \cdot 0,67 \cdot 0,95 \times \\ &\times 1,0 \cdot 0,86 \cdot 0,97 \cdot 1,07 \times \\ &\times 0,99 = 30,2 \text{ К.} \end{aligned}$$

3. По формуле (13.82) определяем перегрев воздуха, выходящего из отсека 1:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{вых}1} &= \vartheta_{\text{вых}2} = 0 + 250/10^3 \times \\ &\times 0,022 = 11,4 \text{ К.} \end{aligned}$$

4. Определяем коэффициенты для отсека 2 аппарата:

$$\begin{aligned} \vartheta_\phi &= 54 \text{ К, } K_{\phi_{\text{вх}}} = 0,99 + \\ &+ 0,014 \cdot 11,4 = 1,15, \\ K_{G_m} &= 0,67, K_{S_{\text{в}i}} = 1,07, \\ K_{l_{0i}}(0,042) &= 0,98, \\ K_{S_{\text{кн}}} &= 1,0, K_{S_{\text{эл}}} = 0,97, \\ K_{S_{\text{в}i}}(0,32) &= 0,92, K_{\theta_c} = 0,99. \end{aligned}$$

5 Определяем перегрев НЗ отсека 2:

$$\Delta\theta_{32} = 54 \cdot 1,15 \cdot 0,67 \cdot 1,07 \times \\ \times 0,98 \cdot 1,0 \cdot 0,97 \cdot 0,92 \times \\ \times 0,99 = 38,5 \text{ К.}$$

6 Перегревы НЗ отсеков 3 и 4 равны соответственно перегревам НЗ отсеков 1 и 2:

$$\theta_{33} = 28,6 \text{ К и } \theta_{34} = 38,5 \text{ К.}$$

13.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ, ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И МИКРОСБОРОК

Общие положения *

Параметрами теплового режима полупроводниковых приборов ППП, интегральных микросхем ИС и микросборок МС являются: температура θ , К; рассеиваемая мощность Φ , Вт; тепловое сопротивление r , К/Вт. Обозначение температуры θ конкретизируется с помощью индексов: p — p - n -переход (кристалл), k — корпус, t — внешний теплоотвод, c — окружающая среда (воздух). Предельно допустимые значения θ и Φ получают дополнительный индекс прд. Например, θ_p — температура p - n -перехода, $\theta_{k \text{ прд}}$ — предельно допустимая температура корпуса. Обозначения теплового сопротивления при необходимости конкретизации получают следующим образом: ps — p - n -переход — среда (полное), pk — p - n -переход — корпус (внутреннее r), ks — корпус — среда (внешнее r), pt — p - n -переход — внешний теплоотвод, kt — корпус — внешний теплоотвод (r контакта). Например, r_{ps} и r_{ks} — тепловые сопротивления p - n -переход—среда и корпус—среда.

Если параметр зависит от времени, то к его обозначению добавляется символ t . Например, $r(t)$ — переходное тепловое сопротивление, $\theta_p(t)$ — мгновенная температура p - n -перехода.

* Составитель Д. И. Закс.

Полное, внутреннее, внешнее и контактное тепловые сопротивления связаны следующими соотношениями:

$$r_{ps} = r_{pk} + r_{ks},$$

$$r_{pt} = r_{pk} + r_{kt} \quad (13.86)$$

При измерении r_{pk} у ППП, ИС и МС малой и средней мощности измеряют r_{pt} и принимают $r_{pk} \approx r_{pt}$, ибо внутреннее тепловое сопротивление как правило значительно превышает r_{kt} .

Для многокристалльных ИС тепловое сопротивление i -го кристалла r_i определяется так:

$$r_i = \Phi_i r_{iit}/\Phi + \sum_{j=1, j \neq i}^n \Phi_j r_{ijt}/\Phi \approx \\ \approx r_{iit}/n + (n-1)/\bar{r}_{ijt}, \quad (13.87)$$

где Φ_i и Φ_j — мощности, рассеиваемые i -м и j -м кристаллами; Φ — мощность, рассеиваемая всеми кристаллами; r_{iit} — тепловое сопротивление одного кристалла без учета подогрева остальными кристаллами; r_{ijt} — тепловое сопротивление фона, определяющее разогрев кристалла i , мощностью, рассеиваемой кристаллом j ; \bar{r}_{ijt} — среднее значение r_{ijt} ; n — число кристаллов в корпусе.

ППП, ИС и МС малой мощности обычно рассеивают тепло в воздух. Поэтому определяющим параметром их теплового режима, выбираемым в соответствии с ожидаемыми условиями эксплуатации, является предельно-допустимая температура окружающей среды. В технической документации на ППП, ИС и МС приводятся значения r_{ps} , а для некоторых типов и значения Φ .

Температура кристалла

$$\theta_p = \theta_c + r_{ps}\Phi, \quad (13.88, а)$$

а условия обеспечения теплового режима:

$$\theta_p = \theta_{c \text{ прд}} + r_{ps}\Phi \leq \theta_{p \text{ прд}} \quad (13.88, б)$$

или

$$\Phi_{\text{прд}} \leq (\theta_{p \text{ прд}} - \theta_{c \text{ прд}})/r_{ps}. \quad (13.88, в)$$

ППП, ИС и МС большой мощности обычно охлаждаются с помощью внешнего теплоотвода. Поэтому определяющим параметром их теплового режима является предельно допустимая температура внешнего теплоотвода, которая (как и $\theta_{спрд}$) выбирается в зависимости от условий эксплуатации. При этом принимается, что $\theta_{тпрд} \approx \theta_{кпрд}$. Дополнительно задаются $r_{пк}$ и иногда Φ Температура кристалла:

$$\theta_{п} = \theta_{к} + r_{пк}\Phi, \quad (13.89, а)$$

а условия обеспечения теплового режима:

$$\theta_{п} = \theta_{кпрд} + r_{пк}\Phi \leq \theta_{ппрд} \quad (13.89, б)$$

или

$$\Phi_{прд} \leq (\theta_{ппрд} - \theta_{кпрд})/r_{пк}. \quad (13.89, в)$$

При расчете мгновенной температуры ППП, ИС и МС, работающих в импульсном режиме, используют формулы (13.88) и (13.89), заменяя стационарные значения мощности и теплового сопротивления мгновен-

ными значениями. При этом необходимо учитывать, что у мощных транзисторов при коротких импульсах возможно увеличение $r_{т}$ за счет кумуляции тока. При эксплуатации ППП, ИС и МС рекомендуется иметь запасы по температуре и рассеиваемой мощности (коэффициент запаса по Φ для транзисторов равен 0,8 ... 0,9). В табл. 13.3 ... 13.5 даны тепловые сопротивления для характерных ППП и ИС. Дополнительные сведения по тепловым параметрам ППП даны в [1, 13, 18, 34 и 36].

Расчет тепловых режимов ППП, ИС и МС *

Определение предельно допустимых значений. Величины $\theta_{спрд}$ и $\theta_{кпрд}$ выбираются из стандартизированного ряда температур, причем, как правило, выполняется условие $343 \text{ К} \leq \theta_{спрд} \leq 398 \text{ К}$. Для транзисторов по известному значению $\Phi_{прд}$ на семействе выходных вольт-амперных характеристик строится область безопасной работы.

Таблица 13.2

Тепловые сопротивления транзисторов в корпусах с воздушным охлаждением

Тип транзистора	$r_{пк}$, К/Вт	$\theta_{пер}^{max}$, К	$\theta_{с}^{доп}$, К
Германиевые			
П213А...П21АГ	35	358	343
П201Э...П203Э	40	358	343
П601...П602АК	50	358	333
ГТ404А...ГТ403И	100	358	328
ГТ308А...ГТ308Г	250	358	343
МП30А...ПМ21Е	330	358	333
П27...П28	1000	358	333
ГТ108А...ГТ108Г	800	353	328
ГТ109А...ГТ109Г	1800	353	328
Кремниевые			
П302...П304	100	393	358
КГ603А, КГ603Б	200	423	358
КТ324А...КТ324Е	3000	373	358
КТ319А...КТ319В	4000	353	343
КТ306А...КТ306Д	400	433	373
КТ118А...КТ118В	400	423	398

Таблица 13.4

Тепловые сопротивления транзисторов в корпусах с кондуктивным охлаждением

Тип транзистора	$r_{пк}$, К/Вт	$\theta_{пер}^{max}$, К
Германиевые		
П210Б, П210В	1	343
П4АЭ...П4ДЭ	2	363
ГТ806А...ГТ806В	3	338
П201Э...П203Э	4	358
П605...П609	15	358
Кремниевые		
КТ908, КТ908Б	2	424
КТ805А, КТ805Б	3,3	423
КТ807А, КТ807Б	5	393
П303, П304	10	423
КТ605А, КТ605Б	40	423
КТ603А + КТ603Е	140	393

Тепловые сопротивления ИС

Конструкция корпуса	Материал корпуса	Число выводов	Обозначение	$r_{\text{по}}, \text{ К/Вт}$	$r_{\text{пк}}, \text{ К/Вт}$
Плоский с планарным расположением выводов	Металлостеклянный	14	401.14-1 (3)	364...380	160
	То же Керамический	14	401.14-2 (4)	104...137	14...22
		16	402.16-1	66...91	12...22
		48	402.16-2 402.48-3	» 20...23	» 2...5
Плоский с штырьковыми выводами	То же »	14	252 МС14-1	129	—
		15	252 МС15-1	144	—
Пластмассовый с вертикальными выводами	Пластмассовый	14	201.14-1	120...180	80...100
	Пластмассовый с металлическим вкладышем	14	201.14-2	100...110	30...50
	Пластмассовый с металлическим вкладышем	16	238.16-1	160...170	30...50
	Пластмассовый с металлическим вкладышем	16	238.16-2	94...118	25
	То же	24	239.14-2	80	—
Керамический с вертикальными выводами	Керамический	16	201.16-1	79...118	22
	То же »	14	201.14-8	143...146	66...73
		24	239.24-4	113	—
Круглый	Металлический	8	301.8-2	144	—

Предельно допустимая температура кристалла определяется на основе накопленного опыта при эксплуатации сходных конструкций, в соответствии с требованиями по надежности и нормами на значения электрических параметров. Значение $\theta_{\text{п прд}}$ обычно лежит в пределах 358 ... 373 К для германиевых и 423 ... 473 К для кремниевых ППП. В некоторых ППП физические процессы в наиболее слабых участках конструкции приводят к необходимости снижать значение $\theta_{\text{п прд}}$.

Например, для ИС в пластмассовых корпусах $\theta_{\text{п прд}}$, определенная по температуре стеклования пластмассы, равна 398 К, для некоторых ИС ЭСЛ-типа $\theta_{\text{п прд}}$, определенная уменьшением помехозащищенности, равна 383 К.

Расчет тепловых сопротивлений ППП, ИС и МС. Точный расчет тепловых сопротивлений для некоторых типов конструкций, изложенный в [16, 17], является трудоемким процессом, требующим применения ЭВМ. С помощью простых методов можно

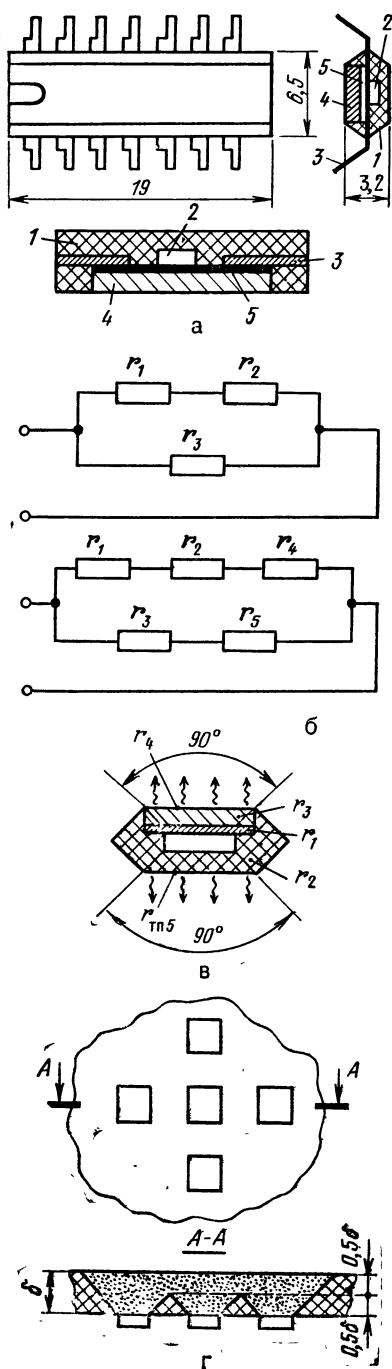


Рис. 13.40. ИС в корпусе 201.14.2. Схема конструкции (а), тепловая схема для расчетов $r_{пк}$ и $r_{пс}$ (б), схема расположения элементов и тепловых потоков (в), расположение кристаллов на подложке и схема тепловых потоков в сечении А—А (г):

1 — пластмасса; 2 — кристалл; 3 — выводы из ковара; 4 — алюминиевый вкладыш; 5 — клей

выполнять расчеты только в грубом приближении. Точность приближенных расчетов, выполненных по упрощенным методикам, можно повысить, если произвести пересчет известного теплового сопротивления ППП к другим условиям охлаждения или к измененной конструкции.

Тепловое сопротивление участков конструкции, которое можно свести к модели в виде параллелепипеда с расположенным на нем кристаллом, равно:

$$r \approx \delta / \lambda \sqrt{S_K} (\sqrt{S_K} + 2\delta), \quad (13.90)$$

где S_K — поверхность кристалла эквивалентного в данном случае источнику тепла; δ — толщина параллелепипеда; λ — коэффициент теплопроводности.

Используя правила последовательно-параллельного соединения тепловых сопротивлений отдельных участков ППП, ИС или МС (рис. 13.40, а) можно получить $r_{пк}$ или $r_{пс}$, в соответствии со схемой рис. 13.40, б. В случае многослойного параллелепипеда r равно сумме тепловых сопротивлений каждого слоя, причем к величине $\sqrt{S_K}$ добавляется удвоенная толщина предыдущего слоя. Геометрически это означает, что тепловой поток растекается от кристалла под углом 45° (рис. 13.40, в).

Если тепловой поток ограничен боковыми стенками параллелепипеда или параллельным потоком от расположенного рядом кристалла, то сечение теплового потока уменьшается, как это показано на рис. 13.40, г. Это приводит к увеличению r , что учитывается в формуле (13.87) вторым слагаемым.

Полное тепловое сопротивление ППП, ИС или МС можно пересчи-

тать к новым условиям охлаждения по формуле:

$$r''_{\text{пс}} \simeq (r'_{\text{пс}} - r'_{\text{пк}}) \alpha' / \alpha'' + r'_{\text{пк}}, \quad (13.91)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/К · м². Индекс (') соответствует исходным условиям охлаждения, индекс (") — новым условиям охлаждения. Величины α' и α'' можно рассчитать по [15].

Пример 15. Рассчитать насколько изменится внутреннее тепловое сопротивление $r_{\text{пк}}$ кристалл—основание корпуса ИС при конструкции корпуса типа 201.14—2 (рис. 13.40) при увеличении площади кристалла от $S'_k = 1,6 \cdot 10^{-3} \times 1,6 \cdot 10^{-3}$ м до $S''_k = 2 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Дано: $r'_{\text{пк}} = 34$ К/Вт; $\delta_{\text{кд}} = 2 \times 10^{-5}$ м, $\delta_{\text{ал}} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м (толщины клея и алюминиевого вкладыша); $\lambda_{\text{кд}} = 0,24$ Вт/К · м, $\lambda_{\text{ал}} = 180$ Вт/К · м (коэффициенты теплопроводности клея и алюминиевого вкладыша).

Решение. Пренебрегая тепловым сопротивлением алюминиевого вкладыша, по формуле (13.90) находим:

$$r''_{\text{пк}} \simeq r'_{\text{пк}} \frac{\sqrt{S'_k} (\sqrt{S'_k} + 2\delta_{\text{кд}})}{\sqrt{S''_k} (\sqrt{S''_k} + 2\delta_{\text{кд}})},$$

$$\begin{aligned} r''_{\text{пк}} &\simeq 34 \times \\ &\times \frac{\sqrt{(1,6 \cdot 10^{-3})^2} (\sqrt{(1,6 \cdot 10^{-3})^2} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5})}{\sqrt{(2 \cdot 10^{-3})^2} (\sqrt{(2 \cdot 10^{-3})^2} + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5})} = \\ &= 21,9 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Величина $r'_{\text{пк}}$ уменьшилась на $100(r'_{\text{пк}} - r''_{\text{пк}})/r'_{\text{пк}} = 100(34 - 22)/34 = 36\%$.

Пример 16. При измерении теплового сопротивления $r_{\text{пс}}$ ИС в корпусе конструкции 201.8—16 она находилась на вертикально установленной печатной плате. Рассчитать тепловое сопротивление той же ИС при повороте печатной платы в горизонтальное положение и при расположении ИС на нижней поверхности печатной платы.

Дано: $r'_{\text{пк}} = 9$ К/Вт; $r'_{\text{пс}} = 59$ К/Вт; $\alpha'/\alpha'' = 1,3$.

Решение. По формуле (13.91) находим:

$$r''_{\text{пс}} \approx (59 - 9) \cdot 1,3 + 9 = 74 \text{ К/Вт}.$$

Измерение тепловых сопротивлений ППП и ИС *

Измерение r и контроль теплового режима ППП, ИС и МС в РЭА. Формула для определения теплового сопротивления, например, $r_{\text{пк}}$ полученная дифференцированием выражения (13.88, а) по Φ имеет вид:

$$r_{\text{пк}} = \Delta\theta_{\text{п}}/\Delta\Phi$$

$$\text{при } \theta_{\text{к}} = \text{const}, \quad (13.92)$$

где $\Delta\theta_{\text{п}}$ и $\Delta\Phi$ — приращение температуры $\theta_{\text{п}}$ и рассеиваемой мощности Φ .

Из (13.92) следует, что при измерении $r_{\text{пк}}$ необходимо поддерживать неизменной температуру корпуса ППП, ИС или МС. Это достигается применением термостата. При этом $\theta_{\text{к}}$ контролируется за температурой теплообменника, к которому прикреплен ППП (ИС или МС). Это допустимо при $\theta_{\text{к}} \simeq \theta_{\text{т}}$ или при применении термопары, укрепленной на корпусе ППП (ИС или МС).

Температура кристалла может измеряться разными способами, из которых наиболее широко применяются методы, при которых измеряют напряжение p — n переходов U , зависящее от температуры [13, 38]. Элементы кристалла, на которых измеряется напряжение, называются датчиками температуры, а элементы кристалла, с помощью которых коммутируется потребляемая мощность — источниками тепла.

Методы измерения напряжения датчиков температуры можно разделить на статический и импульсный. Статический метод применяется тогда, когда источники тепла и датчики температуры на кристалле ППП, ИС или МС электрически изолированы друг от друга. Эти условия выполняются для тестовых структур, предназначенных для измерения тепловых параметров, и (приблизленно) для некоторых типов транзисторов

* Составитель Д. И. Закс.

и ИС. Метод прост и позволяет обойтись стандартными измерительными приборами.

Импульсный метод значительно универсальнее статического, однако он более сложен и требует нестандартных измерительных приборов, позволяющих измерять приращение импульсных напряжений в ППП, ИС или МС с точностью до единиц или долей милливольт.

На рис. 13.41, а приведены диаграммы токов и напряжений при измерении r ИС 1ЛБ333 импульсным методом, а на рис. 13.41, б — функциональная схема прибора.

Приращение напряжения U должно определяться только изменением температуры кристалла за счет саморазогрева ИС. Поэтому в момент измерения U электрический режим нагретой и холодной ИС должен быть одинаковым, для чего ИС на короткое время переключается в режим измерения. После затухания электрических переходных процессов подается измерительный строб — импульс, в течение которого происходит измерение напряжения. Переключение ИС в режим измерения или изменение потребляемой мощности осуществляется с помощью электронного ключа. Измерение импульсного напряжения осуществляется путем сравнения его величины с постоянным опорным напряжением. Для градуировки измеряемого напряжения ИС помещается в термостат.

Следует учитывать то, что измерение r требует измерения приращения напряжений, величина которых на два-три порядка меньше самих напряжений U . Это может привести к большим систематическим и случайным ошибкам.

Контроль теплового режима ППП, ИС или МС в условиях эксплуатации осуществляется путем измерения температуры окружающей среды или корпуса и величины потребляемой мощности. Зная тепловые сопротивления $r_{\text{дс}}$ и $r_{\text{пк}}$, можно проверить условия обеспечения заданного теплового режима. Однако условия охлаждения ППП, ИС или МС при измерении $r_{\text{дс}}$ могут сильно отличаться от условий охлаждения при эксплуатации, что приводит к изменению $r_{\text{дс}}$. В связи с этим

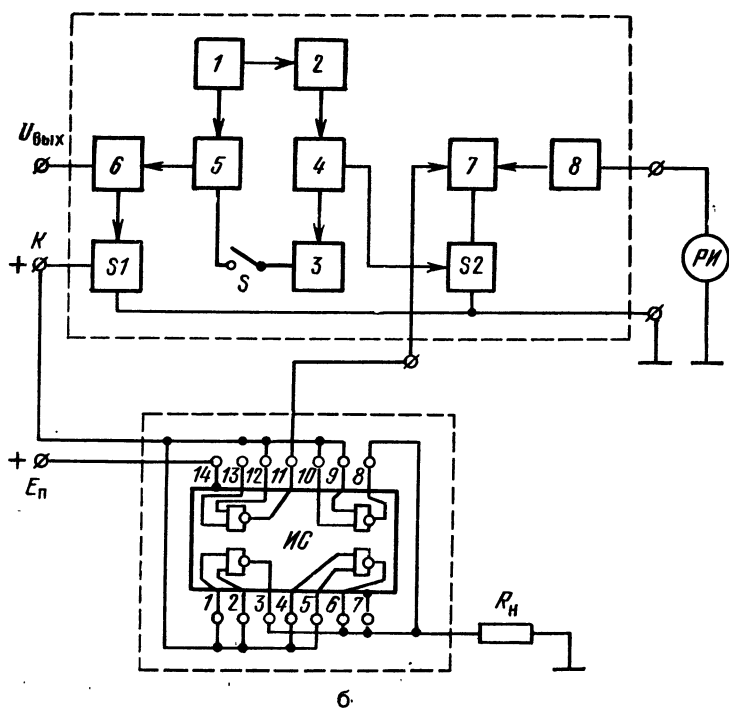
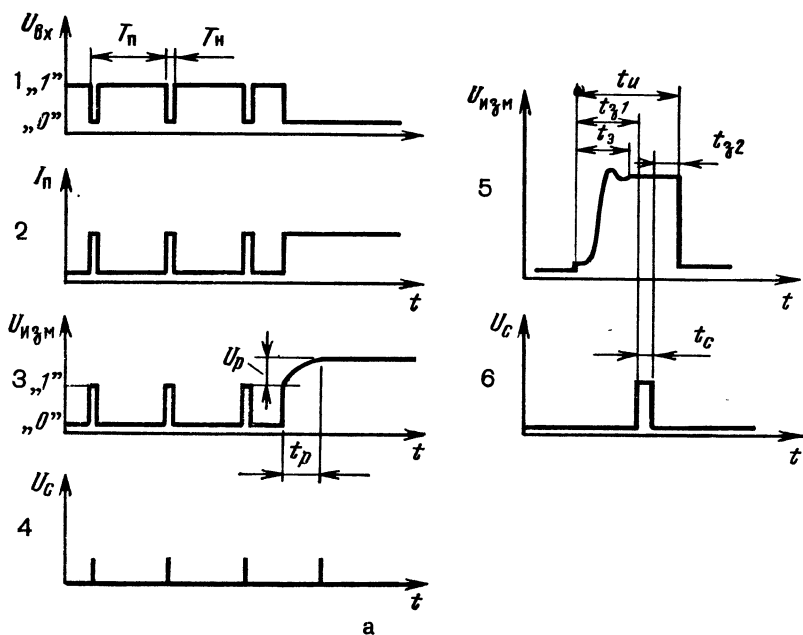
Рис. 13.41. Диаграммы токов и напряжений при измерении тепловых сопротивлений ИС 1ЛБ333 (а) и функциональная схема прибора (б):

$U_{\text{вх}}$ — уровни напряжений логических единицы и нуля на входах ИС, коммутируемых ключом $S1$; $I_{\text{л}}$ — ток, протекающий через ИС; $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение ИС, подаваемое на клемму $U_{\text{изм}}$ ($t_{\text{р}}$ — время разогрева ИС); $U_{\text{с}}$ — стробимпульсы с амплитудой управления ключом $S2$; 1—6, $S1$ — блоки задержки и формирования; 7, 8, $S2$ — блок сравнения

предпочтительнее проводить контроль теплового режима ППП, ИС или МС по температуре корпуса. Последняя обычно измеряется с помощью термопар или термоиндикаторов плавления.

Зависимость r от электрического режима измерения. В ППП (особенно в транзисторах), ИС и МС возможен в некоторой степени произвольный выбор источников тепла и датчиков температуры. Это может привести к значительному изменению найденных значений r . Так например, если в качестве источника тепла и датчика температуры мощного транзистора, являющегося элементом ИС, использовать коллекторный и эмиттерный переходы, то $r_{\text{дс}} = 150$ К/Вт. Если в этом же транзисторе для этих же целей использовать области пробоя эмиттерного перехода, то $r_{\text{дс}}$ возрастет до 1700 К/Вт. Принимая за температуру корпуса ИС ее максимальное или среднеповерхностное значение, мы получим разные значения внутреннего теплового сопротивления, что приведет к получению либо завышенных, либо заниженных величин r . Например, при произвольном выборе $\theta_{\text{к}}$ для ИС в корпусе 401.14—1 в значениях $r_{\text{пк}}$ будет получена разница в 260 К/Вт.

Зависимость r от внешних условий. Внутреннее тепловое сопротивление обратно пропорционально площади сечения тех участков конструкции, по которым проходит тепловой поток от источников тепла до внешнего теплоотвода. Поэтому величина $r_{\text{пк}}$ будет зависеть от того, какой частью корпуса ППП, ИС или МС прикреплены к внешнему теплоотводу. Например, для ИС в корпусе 402.14—1 $r_{\text{пк}}$ возрастает на 100 К/Вт, если корпус присоеди-



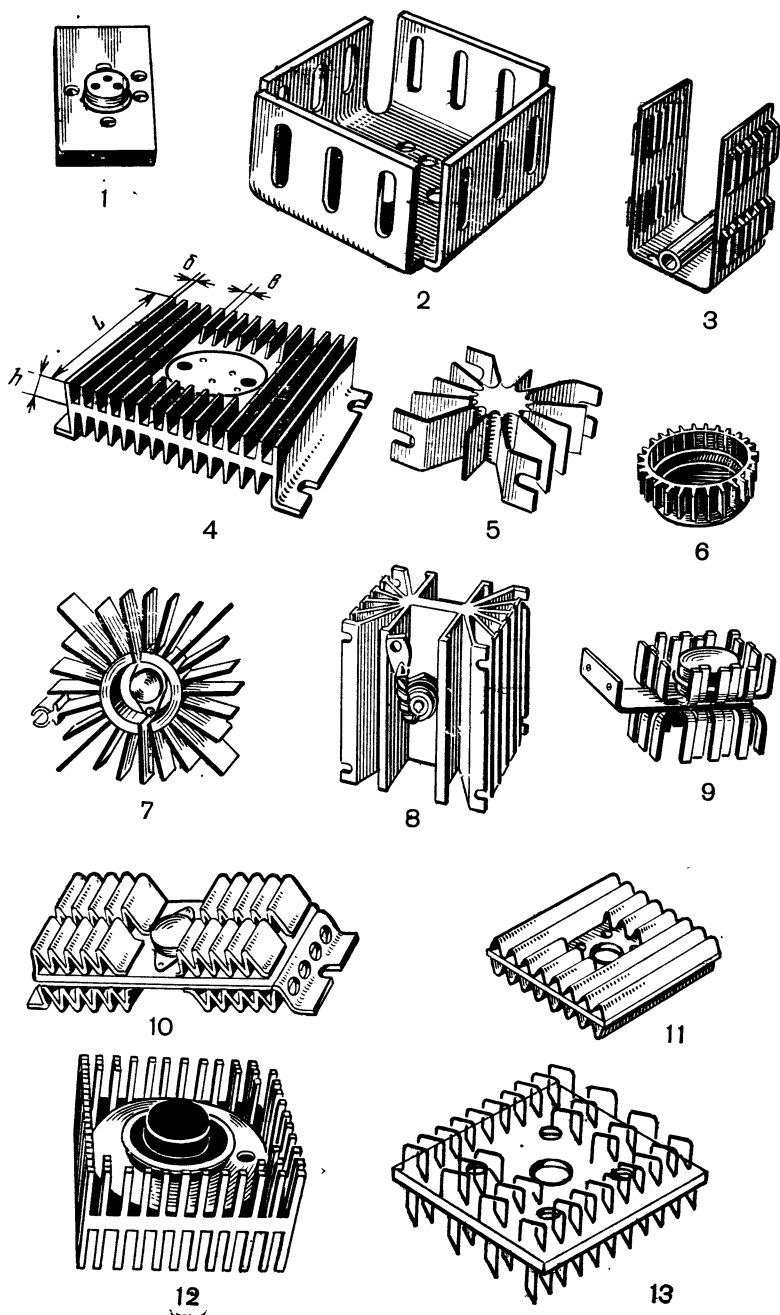


Рис. 13.42. Радиаторы для ППП:

1 — пластина, 2 — пластина с отогнутыми крыльями с просечками, 3 — пластина с крыльями и выштампованными ребрами на них, 4 — литой горизонтальный двухсторонний, 5 — литой вертикальный, 6 — литой круглый, 7 и 8 — литые для транзистора и диода, 9 — наборный из трех пластин, 10 и 11 — наборные сварные с пустотелыми ребрами, 12 — литой штырьковый, 13 — петельно-проволочный



нить к внешнему теплоотводу крыш-кой, а не основанием.

Внешнее, а также полное тепловое сопротивление сильно зависит от интенсивности охлаждения и условий монтажа ППП, ИС или МС в узлах и блоках РЭА. Наличие слабых токов воздуха до 0,5 м/с в рабочей камере, где производится измерение $r_{\text{пс}}$, вертикальное или горизонтальное расположение печатных плат, на которых установлены ППП, ИС или МС, может изменить величину внешнего теплового сопротивления на 10 ... 50%. Например, приводимые в каталогах ведущих зарубежных фирм значения тепловых сопротивлений $r_{\text{пк}}$ для однотипных конструкций ИС в пластмассовых корпусах имеют разброс 20 ... 150 К/Вт, а для $r_{\text{пс}}$ — 80 ... 300 К/Вт.

Из приведенных примеров следует необходимость регламентации электрических и тепловых режимов при измерениях тепловых сопротивлений. В противном случае даже для однотипных конструкций ППП, ИС и МС величина r будет иметь недопустимо большой разброс. Значения r необходимо соотносить условиям теплового режима при измерениях, чтобы иметь возможность пересчета r к другим условиям охлаждения. Дополнительные сведения по тепловым параметрам ППП и ИС можно найти в [13, 36].

Условия однозначности измерения r . Условия измерений тепловых параметров ППП, ИС и МС не регламентированы единой нормативно-технической документацией. Для ИС условия однозначности следующие: 1) распределение мощности по кристаллу в режиме измерения r и испытаний на надежность должно максимально приближаться друг к другу; 2) измерение $r_{\text{пс}}$ производится в условиях, соответствующих испытаниям на надежность

с обдувом и без обдува; 3) $r_{\text{пк}}$ измеряется в среде перемещаемой жидкости (например, фреона-113) или на теплообменнике, температура которых принимается за температуру корпуса ИС; 4) измерение $r(t)$ производится при подаче единичного импульса мощности.

Радиаторы для ППП и ИС*

Радиаторами называют теплоотводы с воздушным охлаждением для ППП и ИС. Они значительно снижают тепловое сопротивление $r_{\text{ке}}$ корпус—среда и уменьшают перегревы ППП и ИС. По конструкции различают пластинчатые, штырьковые и проволочные (петельные) радиаторы. Их выполняют в виде самостоятельной конструкции либо в виде несущей конструкции, которая работает как радиатор. Для изготовления радиаторов используют в основном алюминиевые сплавы, а также медь, магниевые и бериллиевые сплавы [28, 34]. На рис. 13.42 и 13.43 показаны характерные конструкции радиаторов.

Пластинчатые радиаторы самые простые по конструкции, но они менее эффективны, чем штырьковые, которые используются при естественной и вынужденной конвекции и являются наиболее компактными по сравнению с радиаторами других типов. Радиаторы с проволочным оребрением применяются только при принудительном воздушном охлаждении, но из-за сложности изготовления не получили широкого распространения [34]. Относительную эффективность различных типов радиаторов при рассеиваемой мощности Φ_r можно оценить по рис. 13.44, на котором кривая 1 соответствует ЕК корпуса при отсутствии радиатора, 2 — радиатор в виде пластины размером 60 × 60 мм при ЕК, 3 — штырьковый двухсторонний радиатор 60 × 60 × 34 мм при ЕК, 4 — радиатор (3) при ГВ со скоростью воздуха 2 м/с.

Эквивалентная тепловая схема для ППП или ИС, установленных на радиаторе, показана на рис. 13.45, а.

Уравнение для определения температуры перехода обычно состав-

* Составитель Е. Ф. Чукин.

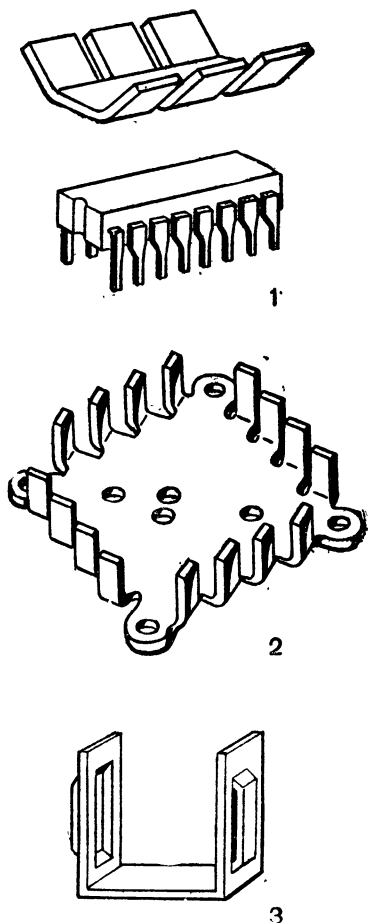


Рис. 13.43. Радиаторы для ИС и МС:
1 — пластинчатый с разрезными ребрами для корпусов 301 ПЛ; 2 — штырьковый для корпусов 301 12.1; 3 — пластинчатый с просечками для корпусов 401.14 и им подобных

ляется на основе упрощенной эквивалентной схемы (рис. 13.45, б)

$$\theta_{\text{пер}} = \theta_c + \theta_p^{\text{max}} + \Delta\theta_{\text{кр}} + \Delta\theta_{\text{пк}}, \quad (13.93)$$

где θ_c — температура среды; θ_p^{max} — максимальный перегрев основания радиатора относительно среды; $\Delta\theta_{\text{кр}}$ — перегрев контактной поверхности прибора относительно контактной поверхности радиатора;

$\Delta\theta_{\text{пк}}$ — перегрев коллекторного перехода относительно корпуса прибора.

Максимальный перегрев основания радиатора относительно среды определяется по формуле:

$$\theta_p^{\text{max}} = \theta_p^{\text{max}} - \theta_c = \Phi_p / K_{\text{нр}}, \quad (13.94)$$

где θ_p^{max} — максимальная температура основания радиатора в месте крепления ППП; Φ_p — средний перегрев основания радиатора относительно среды; $K_{\text{нр}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность температурного поля основания радиатора при различной его протяженности L :

$K_{\text{нр}}$	1	0,98	0,96	0,92	0,86	0,77
L , мм	0	40	80	120	160	180

Для пластин и штыревых радиаторов размером до 120×120 мм в [1, 15] приводится значение $K_{\text{нр}}$, равное 0,96 для естественной и 0,93 для вынужденной конвекции при скорости воздуха до 4 м/с.

Перегрев радиатора относительно среды

$$\theta_p = r_p \Phi_p, \quad (13.95)$$

где Φ_p — мощность, рассеиваемая радиатором, Вт; r_p — тепловое сопротивление радиатора, К/Вт. Если на радиаторе установлено n приборов, то

$$\Phi_p = \sum_{i=1}^n \Phi_{pi},$$

где Φ_{pi} — мощность, рассеиваемая i -м прибором.

Разность температур корпуса ППП или ИС и основания радиатора

$$\Delta\theta_{\text{кр}} = r_{\text{к}} \Phi_p,$$

где $r_{\text{к}}$ — тепловое сопротивление контакта корпуса ППП и радиатора ППП. Разность температур $\Delta\theta_{\text{кр}}$ возникает вследствие неидеальности теплового контакта, наличия про-

кладок и т. д. Контактное сопротивление изоляционных прокладок для характерных материалов и ППП в корпусе 301 следующее: 0,31 К/Вт — анодирование с пропиткой бакелитовым лаком с маслом, 1 К/Вт — анодирование с пропиткой бакелитовым лаком, 0,6 К/Вт — лавсан (с двух сторон фольга), 1,6 К/Вт — слюда толщиной 0,6 мм, 2 К/Вт — слюда толщиной 0,14 мм.

Для уменьшения $\Delta\theta_{кр}$ следует использовать материалы с меньшим r_k высокую чистоту обработки контактирующих поверхностей, достаточные усилия затяжки винтов и площадь контактных поверхностей. Приблизленно для контакта без прокладок и смазок с достаточной затяжкой

$$r_k \approx 2,2/S_k,$$

где S_k — площадь контактной поверхности, см^2 .

Винты, крепящие ППП к радиатору, рекомендуется затягивать с моментом: не менее 0,15 Н·м для винтов М3, не менее 0,4 Н·м для винтов М4. При наличии электроизоляционной прокладки из слюды толщиной 0,025 ... 0,05 мм r_k увеличивается на 50% по сравнению с r_k без прокладки. Применение специальных паст и смазок уменьшает r_k примерно на 50%.

Разность температур коллекторного перехода и корпуса прибора

$$\Delta\theta_{пк} = r_{пк}\Phi_p,$$

где $r_{пк}$ — тепловое сопротивление переход — корпус прибора (обычно задается в ТУ на прибор).

Если на радиаторе установлен один прибор, то температура его перехода $\theta_{пер} = \theta_c + \Phi_{тп}(r_p/K_{нр} + r_k + r_{пк})$, если несколько приборов, то температура перехода i -го прибора $\theta_{пер i} = \theta_c + r_c\Phi_p/K_{нр} + \Phi_i(r_k + r_{пк})_i$,

где $\Phi_i(r_k + r_{пк})_i$ — для i -го прибора.

Все методы расчета радиаторов [1, 15, 28] сводятся к вычислению теплового сопротивления радиатор — среда r_p для выбранной геометрии радиатора. Критерием правильности выбора радиатора является обеспе-

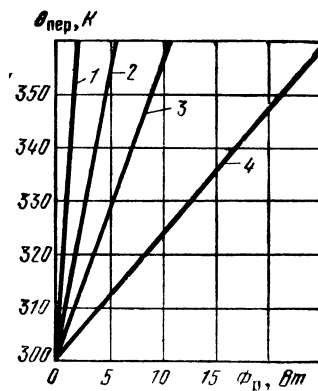
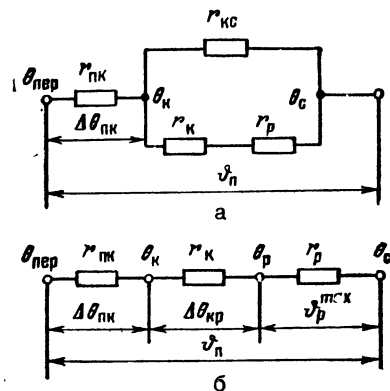


Рис. 13.44. Влияние конструкции радиатора и вида теплообмена на температуру коллекторного перехода транзистора

чение заданного значения $\theta_{пер}$ или θ_k . Для расчета радиатора должны быть даны: температура θ_c и давление окружающей среды p_c , рассеиваемая прибором мощность Φ , тепловое сопротивление переход — корпус $r_{пк}$, допустимые температуры перехода $\theta_{пер}$ или корпуса θ_k , скорость и направление потока охлаждающих среды v . Средний допустимый перегрев основания радиатора при этом

$$\theta_p^{доп} = [\theta_{пер} - \theta_c - \Phi(r_{пк} + r_k)]K_{нр}. \quad (13.96)$$

Рис. 13.45. Полная (а) и упрощенная (б) тепловые схемы для определения r_k



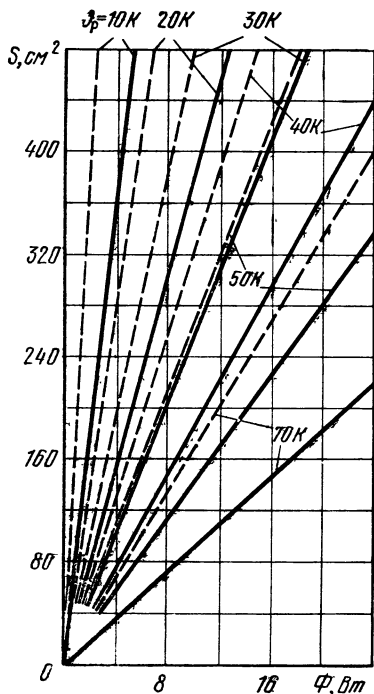


Рис. 13.46. Графики для выбора площади пластинчатого радиатора с учетом излучения при $\varepsilon=0,9$ (сплошные линии) и без учета излучения (штриховые)

Расчет радиатора в виде пластины. Для предварительной оценки теплообменной поверхности радиатора-пластины $S_{пл}$ (материал пластины — алюминиевый сплав Д16) можно воспользоваться графиком на рис. 13.46, построенным для ЕК при нормальном давлении и пластин толщиной 2 ... 3 мм [1]. Площадь радиаторной пластины $S_p = 0,5 S_{пл}$. При этом площадь, занимаемую ППП, не вычитают из общей поверхности теплообмена.

Пример 17. Дано: $\Phi = 3$ Вт, $\theta_p = 30$ К. Определить размеры пластины.

Решение: 1) с учетом излучения ($\alpha_{л} \neq 0$) из рис. 13.46 находим $S_{пл} = 70$ см², $S_p = 35$ см², а размеры радиатора (с запасом) 60×60 мм, 2) без учета излучения ($\alpha_{л} = 0$) из рис. 13.46 находим $S_{пл} = 80$ см², $S_p = 40$ см², размеры радиатора

65×65 мм. Более точное значение площади поверхности радиатора определяют по формуле

$S_{пл} = \Phi / \alpha \theta_p$, где α — суммарный коэффициент теплообмена (см. § 13.1).

Расчет пластинчатого (ребристого) радиатора.

1. Определяется теплоотдача с поверхностей ребер для выбранного межреберного расстояния и для предварительно заданных нескольких значений температуры основания радиатора θ_p . Оценку величины θ_p можно произвести, пользуясь формулой (13.96) рис. 13.5 и табл. 13.1 (см. § 13.1).

В качестве определяющей температуры при вычислении критериев Nu , Re , Gr , Pr берется температура θ .

Для естественной конвекции

$$\theta_{ср} = 0,5 (\theta_p + \theta_c). \quad (13.97)$$

Для вынужденной конвекции

$$\theta = \theta_c + \Phi_p / (2v S_k \rho c_p), \quad (13.98)$$

где v — скорость воздуха в каналах между ребрами, м/с; S_k — суммарная площадь поперечного сечения каналов между ребрами, м²; ρ — плотность воздуха при температуре $\theta_{ср}$, кг/м³; c_p — теплоемкость воздуха при температуре $\theta_{ср}$, Дж/(кг · К).

Количество тепла, отданное конвекцией поверхностями ребер радиатора,

$$\Phi_{рк} = z \lambda m S_p \theta_p \text{th}(mh), \quad (13.99)$$

где z — количество ребер радиатора; λ — коэффициент теплопроводности материала радиатора, Вт/(м · К); $m = \sqrt{2\alpha/\lambda\delta}$; S_p — площадь поперечного сечения ребра радиатора, м²; h — высота ребра радиатора, м; δ — толщина ребра радиатора, м; α — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м² · К) (см. § 13.1).

2. Определяется теплоотдача радиатора за счет излучения при различных температурах θ_p .

Лучистый коэффициент теплообмена

$$\alpha_{л} = \varepsilon_{пр} f(\theta_{ср}, \theta_c) \cdot \varphi, \quad (13.100)$$

где

$\theta_{ср} \simeq (\theta_p/2) [1 + 1/\text{ch}(mh)]$ — средняя температура ребра радиатора; $f(\theta_{ср}, \theta_c) = 0,23 [5 \cdot 10^{-3}(\theta_{ср} + \theta_c)]^3$.

Коэффициент облученности

$$\Phi = b_p / (b_p + 2h), \quad (13.101)$$

где b_p — расстояние между ребрами радиатора, м. За приведенную степень черноты радиатора $\epsilon_{пр}$ можно принять степень черноты радиатора ϵ_p .

Количество тепла, отданное радиатором за счет излучения,

$$\Phi_{рл} = \alpha_{л} S_{л} (\theta_{ср} - \theta_{с}), \quad (13.102)$$

где

$$S_{л} = 2L [(z - 1)(b + \delta) + \delta] + 2h_p Lz \quad (13.103)$$

3. Определяется количество тепла, отданное радиатором в среду при заданных значениях θ_p :

$$\Phi_p = \Phi_{рк} + \Phi_{рл}. \quad (13.104)$$

Строится график тепловой характеристики радиатора $\Phi_p = f(\theta_p)$. По заданному значению мощности установленного на радиатор ППП Φ при помощи тепловой характеристики определяется средняя температура основания радиатора $\theta_p^{ср}$ и перегрев θ_p , который должен быть не более $\theta_p^{доп}$, определенного по формуле (13.96).

Приведенная методика расчета ребристого радиатора справедлива для радиаторов с прямыми ребрами постоянного сечения. Для прямых ребер треугольного и трапециевидального сечения и для кольцевых ребер методика расчета изложена в [33].

Расчет игольчато-штыревого радиатора

1. Определяется коэффициент конвективного теплообмена одиночного штыря

$$\alpha_{шт\kappa} = Nu_m \lambda / d,$$

где в соответствии с табл. 13.1 для естественной конвекции при $10^{-8} < GrPr < 5 \cdot 10^2$ $Nu = 1,18 \times (GrPr)^{0,125}$. Для вынужденной воздушной конвекции при $Re = 1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^6$ $Nu = 0,21 Re^{0,65}$.

При вычислении критерия Nu скорость воздуха определяется в узком сечении канала:

$$v = v_{вх} [1 + d/(s - d)], \quad (13.105)$$

где $v_{вх}$ — скорость воздуха на входе в радиатор, м/с; s — шаг расположения штырей в направлении, нормальном потоку воздуха, м; определяющим размером штыря d является его эквивалентный диаметр $d = 4S_{шт}/\Pi$; $S_{шт}$ — площадь поперечного сечения штыря, м²; Π — периметр сечения штыря, м.

2. Находится количество тепла, отданное радиатором в среду

$$\Phi_p = \alpha (\Pi/m) \theta_p th(mh), \quad (13.106)$$

где z — количество штырей радиатора; θ_p — перегрев основания радиатора, определенный по формуле (13.95); $m = \sqrt{\alpha \Pi / \lambda S_{шт}}$; $\alpha = \alpha_{шт\kappa} + \alpha_{штл}$ ($\alpha_{штл}$ определяется по аналогии с предыдущей методикой); λ — коэффициент теплопроводности материала радиатора, Вт/(м · К); h — высота штыря, м.

Приведенная методика расчета справедлива для штырей постоянного поперечного сечения. Для штырей другого профиля методика расчета приведена в [33].

Отличие расчета радиаторов для ИС и МС заключается в определении контактного теплового сопротивления, которое для ИС и МС, приклеенных к радиатору, равно $r_{\kappa} = \delta_{\kappa} \lambda_{\kappa}^{-1} S_{\kappaонт}^{-1}$.

где δ_{κ} — толщина клеевого шва между корпусом ИС и радиатором, м; λ_{κ} — коэффициент теплопроводности клея, Вт/(м · К); $S_{\kappaонт}$ — площадь клеевого шва, м².

Для ненаполненных клеевых материалов ориентировочно можно принимать $\lambda_{\kappa} = 0,2 \dots 0,4$ Вт/(м · К). Для клеевых материалов с наполнителями $\lambda_{\kappa} = 0,4 \dots 2,0$ Вт/(м · К). Подробно вопросы теплообмена через клеевые соединения рассмотрены в [32].

При расчете теплового сопротивления ИС и МС необходимо пользоваться полной эквивалентной тепловой схемой (рис. 13.45, а), а для небольших корпусов ИС (например, К401. 14-1, К402. 16-1), кроме того, необходимо учитывать теплоток от корпуса ИС через выводы к печатной плате.

Пример 18. Провести поверочный расчет ребристого радиатора для транзистора в корпусе 301. Дано:

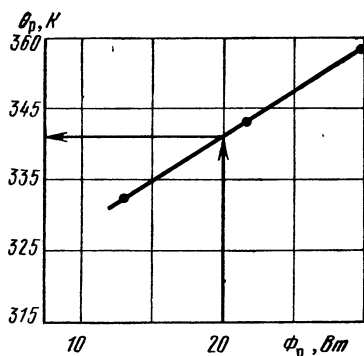


Рис. 13.47. Тепловая характеристика радиатора (к примеру 18)

$\Phi = 20$ Вт, $\theta_c = 313$ К, $h = 2,0 \times 10^{-2}$ м, $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м, материал радиатора — алюминиевый сплав Д16, $\lambda = 170$ Вт/(м · К), $b = 8 \times 10^{-3}$ м, $L = 0,1$ м. Транзистор установлен на радиатор через слюдяную прокладку толщиной 0,06 мм $\theta_{пер}^{max} = 403$ К, $r_{пк} = 1$ К/Вт. Скорость воздуха в каналах радиатора $v = 2$ м/с, $z = 10$, $\varepsilon_p = 0,9$.

Решение. 1. Контактное сопротивление для прокладки из слюды толщиной 0,06 мм; $r_k = 1,6$ К/Вт (из приведенных выше рекомендаций).

2. Суммарная площадь сечения каналов между ребрами

$$S_k = (z - 1)bh = (10 - 1) \cdot 8 \times 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

3. Задаемся тремя значениями средней температуры основания радиатора $\theta_p = 333, 343, 353$ К и проводим расчет для каждого значения. Покажем ход расчета для $\theta_p = 353$ К.

4. По формуле (13.98) определяем температуру

$$\theta = 313 + 20 / (2 \cdot 2 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} \times 1,005 \cdot 10^3 \cdot 1,28) = 316 \text{ К}.$$

5. Определяем теплоотдачу с ребер радиатора (см. § 13.1)

$$Re = vL/\nu = 2 \cdot 0,1 / 17 \cdot 10^{-6} = 1,18 \times 10^4.$$

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} = 0,032 \cdot (1,18 \times 10^4)^{0,8} = 58,3,$$

13. Защита РЭА от тепловых воздействий

$$\alpha_k = Nu \lambda / L = 58,3 \cdot 2,76 \cdot 10^{-2} / 0,1 = 16,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

6. Определяем

$$m = \sqrt{2 \cdot 16,2 / 170 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 9,85,$$

$$mh = 9,85 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 0,197,$$

$$\text{th}(mh) = 0,2.$$

7. По формуле (13.99) находим

$$\Phi_{рк} = 10 \cdot 170 \cdot 9,85 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \times \times 0,2 = 26,8 \text{ Вт},$$

$$S_p = L\delta = 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

8. Определяем среднюю температуру ребра радиатора

$$\theta_{ср} = (\theta_p/2) [1 + 1/\text{ch}(mh)] = 353/2 [1 + 1/1,02] = 352 \text{ К}, \quad \text{ch}(mh) = 1,02.$$

9. По формуле (13.100) вычисляем

$$\alpha_d = 0,9 \cdot f(352 \cdot 316) \cdot 0,167 = 0,9 \times \times 8,4 \cdot 0,167 = 1,26 \text{ Вт/м}^2 \text{ К},$$

$$\varphi = 8 \cdot 10^{-3} / (8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-2}) = 0,167 \text{ (по формуле (13.101))}.$$

10. По формуле (13.103) определяем

$$S_d = 2 \cdot 0,1 \cdot (10 - 1) \cdot (8 \cdot 10^{-3} + + 2 \cdot 10^{-3}) + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 10 = = 5,84 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

11. По формуле (13.102) определяем

$$\Phi_{рл} = 1,26 \cdot 5,84 \cdot 10^{-2} (352 - 316) = = 2,87 \text{ Вт}.$$

12. По формуле (13.104) находим количество тепла, отданное радиатором: при $\theta_p = 353$ К $\Phi_p = 26,8 + + 2,87 = 29,67$ Вт; при $\theta_p = 333$ К $\Phi_p = 14,68$ Вт;

при $\theta_p = 343$ К $\Phi_p = 22,13$ Вт.

По тепловой характеристике радиатора (рис. 13.47) определяем, что заданная мощность транзистора $\Phi = 20$ Вт отводится радиатором при $\theta_p = 341$ К, $\theta_p = 341 - 313 = = 28$ К.

13. Определяем по формуле (13.96) средний допустимый перегрев основания радиатора

$$\theta_{\text{р}}^{\text{доп}} = 0,94 [403 - 20 \cdot (1,6 + 1) - 313] = 35,7\text{K}, \text{ причем } K_{\text{нр}} = 0,94.$$

14. Сравнивая значение $\theta_{\text{рс}}^{\text{доп}}$, полученное по формуле (13.96), с $\theta_{\text{р}}$, полученным из графика тепловой характеристики радиатора (рис. 13.47), убеждаемся, что первая величина больше, а следовательно, заданный радиатор обеспечивает с запасом нормальный тепловой режим транзистора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агапова М. Г., Гальперин Е. И. Основы тепловых расчетов полупроводниковых приборов с радиаторами. — Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. — М.: Сов. радио, 1965, вып. 14.
- Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Энергия, 1964.
- Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Физматгиз, 1963.
- Варламов Р. Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. 2-е изд. — М.: Сов. радио, 1975.
- Володин Ю. Г., Малюков Г. В. Конструирование систем терморегулирования подвижных радиоэлектронных комплексов. — М.: Сов. радио, 1977.
- Волохов В. А., Хрычиков Э. Е.; Киселев В. И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. — М.: Сов. радио, 1975.
- Воронин Г. И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. — М.: Машиностроение, 1973.
- Гаврилов Ю. А., Тарновский Н. Н. Тепловые схемы замещения однородного стержня постоянного сечения. — Изв. вузов СССР. Приборостроение, 1971, т. XIV, № 4.
- Гаврилов Ю. А. Расчет температурного поля вентилируемого кассетного радиоэлектронного аппарата. — Изв. вузов СССР. Приборостроение, 1972, т. XV, № 7.
- Глушицкий И. В. Расчет теплообмена в бортовой аппаратуре летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1976.
- Грайбой Л. П., Ленская Л. П., Троценко А. В. К вопросу о реакции двухпозиционного термостата на скачкообразное изменение температуры окружающей среды. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1971, вып. 3.
- Грайбой Л. П.; Горохов С. М.; Ленская Л. П., Водинская Л. П. Исследование динамических процессов в регулируемых системах термостабилизации тепловыделяющих объектов РЭА. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1975, вып. 3.
- Конструкция корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов / Годов А. Н. и др. — М.: Энергия, 1972.
- Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
- Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы радиоэлектронной аппаратуры. — Л.: Энергия, 1971.
- Закс Д. И. Расчет теплового сопротивления плоских корпусов интегральных схем. — Электронная техника. Сер. VI, 1971, вып. 1 (27).
- Закс Д. И., Наумов П. М. Анализ температурного поля полупроводниковой микросхемы. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1975, т. XVIII, вып. 1.
- Захаров А. Л.; Асвадунова Е. И. Метод расчета тепловых сопротивлений мощных транзисторов. — Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. — М.: Сов. радио, 1968, вып. 10.
- Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Госэнергоиздат, 1960.
- Теоретические основы электротехники в 2-х ч. / П. А. Ионкин и

- др. — М.: Машиностроение, 1975. — Ч. I.
21. Исаченко В. П.; Осипова В. А.; Сукомел А. С. Теплопередача. — 3-е изд. — М.: Энергия, 1975.
 22. Коздоба Л. А. Электромоделирование температурных полей. — Л.: Судостроение, 1964.
 23. Краус А. Д. Охлаждение радиоэлектронного оборудования: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1971.
 24. Кутателадзе С. С.; Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. — М.: Госэнергоиздат, 1959.
 25. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967.
 26. Помехоустойчивость устройств на интегральных логических схемах/Наумов Ю. Е. и др. — М.: Сов. радио, 1974.
 27. Нейман Л. Р.; Демирчан К. С. Теоретические основы электротехники. — М.: Энергия, 1967. — Ч. I.
 28. Краткий справочник конструктора РЭА/Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1972.
 29. Основные максимальные-допустимые величины параметров и характеристик полупроводниковых приборов и общие принципы измерений: Публикация 147—1. — Изд. 1-е. Рекомендации МЭК/Комитет по участию СССР в международных энергетических объединениях, 1965.
 30. Пехович А. И.; Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — М.: Энергия, 1968.
 31. Поливанов К. М. Теоретические основы электротехники. — М.: Энергия, 1965. — Ч. I.
 32. Попов В. М. Теплообмен через соединения на клеях. — М.: Энергия, 1974.
 33. Ройзен Л. И.; Дулькин И. Н. Тепловой расчет обрешеченных поверхностей/Под ред. В. Г. Фастовского. — М.: Энергия, 1977.
 34. Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976.
 35. Рябец Н. Н., Гапоненко Н. П. Электротепловые двухполюсники на теплопередающих элементах. — Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника, 1975, т. XVIII, № 11.
 36. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам/Под ред. Н. Н. Горюнова. — М.: Энергия, 1972.
 37. Теплофизические свойства веществ: Справочник/Под ред. Н. Б. Варгафтика. — М.: Госэнергоиздат, 1956.
 38. Федоренко Ю. С., Закс Д. И.; Долматова Т. В. Условия однозначного определения тепловых параметров микросхем. — Электронная техника. Сер. 8, вып. 10 (28), 1974.
 39. Шифрин-Крыжаловский Ю. А.; Митин В. С. Тепловая устойчивость транзисторов и надежность радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1966.
 40. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. — М.: ИЛ, 1960.
 41. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. — Л.: Энергия, 1967.
 42. Ярышев Н. А.; Андреева Л. Б. Расчет термических сопротивлений элементов термостатирующих устройств. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1970, вып. 2.
 43. Ярышев Н. А., Андреева Л. Б., Манжикова С. Ц. Стационарные температурные поля в оболочках при неравномерном размещении источников нагрева. Труды ЛИТМО, 1972, вып. 70.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аббревиатуры, списки по главам 26, 54, 97, 147, 157, 207, 262, 298, 334, 360, 397
- Автоматизация конструкторского труда 181...184, 251...253
- Автомобили 61, 63
- Аккумуляторы системы НК дисковые 280, 282
- — — прямоугольные 281...284
- — — цилиндрические 280...282
- — СК 285
- — СЦ 284, 285
- Алгоритм покрытия и компоновки схем РЭА 254, 255
- Амортизаторы, типы 377
- втулочные двойные АВД 377, 378, 381
- — малогабаритные 377, 381
- корабельные сварные со страховкой АКСС 377, 378, 379, 381
- нелинейные ДК 378, 379, 382
- опорные АО 378, 379, 381
- пространственного нагружения АПН, АПНМ 378, 379, 380, 382
- пружинно-поролонные ППА 378, 379
- пружинные с воздушным демпфированием АД 378, 382
- рамочные пружинно-поролонные 378, 380
- резино-металлические АП, АЧ 378...380 382, 383
- — АСД 378, 381, 384
- рожковые АР 378, 382...384
- с регулируемой резонансной частотой АРМ 378, 381, 384, 385
- скобочные АМ 378, 381, 385
- стерженьковые АН 378, 382, 385
- тросовые АТ 378, 384
- цельнометаллические однонаправленного действия АЦП 378, 382, 385, 386
- Анализ размерностей 210
- Анализаторы человека-оператора 84...86
- Аналогия электротепловая 218, 404...407
- Антенны воздушной РЭА 75...78, 79
- — — аварийной 79, 80
- — — судовой РЭА 65...67
- Аппликация 170, 172
- Арифметико-логическое устройство АЛУ 14, 15, 249, 250
- Байт, 251
- Блок комплектный 114, 116, 119, 121, 124
- частичный 114, 116, 119, 121
- Влага, воздействие 36, 37
- Влажность относительная 26, 27
- Воздействие биологических факторов 38, 39
- влаги 36, 37
- гололеда 31...37
- гололедно-изморозевых отложений ГИО 31...33, 36
- динамическое 360...362
- иней 27
- ионизирующих излучений ИИ 45...53
- осадков 27
- полей СВЧ 39...45
- пыли и песка 37, 38
- радиации солнечной РС 38, 416, 417
- тепловое 37
- Выбор амортизаторов 377...386
- кондиционера 420...422
- Генераторы электрические 268...270
- Герметизация, виды 334
- неразъемная, области применения 350
- — изоляторы проходные и гермопроходники 353, 355
- — сваркой и пайкой 351...354
- примеры расчетов 350, 356, 357
- разъемная конструкция корпусов и крышек 348, 349
- — области применения 343
- — прокладки 343...345, 347...349
- — прокладки резиновые 345...347
- — прокладки металлические 343
- Гололедно-ветровой район ГВР 26, 32, 33, 35, 36

Гололедно-изморозевые отложения
 ГИО 26, 30...33, 35
 Государственная система стандартов
 ГСС 5
 — — обеспечения единства измере-
 ний ГСИ 5
 Головка чертежная 190

Деталь 152
 Дизайн 94
 Диффузия 37
 Доза излучения, поглощенная ПДИ
 26, 46...51
 Документация конструкторская, ви-
 ды 153
 — на микросхемы интегральные 155
 — учет и обращения 157
 — эксплуатационная и ремонтная
 155
 Доля относительная, участия в проек-
 тировании 24
 Доска чертежная 188

Единая система защиты от коррозии
 и старения материалов и изделий
 ЕСЗКС 5
 — — конструкторской документации
 ЕСКД 5, 152
 — — документации, группы стан-
 дартов 152
 — — программной документации
 ЕСПД 5
 — — технологической документации
 ЕСТД 5
 — — подготовки производства
 ЕСТПП 5
 Единица сборочная 153

Заболевания профессиональные кон-
 структорские 198
 Задание техническое ТЗ 148
 Задача граничная Неймана 210
 — — постановка 235
 — — разностная, постановка 245
 — — краевая, постановка 223, 229
 Закон Голкинсона 218
 — Кирхгофа, первый 405
 — — второй 405
 — Ньютона 230, 405
 — Ома 218, 405
 — переноса обобщенный 218
 — Стефана-Больцмана 405
 — теплообмена 398
 — Фика, второй 218
 — Фурье 218, 229, 405
 Заливка, область применения 339,
 341
 — внутренние напряжения, расчет
 339

— — — снижение 339
 — — конструкции 342
 — — материалы 340...342
 Записка пояснительная ПЗ 151
 Зона расположения регуляторов и
 индикаторов 95
 — — нагретая НЗ, определение 407
 — — построение 409, 410
 — — расчет перегрева 452, 454

Изделие И, определение 152
 Излучение тепловое 403
 Измерение сопротивления теплового
 полупроводниковых приборов и ин-
 тегральных микросхем 459
 Индексы буквенные 5
 — греческие 7
 — знаковые 6
 — зоны расположения 4
 — латинские 6
 Индикаторы акустические 94
 — — визуальные 92
 — — зоны расположения 95
 Инструменты чертежные, комплекты
 193
 — — состав комплектов 194
 Ионизирующие излучения ИИ 26, 45,
 46
 — — влияние на интегральные мик-
 росхемы 50, 51
 — — — на конденсаторы 48
 — — — на материалы 47
 — — — на полупроводниковые при-
 боры 49, 50
 — — — на резисторы 47
 — — — на электровакуумные при-
 боры 51
 Информации графической носители
 191
 Источник наводки ИН 298...309
 — — тока химический ХИТ 262...265,
 267
 — — питания ИП 262...265, 267
 — — области использования 267
 — — оценка технико-экономическая
 292, 293, 295...297
 — — перспективный 294, 295, 297
 — — примеры выбора 297
 — — термоэлектрический 287...290
 — — термоэмиссионный 290, 291
 — — характеристики разрядные 266
 — — — удельные 265, 266

Класс движений управления 89
 Климат, определение 26
 Климатические районы 29
 Колебания одномерные малые, кон-
 струкций РЭА 238
 — — системы с несколькими степенями
 свободы, малые 239

Компонент микроэлектронный в конструкции РЭА 102...105, 110, 111, 113

— — размещение 105...107

Комплекс 153

Комплект 153

Компоновка, определение 166

— аналитическая 167

— аппликационная 170, 172

— графическая 168

— графоаналитическая 168

— изооптическая 170, 172

— машинная 169, 181

— натурная 169

— номографическая 169

— объемная 170

— плоскостная 170...172

— усилителей с учетом помех 324, 325

— устройств питания с учетом помех 328

— функциональных узлов с дискретными элементами 175...177

— — с модульными элементами 171, 176

— элементов, последовательность 173, 174

— — микромодулей 171, 172

Конвекция 400

Коррозия 37

— причина термодинамическая 36

Конструкция РЭА, описание в обобщенных параметрах 217

— — оценка вибропрочности 386

— — вибропрочности, расчетные модели 386...393

— — на микросхемах и микросборках 107...111

— — оценка резонансных частот 386, 387

— — типовая 97...102, 112, 113, 116, 117

— — — зарубежная 118, 119

— — — система модулей 98, 99, 115

— — — универсальная 97, 120, 121, 124...140, 142...147

— — — элементы 97, 108, 109

— — — уровень конструкторский 97, 100, 101

Критерий 4, 7

— Био 234, 400

— Грасгофа 400...402

— Нуссельта 400

— Пекле 400

— Прандтля 400...402

— Рейнольдса 400, 402

— Фурье 400

Коэффициент заполнения 167, 436

— использования объема 4

— — площади 167

— обозначение общее 4

— увеличение площади (объема) 167

Макроклимат 27

— районы 29

Машины печатные, электрофотографические 198...200

Мезоклимат 27

Межсоединения схем РЭА, трассировка 256...259

Метод интегральных преобразований 225

— конечных разностей 246

— — интегральных преобразований 233

— подобия 212

— разделения переменных 223, 230

— операционный 227, 231

— уравнений Лагранжа 238

— функций Грина 227

— Фурье 231

— Лапласа 232

Механизм физический работы РЭА 19

Микрокалькулятор 13

— для инженерных расчетов 13

— рекомендации по выбору 16, 17

— схема функциональная 15

— типы отечественные 18

Микроклимат 27

Модель обобщенная геометрическая ОГМ 167

— РЭА физическая, обобщенная 215

— — — I рода 215...217

— — — II рода 215...217

— — — III рода 216...217

— — — IV рода 216...217

— схемы РЭА, формальная 253

— тепловая 407

Наводка паразитная, определение 298

— импульсная 329

— источник ИН 298...301, 308

— защита от нее 308, 309

— приемник ПН 298...301, 309

Напор ветра скоростной СНВ 31, 35

Носитель информации графический 191

Оператор Лапласа 222

Осадки 27

Перевод основных англо-американских мер в метрические 12

Перенос ионизирующих частиц ПИЧ 26, 46...51, 53

Песок и пыль, воздействие 37, 38

Пи-теорема 211

Плата печатная ПП 124, 125, 126, 177

— многослойная МПП 126, 178, 179

— расчет вибропрочности 386... 392

— универсальная УПП 178, 179

Подобия теорема первая 212

— третья 212

Поле механическое 218, 219

— СВЧ, воздействие на материалы 39

— тепловое 220

— физическое 221, 222

— электромагнитное 219, 220

Помехи импульсные, влияние на конструкцию 331

— в ЭВМ 332, 333

— искрогашение 330

Помещение для стационарной РЭА 57, 58

— ЭВМ 59

— огнестойкость 59

Постоянные физические основные 12

Предложение техническое 148, 149

Преобразование Лапласа 225, 233

— Фурье 225

— конечное интегральное 225

Преобразователь активный ПА 213... 215

— пассивный ПП 213...215

Прибор чертежный 189, 190

Принципы экранирования основные 241

Приспособления пишущие и стирающие 191, 192

Проект рабочий 148, 151

— технический 148, 150

— эскизный 148, 150

Прокладка металлическая 343

— резиновая 347...349

Пропитка, материалы и рекомендации 335...338

— назначение и область применения 335

— особенности конструкций изделий 335

Работа конструктора творческая 162, 163

— — интенсификация 165

— — методика АРИЗ 164, 165

— конструкторская, планирование и нормирование 201

— приемы 201

— примеры расчетов 202...204

— трудоемкость 202...205

Рабочее место конструктора автоматизированное АРМ 181...184

— — комплектное 195, 197

— — определение 188

— — планировка 196, 197

Радиаторы для полупроводниковых приборов и микросхем 463

Радиация солнечная РС 26, 27, 38, 416...418

Разработка конструкций, последовательность 159...161

Размещение элементов схем РЭА 255

Районы климатические I...IV 55

Расчет амплитуды блока при вибрации 393

— вибропрочности элементов конструкции 386, 396

— и подбор амортизаторов 393

— массы блока, требуемой 393

— параметров амортизатора при ударе 396

— собственных частот 395

— тепловых потоков от солнечной радиации 416, 417

— — кузова аппаратной машины 418, 419

— термостата, последовательность 429...432

— толщины прокладки при выборе амортизатора 394

— числа микросхем на печатной плате 104, 106

Регуляторы ручные, классы 89...91

Режим тепловой аппаратной машины 414

— — многоблочной РЭА 452

— — одноблочной РЭА 436

— — отдельных элементов РЭА 451

— — полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и микросборок 456

— — термостата пусковой 432

РЭА воздушная и ракетно-космическая, группы по размещению 72...74

— возимая, группы по размещению 59, 60

— носимая, группы по размещению 67...69

— портативная, группы по размещению 67...69

— — схемы компоновочные 70...72

— ракетно-космическая, особенности компоновки 80...82

— самолетная, размещение 75, 77, 79

— типоразмеры блоков 76, 77

— судовая, группы по размещению 65

— — размещение 65...67

Ряды размерно-параметрические 97, 98

- Светопланы 92, 94
 Светофоры 92
 Связь паразитная 298
 — — внешняя 320
 — — внутренняя 319
 — — в усилителях 319
 — — емкостная и индуктивная по
 посторонним проводам 303
 — — — непосредственная 302
 — — — подавление 307
 — — индуктивная 302, 303
 — — — подавление 309
 — — оценка влияния 305, 306
 — — по цепям питания и управле-
 ния 321...324
 — — учет при конструировании 324,
 325
 — — цепи 301
 — — через общее полное сопротив-
 ление 304
 — — — электромагнитное поле из-
 лучения 303
 Сети электрические, параметры
 268, 270
 Сетки и сеточные функции 244
 Сеть питания, фон и помехи 326
 — — — и помехи через провода 327
 Система автоматизации проектиро-
 вания САП, структура 259
 — документации унифицированная
 УСД 5
 — единиц СИ 4, 10
 — проектной документации при стро-
 ительстве СПДС 5
 — показателей качества продукции
 СПКП 5
 — СИ, единицы основные и допол-
 нительные 10
 — — — производные 10
 — стандартов безопасности труда
 ССБТ 5
 — обеспечения тепловых режимов,
 классификация 411, 413
 — — — режимов, характерные для
 кузова аппаратной машины 422...
 427
 Служба конструкторская, структура
 161, 162
 Соотношения единиц десятичные 11
 — — с внесистемными единицами 12
 Среда комфортная рабочая для чело-
 века-оператора 86...88
 Станок чертежный 188
 Стол чертежный, письменный 192
 Стул конструкторский 192
 Суда, размещение РЭА 64
 Схемы разностные для уравнений
 теплопроводности 246
 — — — уравнений Лапласа и Пу-
 ассона 247
 — — — системы уравнений теории
 упругости 249
 — — — системы уравнений колеба-
 ний и теории прочности 248
 Счетчик 92
 Транспорт автомобильный 61
 — воздушный и ракетно-космический
 72...75
 — — — ракетно-космический, осо-
 бенности компоновки антенн 75...80
 — гусеничный 61, 62
 — железнодорожный 62...64
 — морской 64, 65
 — размещение РЭА и антенн 65,
 66
 Теплопроводность 398
 Уравнение Лагранжа 219, 221, 238
 — Максвелла 219, 240, 243
 — Пуассона 222, 243
 — продольных колебаний стержней
 235
 — поперечных колебаний стержней
 237
 Условия граничные I рода 209, 230
 — — II рода 210, 230, 236
 — — III рода 210, 230, 236
 — — IV рода 230
 — Дирихле 209
 Функции некоторые, обозначение 7
 Функция Грина для уравнений пара-
 бического типа 228
 — — — уравнений эллиптического
 типа 228
 — Лагранжа 219, 238
 Факторы биологические 38, 39
 — метеорологические МФ 26, 30, 31
 Цепь искрогасящая 330
 — фильтрующая (развязывающая)
 317
 Частота собственная РЭА на аморти-
 заторах 368...370
 Человек как транспортное средство
 67, 69
 Человек-оператор как интегрирую-
 щее звено управления 83
 — — «машина» управления 86, 88...
 91
 — погрешности в работе 83

- в качестве «человека-инструмента» 88
- — — «человека-машины» 88

Шкалы 92, 93

ЭВМ принципы работы и структура 249...251

ЭКВМ принципы работы и структура 14, 15

Эквивалентного гололеда толщина ЭГ 26, 32

Экранирование 307

— постоянного и медленно изменяющегося поля 309, 310

— высокочастотного магнитного поля 310...312

— оценка эффективности 320, 321

Элемент гальванический МЦ системы 271

— — — системы, общие параметры 270

— — — системы с соевым электролитом 272...274, 277

— — — со щелочным электролитом 274, 275, 277

— — наливной и резервный 276...278

— — РЦ системы 278, 279

— замены типовой ТЭЗ 97

Эпюра потенциальная 174, 175

— термальная 174, 175

Эффект физический определяющий 213

— — теплообмена 411

— Джоуля—Томсона 411

— Ранка 411

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3	3.5. Размещение носимой и портативной РЭА	67
Введение	4	3.6 Размещение РЭА на самолетах, вертолетах, ракетах и космических кораблях	72
В.1. Структура Справочника	4	Список литературы	82
В.2 Сокращения и обозначения	5	4. Человек-оператор	83
В.3. Иллюстративный материал	7	4.1. Человек — интегральное звено управления	83
В.4. Система единиц	10	4.2. Человек — «машина» по выработке сигналов управления	88
В.5. Рекомендации по выполнению конструкторских расчетов	13	4.3. Человек — «машина» по приему сигналов	92
ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНСТРУКЦИЮ РЭА		4.4. Человек и дизайн	94
1. Классификация РЭА	19	Список литературы	96
1.1. Общие положения	19	5. Характерные типовые конструкции РЭА	97
1.2. Области использования РЭА	20	5.1. Принципы построения размерно-параметрических рядов типовых конструкций	97
1.3 Назначение РЭА	20	5.2. Особенности РЭА на микроэлектронных компонентах	102
1.4 Схемотехническая (элементная) база РЭА	22	5.3 Типовые конструкции РЭА	112
1.5 Конструктивная база	25	5.4. Универсальные типовые конструкции РЭА	121
Список литературы	25	Список литературы	147
2. Окружающая среда и ее воздействие на РЭА	26	6. Стадии разработки РЭА и конструкторская документация	147
2.1. Климат, климатические зоны и характерные группы эксплуатации	26	6.1. Стадии разработки РЭА	148
2.2. Воздействие ветра и гололеда	30	6.2. Конструкторская документация по ЕСКД	152
2.3. Воздействие влаги, пыли, солнечной радиации и биологических факторов	36	7. Методология и организация конструкторского труда	157
2.4 Воздействие полей СВЧ	39	7.1. Общие вопросы	158
2.5. Ионизирующие излучения	45	7.2. Организация творческой работы конструктора	162
Список литературы	53	7.3. Общие вопросы практики компоновки	166
3. Объекты-носители для размещения РЭА	54	7.4. Последовательность компоновки ЭРЭ	173
3.1. Классификация условий эксплуатации РЭА в зависимости от размещения и свойств объекта-носителя	54		
3.2. Размещение стационарной РЭА	55		
3.3. Размещение возимой РЭА	59		
3.4. Размещение РЭА на судах	64		

7.5 Последовательность машинной компоновки черчения и выпуска текстовой КД на ЭВМ	181	10.3. Экранирование	307
7.6. Рабочее место конструктора	188	10.4. Паразитные обратные связи в усилителях	319
7.7. Планирование и нормирование конструкторских работ	201	10.5. Фон и помехи, наводимые сетью питания	326
Список литературы	205	10.6. Импульсные наводки	329
КОНСТРУКТОРСКИЕ РАСЧЕТЫ РЭА		Список литературы	333
8. Физико-математические основы конструирования РЭА	207	11. Герметизация	334
8.1. Общие положения	207	11.1. Виды герметизации	334
8.2. Методы теории подобия и моделирования	210	11.2. Пропитка	335
8.3. Обобщающие физические модели конструкций РЭА	213	11.3. Обволакивание и заливка	339
8.4. Методика обобщенного исследования преобразования потоков энергии в РЭА	218	11.4. Разъемная герметизация	343
8.5. Математические методы анализа физических полей РЭА	221	11.5. Примеры расчетов качества герметизации	350
8.6. Математические основы характерных тепловых расчетов	229	11.6. Неразъемная герметизация	350
8.7. Математические методы расчетов вибраций и прочности конструкции РЭА	235	11.7. Расчеты герметичности	356
8.8. Математические методы расчета электромагнитных полей РЭА и экранирование	240	Список литературы	359
8.9. Математические методы численных расчетов физических полей	243	12. Защита от динамических воздействий	360
8.10. Теоретические основы конструирования РЭА с помощью ЭВМ	249	12.1. Общие положения	360
Список литературы	260	12.2. Расчет линейных систем амортизации	362
9. Источники энергии питания	262	12.3. Расчет собственных частот РЭА на амортизаторах	368
9.1. Классификация ИП	262	12.4. Расчет системы амортизации на ударные нагрузки	373
9.2. Гальванические элементы и батареи	270	12.5. Расчет системы амортизации на линейные ускорения	374
9.3. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи	280	12.6. Расчет системы амортизации при случайных воздействиях	374
9.4. Полупроводниковые элементы и батареи	286	12.7. Основные типы амортизаторов	377
9.5. Оценка и выбор ИП	292	12.8. Оценочные расчеты вибропрочности конструкции РЭА	386
Список литературы	297	12.9. Примеры расчетов	393
10. Защита от паразитных наводок	298	Список литературы	397
10.1. Основные сведения об источниках и приемниках паразитных наводок	298	13. Защита РЭА от тепловых воздействий	397
10.2. Цепи паразитной связи	301	13.1. Общие положения	398
		13.2. Системы обеспечения тепловых режимов передвижной наземной РЭА	412
		13.3. Термостаты	428
		13.4. Обеспечение тепловых режимов РЭА с воздушным охлаждением	436
		13.5. Обеспечение тепловых режимов полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и микросборок	455
		Список литературы	469
		Предметный указатель	471

**СПРАВОЧНИК
КОНСТРУКТОРА РЭА**

Составители:

**Людмила Борисовна Андреева,
Николай Арсеньевич Барканов,
Анатолий Сергеевич Бегинин
и др.**

Редакторы *Н. К. Калинина,
Ю. И. Суханов, Е. В. Вязова*
Переплет художника
О. В. Камаева

Художественный редактор
Н. А. Игнатьев
Технический редактор *Т. Н. Зыкина*
Корректор
Н. М. Давыдова

Сдано в набор 9.03.79.

Подписано в печать 18.06.80. Т-11745

Формат 60×90^{1/16} Бумага типограф.

№ 1. Гарнитура литерат. Печать
высокая. Объем 30 усл. п. л.

41,7 уч.-изд. л. Тираж 100 000

(2 завод 60 001—100 000). Зак. 1321

Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Советское радио»,
Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 4
Союзполиграфпрома Государственного
комитета СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, 129041, Б. Переяславская, 46

Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования/Под ред. Р. Г. Варламова. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с., ил.

В пер : 2 р. 50 к.

Рассмотрены факторы, влияющие на конструкцию РЭА. Приведены описания несущих конструкций и структура ЕСКД Систематизированы материалы по методологическим, организационным и физико-математическим основам конструирования РЭА, выбору и расчету средств герметизации и защите РЭА от влаги, динамических и тепловых воздействий.

Справочник предназначен для конструкторов РЭА широкого профиля и студентов вузов.

С $\frac{30404-047}{046(01)-80}$ 09-80

ББК 32.844
6Ф2.1

2р.50к.

