

Б. Е. ТЕЛЕШЕВСКИЙ

# Измерения в электро- и радиотехнике

Одобрено Ученым советом  
Государственного комитета СССР  
по профессионально-техническому образованию  
в качестве учебника для средних  
профессионально-технических училищ

**Scan Pirat**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1984

ББК 31.221 + 32.842  
Т31  
УДК 621.317.3 + 621.396

Рецензенты: Е. В. Бабкин, канд. техн. наук (Всесоюзный научно-исследовательский институт радиовещания и телевидения), Т. П. Казанкина, инженер (Всесоюзный заочный техникум железнодорожного транспорта).

**Телешевский Б. Е.**

**Т31** Измерения в электро- и радиотехнике: Учеб. для средн. проф.-техн. училищ.—М.: Высш. шк., 1984.—207 с., ил.—(Профтехобразование).

25 к.

В книге рассмотрены основные методы измерений электрических и радиотехнических величин на постоянном токе и переменном в широком диапазоне частот. Описаны измерительные схемы, их принципы построения и приведены технические характеристики наиболее широко распространенных измерительных приборов. Даны примеры расчетов, облегчающие усвоение материала. Учебник может быть использован при профессиональном обучении рабочих на производстве.

Т 2302010000-021 16-84  
052(01)-84

ББК 31.221 + 32.842

6П2.1.083 + 6Ф2.08

© Издательство «Высшая школа», 1984

## ВВЕДЕНИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года предусмотрено на основе новейших достижений микро- и оптоэлектроники дальнейшее совершенствование вычислительной техники и ее элементной базы, приборов и средств автоматизации. Для решения поставленных задач необходимо опережающее развитие электроники, радиотехники и приборостроения, тесно связанных с разработкой точных и надежных методов и средств измерений.

Велики роль и значение измерений и измерительной техники в различных областях науки и народного хозяйства. Измерения позволяют выполнять не только количественную оценку различных физических величин, но и качественный анализ исследуемых явлений и необходимы при разработке, производстве, настройке и эксплуатации электро- и радиоустройств, технические показатели которых во многом определяются правильностью выбора методов и средств измерений.

Достижениям Советского Союза в области космонавтики способствовало применение современных методов и средств измерений. Создание космической техники, вывод летающих объектов на орбиту и управление ими связаны с проведением большого числа высокоточных измерений, выполняемых электронной измерительной аппаратурой. Искусственные спутники земли и космические орбитальные станции – это грандиозные летающие лаборатории.

Техника измерений развивалась параллельно с радиотехникой как ее составная и неотъемлемая часть. Изобретатель радио А. С. Попов в своих первых опытах разрабатывал методы и аппаратуру для измерения длин волн электромагнитных колебаний и некоторых параметров судовых антенн. Первая в России лаборатория, в которой разрабатывались и изготавливались измерительные приборы, была организована академиком М. В. Шулейкиным в 1913 г. Однако в дореволюционной России средства измерений производились в ограниченном количестве. После Великой Октябрьской социалистической рево-

люции началось всестороннее развитие всех отраслей народного хозяйства. Научно-исследовательскими институтами и лабораториями началось широкое освоение новых методов измерений, разработка и выпуск отечественных измерительных приборов.

В настоящее время в результате успешного выполнения пятилетних планов развития народного хозяйства СССР приборостроение является передовой отраслью, производящей большое количество первоклассной измерительной аппаратуры.

Совершенство измерительной техники служит одним из критериев научно-технического прогресса. Так, при научных исследованиях и в промышленности на измерения приходится 1/10 всех затрат, а при разработке, производстве и эксплуатации радиоэлектронной и космической аппаратуры — до половины.

Широкое применение полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, новые принципы конструирования, а также повышенные требования к точности и надежности способствовали созданию современных измерительных приборов и средств их поверки. Развитие вычислительной техники и микроэлектроники привело к совершенствованию не только измерительных систем, но и отдельных приборов, которые строятся на основе методов цифровой обработки информации и включают в себя функциональные блоки вычислительных устройств. Кроме того, изменились принципы построения приборов, т.е. они стали multifunctionalными и позволяют выполнять комплекс измерений, значительно возросла сложность приборов, повысились их разрешающая способность и точность, уменьшились габариты и масса.

Большое количество измерений электро- и радиотехнических величин и чрезвычайно широкие диапазоны их возможных значений (например, частот от долей герца до десятков гигагерц, мощностей от долей микроватта до десятков мегаватт, сопротивлений от долей ома до тысяч мегаом) обуславливают разнообразие методов и средств измерений.

Основными направлениями развития электро- и радиоизмерительной аппаратуры являются улучшение технических и эксплуатационных характеристик, внедрение новой элементной базы и рациональных методов конструирования, использование унифицированных блоков и модулей, повышение выпуска приборов с цифровой индикацией, разработка автоматически действующих измерительных комплексов, обеспечивающих последовательную проверку исследуемых объектов по ряду параметров, повышение общей и метрологической надежности.

Метрология — наука о единстве мер и точности измерений — стала особенно актуальной в связи со стандартизацией и унификацией изделий и технологических процессов, созданием Единой общегосударственной автоматизированной системы управления народным хозяйством. Важнейшей задачей Государственной метрологической службы СССР является испытание новых типов измерительных приборов, надзор за их состоянием и правильным использованием измерительной техники в народном хозяйстве.

Внедрение электро- и радиоизмерений практически во все отрасли народного хозяйства и постоянное совершенствование измерительной техники требуют подготовки в системе профессионально-технического образования квалифицированных специалистов, обладающих глубокими теоретическими знаниями и практическими навыками при работе с измерительными приборами.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

#### § 1. Основные определения. Особенности и методы измерений

Общее в качественном отношении свойство многих физических объектов (физических систем, их состояний, происходящих в них процессов) называют *физической величиной*. В электро- и радиотехнике физическими величинами являются электрическое напряжение, сила тока, мощность, энергия, а также электрическое сопротивление, электрическая емкость, индуктивность, частота.

Физическая величина может иметь различные значения. Определенное значение принимают в качестве единицы измерения физической величины. Как правило, таким значением является единица.

Измерение данной физической величины — это определение ее значения опытным путем. Количественный результат, т.е. результат измерений, получают, сравнивая найденное значение физической величины с единицей ее измерения.

Технические устройства, применяемые при измерениях, называют *средствами измерений*. К ним относят меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки, измерительные информационные системы.

**Мера** — средство измерения, воспроизводящее с высокой точностью физическую величину данного значения. Обычно мера воспроизводит единицу измерения либо ее увеличенное или уменьшенное в 10 раз значение.

Однозначная мера воспроизводит одно из значений физической величины, например резистор  $(1 \pm 0,005)$  кОм, конденсатор  $(0,1 \pm 0,0005)$  мкФ, а многозначная — ряд значений, например переменный резистор со шкалой для отсчета сопротивлений, конденсатор переменной емкости со шкалой для отсчета емкости.

Измерительный прибор — средство измерения, вырабатывающее доступный для восприятия наблюдателем сигнал, определяющий значение измеряемой величины. Приборами вы-

полняется прямое или косвенное сравнение измеряемой величины с мерой. При прямом сравнении мера используется непосредственно в приборе, а при косвенном — использовалась при изготовлении прибора, например при нанесении градуировки на шкалу.

Приборы, показания которых изменяются плавно в зависимости от изменения измеряемой величины, называют *аналоговыми*. К ним относят широко распространенные приборы со стрелочным отсчетом. Приборы, в которых показания представлены в цифровой форме и изменяются дискретно (ступенями) при плавном изменении измеряемой величины, называют *цифровыми*.

Измерительный преобразователь — средство измерения, преобразующее измеряемую величину в вспомогательную, более удобную для передачи, дальнейшего преобразования и обработки. Такие измерительные преобразователи, как шунты, добавочные резисторы, измерительные трансформаторы, делители напряжения и измерительные усилители, не изменяют электрического характера сигнала и позволяют расширить пределы измерений. Так, вольтметром можно измерять сравнительно малые напряжения, используя предварительный усилитель, и сравнительно большие напряжения, используя добавочные резисторы, делители напряжения и другие преобразователи. Для передачи измерительной информации по каналам связи и для ее введения в ЭВМ применяют измерительные преобразователи, преобразующие измеряемую величину в соответствующий код.

Неэлектрические величины (температуру, влажность, давление, механические колебания и др.) преобразуют в удобные для измерения электрические сигналы с помощью терморезисторов, индуктивных преобразователей и других датчиков.

Электроизмерительная установка — средство измерения, объединяющее ряд других средств измерений, преобразователей и вспомогательных устройств и позволяющее рационально проводить комплекс определенных измерений.

Измерительная информационная система — средство измерения, служащее для автоматического сбора измерительных сигналов от нескольких источников, передачи их по каналам связи и преобразования в удобный для считывания, записи и переработки вид.

Результаты и точность измерений определяются метрологическими характеристиками средств измерений, на которые имеются соответствующие стандарты. Одной из главных метрологических характеристик средств измерений является по-

*грешность*, определяющая степень несовпадения измеренного и истинного значения измеряемой величины. Следует отметить, что истинное значение измеряемой величины всегда неизвестно, поэтому используют ее действительное значение, измеренное точным прибором.

К метрологическим относятся также динамические характеристики средств измерений, определяющие зависимость результата измерений от изменяющихся во времени входного сигнала, внешних влияний, нагрузки и др. Частной динамической характеристикой является время установления показаний. Кроме того, метрологическими характеристиками являются вариация (разность показаний при увеличении или уменьшении измеряемой величины до данного значения), а также входное и выходное полные сопротивления прибора. Входное сопротивление должно быть достаточно велико, тогда подключение прибора не влияет на режим работы измеряемой цепи. В ином случае возрастает погрешность измерения. Выходное сопротивление должно быть достаточно мало, тогда подключение нагрузки не вызывает значительного увеличения погрешности.

В электротехнике измерения выполняют на постоянном токе и переменном промышленной частотой 50 Гц, используя в основном электромеханические измерительные механизмы различных систем со стрелочным отсчетом. В последние годы все более широкое применение находят приборы с цифровым отсчетом. В радиотехнике измерения выполняют на переменном токе в очень широком диапазоне частот — от единиц герц до десятков тысяч мегагерц. Электромеханические измерительные механизмы, имеющие катушки и стальные сердечники, можно использовать на частотах до 1–2 кГц. На более высоких частотах возрастающее влияние собственных емкостей и индуктивностей прибора и подводящих проводов вызывает дополнительную частотную погрешность результата измерений. Следовательно, применяемые на высоких частотах приборы должны иметь минимальные собственные емкость и индуктивность. При значительном повышении частоты изменяются методы измерений. Так, емкость и индуктивность измеряют на низких частотах мостовым методом, а на высоких — резонансным.

Подключение прибора не должно изменять режима работы исследуемой цепи, поэтому потребляемая им мощность должна быть очень мала, а входное сопротивление велико. Влиянием подключения прибора можно пренебречь, если его входное сопротивление в 20–30 раз больше сопротивления того участка исследуемой цепи, к которому он подключен.



Режим исследуемой цепи контролируют, измеряя напряжения вольтметрами и токи амперметрами. Параметры элементов электрических цепей (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, колебательных контуров и др.) измеряют омметрами, универсальными мостами, измерителями добротности и другими соответствующими приборами. Источниками контрольных сигналов служат измерительные генераторы сигналов синусоидальной и прямоугольной формы, а также генераторы шумовых сигналов. Уровни сигналов в диапазоне частот от единиц герц до сотен мегагерц контролируют вольтметрами, а на более высоких частотах — ваттметрами. Для наблюдения и фотографирования формы сигналов, а также измерения с достаточной точностью их амплитудных и временных параметров используют электронные осциллографы. Основным методом измерения частоты переменного тока является электронно-счетный. Современные электронно-счетные частотомеры позволяют измерять частоту от долей герц до сотен мегагерц с большой точностью и имеют цифровой отсчет.

В зависимости от способа получения результаты измерения подразделяют на прямые, косвенные и совокупные.

При прямых измерениях значение измеряемой величины определяют непосредственно, например по положению указателя шкалы прибора, проградуированной в соответствующих единицах. Точность измерений сравнительно невелика, но этот метод широко применяют из-за простоты получения результата.

К прямым измерениям относится также прямое сравнение измеряемой величины с мерой, которая является вещественным воспроизведением единицы измеряемой величины. Этот метод трудоемок, требует сложной аппаратуры, но позволяет получить высокую точность измерений и подразделяется на нулевой, дифференциальный и замещения. При нулевом методе сравнения измеряемую величину уравнивают известной до тех пор, пока их разность, определяемая прибором непосредственной оценки, станет равной нулю. При дифференциальном оценивают разность измеряемой и известной величин при неполном их уравнивании. При замещении на прибор непосредственной оценки вначале подают измеряемую величину и замечают показания, а затем — воспроизводимую мерой известную величину, которую изменяют до получения тех же показаний.

При косвенных измерениях предварительно измеряют несколько других величин, а затем рассчитывают числовое значение измеряемой величины, используя известную зависимость между ними. Например, электрическое сопротивление резисто-

ра рассчитывают по формуле  $R = U/I$ , предварительно измерив напряжение  $U$  на его выводах и проходящий ток  $I$ .

При совокупных измерениях определяют несколько однородных величин и решением системы уравнений находят числовое значение измеряемой величины. Примером может быть определение взаимной индуктивности  $M$  двух катушек индуктивностью  $L_1$  и  $L_2$  двукратным измерением их суммарных индуктивностей  $L'$  и  $L''$  при последовательном прямом и встречном включении. Решением системы двух уравнений  $L' = L_1 + L_2 + 2M$  и  $L'' = L_1 + L_2 - 2M$  определяют  $M = (L' - L'')/4$ .

## § 2. Физические величины и их единицы измерения

В нашей стране введена и действует Международная система единиц (СИ), основными единицами которой являются метр (м)—единица длины, килограмм (кг)—единица массы, секунда (с)—единица времени, ампер (А)—единица электрического тока, кельвин (К)—единица термодинамической температуры, моль (моль)—единица количества вещества, кандела (кд)—единица силы света.

Наименования и обозначения некоторых электрических величин и их основных и производных единиц в СИ приведены в табл. 1. Так как значения величин изменяются в широких пределах, наряду с единицами СИ применяют десятичные кратные и дольные единицы, наименования и обозначения которых получают с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 2.

На принципиальных электрических схемах рядом с условным обозначением элементов приводятся в упрощенном виде их номинальные значения. Сопротивление резисторов в омах обозначают целым числом (например, 5, 47, 820); в килоомах—числом с добавлением буквы к (например, 1,5к, 33к, 110к), а в мегаомах—числом с добавлением буквы М (например, 2,2М, 10М, 33М). Емкость конденсаторов в пикофарадах обозначают целым числом (например, 3, 56, 680), в нанофарадах—числом с добавлением буквы н (например, 3,9н, 15н), а в микрофарадах—числом с запятой и нулем (например, 1,0; 20,0; 150,0; 1000,0).

Корпуса малогабаритных резисторов и конденсаторов имеют маркировку, состоящую из трех знаков (буквы и числа) и определяющую их номиналы. Сопротивления в омах, килоомах и мегаомах соответственно обозначают буквами Е, К и М, а емкость в пикофарадах, нанофарадах и микрофарадах— бук-

Таблица 1. Электрические величины и их единицы

Величина		Единица		
наименование	обозначение	наименование	обозначение	
			русское	международное
Сила электрического тока	$I$	ампер	А	A
Электрическое напряжение	$U$	вольт	В	V
Электродвижущая сила	$E, e$	вольт	В	V
Активная мощность электрической цепи	$P$	ватт	Вт	W
Полная мощность электрической цепи	$S$	вольт-ампер	В·А	V·A
Электрическая энергия	$W$	ватт-час	Вт·ч	W·h
Электрическая емкость	$C$	фарад	Ф	F
Электрическое сопротивление	$R, r$	ом	Ом	$\Omega$
Электрическая проводимость	$G, g$	сименс	См	S
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L, M$	генри	Г	H
Частота электрического тока	$F, f$	герц	Гц	Hz

Таблица 2. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		русское	международное			русское	международное
$10^{18}$	экса	Э	E	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^{15}$	пета	П	P	$10^{-2}$	санتي	с	c
$10^{12}$	тера	Т	T	$10^{-3}$	милли	м	m
$10^9$	гига	Г	G	$10^{-6}$	микро	мк	$\mu$
$10^6$	мега	М	M	$10^{-9}$	нано	н	n
$10^3$	кило	к	k	$10^{-12}$	пико	п	p
$10^2$	гекто	г	h	$10^{-15}$	фемто	ф	f
$10^1$	дека	да	da	$10^{-18}$	атто	а	a

вами П, Н и М, которые располагают в том месте числа, где должна быть запятая. Например, сопротивления резисторов обозначают: 0,47 Ом—E47; 4,7 Ом—4E7; 470 Ом = =0,47 кОм—K47; 4,7 кОм—4K7; 47 кОм—47K; 470 кОм=

= 0,47 МОм—М47; 4,7 МОм—4М7 и т. д.; емкости конденсаторов обозначают: 6,8 пФ—6П8; 68 пФ—68П; 680 пФ = 0,68 нФ—Н68; 6800 пФ = 6,8 нФ—6Н8; 0,068 мкФ—68Н; 0,68 мкФ—М68; 6,8 мкФ—6М8.

### § 3. Погрешности измерений

В результате измерений получают приближенное значение определяемой величины, которое отличается от истинного значения в большей или меньшей степени. Таким образом, вместо истинного значения измеряемой величины  $A$  используют действительное  $A_d$ , которое определяют образцовым прибором или как среднее арифметическое  $A_{ср}$  нескольких  $n$  измерений:  $A_d = A_{ср} = (A_1 + A_2 + \dots + A_n)/n$ .

Следовательно, измерения выполняют с определенными погрешностями, вызываемыми погрешностями метода, средств и внешними влияниями на них.

Погрешность метода измерений определяется степенью его несовершенства, а также измерительной схемы и ее элементов и неточностью используемых формул и уравнений.

Погрешность средств измерений (инструментальная) обусловлена технологическими и конструктивными недостатками применяемых приборов. Например, источниками такой погрешности могут быть неточная градуировка шкалы, трение в осях подвижной системы прибора, нестабильность параметров отдельных элементов цепей.

Погрешность от внешних влияний на средства измерений обусловлена нестабильностью напряжения питания, изменениями температуры, магнитных и электрических полей, положения прибора и другими факторами. В зависимости от условий эксплуатации средств измерений различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность характеризует точность средств измерений, работающих в нормальных условиях, т. е. при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ , относительной влажности  $(60 \pm 15)\%$ , атмосферном давлении  $(1000 \pm 40)$  гПа, напряжении сети  $(220 \pm 22)$  В, и зависит от их конструктивных особенностей и качества изготовления. Основная погрешность обычно приводится в паспорте и на шкале прибора.

Дополнительная погрешность характеризует точность средств измерений, работающих в условиях, отличных от нормальных, и обычно приводится в виде дополнительного слагаемого к основной погрешности или множителя к результату измерений.

При высокоточных измерениях учитывают характер проявления погрешности.

Систематические погрешности проявляются при многократных измерениях одной и той же величины и их значения и знаки остаются неизменными или изменяются по определенному закону. Причинами появления систематических погрешностей могут быть неточность градуировки шкалы, изменение температуры и других влияющих факторов, самопроизвольное изменение противодействующего момента пружинок (растяжек) измерительного механизма из-за старения и др. Для повышения точности измерений следует, выявив эти погрешности и определив их значение и знаки, внести соответствующие поправки в результат.

Случайные погрешности возникают в результате многих причин, которые отчетливо не проявляются и не могут быть учтены. При многократных измерениях случайные погрешности получаются различными как по значению, так и по знаку. Уменьшить влияние случайных погрешностей на результат измерений можно, если повторить измерение  $n$  раз, получить результаты  $A_1, A_2 \dots A_n$ , рассчитать их среднеарифметическое значение  $A_{\text{ср}} = A_{\text{д}}$  и случайные абсолютные погрешности  $\Delta A_1 = A_1 - A_{\text{ср}}, \Delta A_2 = A_2 - A_{\text{ср}} \dots \Delta A_n = A_n - A_{\text{ср}}$ . Если какая-либо из этих погрешностей значительно отличается от других, ее из расчета исключают, считая измерение ошибочным. Математическими методами доказано, что наибольшая погрешность  $\Delta A_{\text{max}}$  всегда меньше удвоенного значения среднеквадратичной погрешности  $\sigma$ , которую рассчитывают по формуле  $\sigma = \pm \sqrt{(\Delta A_1^2 + \Delta A_2^2 + \dots + \Delta A_n^2)/(n - 1)}$ , т.е.  $\Delta A_{\text{max}} \leq 2\sigma$ . При малой среднеквадратичной погрешности измерение точнее, поскольку влияние случайных погрешностей на результат измерений меньше.

Точность средств измерений оценивают по абсолютной, относительной (действительной и приведенной), среднеарифметической и среднеквадратичной погрешностям.

Абсолютную погрешность определяют как разность измеренного  $A$  и действительного  $A_{\text{д}}$  значений измеряемой величины, т.е.  $\Delta A = A - A_{\text{д}}$ . Абсолютная погрешность, взятая с другим знаком и называемая *поправкой*, не характеризует точность измерений (например, если при измерении напряжения  $U_{\text{д}} = 50$  В вольтметр показал  $U = 48$  В, абсолютная погрешность  $\Delta U = U - U_{\text{д}} = 48 - 50 = -2$  В. Такая погрешность чрезмерно велика при измерении напряжений 5–10 В и пренебрежимо мала при измерении напряжений 500–1000 В).

Оценить точность результатов измерений можно, если сопоставить абсолютную погрешность  $\Delta A$  с измеряемой величиной  $A$ , т.е. определить относительную погрешность  $\gamma = \Delta A/A$ , обычно выражаемую в процентах.

Действительную относительную погрешность  $\gamma_d$  определяют как отношение значения абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, т.е.  $\gamma_d = \Delta A/A_d$ .

Приведенную относительную погрешность  $\gamma_{пр}$  определяют как отношение абсолютной погрешности к максимально возможной измеряемой величине — верхнему пределу измерений  $A_{пр}$ , т.е.  $\gamma_{пр} = \Delta A/A_{пр}$ .

Согласно ГОСТ 1845-59 аналоговые электроизмерительные приборы по степени точности подразделяются на девять классов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0. Класс точности прибора определяет наибольшую основную приведенную погрешность. Так, при классе точности 2,5 основная приведенная погрешность измерений лежит в пределах от 1,5 до 2,5%. Комбинированные и многопредельные аналоговые приборы могут иметь различные классы точности при разных видах измерений и на разных пределах.

При работе с многопредельными аналоговыми приборами со стрелочным или световым указателем не следует производить отсчет на начальном участке шкалы, так как резко возрастает действительная погрешность. Например, для вольтметра со шкалой 0—100 В класса точности 2,5 при полном отклонении указателя погрешность  $\gamma_{пр} = 100 \cdot 2,5/100 = 2,5\%$ , при установке на отметке 50 В —  $\gamma_d = 100 \cdot 2,5/50 = 5\%$ , а на отметке 20 В —  $\gamma_d = 100 \cdot 2,5/20 = 12,5\%$ . Таким образом, для повышения точности следует выбрать такой предел измерений, при котором указатель установится в правой части шкалы возможно ближе к конечной отметке, тогда действительная погрешность будет близка к приведенной.

Радиоизмерительные приборы на классы точности не подразделяются. Для характеристики их точности указывают наибольшую абсолютную или относительную погрешность.

Абсолютная погрешность дается в виде одного значения или суммы двух значений, из которых первое зависит, а второе не зависит от значения измеряемой величины. Например, нестабильность частоты генератора ГЗ-102 не более  $\pm 1$  Гц, а погрешность ее установки не более  $\pm (0,02f + 2)$  Гц (где  $\pm 0,02f$  Гц — это погрешность установки частоты 500—1000 Гц и выше, а  $\pm 2$  Гц — более низкой).

Относительная погрешность дается в процентах одним значе-

нием или в виде суммы двух значений, из которых первое—это погрешность при больших, а второе—при малых измеряемых величинах. Например, при измерении частоты резонансным частотомером погрешность составляет не более 0,1%, сопротивлений универсальным мостом—не более  $(1+6/R)\%$ , постоянных напряжений прибором В7-16—не более  $(0,1+0,1 U_{\text{пр}}/U)\%$ . Таким образом, при измерении сопротивлений от 10 Ом до 10 МОм погрешность измерений порядка 1%, а ниже 10 Ом резко возрастает; при измерении напряжений  $U$ , близких к предельному  $U_{\text{пр}}$ , погрешность порядка 0,2%, а меньших резко возрастает.

**Погрешности при косвенных измерениях.** Как уже отмечалось, при косвенных измерениях искомую величину  $A$  рассчитывают, предварительно измерив с погрешностями  $\Delta A_1, \Delta A_2 \dots$  вспомогательные величины  $A_1, A_2 \dots$ , с которыми она функционально связана, поэтому возникает необходимость расчета погрешностей величины  $A$ . Рассмотрим четыре простейших случая расчета этой погрешности.

1. Если искомую величину  $A$  рассчитывают как сумму или разность вспомогательных величин  $A_1$  и  $A_2$ , т. е.  $A = A_1 \pm A_2$ , ее абсолютную погрешность, т. е. отклонение от действительного значения, определяют по формуле  $\Delta A = \sqrt{\Delta A_1^2 + \Delta A_2^2}$ .

**Пример 1.** Два последовательно соединенных резистора  $R_1$  и  $R_2$  соответственно сопротивлением 180 и 120 кОм имеют допустимое отклонение от номинала 10% и составляют добавочное сопротивление вольтметра  $R_{\text{доб}} = R_1 + R_2 = 180 + 120 = 300$  кОм. Определим допустимое отклонение от номинала  $R_{\text{доб}}$ .

Абсолютные погрешности резисторов  $R_1$  и  $R_2$  составляют:  $\Delta R_1 = 10\% R_1 = 0,1 \cdot 180 = 18$  кОм и  $\Delta R_2 = 10\% R_2 = 0,1 \cdot 120 = 12$  кОм. Абсолютная погрешность добавочного сопротивления  $\Delta R_{\text{доб}} = \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2} = \sqrt{18^2 + 12^2} = 22$  кОм. Допустимое отклонение  $\Delta R_{\text{доб}}/R_{\text{доб}} = 22/300 = 0,073$ , или 7,3%, что меньше 10%.

Таким образом, расчет показывает, что для уменьшения допустимого отклонения следует составлять добавочное сопротивление из двух-трех примерно равных по номиналу последовательно соединенных резисторов.

2. Если искомую величину  $A$  рассчитывают как произведение или частное вспомогательных величин  $A_1$  и  $A_2$ , т. е.  $A = A_1 A_2$  или  $A = A_1/A_2$ , ее относительную погрешность определяют по формуле  $\gamma = \Delta A/A = \sqrt{(\Delta A_1/A_1)^2 + (\Delta A_2/A_2)^2} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}$ .

**Пример 2.** Определим мощность и сопротивление и их относительные погрешности электрической лампы накаливания, если на ее выводах напряжение  $U = 220$  В, а проходящий ток  $I = 0,18$  А. Измерения вы-

полняют ампервольтметром Ц4315, имеющим класс точности 1,5 (погрешность 1,5%) и пределы измерений 250 В и 0,5 А.

Истинное значение напряжения  $U = 220 \pm 0,015 \cdot 250 = (220 \pm 3,75)$  В (т.е. находится в пределах от 216,25 до 223,75 В), а тока  $I = 0,18 \pm \pm 0,015 \cdot 0,5 = (0,18 \pm 0,0075)$  А (т.е. находится в пределах от 0,1725 до 0,1875 А).

Относительная погрешность при измерении мощности и сопроти-

вления  $\gamma = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2} = 2,12\%$ .

Мощность  $P = UI = 220 \cdot 0,18 = 40 \pm 0,0212 \cdot 40 = (40 \pm 0,85)$  Вт, т.е. ее истинное значение находится в пределах от 39,15 до 40,85 Вт.

Сопротивление  $R = U/I = 220/0,18 = 1220 \pm 0,0212 \cdot 1220 = = (1220 \pm 26)$  Ом, т.е. его истинное значение находится в пределах от 1194 до 1246 Ом.

3. Если искомую величину  $A$  рассчитывают как возведенную в  $n$ -ю степень вспомогательную величину  $A_1$ , измеренную с погрешностью  $\gamma_1$ , относительную погрешность  $\gamma$  величины  $A$  определяют по формуле  $\gamma = n\gamma_1 = n(\Delta A_1/A_1)$ .

4. Если искомую величину  $A$  рассчитывают как корень  $n$ -й степени из вспомогательной величины  $A_1$ , измеренной с погрешностью  $\gamma_1$ , относительную погрешность  $\gamma$  величины  $A$  определяют по формуле  $\gamma = \gamma_1/n = \Delta A_1/(A_1 n)$ .

#### § 4. Классификация и система обозначений измерительных приборов

Электроизмерительные приборы в основном имеют электромеханический измерительный механизм, преобразующий измеряемую величину в отклонение подвижной системы и связанного с ней указателя. Такие механизмы отличаются простотой конструкции, достаточно высокой чувствительностью, надежностью, разнообразием применения и недороги.

Преобразование электрической энергии измеряемой величины в механическую энергию отклонения подвижной системы и указателя происходит в результате взаимодействия магнитных и электрических полей. Наименование различных систем измерительных механизмов и их условные обозначения в зависимости от используемых физических явлений даны в табл. 3. Электроизмерительным приборам в зависимости от системы измерительного механизма присваиваются следующие буквенные обозначения: М—магнитоэлектрический, Э—электромагнитный, Д—электро- и ферродинамический, И—индукционный, С—электростатический, Ц—выпрямительный комбинированный, Т—магнитоэлектрический с термопреобразователем, Ф—электронный цифровой, Н—самопишущий и Р—измерители параметров элементов (измерительные мосты, ом-



**Таблица 3. Наименования и обозначения систем измерительных механизмов**

Наименование	Обозначение	Физическое явление
Магнитоэлектрический: с подвижной рамкой		Взаимодействие магнитных полей постоянного магнита и проводника с током
с подвижным магнитом		
с термопреобразователем		
с выпрямителем		
Электромагнитный		Втягивание стального сердечника магнитным полем катушки с током
Электродинамический		Взаимодействие двух проводников с токами
Ферродинамический		Взаимодействие магнитных полей катушки с сердечником и проводника с током
Индукционный		Поворот алюминиевого диска, находящегося в поле электромагнитов
Электростатический		Взаимодействие двух металлических пластин при подаче напряжения и появлении электрического поля

метры, микрофарадметры, магазины резисторов, меры сопротивления). В маркировку прибора входят одна из этих букв и четырехзначное число, первые две цифры которого указывают шифр завода-изготовителя, а две другие — номер конструктивной разработки.

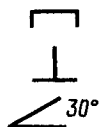
На шкалы приборов наносят маркировку и условные обозначения, указывающие измеряемую величину (А — амперметры, V — вольтметры и др.), характер измеряемого тока (— постоянный, ~ переменный, ≈ трехфазный), систему измерительного механизма, класс точности, а также дополнительные обозначения, приведенные на стр. 18.

Положение шкалы:

горизонтальное

вертикальное

наклонное



Направление ориентировки в магнитном поле земли



Изоляция между измерительной цепью и корпусом испытана напряжением 3 кВ



Категория защищенности от внешних полей:

магнитных



электрических



Отрицательный, положительный и общий зажимы



На рис. 1 показаны шкала прибора Ц4315 и все нанесенные на нее обозначения, из которых следует, что это комбинированный прибор, который является магнитоэлектрическим или выпрямительным соответственно при измерениях постоянных с приведенной погрешностью 2,5% или переменных с приведенной погрешностью 4,0% токов и напряжений. Кроме того, этим прибором можно измерять сопротивления и емкости соответственно с погрешностями 2,5 и 4,0%. Изоляция между измерительной цепью прибора и корпусом испытана напряжением 3 кВ. Прибор нормально работает при горизонтальном положении шкалы.

Радиоизмерительные приборы применяют на постоянном токе и переменном в широком диапазоне частот для измерения электрических и радиотехнических величин, наблюдения формы исследуемых сигналов и характеристик, генериро-

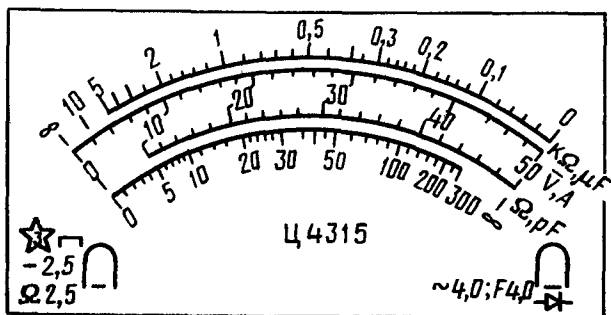


Рис. 1. Шкала прибора Ц4315

вания сигналов различной формы и частоты, питания радиостановок. Большинство этих приборов имеют электронную схему на транзисторах или лампах и индикатор. Для визуальной индикации служат электромеханические измерительные механизмы, электронно-лучевые трубки, электронно-световые и цифровые газоразрядные лампы, а для слуховой — телефон.

Электронные радиоизмерительные приборы согласно ГОСТ 15094—69 в зависимости от характера измерений и вида измеряемой величины разделяются на 20 групп, обозначаемых буквами русского алфавита. Приборы, входящие в каждую группу и объединенные по основной выполняемой функции, обозначают буквой группы и цифрой, после которой через дефис следует порядковый номер разработки. Так, прибор В7-26 является современным вольтметром на транзисторах и имеет лучшие технические характеристики и внешний вид, чем выпускавшиеся ранее ламповые вольтметры В7-2—В7-9. Приборы, прошедшие первую модернизацию, имеют в обозначении после номера разработки букву А, вторую — Б и т. д. Приборы с одинаковыми характеристиками, но отличающиеся конструктивным исполнением, имеют в обозначении через косую черту цифру, указывающую номер конструктивной модификации (например, В7-10/1). Основные группы и виды радиоизмерительных приборов, а также их обозначения приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные группы и виды радиоизмерительных приборов

Группы и виды приборов	Обозначение	Группы и виды приборов	Обозначение
<i>Приборы для измерения силы тока</i>		<i>Источники постоянно-го тока</i>	<i>Б5</i>
Установки или приборы для проверки амперметров	A1	<i>Приборы для измерения напряжений</i>	
Амперметры постоянного тока	A2		
Амперметры переменного тока	A3	Установки или приборы для проверки вольтметров	B1
Амперметры универсальные	A7	Вольтметры постоянного тока	B2
<i>Источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов</i>		Вольтметры переменного тока	B3
		Вольтметры импульсного тока	B4
		Вольтметры селективные	B6
Источники переменного тока	B2	Вольтметры универсальные	B7

Группы и виды приборов	Обозначение	Группы и виды приборов	Обозначение
<i>Генераторы измерительные</i>		Измерители параметров (характеристик) электронных ламп	ЛЗ
Установки для поверки генераторов	Г1	Измерители шумовых параметров полупроводниковых приборов	Л4
Генераторы шумовых сигналов	Г2	<i>Приборы для измерения мощности</i>	
Генераторы сигналов низкочастотные	Г3	Ваттметры проходящей мощности	М2
Генераторы сигналов высокочастотные	Г4	Ваттметры поглощаемой мощности	М3
Генераторы импульсов	Г5	<i>Приборы для измерения напряженности поля и радиопомех</i>	
Генераторы сигналов специальной формы	Г6	Индикаторы поля	П2
Генераторы качающейся частоты	Г8	Измерители напряженности поля	П3
<i>Аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений</i>	Д	Измерители радиопомех	П4
<i>Приборы для измерения параметров компонентов цепей с сосредоточенными постоянными</i>		Приемники измерительные	П5
Измерители индуктивностей	Е3	<i>Приборы для измерения параметров и трактов с распределенными постоянными</i>	
Измерители добротности	Е4	Линии измерительные	Р1
Измерители сопротивлений	Е6	Измерители коэффициента стоячей волны	Р2
Измерители параметров универсальные	Е7	Измерители полных сопротивлений	Р3
Измерители емкостей	Е8	Измерители параметров линий передач	Р5
<i>Приборы для импульсных измерений</i>		<i>Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигналов и спектра</i>	
Измерители временных интервалов	И2	Осциллографы универсальные	С1
Измерители параметров импульсов	И4	Измерители коэффициента амплитудной модуляции (модулометры)	С2
<i>Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов</i>		Измерители девиации частоты (девиометры)	С3
Измерители параметров (характеристик) полупроводниковых приборов	Л2	Анализаторы спектра	С4

Группы и виды приборов	Обозначение	Группы и виды приборов	Обозначение
Измерители нелинейных искажений	С6	Приборы для исследования фазочастотных характеристик	Х3
Осциллографы скоростные, стробоскопические	С7	Приборы для исследования амплитудных характеристик	Х4
Осциллографы запоминающие	С8	Приборы для измерения частоты и времени	
Осциллографы специальные	С9	Стандарты частоты и времени	Ч1
Усилители измерительные		Частотомеры резонансные	Ч2
Усилители низкочастотные	У3	Частотомеры электронно-счетные	Ч3
Усилители высокочастотные	У4	Частотомеры гетеродинные, емкостные и мостовые	Ч4
Усилители универсальные	У7	Приемники сигналов эталонных частот и сигналов времени	Ч7
Приборы для измерения фазового сдвига	Ф	Блоки радиоизмерительных приборов	Я
Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств			
Приборы для исследования амплитудно-частотных характеристик	Х1		

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие средства измерений вы знаете и каковы их основные метрологические характеристики?
2. Какие методы измерений вы знаете?
3. Какие единицы измерений применяют при оценке электрических величин?
4. Какие погрешности характеризуют точность измерений?
5. Как оценивают точность средств измерений?
6. Как рассчитывают погрешности при косвенных измерениях?
7. Как классифицируют радиоизмерительные приборы в зависимости от системы измерительного механизма и какие обозначения наносят на их шкалы?
8. Как классифицируют и маркируют электронные радиоизмерительные приборы?

# ГЛАВА ВТОРАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

## § 5. Общие сведения

Как уже отмечалось, принцип действия измерительных приборов основан на преобразовании измеряемой величины в доступный для наблюдения сигнал, по уровню которого можно судить о ее значении.

В приборах прямого преобразования, или прямопоказывающих, имеющих разомкнутую схему (рис. 2, а), электрическая величина  $X$  преобразователями  $П1$ ,  $П2$ ,  $П3$  преобразуется в промежуточные величины  $X1$ ,  $X2$ ..., а затем в механическую или иногда в тепловую либо электрическую величину  $Y$ .

Приборы уравнивания, или сравнивающие, имеют замкнутую схему (рис. 2, б). На преобразователь сравнения  $Пс$  подается для сопоставления измеряемая величина  $X$  и почти равная ей величина  $X_y$ , поступающая из тракта обратного преобразования  $П_{обр}$ . Полученная в результате сопоставления разность  $\Delta X$  преобразуется в тракте прямого преобразования в величину  $Y$ , контролируемую прямопоказывающим прибором. В таких приборах, как мосты, эту разность  $\Delta X$  сводят к нулю. Прямопоказывающий прибор называют нулевым, поскольку он контролирует отсутствие показаний.

В качестве прямопоказывающих широко используют электромеханические измерительные приборы (механизмы), шкалы которых проградуированы в значениях измеряемой величины. Отсчет производят по положению указателя. Электромеханический измерительный механизм имеет статор и ротор с укрепленным на нем указателем. Измерительная цепь, расположенная на статоре или роторе, преобразует измеряемую величину

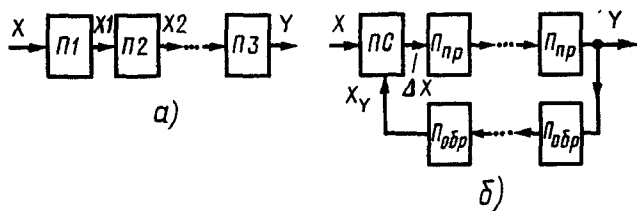


Рис. 2. Структурные схемы приборов:  
а — прямого преобразования, б — уравнивания

в величину, непосредственно воздействующую на измерительный механизм, преобразующий электрическую энергию в механическую и создающий вращающий момент ротора. Чтобы угол поворота ротора был пропорционален значению измеряемой величины, необходим противодействующий момент. При его отсутствии ротор будет повернут до упора при любом значении измеряемой величины.

Противодействующий момент создается при закручивании спиралевидных пружин или растяжек и подвесов, изготовленных из фосфористой или оловянно-цинковой бронзы. В тех приборах, где измерительная цепь расположена на роторе, для подвода тока применяют две пружины 3 (рис. 3, а, б). Для повышения чувствительности ослабляют противодействующий момент. В механизмах высокой чувствительности применяют растяжки и подвесы — ленточные нити толщиной в несколько сотых и шириной в несколько десятых долей миллиметра. Внутренние концы пружин или растяжек припаивают к лепесткам ротора, к которым припаяны выводы обмотки, а внешние — к лепесткам статора.

Крепят подвижную часть так, чтобы резко снизить или устранить трение при ее повороте. При креплении подвижной части — рамки 5 на стальной оси 4 или на двух приклеенных к рамке полюсах 6 их заточенные на конус концы входят в конусообразные углубления камней 2 (агат, корунд и др.), вста-

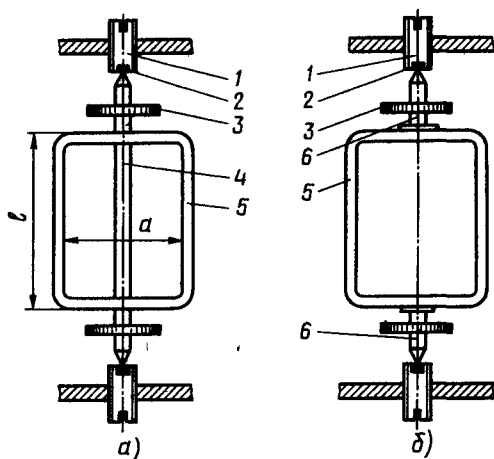


Рис. 3. Установка рамки:  
а — на оси, б — на полюсах

вленных в гнезда подпятников 1. Регулируют положение верхнего подпятника так, чтобы рамка свободно вращалась и имела незначительный продольный люфт. При таком креплении устранить трение невозможно, однако в приборах невысокой чувствительности при значительных вращающих и противодействующих моментах оно вызывает незначительную дополнительную погрешность.

Крепление подвижной части — рамки 2 на двух растяжках 1 (рис. 4, а), применяемое в приборах высокой чувствительности, позволяет устранить трение и уменьшить противодействующий момент. В приборах очень высокой чувствительности, например гальванометрах, подвижная часть — рамка 2 висит на одном подвесе 3 (рис. 4, б). Миниатюрное зеркало 4, укрепленное на подвижной части, позволяет выполнить световой указатель. Ток подводят к обмотке рамки через растяжки 1 или подвес 3 и неупругую нить 5, не создающую противодействующего момента.

Во всех электроизмерительных механизмах для уменьшения времени успокоения подвижной части и указателя применяют успокоители. Магнитный успокоитель представляет собой жестко связанный с осью алюминиевый диск (сектор или рамку), перемещающийся в сильном магнитном поле постоянного магнита. В толще алюминиевых деталей создаются вихревые токи и их магнитные потоки, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создают торможение, пропорциональное скорости движения. Воздушный успокоитель представляет собой жестко связанный с осью подвижной части алюминиевый поршень, свободно перемещающийся внутри закрытой камеры. Торможение создается сопротивлением воздуха камеры при движении поршня. Воздушный успокоитель не имеет постоянного магнита, который может оказать влияние на работу прибора, но конструктивно ненадежен, поскольку возможно затирание между поршнем и стенками камеры. Жидкостный успокоитель позволяет повысить вибростойкость прибора.

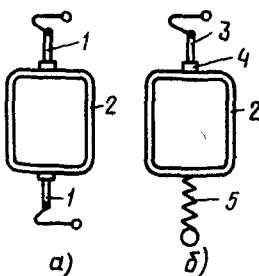


Рис. 4. Крепление рамки:

а — на растяжках, б — на подвесе

Шкала прибора — это пластина с нанесенными на нее отметками, соответствующими определенным значениям измеряемой величины. Расстояние между двумя ближайшими отметками называют делением шкалы. Цена деления — это изменение измеряемой величины, вызывающее перемещение указателя.

Шкала прибора — это пластина с нанесенными на нее отметками, соответствующими определенным значениям измеряемой величины. Расстояние между двумя ближайшими отметками называют делением шкалы. Цена деления — это изменение измеряемой величины, вызывающее перемещение указателя.



теля на одно деление. Первую и последнюю отметки называют начальной и конечной. Равномерная шкала с практически равными делениями более удобна для отсчета, чем неравномерная. Облегчить отсчет можно также, если при градуировке шкалы между начальной и конечной отметками разместить десять или пять крупных делений, разделив каждое на десять или пять мелких.

Легкий и прочный в виде трубки или профилированной ленты стрелочный указатель жестко крепится к подвижной части. Его копьевидные, ножевидные или нитевидные концы позволяют повысить точность отсчета. Зеркальная шкала также позволяет повысить точность отсчета, который производят при совпадении стрелки и ее изображения в зеркале. Световой указатель представляет собой оптическую систему, проектирующую световой луч на миниатюрное зеркало, прикрепленное к подвижной части прибора. Отраженный луч падает на начальную отметку шкалы, создавая на ней световой «зайчик».

Для защиты механизма прибора от пыли, влаги и газов его помещают в футляр, обычно выполняемый из пластмассы, и герметизируют резиновой прокладкой.

## § 6. Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии полей внешнего или внутрирамочного постоянного магнита и проводника с током.

В магнитной системе с внешним постоянным магнитом (рис. 5, а) кольцеобразный воздушный промежуток 2 создан между двумя полюсными наконечниками 4 постоянного магнита

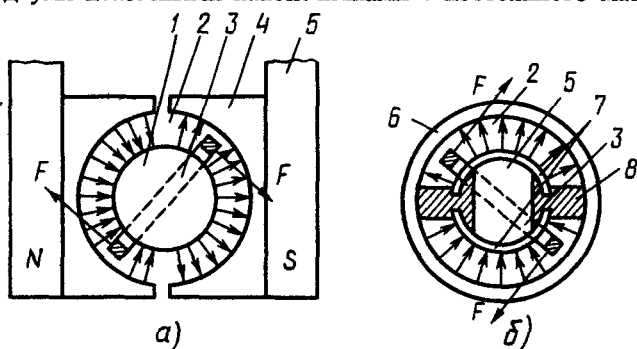


Рис. 5. Магнитная система магнитоэлектрического измерительного механизма:

а — с внешним магнитом, б — с внутрирамочным

5 и концентрично расположенным стальным цилиндром 1, а с внутрирамочным постоянным магнитом (рис. 5, б) — между двумя стальными полукольцами 7 и внешним кольцом 6. Постоянный магнит 5 во втором случае размещен таким образом, что оба полукольца являются его наконечниками. Эти полукольца, внешнее кольцо и постоянный магнит скреплены немагнитными силуминовыми вставками 8. В кольцеобразном воздушном промежутке 2 обеих магнитных систем создается сильное и равномерно распределенное постоянное магнитное поле. Подвижная часть 3 выполнена в виде легкой алюминиевой рамки прямоугольной формы, которая свободно поворачивается в кольцеобразном воздушном промежутке. К рамке крепится легкая стрелка или миниатюрное зеркало. На рамку намотано большое число витков очень тонкого медного провода, концы которого припаяны к тем же лепесткам, к которым припаяны внутренние концы двух спиральных пружин или растяжек.

В результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля, создаваемого при прохождении тока по обмотке рамки, создаются силы  $F$ , зависящие от силы тока  $I$ , магнитной индукции  $B$  в воздушном промежутке, числа витков  $w$  и активной длины провода  $l$ , т.е.  $F = IBwl$ . Вращающий момент  $M_{вр} = Fa$  (где  $a$  — ширина рамки — см. рис. 3, а). Так как  $la = S$  — площадь рамки, вращающий момент  $M_{вр} = IBwS$ , т.е. зависит от числа ампервитков  $Iw$ , магнитной индукции  $B$  и площади рамки  $S$ . При данном магните и определенном конечном значении площади рамки можно изготовить магнитоэлектрический прибор для измерения весьма малых токов (единиц и десятков микроампер), намотав на рамку большое количество витков очень тонкого провода (диаметром 0,03–0,05 мм).

Приборы магнитоэлектрической системы имеют значительно лучшие качественные показатели, чем приборы других систем. Основными достоинствами их являются:

высокая чувствительность, значительно превышающая чувствительность приборов других систем;

высокая точность измерений (обычные щитовые приборы изготавливаются классов 1,0 и 1,5, а лабораторные — от 0,5 до 0,1);

равномерность шкалы, поскольку равномерно магнитное поле в воздушном промежутке;

малое собственное потребление энергии и поэтому незначительное влияние на режим измеряемой цепи;

хорошее успокоение, вызванное торможением движения алюминиевой рамки в сильном магнитном поле;

нечувствительность к внешним магнитным полям, которые практически не меняют собственное сильное магнитное поле прибора.

Следует отметить, что магнитоэлектрические приборы пригодны для измерения только постоянных токов. Изменение направления тока вызывает изменение направления вращения подвижной части и указателя, поэтому при работе с прибором следует соблюдать полярность включения. При включении в цепь переменного тока указатель остается на нулевой отметке и начинает колебаться вправо и влево от нее при понижении частоты ниже 15–10 Гц. При понижении частоты до 2–1 Гц амплитуда колебаний возрастает. Учитывая достоинства магнитоэлектрических приборов, их применяют на переменном токе совместно с преобразователями переменного тока в постоянный — выпрямителями и термопреобразователями. Приборы магнитоэлектрической системы — наиболее широко распространенные электромеханические измерительные механизмы. В радиотехнике при измерениях приборы других систем не применяют.

Оценку этих приборов производят по двум параметрам: току полного отклонения  $I_n$  и сопротивлению провода обмотки рамки  $R_n$ . Если к зажимам прибора подвести напряжение  $U_n = I_n R_n$ , по проводу обмотки будет проходить ток  $I_n$ , вызывающий полное отклонение указателя. Следовательно, прибор можно использовать как для измерения тока, так и напряжения. При последовательном включении в цепь измеряемого тока угол поворота указателя пропорционален току и прибор служит как амперметр (микроамперметр) с пределом измерения  $I_n$ . При параллельном включении угол поворота указателя пропорционален напряжению и прибор служит как вольтметр (милливольтметр) с пределом измерения  $U_n$ .

Для измерения параметров магнитоэлектрических приборов можно использовать схему, показанную на рис. 6, в которой источником постоянного тока служит низковольтный выпрямитель. Плавно увеличивая потенциометром  $R$  постоянный ток в цепи с последовательно включенными поверяемым измерительным прибором  $И$  и образцовым микроамперметром  $\mu A_0$ , отсчитывают по шкале этого микроамперметра

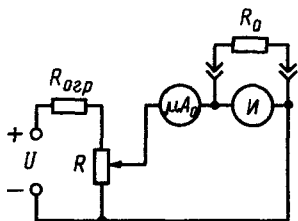


Рис. 6. Измерение параметров магнитоэлектрического измерительного механизма

ток полного отклонения  $I_n$ . Сопротивление резистора  $R_{огр}$  подбирают так, чтобы защитить оба прибора от перегрузок. Для измерения сопротивления  $R_n$  поверяемого прибора следует установить его указатель на конечную или близкую к ней отметку шкалы и отсчитать показания, подключить магазин резисторов  $R_0$  или переменный резистор и изменять сопротивление до получения половины установленного показания. При этом  $R_n = R_0$  и его значение отсчитывают по шкале магазина резисторов.

Параметры некоторых магнитоэлектрических приборов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры магнитоэлектрических приборов

Обозначение	Класс точности	Ток полного отклонения $I_n$ , мкА	Сопротивление $R_n$ , Ом
M24	1,0, 1,5; 2,0	100-450	850-50
M93, M94	1,0; 1,5	50-500	3900-50
M265	1,0, 1,5	50-500	3000-80
M494	1,5, 2,5	50-100	2300-70
M1690	1,0	50-500	4000-250
M4205	1,5, 2,5	10-500	5000-250

## § 7. Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на втягивании сердечника магнитным полем плоской катушки или магнитной системой с катушкой.

В электромагнитном измерительном механизме, показанном на рис. 7,а, плоская катушка из медного провода имеет воздушный промежуток 5, в который при появлении магнитного поля втягивается эксцентрично укрепленный на оси 7 сердечник 4, изготовляемый из электротехнической стали или пермаллоя, имеющих высокую магнитную проницаемость. На оси 7 укреплены также муфта 1 штанги 2 поршня 3 воздушного успокоителя, муфта 10 стрелочного указателя 11 и муфта 8, к которой припаян внутренний конец спиральной пружины 9.

В электромагнитном механизме, показанном на рис. 7,б, на замкнутой магнитной системе 12 расположена катушка 6 из медного провода. Полусные наконечники 13 и 14 магнитной системы имеют продольную щель, в которую при возникновении магнитного поля втягивается подвижной сердечник 4, жестко укрепленный на оси 7. Спиральная пружина и успокоитель на рис. 7,б не показаны. Достоинство этой конструкции —

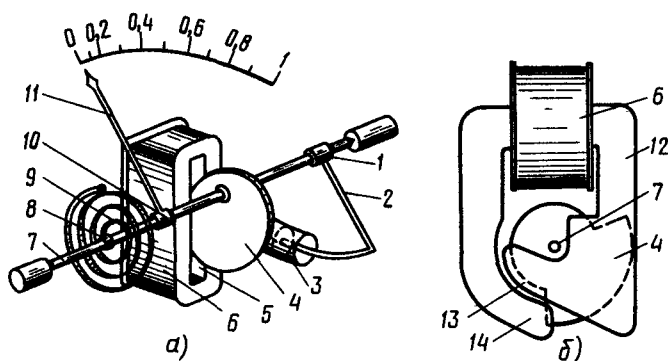


Рис. 7. Электромагнитный измерительный механизм.  
а — с плоской катушкой, б — с магнитной системой

повышение чувствительности, уменьшение влияния внешних магнитных полей, возможность изменения характера шкалы.

Электромагнитные механизмы просты по конструкции, выдерживают значительные перегрузки, надежны в работе и пригодны для постоянного тока и переменного до частоты 100–500 Гц. Шкала прибора в большей своей части равномерная. Чувствительность и точность таких приборов сравнительно невелики, что определяет их область применения в основном как щитовых классов 1,5 и 2,5, работающих на переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

Электромагнитный механизм с катушкой из медного провода большого диаметра (0,5 мм и выше) используется как амперметр, причем чем больше диаметр провода и меньше количество его витков, тем выше предел измерения тока. Для вольтметров применяют катушки из тонкого провода с большим количеством витков.

## § 8. Приборы электро-, ферродинамической и индукционной систем

Приборы ферродинамической системы имеют измерительный механизм с неподвижной и подвижной катушками (рис. 8, а). Неподвижная катушка состоит из двух частей (катушек) 3 и 4, соединенных последовательно так, что их магнитные поля складываются. Между частями неподвижной катушки в подпятниках или на растяжках расположена ось 2 с жестко укрепленной подвижной катушкой 1, к которой через две пружины или растяжки, создающие противодействующий

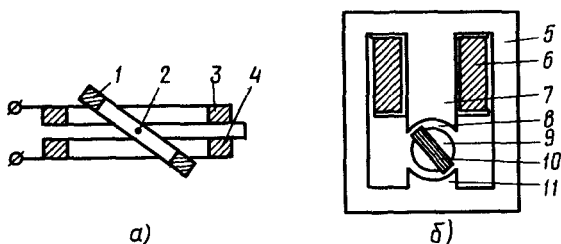


Рис. 8. Электроизмерительные механизмы:  
а — электродинамической системы, б — ферродинамической

момент, подводится ток. Воздушный или магнитный успокоитель, стрелочный указатель и пружины на рис. 8, а не показаны. В измерительном механизме, используемом как амперметр или вольтметр, неподвижную и подвижную катушки соединяют последовательно так, что проходящий ток создает в них встречное магнитное поле и вращающий момент поворачивает подвижную катушку. При этом магнитные поля складываются. При равных индуктивностях катушек вращающий момент  $M_{вр} = I^2 (L + M)$ . Взаимная индуктивность  $M$  при перпендикулярном расположении катушек равна нулю и достигает максимального значения при параллельном. Следовательно, шкала прибора имеет неравномерный характер. Подбирая оптимальную форму катушек и изменяя расстояние между двумя частями неподвижной катушки, несколько уменьшают неравномерность шкалы.

Электродинамические приборы работают на постоянном токе и переменном до частоты 10–20 кГц. При одновременном изменении направления тока в обеих катушках изменяется направление магнитных потоков, однако направление вращающего момента остается неизменным. В электродинамическом механизме отсутствуют ферромагнитные металлические массы, изменяющие характер магнитного поля и вызывающие появление вихревых токов, потери на гистерезис и т. д. Благодаря этому можно изготавливать приборы очень высокого класса точности (0,2 и даже 0,1), используемые как образцовые при градуировке других приборов. Недостаток электродинамических приборов — влияние на их работу внешних магнитных полей. Если на обеих катушках намотано большое число витков, чувствительность прибора возрастает, т. е. уменьшается сила тока и магнитный поток катушек, но резко возрастает влияние внешних магнитных полей.

В приборах ферродинамической системы измерительный механизм (рис. 8, б) имеет замкнутую магнитную систему 5 из ферромагнитного материала. Неподвижная катушка 6 расположена на среднем крене сердечника. Полусные наконечники 7 и 11 и концентрично расположенный стальной цилиндр 9 образуют кольцеобразный воздушный промежуток 8, в котором свободно поворачивается подвижная катушка — рамка 10. Магнитный успокоитель, стрелочный указатель и пружины, создающие противодействующий момент и подводящие ток к катушке рамки, на рис. 8, б не показаны. Наличие сильного магнитного поля в кольцеобразном промежутке, с которым взаимодействует поле подвижной катушки, приводит к значительному увеличению вращающего момента, т.е. повышению чувствительности прибора и уменьшению влияния внешних магнитных полей. Однако точность этих приборов сравнительно невысока (классы точности не лучше 1,5; 2,5), и работают они в более узком диапазоне частот (до 500–1000 Гц), что объясняется потерями в сердечнике.

Ферродинамический механизм находит основное применение в самопишущих вольтметрах, амперметрах и ваттметрах, работающих на переменном токе промышленной частоты 50 Гц. Вместо стрелочного указателя в этом случае укрепляется конусообразная чернильница с трубчатым пером, фиксирующим показания прибора на движущейся диаграммной бумаге с нанесенной на нее координатной сеткой.

В приборах индукционной системы измерительный механизм (рис. 9) имеет неподвижную часть в виде двух электромагнитов 1 и 2 и подвижную — жестко укрепленный на оси 4 алюминиевый диск 3, который может свободно вращаться в воздушном зазоре между полюсными наконечниками электромагнитов. Постоянный магнит 5 создает успокоение и торможение алюминиевого диска. Алюминиевый диск начинает вращаться, если на обмотки электромагнитов подаются синусоидальные сдвинутые по фазе на  $90^\circ$  переменные токи. Магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , также сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , пронизывая толщу алюминиевого диска, наводят в нем вихревые токи  $I_1$

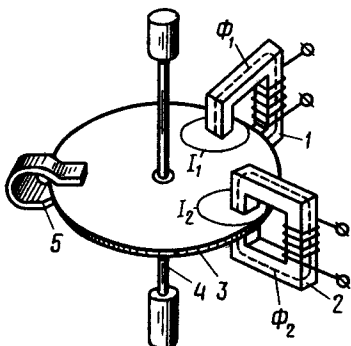


Рис. 9. Индукционный измерительный механизм

и  $I_2$ . Поскольку один контур тока втягивается в соответствующее магнитное поле, а другой — выталкивается, оба вращающих момента совпадают по направлению и создают вращение диска.

Индукционные измерительные приборы находят преимущественное применение в счетчиках электрической энергии переменного тока.

## § 9. Приборы электростатической системы

В приборах электростатической системы измерительный механизм имеет две металлические изолированные друг от друга пластины (конденсатор), одна из которых подвижна и может перемещаться, в результате чего изменяется емкость.

Электростатический измерительный механизм, напоминающий по конструкции конденсатор, емкость которого изменяется при изменении активной площади пластин, показан на рис. 10, а. При подаче измеряемого напряжения создается электрическое поле и две роторные пластины 1, жестко укрепленные на оси 2, втягиваются в воздушные промежутки между тремя статорными пластинами 3. Стрелочный или световой указатель и пружина для создания противодействующего момента на рис. 10, а не показаны. Приборы такой конструкции применяют для измерения напряжений порядка нескольких сотен вольт. Увеличивая количество роторных и статорных пластин, можно повысить чувствительность, т. е. понизить нижний предел измеряемых напряжений.

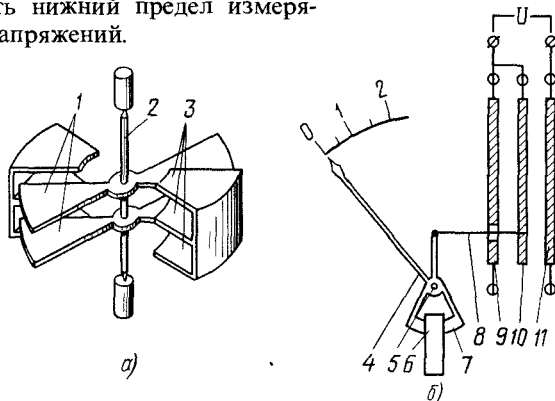


Рис. 10. Электростатический измерительный механизм:

а — с изменением активной площади пластин, б — с изменением расстояния между пластинами



Электростатический механизм, в котором емкость изменяется при изменении расстояния между двумя неподвижными пластинами 9, 11 и подвижной пластиной 10, подвешенной на тонких ленточных подвесках, показан на рис. 10, б. При подаче измеряемого напряжения  $U$  подвижная пластина отталкивается от соединенной с ней и одноименно заряженной пластины 11 и притягивается к разноименно заряженной пластине 9. При перемене полярности измеряемого напряжения направление движения подвижной пластины не изменяется, следовательно, электростатический механизм работает на постоянном и переменном токе, причем во втором случае угол отклонения подвижной пластины пропорционален квадрату действующего напряжения и не зависит от его формы. Перемещение подвижной пластины тягой 8, проходящей в отверстие неподвижной пластины 9, преобразуется в поворот оси 5 с жестко укрепленными на ней алюминиевыми сектором и стрелочным указателем 4. Постоянный магнит 6 создает успокоение движущегося между его полюсами алюминиевого сектора 7. Приборы такой конструкции применяют для измерения напряжений порядка единиц и десятков киловольт.

Электростатические вольтметры потребляют ничтожно малую мощность, имеют очень большое входное сопротивление (до десятков гигаом), работают на постоянном токе и переменном в диапазоне частот до десятков мегагерц, измеряют очень большие напряжения без использования громоздких добавочных резисторов и не подвержены влиянию внешних магнитных полей.

Примером таких приборов может служить киловольтметр С96, имеющий пределы измерений 7,5; 15 и 30 кВ и работающий в диапазоне частот от 0 до 20 МГц. Основная погрешность 1,5% возрастает до 5% для частот выше 5 МГц. Входная емкость не выше 12 пФ, входное сопротивление не менее 10 ГОм. Вращающий момент мал, поэтому подвижную часть крепят на растяжках и применяют световой указатель, для питания осветительной лампочки которого необходимо напряжение сети 220 В или 6 В от любого источника. Измеряемое напряжение подают на вводной штырь, размещенный в фарфоровом изоляторе. Для перестановки предела измерений штырь перемещают, при этом изменяется расстояние между пластинами. Прибор заключен в литой металлический корпус, который служит электростатическим экраном и устраняет влияние внешних электрических полей. При работе с прибором его корпус следует заземлять и соблюдать правила техники безопасности.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково устройство электромеханических измерительных приборов?
2. Каковы принцип действия и особенности конструкции измерительных механизмов магнитоэлектрической системы с внешним и внутрирамочным магнитом?
3. Как устроены и работают электромагнитные измерительные механизмы с плоской катушкой и магнитной системой?
4. Как создается вращающий момент при взаимодействии магнитных полей в измерительных механизмах электро- и ферродинамической систем?
5. Какова конструкция измерительного механизма индукционной системы и где его применяют?
6. Как создается вращающий момент при взаимодействии электрических полей в измерительном механизме электростатической системы?

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

#### § 10. Измерение постоянного тока магнитоэлектрическим прибором

Для питания коллекторных (стоковых) цепей аппаратуры на транзисторах необходимо сравнительно низкое напряжение (6–24 В), а анодно-экранных цепей ламповой аппаратуры – сравнительно высокое (100–500 В). Питающие напряжения подают от химических источников – сухих элементов и аккумуляторов, преобразующих энергию химических реакций в электрическую, и выпрямителей, преобразующих переменное напряжение сети в постоянное. Выявить неисправную цепь и проверить работоспособность аппаратуры можно, измерив соответствующие токи и напряжения.

Для измерения силы тока магнитоэлектрический прибор  $\mu\text{A}$ , параметры которого  $I_n$  и  $R_n$ , включают последовательно в разрыв исследуемой цепи (рис. 11, а). Ток в цепи зависит от напряжения источника  $U$  и сопротивления нагрузки  $R_n$ . Увеличение тока в цепи до  $I_n$  вызывает возрастание показаний прибора до полного отклонения указателя, следовательно, прибор является микроамперметром с пределом измерения  $I_n$ . Включение прибора вызывает некоторое уменьшение тока в цепи, поскольку общее сопротивление цепи возрастает до  $R_n + R_n$ . Этим уменьшением тока можно пренебречь и считать, что при включении прибора ток не изменяется, если  $R_n \ll R_n$ . Дополнительную погрешность, вызванную влиянием включения при-

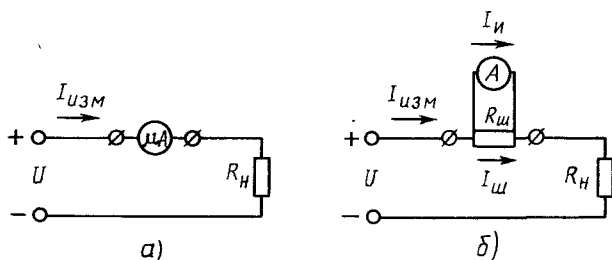


Рис. 11. Измерение постоянного тока:

а — магнитоэлектрическим прибором, б — магнитоэлектрическим прибором с шунтом

бора, можно рассчитать по формуле  $\gamma = R_n / (R_n + R_{и})$ . Так, при  $R_n = 2000$  Ом дополнительная погрешность меньше 5% для нагрузок 40 кОм и выше. В зависимости от чувствительности приборов (тока полного отклонения) их пределы измерений различны и обычно составляют 50–500 мкА (см. табл. 5).

Применение совместно с магнитоэлектрическим прибором шунта (рис. 11, б) позволяет определять токи, превышающие 500 мкА, т. е. расширить предел измерений. Шунт имеет сравнительно малое, точно подобранное сопротивление  $R_{ш}$ , подключается параллельно прибору и последовательно в цепь измеряемого тока. При этом измеряемый ток  $I_{изм}$  разветвляется на две неравные части: большая часть проходит через шунт, а меньшая — через прибор, вызывая отклонение указателя. При полном отклонении указателя измеряемый ток достигает предельного значения  $I_{изм} = I_{пред} = I_{ш} + I_{и}$ , откуда  $I_{ш} = I_{пред} - I_{и}$ . Падения напряжений на выводах шунта и измерительного прибора равны и составляют  $U_{и} = I_{и}R_{и} = I_{ш}R_{ш}$ .

Таким образом, сопротивление шунта  $R_{ш} = I_{и}R_{и} / (I_{пред} - I_{и}) = R_{и} / (I_{пред}/I_{и} - 1)$ .

Следовательно, для расчета сопротивления шунта необходимо знать ток полного отклонения  $I_{и}$  и сопротивление  $R_{и}$  измерительного прибора и выбрать предел измеряемого тока  $I_{пред}$ .

**Пример 3.** Рассчитаем сопротивление двух шунтов для пределов измерений 1 и 5 мА. Параметры измерительного прибора:  $I_{и} = 50$  мкА и  $R_{и} = 2000$  Ом.

Для предела 1 мА сопротивление шунта  $R_{ш} = 50 \cdot 2000 / (1000 - 50) = 105,2$  Ом, а для предела 5 мА —  $R_{ш} = 50 \cdot 2000 / (5000 - 50) = 20,2$  Ом.

Таким образом, чем больше выбранный предел измерения, тем меньше должно быть сопротивление шунта. Для больших

пределов измерения (100 мА и выше) сопротивление шунта должно быть единицы и доли ома.

Шунт изготавливают намоткой проволоки из манганина или другого высокоомного сплава на каркас из любого изоляционного материала. При малых сопротивлениях используют толстый провод и бескаркасную намотку. Небольшие шунты размещают внутри футляра прибора. Наружные взаимозаменяемые шунты используют при измерении токов порядка десятков, сотен и тысяч ампер. Они представляют собой отрезок манганиновой ленты, концы которой впаяны в два медных или латунных наконечника с наружными массивными токовыми зажимами для включения в цепь измеряемого тока и внутренними потенциальными зажимами для подключения двумя калиброванными проводниками измерительного прибора.

Многопредельные амперметры имеют несколько шунтов и служат для измерения различных токов. При измерениях нельзя допускать разрыва шунтовой цепи, при котором измеряемый ток, пройдя через прибор, вызовет чрезмерную перегрузку и может его повредить. Наружные шунты переставляют при выключенном питании, а внутренние переключают безобрывным переключателем. Однако нарушение контактов переключателя может вызвать повреждение измерительного прибора.

Наиболее надежной является схема многопредельного амперметра с постоянно подключенным универсальным шунтом, например примененная в комбинированном приборе Ц4315 (рис. 12). При переключении пределов измерений шунтовая цепь не разрывается. На любом пределе часть резисторов включена последовательно измерительному механизму, а остальные — параллельно и служат шунтовыми.

Так, для показанного на рис. 12 положения переключателя на пределе 0,5 мА предельный ток  $I_{\text{пред}} = 0,5 \text{ мА} = 500 \text{ мкА}$

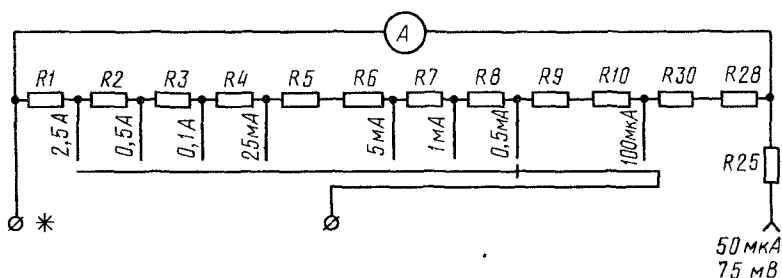


Рис. 12. Схема многопредельного амперметра с универсальным шунтом

разветвляется на две части. Через измерительный механизм и соединенные с ним последовательно резисторы  $R_9, R_{10}, R_{30}$  и  $R_{28}$  проходит ток  $I_n = 42,5$  мкА, вызывающий полное отклонение стрелочного указателя, а через шунт, в качестве которого служат резисторы  $R_1 + R_2 + \dots + R_8$ , ток  $I_{\text{пред}} - I_n = 500 - 42,5 = 457,5$  мкА. При другом пределе измерений шунтовые и последовательные резисторы переключаются и ток разветвляется так, что в цепи измерительного механизма проходит ток полного отклонения  $I_n = 42,5$  мкА.

При измерениях малых токов и напряжений используют гнездо «50 мкА, 75 мВ». Шунтом  $R_{\text{ш}}$  для предела 50 мкА служат резисторы  $R_1, R_2, \dots, R_{10}, R_{30}, R_{28}$ , суммарное сопротивление которых рассчитывают по приведенной ранее формуле, а каждого из них — учитывая отношение значений используемого предела измерений и предыдущего, как это будет показано ниже.

**Пример 4.** Рассчитаем сопротивления резисторов универсального шунта многопредельного амперметра, показанного на рис. 12, сопротивление измерительного механизма которого  $R_n = 706$  Ом.

Для предела 50 мкА сопротивление шунта  $R_{\text{ш}} = R_1 + R_2 + \dots + R_{10} + R_{30} + R_{28} = 42,5 \cdot 706 / (50 - 42,5) = 4000$  Ом. Падение напряжения  $I_n R_n = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}} = 42,5 \cdot 706 = 7,5 \cdot 4000 = 30\,000$  мкВ = 30 мВ. Для получения предела измерений 75 мВ, равного номинальному падению напряжения на наружных калиброванных шунтах, включают резистор  $R_{25} = (75 - 30) / 0,05 = 900$  Ом.

Для предела 100 мкА отношение пределов  $n_1 = 100 / 50 = 2$ . Сопротивление резисторов  $R_1 + R_2 + \dots + R_{10} = R_{\text{ш}} / n_1 = 4000 / 2 = 2000$  Ом. Сопротивление резисторов  $R_{30} + R_{28} = 4000 - 2000 = 2000$  Ом.

Для предела 0,5 мА отношение пределов  $n_2 = 500 / 100 = 5$ . Сопротивление резисторов  $R_1 + R_2 + \dots + R_8 = R_{\text{ш}} / (n_1 \cdot n_2) = 4000 / (2 \cdot 5) = 400$  Ом. Сопротивление резисторов  $R_9 + R_{10} = 2000 - 400 = 1600$  Ом.

Для предела 1 мА отношение пределов  $n_3 = 1 / 0,5 = 2$ . Сопротивление резисторов  $R_1 + R_2 + \dots + R_7 = R_{\text{ш}} / (n_1 n_2 n_3) = 4000 / (2 \cdot 5 \cdot 2) = 200$  Ом. Сопротивление резистора  $R_8 = 400 - 200 = 200$  Ом.

Для предела 5 мА отношение пределов  $n_4 = 5 / 1 = 5$ . Сопротивление резисторов  $R_1 + R_2 + \dots + R_6 = R_{\text{ш}} / (n_1 n_2 n_3 n_4) = 4000 / (2 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 5) = 40$  Ом. Сопротивление резистора  $R_7 = 200 - 40 = 160$  Ом. Сопротивления остальных резисторов рассчитывают аналогично.

## § 11. Измерение постоянного тока электронным микроамперметром

Для измерения очень малых токов используют электронный микроамперметр, состоящий из магнитоэлектрического прибора и усилителя постоянного тока (УПТ) на биполярных транзисторах, который повышает чувствительность, т. е. позволяет уменьшить входной ток полного отклонения  $I_{\text{вх}} = I_n / K$ , где

$K$ —коэффициент усиления по току (рис. 13). Так, для измерительного механизма, имеющего параметры  $I_{и} = 50$  мкА и  $R_{и} = 2000$  Ом, при  $K = 10$  предел измерения  $I_{вх} = I_{и}/K = 50/10 = 5$  мкА, а при  $K = 25$  он равен  $I_{вх} = 50/25 = 2$  мкА. Таким образом, без усилителя прибором измеряют токи от 10 до 50 мкА, а с усилителем при  $K = 10$ —от 1 до 5 мкА и при  $K = 25$ —от 0,4 до 2 мкА.

В качестве УПТ наиболее широкое применение получили балансные (мостовые) схемы, одна из которых была показана на рис. 13. При включении питающего напряжения 9 В в параллельных коллекторных цепях проходят токи, зависящие от сопротивления резисторов смещения  $R1$  и  $R7$ .

Так как схема симметрична, коллекторные токи и напряжения транзисторов равны и стрелочный указатель устанавливается на нулевую отметку. При некоторой асимметрии для установки стрелочного указателя на нулевую отметку служит потенциометр  $R4$ . Резисторы  $R2$  и  $R5$  являются коллекторными нагрузками. Измеряемый ток создает на базах обоих транзисторов разноименные потенциалы, коллекторный ток и напряжение на коллекторе одного транзистора увеличиваются, а на коллекторе другого уменьшаются и образующаяся разность потенциалов вызывает отклонение указателя. Высокая стабильность балансной схемы и незначительная нестабильность нулевого положения указателя объясняются примерно одинаковым влиянием на оба транзистора изменения напряжения питания, температуры и других дестабилизирующих факторов. Резисторы  $R3$  и  $R6$  создают отрицательную обратную связь, которая также стабилизирует работу схемы. Для устойчивой работы схемы и повышения коэффициента усиления УПТ следует предварительно отобрать парные транзисторы с большими коэффициентами передачи тока (порядка 100–120) и малыми обратными коллекторными токами (менее 1 мкА).

Оценку электронного микроамперметра производят по входному току  $I_{вх}$ , вызывающему полное отклонение стрелочного указателя измерительного прибора и входному сопротивлению  $R_{вх}$ . Если к входным зажимам подвести напряжение  $U_{вх} = I_{вх} R_{вх}$ , входной ток  $I_{вх}$  вызовет полное отклонение указателя. Следовательно, прибор можно использовать также для измерения напряжений.

Параметры электронного микроамперметра  $U_{вх}$ ,  $R_{вх}$  и  $I_{вх} = U_{вх}/R_{вх}$  определяют опытным путем, для чего собирают схему, показанную на рис. 14. Плавно изменяя потенциометром  $R1$  постоянное напряжение  $U$ , подают его на делитель на-

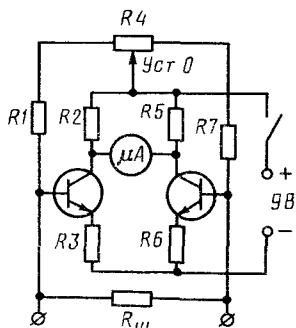


Рис. 13. Балансная схема усилителя постоянного тока с магнитоэлектрическим прибором

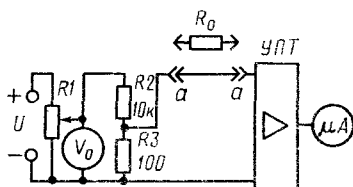


Рис. 14. Измерение параметров электронного микроамперметра

пряжения  $R2R3$  и контролируют образцовым вольтметром  $V_0$ . При сопротивлениях резисторов  $R2 = 10 \text{ кОм}$  и  $R3 = 100 \text{ Ом}$  входное напряжение УПТ равно  $1/100$  напряжения, измеренного образцовым вольтметром.

Напряжение полного отклонения  $U_{вх} = U_0/100$  определяют при включенной перемычке  $a-a$  и установке указателя микроамперметра  $\mu A$  на конечную отметку шкалы (например, при  $\alpha_{\max} = 100$  делений). Входное сопротивление  $R_{вх} = R_0 \alpha' / (\alpha_{\max} - \alpha)$  определяют при включенном вместо перемычки  $a-a$  резисторе  $R_0$ , отсчитывая показания  $\alpha$  по шкале микроамперметра  $\mu A$ . Сопротивление резистора  $R_0$  выбирают в пределах от 3 до 10 кОм.

Ток полного отклонения  $I_{вх} = U_{вх} / R_{вх}$ . Если значение  $I_{вх}$  получено не в виде целого числа, например равно 2,7 мкА, можно чувствительность уменьшить, для чего на входе включают шунтовой резистор  $R_{ш}$  и подбирают его сопротивление так, чтобы получить  $I_{вх}$  в виде целого числа, например 3 или 5 мкА, что сочетается со шкалой, разделенной на пять крупных делений. Включение шунтового резистора несколько изменяет входное сопротивление электронного микроамперметра, поэтому его следует измерить еще раз.

## § 12. Измерение постоянного напряжения магнитоэлектрическим прибором

Магнитоэлектрический прибор включают параллельно участку цепи, на котором действует измеряемое напряжение  $U_{изм}$  (рис. 15, а). Увеличение этого напряжения до  $U_n$  вызывает

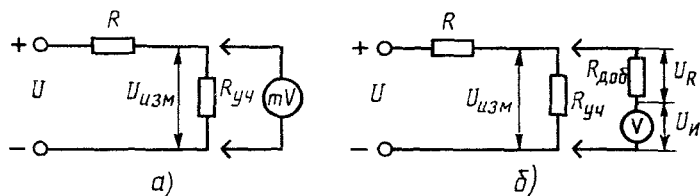


Рис. 15. Измерение постоянного напряжения:

а — магнитоэлектрическим прибором, б — магнитоэлектрическим прибором с добавочным резистором

возрастание показаний до полного отклонения указателя, следовательно, прибор является милливольтметром с пределом измерений  $U_{и}$ . Включение прибора вызывает некоторое уменьшение напряжения, поскольку уменьшается сопротивление участка цепи  $R_{уч}$  из-за его шунтирования сопротивлением  $R_{и}$  прибора. Этим уменьшением напряжения можно пренебречь и считать, что при включении прибора напряжение не изменилось, если  $R_{и} \gg R_{уч}$ . Дополнительная погрешность, вызванная влиянием включения прибора,  $\gamma = R_{уч} / (R_{уч} + R_{и})$ . Так, при  $R_{и} = 2000$  Ом дополнительная погрешность меньше 5% для участков цепи сопротивлением 100 Ом и ниже. В зависимости от чувствительности приборов их пределы измерений различны и обычно составляют 25–200 мВ (см. табл. 5).

Применение совместно с магнитоэлектрическим прибором добавочного резистора  $R_{доб}$  (рис. 15, б) позволяет измерять более высокие напряжения, т.е. расширить пределы измерений напряжений.

Добавочный резистор имеет сравнительно большое, точно подобранное сопротивление и включается последовательно магнитоэлектрическому прибору, который подключается параллельно исследуемому участку  $R_{уч}$ . Измеряемое напряжение разделяется на две неравные части: большая часть падает на  $R_{доб}$ , а меньшая вызывает отклонение указателя прибора. При полном отклонении указателя измеряемое напряжение достигает своего предельного значения  $U_{изм} = U_{пред} = U_R + U_{и}$ . Поскольку через  $R_{доб}$  и прибор проходит общий ток  $I_{и}$  и падение напряжения на добавочном резисторе  $U_R = I_{и} R_{доб}$ , соотношение напряжений  $U_R$  и  $U_{и}$  равно соотношению сопротивлений  $R_{доб}$  и  $R_{и}$ , т.е.  $U_R / U_{и} = I_{и} R_{доб} / (I_{и} R_{и}) = R_{доб} / R_{и}$ , откуда  $R_{доб} = U_R R_{и} / U_{и}$ . Учитывая, что  $U_R = U_{пред} - U_{и}$  и  $U_{и} = I_{и} R_{и}$ , получим  $R_{доб} = U_{пред} / I_{и} - R_{и}$ .



Следовательно, для расчета добавочного резистора следует знать параметры  $I_n$  и  $R_n$  измерительного механизма и выбрать предел измеряемого напряжения  $U_{\text{пред}}$ .

**Пример 5.** Рассчитаем сопротивление добавочных резисторов для пределов измерений 1 и 2,5 В. Параметры измерительного механизма:  $I_n = 50$  мкА и  $R_n = 2000$  Ом.

Для предела 1 В сопротивление  $R_{\text{доб}} = 1/0,05 - 2 = 18$  кОм. Для предела 2,5 В сопротивление  $R_{\text{доб}} = 2,5/0,05 - 2 = 48$  кОм.

Таким образом, чем больше выбранный предел измерения, тем больше должно быть сопротивление добавочного резистора.

Важным параметром вольтметра является входное сопротивление  $R_V = R_n + R_{\text{доб}}$ , которое определяют как отношение предела измеряемого напряжения к току полного отклонения, т.е.  $R_V = U_{\text{пред}}/I_n$ . В рассмотренном примере  $R_V = 20$  кОм на пределе измерения 1 В и  $R_V = 50$  кОм на пределе измерения 2,5 В. Следовательно, чем больше предел измерений, тем больше сопротивление  $R_{\text{доб}}$  и входное сопротивление. Для получения больших входных сопротивлений желательно применять измерительные механизмы большой чувствительности, т.е. имеющие малый ток полного отклонения  $I_n$ . В практике измерений для оценки вольтметра и расчета  $R_{\text{доб}}$  удобно пользоваться удельным входным сопротивлением  $R/U = 1/I_n$ . При этом входное сопротивление вольтметра определяют как произведение предела измерений на удельное входное сопротивление.

Точность показаний вольтметра зависит от точности подбора сопротивлений добавочных резисторов и их стабильности. В массовой измерительной аппаратуре широко используют непроволочные резисторы МЛТ, КИМ, КЛМ, КВМ, ОМЛТ и др., общим недостатком которых является зависимость стабильности сопротивления от температуры, влажности и времени. Для уменьшения нестабильности сопротивления резисторы подвергают искусственному старению и тренировке, пропуская номинальный ток в течение нескольких часов. В вольтметрах повышенной точности используют прецизионные резисторы С2-13 и С2-14 в керамическом герметизированном покрытом эмалью корпусе, имеющие номинальные сопротивления до 1 МОм с допустимыми отклонениями 0,1; 0,2... 2%.

Для подбора сопротивления добавочного резистора к вольтметру прикладывают предельное напряжение и выбирают из нескольких резисторов тот, при котором указатель устанавливается на конечную отметку шкалы.

Многопредельные вольтметры имеют несколько добавочных резисторов и служат для измерения различных напряжений. Возможны две схемы многопредельных вольтметров. В первой схеме, примененной в приборе Ц4315 (рис. 16, а), резисторы включены последовательно и при переключении пределов измерений сопротивления соответствующих резисторов суммируются. Так, для предела 1 В сопротивление  $R_{доб} = R_{12} + R_{13}$ , для предела 2,5 В —  $R_{доб} = R_{12} + R_{13} + R_{14}$ , для предела 5 В —  $R_{доб} = R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15}$  и т.д. Во второй схеме (рис. 16, б) на каждом пределе включен один добавочный резистор. В первой схеме подбор сопротивления добавочных резисторов более прост, поэтому ее используют чаще, однако нестабильность сопротивления одного из резисторов вызывает погрешность измерений на всех верхних пределах.

**Пример 6.** Рассчитаем сопротивление добавочных резисторов для схемы, показанной на рис. 16, а.

В качестве индикатора используется многопредельный амперметр с универсальным шунтом (см. рис. 12), включение которого эквивалентно включению прибора, имеющего ток полного отклонения  $I_u =$

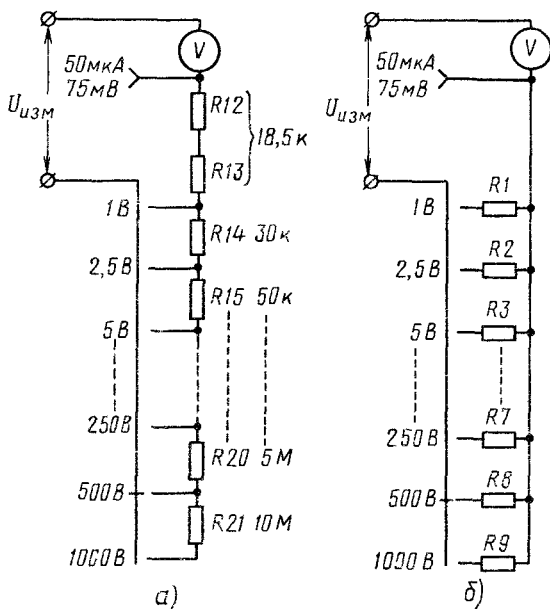


Рис 16. Схемы многопредельных вольтметров.

а — с последовательным включением добавочных резисторов, б — с переключением добавочных резисторов

$= 50 \text{ мкА}$  и внутреннее сопротивление  $R'_и = R_{25} + R_и R_{ш} / (R_и + R_{ш}) = 900 + 706 \cdot 4000 / (706 + 4000) = 1500 \text{ Ом}$  (сопротивления резисторов  $R_{25}$ ,  $R_и$  и  $R_{ш}$  взяты из примера 4).

Для предела 1 В сопротивление резисторов  $R_{12} + R_{13} = 1/0,05 - 1,5 = 18,5 \text{ кОм}$ , для предела 2,5 В  $R_{14} = 2,5/0,05 - 1,5 - 18,5 = 30 \text{ кОм}$ , для предела 5 В  $R_{15} = 5/0,05 - 1,5 - 18,5 - 30 = 50 \text{ кОм}$  и т. д.

Расчет резисторов упрощается, если определить удельное входное сопротивление  $R/U = 1/I_и = 1/0,05 = 20 \text{ кОм/В}$  и умножить его на разность значений соседних пределов.

Так, для предела 2,5 В сопротивление резистора  $R_{14} = (2,5 - 1) \cdot 20 = 30 \text{ кОм}$ , для предела 5 В  $R_{15} = (5 - 2,5) \cdot 20 = 50 \text{ кОм}$ , для предела 10 В  $R_{16} = (10 - 5) \cdot 20 = 100 \text{ кОм}$  ... для предела 1000 В  $R_{21} = (1000 - 500) \cdot 20 = 10\,000 \text{ кОм} = 10 \text{ МОм}$ .

Если последний предел измерения 1000 В недостаточен, следует ввести дополнительный, например 2500 В, подключив внешний резистор, сопротивление которого  $R_{\text{внеш}} = (2500 - 1000) \cdot 20 = 30\,000 \text{ кОм} = 30 \text{ МОм}$ .

Недостаток таких вольтметров — различные на разных пределах измерений сравнительно низкие входные сопротивления (особенно на нижних пределах).

### § 13. Измерение постоянного напряжения электронными приборами

**Электронный милливольтметр с УИТ на биполярных транзисторах.** Схема усилителя постоянного тока с магнитоэлектрическим прибором, показанная на рис. 13, может быть применена в качестве электронного милливольтметра, если ее подключить, как показано на рис. 15, параллельно участку цепи, на котором действует измеряемое напряжение. Допустим, параметры схемы равны, например  $I_{\text{вх}} = 5 \text{ мкА}$ ,  $R_{\text{вх}} = 5 \text{ кОм}$  и  $U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} R_{\text{вх}} = 5 \cdot 5 = 25 \text{ мВ}$ . Такой электронный милливольтметр можно использовать для измерения напряжений до 25 мВ.

Применение электронного милливольтметра совместно с добавочными резисторами позволяет получить милливольтметр-вольтметр с пределами измерений 25, 100 и 250 мВ; 1; 2,5; 10; 25; 100; 250 и 1000 В (рис. 17). Удельное входное сопротивление такого милливольтметра  $R/U = 1/I_{\text{вх}} = 1/5 \cdot 10^{-3} = 200 \text{ кОм/В}$ . Включенные последовательно, как показано на рис. 16, а, добавочные резисторы имеют сопротивления: для предела 100 мВ —  $R_1 = (100 - 25) 10^{-3} \cdot 200 = 15 \text{ кОм}$ , для предела 250 мВ —  $R_2 = (250 - 100) 10^{-3} \cdot 200 = 30 \text{ кОм}$ , для предела 1 В —  $R_3 = (1000 - 250) 10^{-3} \cdot 200 = 150 \text{ кОм}$ , для предела 2,5 В —  $R_4 = (2,5 - 1) \cdot 200 = 300 \text{ кОм}$  и т. д.

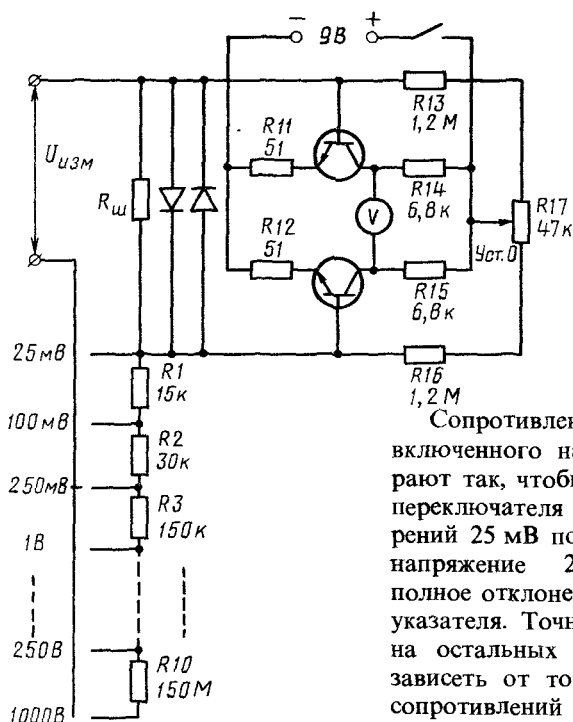


Рис. 17. Схема электронного милливольтметра-вольтметра

Сопротивление шунта  $R_{ш}$ , включенного на входе, подбирают так, чтобы при установке переключателя на предел измерений 25 мВ поданное на вход напряжение 25 мВ вызвало полное отклонение стрелочного указателя. Точность измерений на остальных пределах будет зависеть от точности подбора сопротивлений добавочных резисторов  $R1-R10$ .

Применение усилителя постоянного тока позволяет увеличить удельное входное сопротивление, однако основной

недостаток вольтметров с добавочными резисторами — изменение входного сопротивления на разных пределах — остается. Представляет также известные трудности подбор высокоомных добавочных резисторов, имеющих сопротивление единицы, десятки и особенно сотни мегаом, стабильность которых весьма низка.

**Электронный вольтметр с ламповым УПТ.** Усилители постоянного тока на лампах, применяемые в электронных вольтметрах прежних выпусков, имеют большое входное сопротивление, что является их достоинством. Кроме того, ламповые УПТ менее критичны, чем транзисторные, к уровню входного сигнала, т. е. выдерживают многократные перегрузки.

В последних выпусках ламповых электронных вольтметров применен двухкаскадный УПТ (рис. 18). В первом каскаде ка-

тодный резистор  $R_{12}$  является общим для обоих триодов, что создает глубокую отрицательную обратную связь и весьма слабую зависимость баланса от изменения напряжений на анодах и сетках ламп. Резисторы  $R_5$  и  $R_7$  — анодные нагрузки триодов первого каскада. Выходные напряжения через делители  $R_2, R_3, R_4$  и  $R_9, R_{10}, R_{11}$  поступают на сетки триодов второго каскада, катодными нагрузками которых являются резисторы  $R_6$  и  $R_8$ . Приблизленную и точную установку указателя на нуль производят потенциометрами  $R_3$  и  $R_{10}$ , изменяя смещение на сетках триодов второго каскада. Усилитель имеет очень низкое выходное сопротивление, поэтому выходное напряжение полностью поступает на индикаторную цепь, состоящую из магнитоэлектрического механизма и резистора  $R_{доб}$ . Изменения параметров и старение ламп не влияют на градуировку шкалы прибора. Схема имеет высокую стабильность режима, т.е. коэффициент усиления и установленное нулевое положение указателя весьма мало зависят от изменений напряжения анода и накала.

**Электронный вольтметр с УПТ на полевых транзисторах.** Полевые транзисторы по принципу действия отличаются от биполярных. Если в биполярных транзисторах выходной коллекторный ток управляется изменением входного тока, то в полевых, так же как и в электронных лампах, выходной ток (ток стока) управляется изменением входного напряжения и созданным им электрическим полем. При этом входной ток отсутствует, следовательно, входное сопротивление очень велико (порядка сотен мегаом и выше).

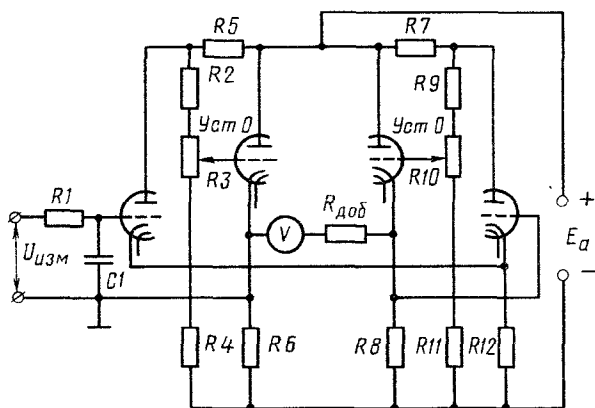


Рис 18. Схема электронного вольтметра с двухкаскадным УПТ

Балансная (мостовая) схема УПТ на полевых транзисторах электронного вольтметра (рис. 19) представляет собой два истоковых повторителя с истоковыми нагрузками, в качестве которых служат резисторы  $R_2$  и  $R_4$ , сопротивления которых суммируются с частями сопротивления переменного резистора  $R_3$ . На стоки обоих транзисторов подается напряжение  $E_c = 4,5$  В. Подбор транзисторов с примерно равными токами стока позволяет устанавливать с помощью потенциометра  $R_3$  стрелочный указатель на нулевую отметку. Резисторы  $R_1$  и  $R_5$  и конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  подключены к затворам транзисторов и являются фильтрами для сглаживания пульсаций измеряемого напряжения и устранения наводок. Измеряемое напряжение, приложенное к затворам транзисторов, нарушает баланс схемы и вызывает отклонение указателя прибора. Чрезмерно большие измеряемые напряжения не вызывают повреждений транзисторов, так как сопротивление стабилитрона  $D$  резко падает и напряжение на входе ограничивается.

Схема УПТ на полевых транзисторах, сохраняя все достоинства схемы УПТ на электронных лампах, в частности очень большое входное сопротивление, выгодно отличается от нее небольшими габаритами и массой, высокой температурной стабильностью, а также малым потребляемым током от низковольтного источника и является наиболее перспективной при конструировании электронных вольтметров.

Для всех приведенных транзисторных и ламповых схем при  $R_{доб} = 0$  измеряемое напряжение  $U_{вх}$ , вызывающее полное отклонение указателя, равно примерно 0,2–0,4 В. Подбором сопротивления добавочного резистора  $R_{доб}$  устанавливают более удобное значение первого предела, равное, например, 0,5 или 1 В. Входное сопротивление  $R_{вх}$  этих схем очень велико (поряд-

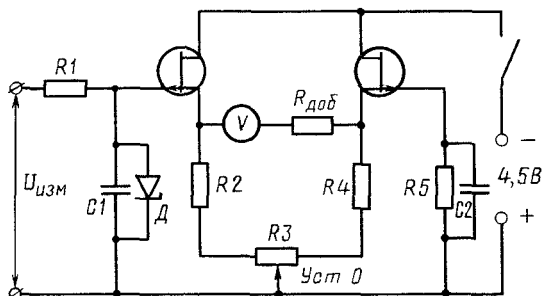


Рис. 19. Схема электронного вольтметра с балансным УПТ на полевых транзисторах

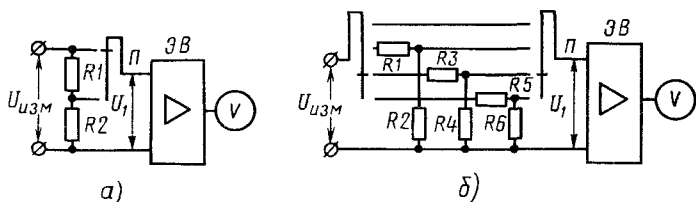


Рис. 20. Схемы электронного вольтметра с делителями измеряемого напряжения:

а — одним, б — тремя

ка сотен мегаом), поэтому расширить пределы измерений с помощью добавочных резисторов не представляется возможным.

Для расширения пределов измерений и получения многопредельных вольтметров используют входные делители измеряемого напряжения. При одном делителе, состоящем из двух резисторов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 20, а), можно получить два предела измерений  $U_1$  и  $U_2$ , выбираемых переключателем  $\Pi$  на два положения. Для предела  $U_1$  коэффициент деления  $\alpha_1 = 1$ , а для предела  $U_2$  коэффициент деления  $\alpha_2 = U_1/U_2 = R_2/(R_1 + R_2)$ , т. е. измеряемое напряжение поступает на вход УПТ полностью или уменьшенное в  $1/\alpha_2$  раз.

На первом пределе входное сопротивление вольтметра  $R_V$  определяют как суммарное сопротивление резисторов  $R_1 + R_2$  и параллельного им входного сопротивления  $R_{вх}$ , т. е.  $R_V = (R_1 + R_2)R_{вх}/(R_1 + R_2 + R_{вх})$ . На втором пределе его определяют как сумму сопротивлений резистора  $R_1$  и соединенных параллельно резисторов  $R_2$  и  $R_{вх}$ , т. е.  $R_V = R_1 + R_2R_{вх}/(R_2 + R_{вх})$ .

Поскольку  $R_{вх}$  порядка сотен мегаом, суммарное сопротивление  $R_1 + R_2$  выбирают равным 10–20 МОм, тогда сопротивление вольтметра  $R_V = R_1 + R_2$ . Таким образом, входное сопротивление вольтметра определяется суммарным сопротивлением резисторов делителя, и шунтирующим влиянием сопротивления  $R_{вх}$  можно пренебречь.

Несколько делителей измеряемого напряжения, например три, переключаемых переключателем  $\Pi$  так, как показано на рис. 20, б, позволяют получить трехпредельный вольтметр.

**Пример 7.** Рассчитаем сопротивления резисторов делителей напряжений, выбрав пределы измерений  $U_1 = 1$  В,  $U_2 = 2,5$  В.  $U_3 = 10$  В и  $U_4 = 25$  В и входное сопротивление вольтметра  $R_V = 10$  МОм.

При пределе  $U_1 = 1$  В делители отключены и измеряемое напряжение полностью поступает на вход УПТ. Коэффициент деления  $\alpha_1 = 1$

При пределе  $U_2 = 2,5$  В коэффициент деления  $\alpha_2 = U_1/U_2 = 1/2,5 = R_2/(R_1 + R_2)$ . Входное сопротивление  $R_V = R_1 + R_2 = 10$  МОм, откуда  $R_2 = 10/2,5 = 4$  МОм, а  $R_1 = 10 - 4 = 6$  МОм.

При пределе  $U_3 = 10$  В коэффициент деления  $\alpha_3 = U_1/U_3 = 1/10 = R_4/(R_3 + R_4)$  и  $R_V = R_3 + R_4 = 10$  МОм, откуда  $R_4 = 10/10 = 1$  МОм, а  $R_3 = 10 - 1 = 9$  МОм.

При пределе  $U_4 = 25$  В коэффициент деления  $\alpha_4 = U_1/U_4 = 1/25 = R_6/(R_5 + R_6)$  и  $R_V = R_5 + R_6 = 10$  МОм, откуда  $R_6 = 10/25 = 0,4$  МОм, а  $R_5 = 10 - 0,4 = 9,6$  МОм.

Многопредельный делитель измеряемого напряжения состоит из нескольких резисторов  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4 \dots$ , включенных последовательно (рис. 21). Коэффициенты деления для каждого положения переключателя пределов  $\Pi$  соответственно равны  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = (R_2 + R_3 + R_4)/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$ ,  $\alpha_3 = (R_3 + R_4)/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$  и  $\alpha_4 = R_4/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$ .

Рассчитать сопротивления резисторов можно по формуле  $R_n = R_V U_1 (U_{n+1} - U_n)/(U_{n+1} U_n)$  (где  $R_V = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$  — входное сопротивление вольтметра,  $U_1 = 1$  В — первый предел измерения,  $U_n$  и  $U_{n+1}$  — предельные напряжения для рассчитываемого и последующего пределов измерения). Приведенные на рис. 21 сопротивления резисторов делителя рассчитаны, исходя из условий, выбранных в примере 7, и обеспечивают требуемые коэффициенты деления  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 1/2,5$ ;  $\alpha_3 = 1/10$  и  $\alpha_4 = 1/25$ . Недостатки таких делителей — неточность и нестабильность коэффициента деления — объясняются применением нестабильных высокоомных резисторов, точный подбор сопротивлений которых практически невозможен. Обычно каждый резистор составляют из двух-трех и точную регулировку сопротивления выполняют подстроечным резистором.

Многопредельный вольтметр можно также получить переключением добавочных резисторов  $R_{доб}$  в выходной цепи УИТ

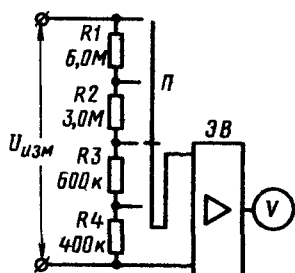


Рис. 21. Схема электронного вольтметра с многопредельным делителем измеряемого напряжения

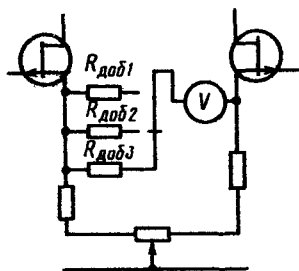


Рис. 22. Схема электронного вольтметра с переключением добавочных резисторов



(рис. 22), сопротивления которых сравнительно невелики (порядка единиц и десятков килоом). Это позволяет использовать непроволочные и проволочные резисторы, сопротивления которых могут быть подобраны с требуемой точностью.

В промышленных электронных вольтметрах для расширения пределов измерений применяют оба способа, причем нижние пределы измерений получают переключением добавочных резисторов на выходе УПТ, а верхние — включением делителя измеряемого напряжения на его входе.

**Защита от перегрузок.** В процессе работы с многопредельными вольтметрами в результате ошибки или неконтролируемых явлений в испытываемой аппаратуре подаваемое на вольтметр напряжение может значительно превысить установленный предел измерения, вызвать чрезмерную перегрузку и повредить транзисторы и измерительный механизм. Поэтому приборы защищают от перегрузок, включая параллельно входу кремниевые диоды.

Особенностью кремниевого диода является то, что при малых прямых напряжениях он не открывается и его прямое сопротивление велико (порядка единиц и десятков мегаом). При увеличении прямого напряжения выше 0,6–0,8 В диод открывается, его прямой ток возрастает, а прямое сопротивление снижается до десятков ом.

Схема защиты приборов от перегрузок с одним диодом показана на рис. 23, а. Диод  $D$  и ограничительный резистор  $R$ , сопротивление которого значительно больше прямого сопротивления открытого диода, составляют делитель напряжения. При малых напряжениях прямое сопротивление диода много больше сопротивления резистора  $R$  и входное напряжение полностью поступает на прибор. При перегрузках диод открывается, его прямое сопротивление уменьшается и входное напряжение почти полностью падает на резисторе  $R$ , в то время как напряжение на диоде, т.е. на входе прибора, не превышает безопасного значения.

Схему защиты приборов от перегрузок с двумя диодами  $D1$  и  $D2$ , включенными встречно-параллельно (рис. 23, б), применяют в тех случаях, когда прибором измеряют напряжение как положительной, так и отрицательной полярности.

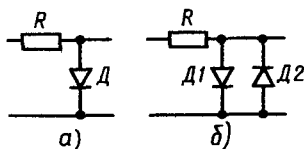


Рис. 23. Схемы защиты приборов от перегрузок:  
а — с одним диодом, б — с двумя

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляют к амперметрам и вольтметрам и как их подключают при измерении тока и напряжения?
2. Как измеряют постоянный ток магнитоэлектрическим прибором и рассчитывают шунты?
3. Как измеряют малые постоянные токи электронным микроамперметром?
4. Как измеряют постоянное напряжение магнитоэлектрическим прибором и рассчитывают добавочные резисторы?
5. Каково устройство электронных вольтметров постоянного тока и чем они отличаются от магнитоэлектрических?
6. Как расширяют пределы измерений напряжений и рассчитывают делители?
7. Как защищают приборы от перегрузок?

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

#### § 14. Общие сведения

Для переменных токов и напряжений характерно изменение с определенной периодичностью соответственно направления и полярности. Количество периодов в секунду, т.е. частота электрических колебаний, может быть различно — от долей герца до десятков гигагерц. К диапазону низких частот относят частоты от долей герца до 100 кГц (звуковые — до 20 кГц), высоких — от 100 кГц до 30 МГц и сверхвысоких — от 30 МГц до 30 ГГц. Сверхвысокочастотный диапазон, в свою очередь подразделяют на поддиапазоны метровых (МВ), дециметровых (ДМВ) и сантиметровых (СМВ) волн, граничные частоты которых соответственно составляют от 30 до 300 МГц, от 300 до 3000 МГц и от 3000 МГц = 3 ГГц до 30 ГГц.

Токи и напряжения промышленной частоты 50 Гц измеряют электромагнитными, электро- и ферродинамическими приборами, а также магнитоэлектрическими совместно с преобразователями переменного тока в постоянный.

Токи и напряжения низких частот в основном измеряют приборами выпрямительной системы — магнитоэлектрическими с диодами. Приборы электромагнитной и ферродинамической систем находят ограниченное применение, поскольку их частотная погрешность с увеличением частоты возрастает.

Токи высокой частоты измеряют термоэлектрическими приборами — магнитоэлектрическими с термопреобразователями.

Напряжения высоких и низких частот измеряют электронными вольтметрами.

Оценить переменный ток и напряжение можно по их амплитудному  $I_m$  и  $U_m$ , среднеквадратичному, или действующему  $I_d$  и  $U_d$ , и средневыпрямленному  $I_{cp}$  и  $U_{cp}$  значениям. В электротехнике наиболее часто производят оценку по действующему значению.

При синусоидальной форме напряжения его действующее значение (рис. 24, а)  $U_d = U_m/\sqrt{2} = 0,707U_m$ , а средневыпрямленное при одно- и двухполупериодном выпрямлении (рис. 24, б)  $U_{cp} = U_m/\pi = 0,318U_m$  и  $U_{cp} = 2U_m/\pi = 0,637U_m$  (коэффициенты определены математически, исходя из условия равенства приведенных на рис. 24, а, б заштрихованных фигур и соответствующих им прямоугольников). Коэффициент формы  $K_f$  напряжения определяют как отношение действующего напряжения к средневыпрямленному и при синусоидальном напряжении  $K_f = U_d/U_{cp} = 0,707U_m/0,637U_m = 1,11$ . При других формах напряжения он может иметь другие значения.

Действующие переменные токи и напряжения измеряют электромагнитными приборами, которые могут быть щитовыми или переносными. Щитовые амперметры и вольтметры имеют один предел измерений, а переносные могут быть многопредельные, для чего переключаются секции катушки измерительного механизма. Так, два предела измерений можно получить, переключая две секции катушки с последовательного соединения на параллельное. Для расширения пределов измерений однопредельных амперметров используют измеритель-

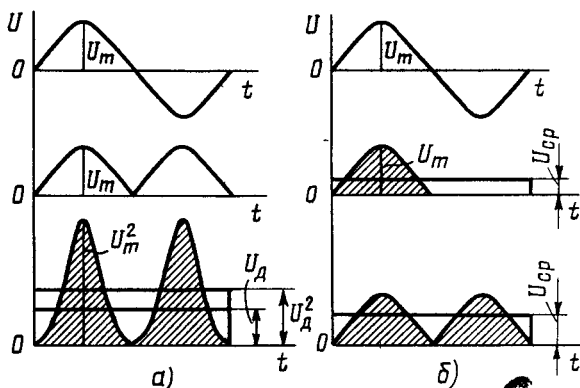


Рис. 24. Действующее (а) и средневыпрямленное (б) переменные напряжения синусоидальной формы

ный трансформатор тока. Применение шунтов возможно только в высокочувствительных приборах. Для расширения пределов измерений однопределных вольтметров используют безреактивные добавочные резисторы или измерительный трансформатор напряжения.

Кроме того, действующие переменные токи и напряжения измеряют электродинамическими переносными амперметрами и вольтметрами с одним или несколькими пределами измерений. Неподвижную и подвижную катушки вольтметров и высокочувствительных амперметров соединяют последовательно, а низкочувствительных амперметров — параллельно. Расширяют пределы измерений однопределных вольтметров и амперметров так же, как электромагнитных приборов. Широко используются амперметры на два предела измерений, которые получают последовательным или параллельным соединением неподвижной и подвижной катушек. Многопределные вольтметры имеют несколько добавочных резисторов, выполненных в виде намотки манганиновой проволоки на каркас из изоляционного материала.

При повышении частоты переменного тока реактивные сопротивления измерительных приборов изменяются и возникают резонансные явления. Например, амперметр, эквивалентная схема которого показана на рис. 25, имеет собственные индуктивность  $L_A$  и емкость  $C_A$ , а также емкости  $C$  между клеммами и корпусом, которые хотя и невелики, но оказывают влияние на высоких частотах. При этом емкостные сопротивления уменьшаются, а индуктивное — возрастает, все большая часть измеряемого тока минует прибор и растет частотная погрешность. Собственные индуктивность и емкость амперметра являются колебательным контуром, поэтому резонансные явления на частотах, близких к резонансной, значительно искажают показания. Таким образом, на высоких частотах следует использовать приборы, имеющие малые собственные емкости и индуктивности.

Для каждого конкретного прибора обычно указывается частотный диапазон, в котором его можно применять с наибольшей допустимой частотной погрешностью. При измерениях на постоянном токе и переменном промышленной частоты 50 Гц

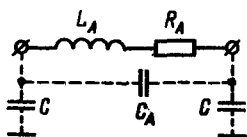


Рис. 25. Эквивалентная схема амперметра

место включения амперметра в цепь значения не имеет. При измерениях на высокой частоте следует включать амперметр в участки цепи, имеющие соединение на корпус (рис. 26), тогда действие емкости между одним зажимом и корпусом исключается, а вторая оказывается соединенной параллельно емкости прибора  $C_A$ . При этом ток утечки незначителен, поскольку он возникает под действием весьма малой разности потенциалов между зажимами прибора.

При измерениях напряжений высоких частот основное влияние оказывает входная емкость  $C_{вх}$  электронного вольтметра (рис. 27), шунтирующая его входное сопротивление  $R_{вх}$ , а также собственная индуктивность подводящих проводов  $L_{пров}$ . При возрастании частоты переменного тока уменьшается реактивное сопротивление входной емкости, возрастает ток утечки через нее, что вызывает снижение показаний вольтметра. Поскольку входные сопротивления вольтметров очень велики (порядка единиц и десятков мегаом), то даже небольшие входные емкости вызывают значительные частотные погрешности. Индуктивность подводящих проводов  $L_{пров}$  и входная емкость  $C_{вх}$  представляют собой последовательный колебательный контур, поэтому на высоких частотах, близких к резонансной, показания вольтметра будут завышены.

Для уменьшения частотной погрешности и расширения диапазона частот входную часть вольтметра конструируют так, чтобы снизить входную емкость и уменьшить длину подводящих проводов. В некоторых конструкциях вольтметров входной частью служит истоковый, эмиттерный или катодный повторитель, имеющий большое входное и малое выходное сопротивление, который монтируют в выносной головке, соединенной с прибором кабелем 0,5–1 м. Выносную головку приближают вплотную к объекту измерений, что резко снижает длину подводящих проводов. Такая конструкция позволяет

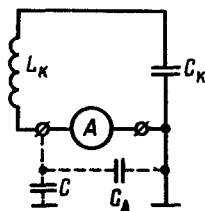


Рис. 26. Включение амперметра при измерениях на высокой частоте

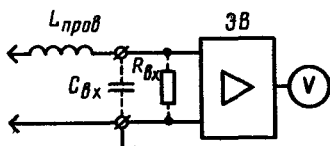


Рис. 27. Эквивалентная схема входной части электронного вольтметра переменного тока

расширить частотный диапазон до нескольких мегагерц. На более высоких частотах применяют вольтметры, в выносной головке которых смонтирован измерительный выпрямитель, который преобразует измеряемое переменное напряжение в постоянное, подаваемое по кабелю непосредственно в прибор на усилитель постоянного тока. Частотный диапазон таких вольтметров достигает сотен мегагерц.

### § 15. Приборы термоэлектрической системы

В термоэлектрических приборах, представляющих собой соединение одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом (рис. 28), используется явление термоэфекта, заключающееся в том, что при нагреве двух соединенных концов термопары (отрезков 2 проводов из разных металлов) на двух других ее концах появляется постоянная термо-эдс, вызывающая отклонение указателя. Нагревателем служит тонкая проволока 1, по которой проходит измеряемый переменный ток. Значение этого тока отсчитывают по шкале амперметра А.

Для увеличения термо-эдс отрезки проводов термопар изготовляют из таких пар металлов и сплавов, как железо-константан, нихром-константан, хромель-копель, хромель-алюмель, допускающих длительный нагрев до 800–1000°С. При этом термо-эдс составляет 20–50 мВ. В качестве нагревателей используют провода из нихрома, платино-иридиевого сплава, константана и других термостойких сплавов. Холодные концы термопар соединяют с массивными латунными зажимами 3, что улучшает отвод тепла и стабилизирует температуру.

Контактные термопреобразователи (рис. 28, а), спай термопары которых приварен к нагревателю, применяют для измерения переменного тока в диапазоне частот до 5–10 МГц. На более высоких частотах появляется значительная утечка измеряемого тока через собственную емкость между измерительным механизмом и корпусом.

Бесконтактные термопреобразователи (рис. 28, б) применяют на частотах от 10 до 200 МГц. Спай термопары и нагреватель 1 разделены прослойкой из изоляционного теплопроводящего материала 4 (стекло, керамика, оксид металла и др.). При этом утечка измеряемого тока высокой частоты резко снижается, так как емкость между нагревателем и термопарой весьма мала (меньше 0,5–1 пФ). Для увеличения термо-эдс при бесконтактном нагреве применяют несколько последовательно соединенных термопар (рис. 28, в).

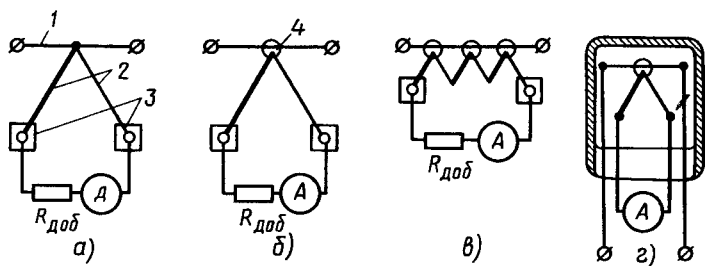


Рис. 28 Термoeлектрические амперметры с термопреобразователями:

а — контактным, б, в — одним и несколькими бесконтактными, г — вакуумным

Вакуумные термопреобразователи (рис. 28, г) позволяют повысить чувствительность термоэлектрического прибора и измерять токи меньше 50–100 мА. Отсутствие воздуха вокруг термопреобразователя уменьшает теплоотдачу, поэтому достаточный нагрев обеспечивается при малых измеряемых токах. Наименьший предел измерения тока 1 мА.

Термопреобразователь может быть размещен внутри футляра измерительного механизма или вне его. Термоэлектрические приборы с внешними термопреобразователями удобны, так как позволяют подключать нагреватель к цепи измеряемого тока короткими соединительными проводами, а измерительный механизм располагать на достаточном расстоянии в удобном для наблюдения месте.

Основным достоинством термоэлектрических приборов являются малые индуктивность и емкость нагревателя, включаемого в цепь измеряемого тока, что позволяет применять их для измерения токов высокой частоты. Однако они имеют серьезные недостатки: невысокую чувствительность, квадратичный характер шкалы, влияние изменений внешней температуры на показания прибора, а также сгорание термопреобразователя при незначительных перегрузках.

Щитовые термоамперметры Т4 и Т5 с наружными контактными термопреобразователями используют для измерения токов до 10 А в диапазоне частот до 7,5 МГц с погрешностью до 5%. Лабораторный термоамперметр Т13 с бесконтактным термопреобразователем Т-103 применяют для измерения токов до 3 А в диапазоне частот до 50 МГц с погрешностью 1,5%, а с вакуумным бесконтактным термопреобразователем Т-102 — от 1 до 500 мА.

Термоэлектрические приборы пригодны также для измерений токов низкой частоты, поэтому их регулируют и градуи-

руют на переменном токе промышленной частоты 50 Гц. Требуемые пределы измерений устанавливают подбором сопротивления добавочного резистора  $R_{доб}$ , включаемого последовательно магнитоэлектрическому измерительному механизму.

## § 16. Приборы выпрямительной системы

Основной частью приборов выпрямительной системы являются измерительные выпрямители среднечередного, действующего или амплитудного переменного напряжения, которые состоят из одного или нескольких диодов и магнитоэлектрического измерительного механизма. Измеряемое переменное напряжение выпрямляется полупроводниковым или ламповым диодом, при этом в цепи измерительного механизма проходит постоянный ток, вызывающий отклонение его подвижной системы и указателя.

Наиболее широко используются полупроводниковые точечные германиевые диоды, выдерживающие прямые токи до нескольких десятков миллиампер и обратные напряжения до десятков и сотен вольт. Ламповые диоды имеют более стабильные параметры, но требуют питания цепи накала и применяются в основном в электронных вольтметрах. Характер проводимости германиевого диода можно определить с помощью вольтамперной характеристики (рис. 29), из которой видно, что при малых прямых напряжениях (примерно до 0,5 В) зависимость тока от напряжения имеет квадратичный характер, т. е.  $I_{пр} \approx mU_{пр}^2$  (где  $m$  — постоянный коэффициент), а при больших прямых напряжениях (выше 0,5 В) — линейный характер, т. е.  $I_{пр} \approx mU_{пр}$ . Очень малые прямые напряжения (примерно до 0,2 В) не открывают диод и прямого тока нет. Обратные

напряжения (порядка десятков и даже сотен вольт) вызывают в цепи диода очень малые обратные токи, которые можно не учитывать.

Основная погрешность выпрямительных приборов обычно составляет 1,5–4%, выражается в процентах от конечного значения шкалы, определяется при нормальных

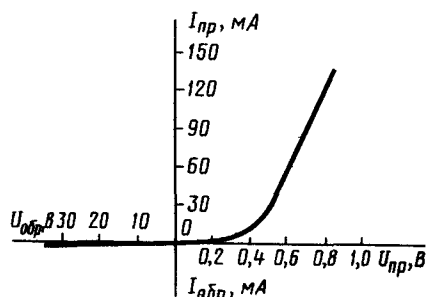


Рис. 29. Вольтамперная характеристика германиевого диода



значениях влияющих величин, т.е. при температуре  $(20 \pm 5)^\circ \text{C}$  и синусоидальной форме напряжения частотой  $(50 \pm 5)$  Гц и зависит от разброса параметров диодов, их нестабильности, а также точности подбора добавочных резисторов, шунтов и градуировки шкалы. Для выпрямительных приборов характерна температурная погрешность, вызванная изменением прямого и обратного сопротивления диодов при изменении температуры. Собственная емкость точечных диодов очень мала (меньше 1–2 пФ), потому их применяют в очень широком диапазоне частот: от низких до сверхвысоких. Частотный диапазон выпрямительных приборов достигает 10–20 кГц и ограничивается наличием собственных индуктивностей и емкостей других элементов приборов: шунтов, добавочных резисторов, переключателей, соединительных проводов и т.д. На высоких и сверхвысоких частотах выпрямительные приборы служат как индикаторы и позволяют определять точную настройку контуров в резонанс по максимуму показаний.

В паспорте выпрямительных приборов обычно указываются погрешности: дополнительные температурная (порядка 1,5–3% на каждые  $10^\circ \text{C}$  изменения температуры) и частотная (порядка 1,5–4% для частот в указанных границах диапазона).

Шкалы выпрямительных приборов с выпрямителем средневывпрямленного напряжения градуируют в действующих значениях переменного напряжения синусоидальной формы. При других формах измеряемого напряжения в показаниях прибора появляется погрешность, зависящая от того, насколько коэффициент формы  $K_f$  отличается от 1,11.

Измерительные выпрямители средневывпрямленного напряжения могут быть одно- и двухполупериодные.

Однополупериодные с одним диодом  $D$  (рис. 30, а) используют на высоких и сверхвысоких частотах в качестве индикатора резонанса при контроле напряжений контура, однополупериодные с двумя диодами (рис. 30, б) позволяют пропустить обратную волну переменного тока через диод  $D2$  и резистор  $R$ , имеющий сопротивление, равное сопротивлению измерительного механизма  $R_n$ , и этим устранить недостатки предыду-

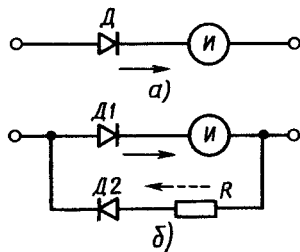


Рис. 30. Однополупериодные выпрямители средневывпрямленного напряжения с диодами:

а — одним, б — двумя

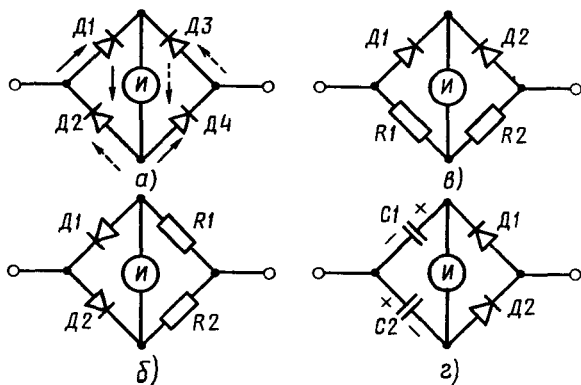


Рис. 31. Двухполупериодные мостовые выпрямители средневыврямленного напряжения с четырьмя диодами (а), параллельный (б), последовательный (в) и с удвоением напряжения (г) с двумя диодами

щей схемы, т.е. выравнять сопротивление схемы для токов обоих направлений и устранить перенапряжение на диоде  $D1$  в тот полупериод, когда он закрыт.

Двухполупериодные мостовые с четырьмя диодами (рис. 31, а) позволяют удвоить чувствительность прибора, поскольку ток через измерительный механизм проходит (как это показано на рис. 31, а стрелками) в течение обоих полупериодов переменного напряжения. В мостовых параллельных (рис. 31, б) и последовательных (рис. 31, в) вместо двух диодов включены резисторы  $R1$  и  $R2$ , поэтому они не требуют тщательного подбора одинаковых по параметрам диодов и градуировка шкал при замене диодов более стабильна. По чувствительности эти выпрямители уступают выпрямителям с четырьмя диодами, так как часть выпрямленного тока минует измерительный механизм. Двухполупериодные мостовые выпрямители с удвоением напряжения (рис. 31, г) позволяют получить наибольшую чувствительность. В один полупериод происходит заряд конденсатора  $C1$  через открытый диод  $D1$ , а в другой — заряд конденсатора  $C2$  через открытый диод  $D2$ . Напряжения на конденсаторах постоянны и соответствуют амплитудному значению переменного напряжения. К измерительному механизму прикладывается суммарное напряжение конденсаторов, соединенных последовательно.

Анализируя характер шкал, показанных на рис. 32, а–г, можно заметить, что наиболее равномерную шкалу, удобную

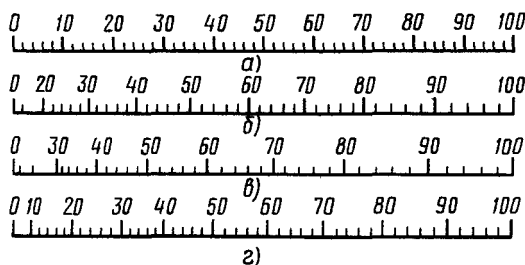


Рис. 32. Характер шкал измерительного механизма:

а — на постоянном токе, б, в, г — на переменном токе для схем, показанных на рис. 30, б, 31, а и 31, б, в

для отсчета (рис. 32, г), можно получить, применив мостовую параллельную или последовательную схему. Однополупериодные схемы также позволяют получить достаточно равномерный характер большей части шкалы (рис. 32, б). Неравномерный начальный участок шкалы (рис. 32, в) наиболее велик при использовании мостовой схемы с четырьмя диодами.

Измерительные выпрямители действующего переменного напряжения, или квадратичные вольтметры, имеют довольно сложную схему (рис. 33), в которой применены широкополосный трансформатор  $Tr$  со средней точкой во вторичной обмотке и двухполупериодный выпрямитель измеряемого напряжения на диодах  $D1$  и  $D2$ . Для получения квадратичной зависимости тока измерительного механизма  $I$  от приложенного напряжения последовательно ему включают диодную цепочку, состоящую из нескольких звеньев (на рис. 33 — четырех). Резисторы  $R3$ ,  $R5$ ,  $R7$  и  $R9$  делителей напряжения источника питания  $E$  каждого звена подобраны так, чтобы создать на резисторах  $R2$ ,  $R4$ ,  $R6$  и  $R8$  увеличивающиеся постоянные напряжения, соответственно запирающие диоды  $D3$ ,  $D4$ ,  $D5$  и  $D6$ . При увеличении измеряемого напряжения диоды  $D3$ ,  $D4$  и  $D5$  поочередно открываются и их токи, определяемые линейным участком характеристики, суммируются с током, определяемым квадратичным участком характеристики открывающегося послед-

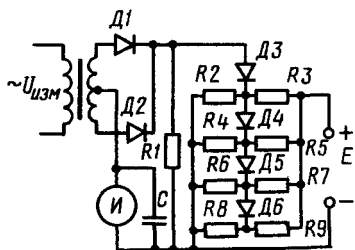


Рис. 33. Схема измерительного выпрямителя действующего напряжения

ним диода Д6. Шкалу измерительного механизма градуируют в действующих значениях синусоидального напряжения, и эта градуировка справедлива при любой другой форме измеряемого напряжения. Такие вольтметры являются единственно пригодными для измерения напряжений сложной формы и напряжений шумов.

Измерительный выпрямитель амплитудного значения переменного напряжения, или амплитудный выпрямитель, выполняют по схеме с закрытым входом (рис. 34, а). В положительный полупериод измеряемого переменного напряжения  $U_{изм}$  (рис. 34, б) диод открыт и конденсатор  $C$  заряжается до напряжения  $U_c$ . В момент  $t_1$  мгновенное значение измеряемого напряжения становится равным  $U_c$  и диод закрывается. В течение времени от  $t_1$  до  $t_2$  диод закрыт и конденсатор медленно разряжается через большое сопротивление нагрузочного резистора  $R$ . В отрезок времени от  $t_2$  до  $t_3$  диод снова открывается, конденсатор подзарядается, напряжение  $U_c$  возрастает и т.д.

После нескольких периодов постоянное напряжение на конденсаторе  $U_c$  вырастает и становится почти равным амплитудному значению измеряемого напряжения  $U_m$ . При большом сопротивлении резистора  $R$  ток через него  $I = U_c/R \approx U_m/R$ . Таким образом, ток через резистор и постоянное выходное напряжение на нем пропорциональны амплитуде измеряемого переменного напряжения или переменной составляющей пульсирующего напряжения.

Конденсатором  $C$  вход схемы закрыт для постоянного напряжения или постоянной составляющей пульсирующего напряжения. Фильтр  $R_\phi C_\phi$ , включенный на выходе схемы, снижает пульсации выпрямленного напряжения. Схема с параллельным включением диода и нагрузочного резистора  $R$  имеет входное сопротивление  $R_{вх} \approx R/3$ , которое можно увеличить, выбрав сопротивление  $R$  порядка нескольких десятков мегаом, что вполне допустимо, поскольку схемы УПТ имеют очень

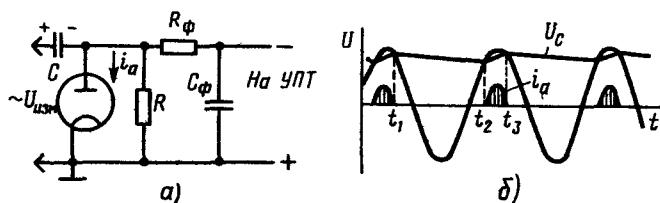


Рис. 34. Измерительный амплитудный выпрямитель.

а — схема, б — график напряжений

большое входное сопротивление и не оказывают заметного шунтирующего действия. Входная емкость достаточно мала (порядка 2–3 пФ), так как применены специальный диод, имеющий плоские электроды и малые междueleктродные расстояния, а также малогабаритные резисторы и конденсаторы.

Амплитудные выпрямители, смонтированные в выносном пробнике, используют не только в вольтметрах, но и в других приборах, когда требуется преобразование переменного напряжения высокой частоты в постоянное, например в некоторых электронных осциллографах, измерителях частотных характеристик и др.

Все схемы измерительных выпрямителей оценивают по входному напряжению  $U_v$ , вызывающему полное отклонение стрелочного указателя измерительного механизма, и сопротивлению  $R_v$  со стороны входных зажимов. Если к входным зажимам приложить напряжение  $U_v$ , появившийся входной ток  $I_v = U_v/R_v$  вызовет полное отклонение указателя. Следовательно, эти схемы можно применять для измерения напряжений и токов соответственно на пределах до  $U_v$  и  $I_v$ .

Параметры выпрямительных схем  $U_v$  и  $R_v$  определяют опытным путем на переменном токе промышленной частоты 50 Гц, для чего собирают схему, показанную на рис. 35. Переменное напряжение 6,3 В со вторичной обмотки понижающего трансформатора  $Tr$  подается на лабораторный регулировочный автотрансформатор (ЛАТР), плавно регулируется от 0 до 6,3 В и отсчитывается по образцовому вольтметру  $V_0$ . Входное напряжение  $U_v$  полного отклонения отсчитывают при включенной перемычке  $a-a$  по шкале образцового вольтметра при установке указателя измерительного механизма на конечную отметку шкалы. Если значение  $U_v$  получено не в виде целого числа, например  $U_v = 0,6$  В, можно уменьшить чувствительность измерительного выпрямителя, включив резистор  $R_{доб}$ , и подобрать его сопротивление до получения  $U_v = 1$  В.

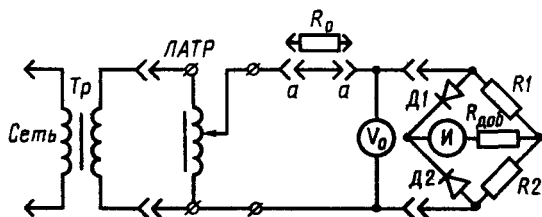


Рис. 35. Измерение параметров измерительных выпрямителей

Входное сопротивление  $R_b = R_0 U / (U_b - U)$  определяют при включенном вместо переключки  $a-a$  образцовом резисторе  $R_0$ , отсчитывая показания  $U < U_b$  по шкале образцового вольтметра. Сопротивление образцового резистора  $R_0$  выбирают в пределах от 3 до 10 кОм. Если требуется повысить чувствительность измерительного выпрямителя, следует применить более чувствительный магнитоэлектрический механизм и подобрать диоды с возможно меньшим сопротивлением прямому току.

## § 17. Амперметры и вольтметры выпрямительной системы

Выпрямительные амперметры представляют собой соединение одной из схем измерительных выпрямителей, показанных на рис. 30 и 31, с шунтом  $R_{ш}$ , который позволяет расширить пределы измерений и измерять токи, превышающие ток полного отклонения  $I_b$ . Включение однопредельных выпрямительных амперметров с одно- и двухполупериодными схемами измерительных выпрямителей в цепь измеряемого тока, значение которого определяется напряжением источника  $U$  и сопротивлением нагрузки  $R_n$ , показано на рис. 36. Действие шунта и его расчет были даны в § 10; в формулу для расчета шунта вместо параметров магнитоэлектрического прибора  $I_n$  и  $R_n$  следует подставлять соответствующие параметры схемы измерительного выпрямителя  $I_b$  и  $R_b$ .

Многопредельные выпрямительные амперметры можно получить применением нескольких сменных наружных шунтов, переключением шунтов или используя схему универсального шунта. Схема многопредельного амперметра прибора

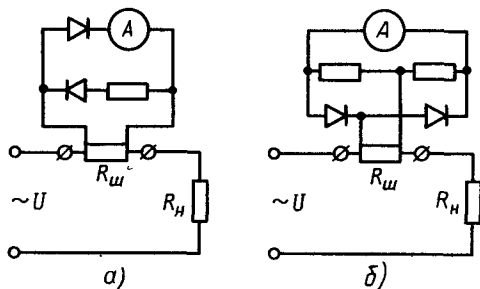


Рис. 36. Включение однопредельных выпрямительных амперметров с выпрямителем:

$a$  — однополупериодным,  $б$  — двухполупериодным

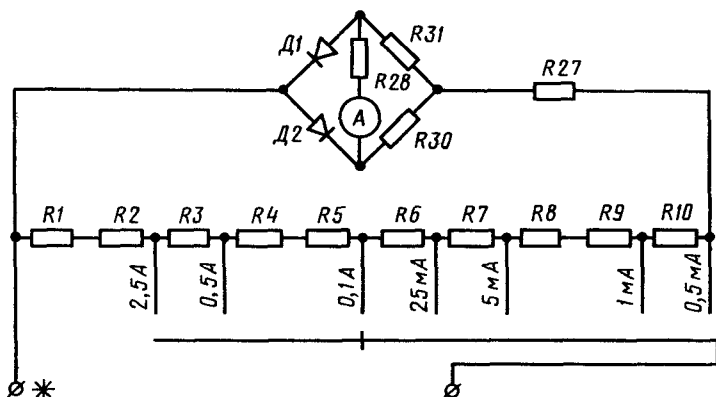


Рис. 37. Схема многопредельного выпрямительного амперметра с универсальным шунтом

Ц4315, в которой использован тот же универсальный шунт, который был применен в схеме многопредельного амперметра постоянного тока (см. рис. 12), показана на рис. 37. Сравнивая обе схемы, можно отметить, что во втором случае изменены отводы шунта, а магнитоэлектрический механизм включен в параллельную схему выпрямителя. Применение именно этой схемы измерительного выпрямителя и постоянно к ней подключенного универсального шунта с достаточно большим суммарным сопротивлением всех резисторов позволяет использовать в всех пределах одну градуировку шкалы с соответствующим множителем для каждого предела.

Выпрямительные вольтметры представляют собой соединение одной из схем выпрямителей, показанных на рис. 30 и 31, с добавочным резистором  $R_{доб}$ , который позволяет расширить пределы измерений и измерять напряжения, превышающие напряжение полного отклонения  $U_v$ . Подключение однопредельных выпрямительных вольтметров с одно- и двухполупериодной схемами измерительных выпрямителей для измерения падения напряжения на участке цепи  $R_{уч}$  показано на рис. 38. Действие добавочного резистора и расчет его сопротивления были даны в § 12; в формулу для расчета добавочного резистора вместо параметров магнитоэлектрического прибора  $I_n$  и  $R_n$  следует подставлять соответствующие параметры измерительного выпрямителя  $I_v$  и  $R_v$ .

Многопредельные вольтметры можно получить применением нескольких добавочных резисторов или резисторных либо конденсаторных делителей напряжения.

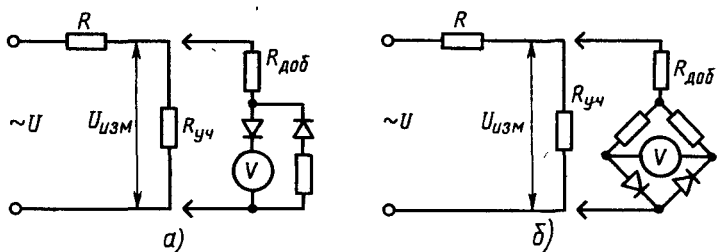


Рис. 38. Включение однопредельных выпрямительных вольтметров с выпрямителем:

а — однополупериодным, б — двухполупериодным

Многопредельный вольтметр с добавочными резисторами можно выполнить, соединив измерительный выпрямитель с несколькими добавочными резисторами. Два способа их соединения, т.е. последовательное включение и переключение, были показаны на рис. 16 для многопредельного вольтметра постоянного тока. В приведенной на рис. 39 схеме многопредельного выпрямительного ампервольтметра прибора Ц4315 применен мостовой параллельный выпрямитель с постоянно подключенным универсальным шунтом  $R1-R10$ , что позволяет при семи верхних положениях переключателя использовать прибор как многопредельный амперметр. Эта часть схемы как индикаторная часть с током полного отклонения  $I_v = 0,5 \text{ mA} = 500 \text{ мкА}$  совместно с цепочкой последовательно соединенных добавочных резисторов  $R23, R24, R12, R13-R18, R22$  и  $R35$  является многопредельным вольтметром. Вольтметр постоянного тока прибора Ц4315 имеет ток полного отклонения  $I_n = 50 \text{ мкА}$  и удельное входное сопротивление  $R/U = 1/I_n = 1/0,05 = 20 \text{ кОм/В}$ . Вольтметр переменного тока на всех пределах, кроме двух нижних, имеет  $I_v = 0,5 \text{ mA} = 500 \text{ мкА}$  и  $R/U = 2 \text{ кОм/В}$ . На нижних пределах (1 В и 2,5 В) заметное влияние оказывает нелинейный участок характеристики диодов, поэтому, как это видно из схемы, подключение добавочных резисторов  $R23$  и  $R24$  изменено. Токи полного отклонения увеличены до 2,5 и 1 мА, а входные сопротивления уменьшены соответственно до 0,4 и 2,5 кОм.

Многопредельный вольтметр с резисторными делителями имеет несколько переключаемых, как показано на рис. 40, делителей напряжения и измерительный выпрямитель с добавочным резистором  $R_{доб}$ . При регулировке и испытаниях радиоприемных устройств и усилителей звуковой частоты вместо



головного телефона, сопротивление которого на средних звуковых частотах 800–1000 Гц равно 20 кОм, подключают вольтметр с таким же входным сопротивлением. Неизменное на всех пределах входное сопротивление вольтметра может быть получено применением резисторных делителей напряжения. Схема таких делителей, включенных вместе с электронным вольтметром постоянного тока, была показана на рис. 20, б, а в § 13 был дан пример их расчета. Расчет делителей выпрямительных вольтметров более сложен, так как входное сопротивление  $R_v$  выпрямителей сравнительно невелико и оказывает значительное шунтирующее влияние на резисторы делителей.

**Пример 8.** Рассчитаем сопротивления резисторов делителей, выбрав пределы измерений напряжений  $U_1, U_2, U_3, U_4$  и  $U_5$ , равные соответственно 1,5; 3, 15, 60 и 300 В, и применив измерительный выпрямитель, параметры которого  $U_v = 0,3$  В,  $R_v = 4$  кОм и  $I_v = U_v/R_v = 0,3/4 = 0,075$  мА.

Предел  $U_1 = 1,5$  В получим, включив добавочный резистор, сопротивление которого  $R_{доб} = U_1/I_v - R_v = 1,5/0,075 - 4 = 16$  кОм. Шунтирующее влияние оказывает входное сопротивление  $R_{вх}$  измерительной схемы, которое с учетом  $R_{доб}$  равно  $R_{вх} = R_{доб} + R_v = 16 + 4 = 20$  кОм.

Определим коэффициенты деления делителей:  $\alpha_1 = U_1/U_2 = 1,5/3 = 1/2$ ;  $\alpha_2 = U_1/U_3 = 1,5/15 = 1/10$ ;  $\alpha_3 = U_1/U_4 = 1,5/60 = 1/40$ ;  $\alpha_4 = U_1/U_5 = 1,5/300 = 1/200$ . Эти коэффициенты обеспечивают деление измеряемого напряжения в 2, 10, 40 и 200 раз, и при измеряемых напряжениях, равных предельным значениям, на входе измерительной схемы напряжение  $U_1 = 1,5$  В вызовет полное отклонение указателя.

Предел  $U_2 = 3$  В. Сопротивление резистора  $R_2$  с учетом шунтирующего влияния  $R_{вх} = 20$  кОм обозначим как  $R_2'$ . Коэффициент деления  $\alpha_1 = 1/2 = R_2'/(R_1 + R_2')$ , откуда  $R_1 = R_2'$ . Входное сопротивление вольтметра  $R_v = R_1 + R_2' = 20$  кОм, следовательно,  $R_1 = 10$  кОм и

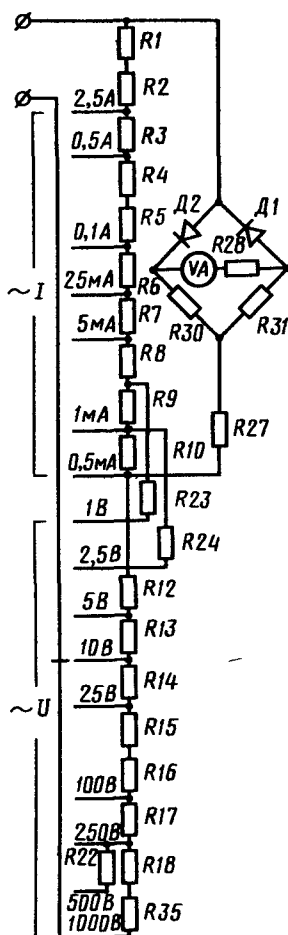


Рис. 39. Схема многопределного выпрямительного ампервольтметра прибора Ц4315

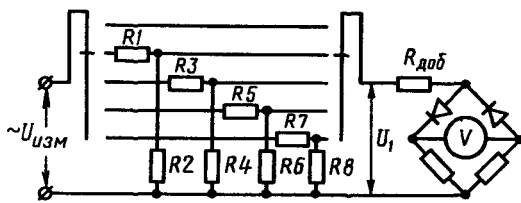


Рис. 40. Схема многопредельного выпрямительного вольтметра с резисторными делителями напряжения

$R2' = 10 \text{ кОм}$ . Поскольку  $R2' = R2R_{\text{вх}}/(R2 + R_{\text{вх}})$ , то  $R2 = R2'R_{\text{вх}}/(R_{\text{вх}} - R2') = 10 \cdot 20/(20 - 10) = 20 \text{ кОм}$ .

Предел  $U_3 = 15 \text{ В}$ . Сопротивление резистора  $R4$  с учетом шунтирующего влияния  $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм}$  обозначим  $R4'$ . Коэффициент деления  $\alpha_2 = 1/10 = R4'/(R3 + R4')$ , откуда  $R3 = 9R4$ . Входное сопротивление вольтметра  $R_V = R3 + R4' = 20 \text{ кОм}$ , следовательно,  $R3 = 18 \text{ кОм}$  и  $R4' = 2 \text{ кОм}$ . Поскольку  $R4' = R4R_{\text{вх}}/(R4 + R_{\text{вх}})$ , то  $R4 = R4'R_{\text{вх}}/(R_{\text{вх}} - R4') = 2 \cdot 20/(20 - 2) = 2,22 \text{ кОм}$ .

Аналогично можно рассчитать сопротивления остальных резисторов:  $R5 = 19,5 \text{ кОм}$ ,  $R6 = 0,513 \text{ кОм}$ ,  $R7 = 19,9 \text{ кОм}$  и  $R8 = 0,1005 \text{ кОм}$ . Эти сопротивления сравнительно невелики, что позволяет использовать в делителях высокоточные и стабильные проволочные и непроволочные резисторы и получать точные и стабильные коэффициенты деления.

Резисторные делители напряжения применяют на переменном токе в ограниченном диапазоне частот. При значительном повышении частоты возрастает влияние входной емкости и емкости монтажа, шунтирующих резисторы делителя. Коэффициент деления падает, т.е. возникает его частотная погрешность. Некоторое расширение частотного диапазона возможно, если уменьшить сопротивления резисторов делителя и этим снизить влияние емкостных сопротивлений. При этом снижается входное сопротивление делителя.

Многопредельный вольтметр ВЗ-10А (рис. 41) предназначен для измерения переменных напряжений от 0,05 до 300 В на пределах 0,3; 1,5; 3; 15; 60 и 300 В, имеет неизменное входное сопротивление  $R_V = 20 \text{ кОм}$  и может быть использован как измеритель выхода радиоприемных устройств и усилителей звуковых частот. Основная погрешность прибора не превышает 4% в диапазоне частот от 50 до 10 000 Гц и возрастает до 8% на частотах до 20 000 Гц. Транзисторный усилитель включается только на пределе 0,3 В, служит для повышения чувствительности прибора и получает питание от сухой батареи 3336Л, эдс которой 4,5 В.

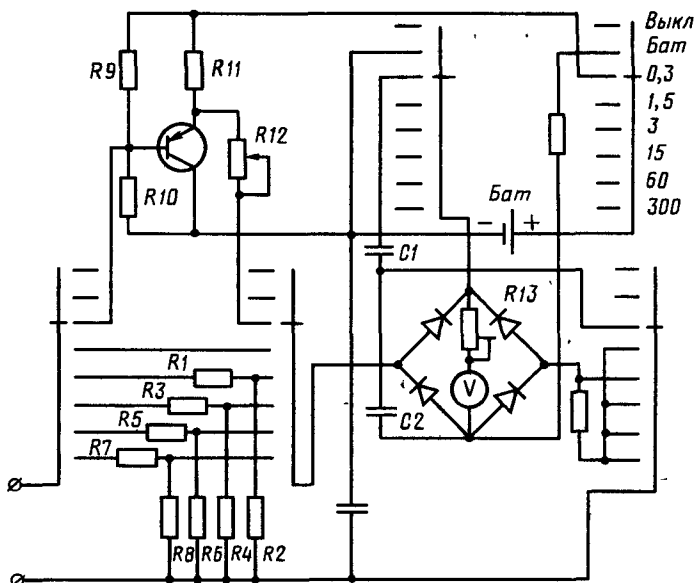


Рис. 41. Схема прибора ВЗ-10А

Прибор представляет собой обычный выпрямительный вольтметр с переключаемыми делителями измеряемого напряжения. На пределе 1,5 В измеряемое напряжение полностью поступает на измерительную часть схемы, а на других пределах включаются соответствующие делители  $R1R2$ ,  $R3R4$ ,  $R5R6$  и  $R7R8$ , расчет которых был выполнен в примере 8. На пределе 0,3 В измеряемое напряжение поступает на вход транзисторного усилителя, а с его выхода — на измерительную часть схемы. Одновременно на усилитель подается питание и включаются конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , удваивающие выпрямленное напряжение, что повышает чувствительность прибора. Эти конденсаторы также отделяют выпрямительный мост от цепей постоянного тока усилителя.

Усилительный каскад собран по схеме с общим коллектором, работает в режиме усиления мощности и имеет входное сопротивление порядка 20 кОм. Нагрузочный резистор  $R11$  включен в цепь эмиттера, резисторы  $R9$  и  $R10$  составляют делитель постоянного питающего напряжения, устанавливающий нормальный коллекторный ток и напряжение между коллектором и базой, равное 1,1 В. Полное отклонение указателя на

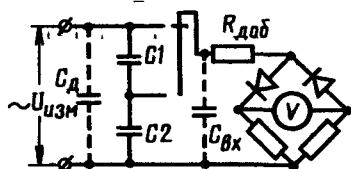


Рис. 42. Схема многопредельного выпрямительного вольтметра с конденсаторным делителем напряжения

пределах 1,5–300 В устанавливают подстроечным резистором  $R13$ , а на пределе 0,3 В – резистором  $R12$ .

На передней панели прибора имеются два входных зажима и переключатель на восемь положений, шесть из которых соответствуют шести пределам измерений, седьмое – контролю напряжения батареи, а восьмое – «Выкл». В последнем положении выводы измерительного механизма замыкаются накоротко, что предохраняет его при трясках. <sup>Р</sup>

Многопредельный вольтметр с конденсаторным делителем измеряемого напряжения показан на рис. 42. Коэффициент деления напряжения  $\alpha = U_2/U_1 = C1/(C1 + C2)$ , т.е. зависит от емкостей конденсаторов  $C1$  и  $C2$  делителя. Входное сопротивление делителя зависит от его входной емкости  $C_д$ , которую рассчитывают как последовательное соединение емкостей конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Влиянием входной емкости  $C_вх$  измерительной схемы можно пренебречь, если она много меньше емкости конденсатора  $C2$ . В ином случае параллельно включенные входную емкость  $C_вх$  и емкость конденсатора  $C2$  следует сложить или, исключив конденсатор  $C2$ , составить делитель из конденсатора  $C1$  и входной емкости  $C_вх$ , тогда коэффициент деления  $\alpha = U_2/U_1 = C1/(C1 + C_вх)$ .

Конденсаторные делители широко используют на частотах до сотен мегагерц вместе с электронными вольтметрами переменного тока и конструктивно выполняют в виде насадки на выносной пробник вольтметра.

## § 18. Комбинированные приборы

В практике измерений широко используют комбинированные приборы, измеряющие постоянные и переменные токи, напряжения и сопротивления, – ампервольтметры, или авометры. Промышленностью выпускаются авометры разных типов: ВК7-1, Ц4312–Ц4315, Ц4324, Ц4325 и др. При всем многообразии конструктивного оформления их принцип действия примерно одинаков, а схемы измерения постоянного и переменного тока и напряжения аналогичны схемам, рассмотренным в предыдущих параграфах.

Комбинированные приборы имеют кнопочный или ползунковый переключатель рода работы на три положения «Пост.», «Перем.» и «Ом», галетный переключатель пределов измерений и два или три входных зажима. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы с внутрирамочным магнитом и креплением подвижной части на растяжках или полуосях имеет высокую чувствительность. Ток полного отклонения порядка 30–40 мкА при постоянном подключении универсального шунта возрастает до 50 мкА. Это значение является первым пределом измерений постоянного тока и определяет удельное входное сопротивление вольтметра  $R/U = 1/0,05 = 20 \text{ кОм/В}$ .

Таким комбинированным измерительным прибором является авометр Ц4315 (рис. 43, а), измеряющий постоянные и переменные токи и напряжения, сопротивление постоянному току и емкости. Прибор имеет два основных зажима и дополнительное гнездо «75 мВ, 50 мкА». Магнитоэлектрический измерительный механизм, ток полного отклонения которого  $I_n = 42,5 \text{ мкА}$ , защищен от перегрузок двумя параллельными кремниевыми диодами Д226Д. При нажатии одной или одновременно двух кнопок трехкнопочного переключателя рода работы можно получить пять положений «Пост.», «Перем.», «кОм», «Ом» и «С<sub>x</sub>» (рис. 43, б).

Постоянный ток от 10 мкА до 2,5 А измеряют с погрешностью 2,5% на пределах 50 и 100 мкА, 0,5; 1; 5 и 25 мА, 0,1; 0,5 и 2,5 А. Для измерений постоянного тока используется универсальный шунт  $R1-R10$ ,  $R30$  и  $R28$  (см. рис. 12).

Постоянное напряжение от 15 мВ до 1000 В измеряют с погрешностью 2,5% на пределах 75 мВ (гнездо «75 мВ»); 1; 2,5; 5; 10; 25; 100; 250; 500 и 1000 В. Миллиамперметр на пределе 50 мкА с постоянно подключенным универсальным шунтом и добавочными резисторами  $R12$ ,  $R13-R21$  (см. рис. 16, а) используется в качестве вольтметра.

Переменный ток от 100 мкА до 2,5 А измеряют с погрешностью 4% на пределах 0,5; 1; 5 и 25 мА, 0,1; 0,5 и 2,5 А. Измерительный механизм совместно с резистором  $R28$  включен в диагональ мостовой параллельной схемы, составленной из двух диодов  $D1$  и  $D2$  (Д9Д) и двух резисторов  $R30$  и  $R31$ . Для расширения пределов измерений включают универсальный шунт (см. рис. 37).

Переменное напряжение от 0,2 до 1000 В измеряют с погрешностью 4% на пределах 1; 2,5; 5; 10; 25; 100; 250; 500 и 1000 В. Миллиамперметр переменного тока с постоянно подключенным шунтом и добавочными резисторами  $R12$ ,  $R13-R18$ ,  $R22$  и  $R35$  (см. рис. 39) служит вольтметром.

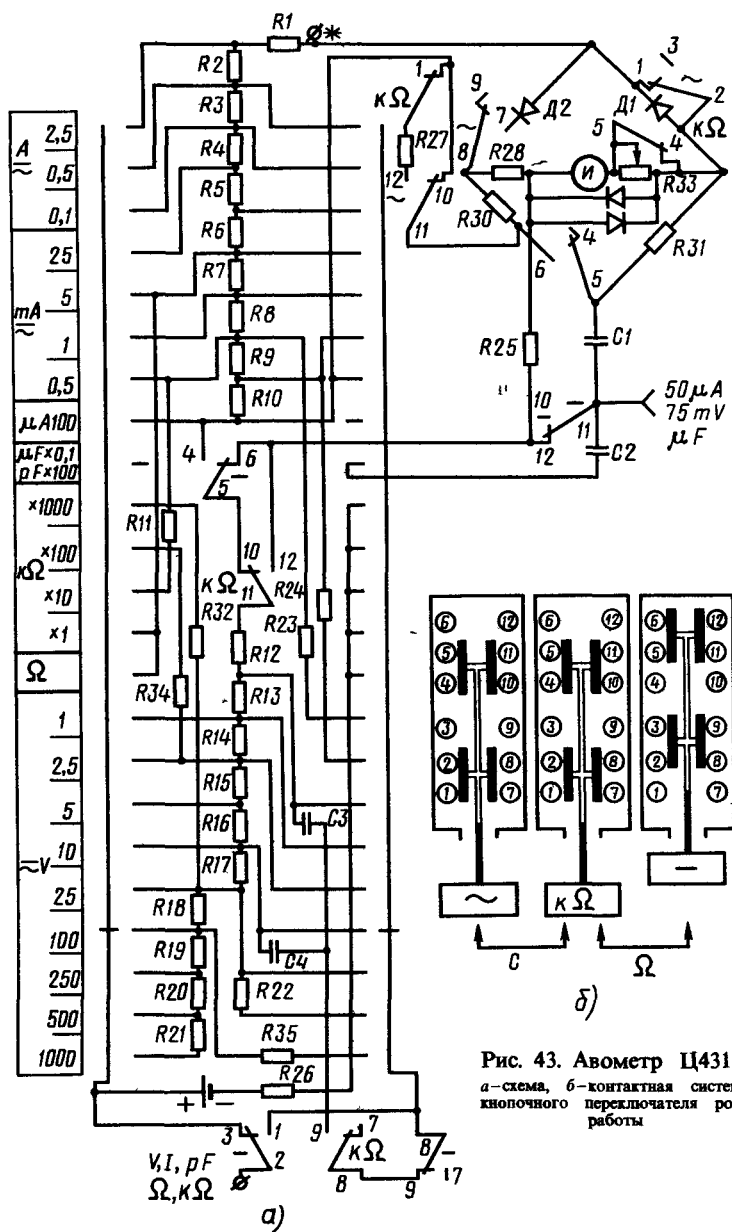


Рис. 43. Авометр Ц4315.

а-схема, б-контактная система  
кнопочного переключателя рода  
работы

Сопротивления от 0,1 до 5000 кОм измеряют с погрешностью 2,5% на пределах  $\times 1$  кОм,  $\times 10$  кОм,  $\times 100$  кОм и  $\times 1000$  кОм. На всех пределах, кроме последнего, в качестве источника постоянного тока используют внутреннюю батарею 3336Л, эдс которой 4,7 В. На последнем пределе необходимо подключить дополнительный внешний источник постоянного тока напряжением 47 В. При измерении сопротивлений соединяют последовательно измерительный механизм, источник постоянного тока и дополнительный резистор  $R_{\text{доп}}$ , составленный из нескольких резисторов со смешанным соединением. Сопротивление дополнительного резистора для указанных пределов измерений должно быть соответственно 0,5; 5; 50 и 500 кОм. Для установки стрелочного указателя на нулевую отметку шкалы больших сопротивлений при замкнутых накоротко входных зажимах последовательно измерительному механизму включается переменный резистор  $R_{33}$ . При этом наибольшие потребляемые от источника (батареи) токи для указанных пределов измерений соответственно составляют  $I_6 = 4,7/0,5 = 9,5$  мА,  $I_6 = 4,7/5 = 0,95$  мА,  $I_6 = 4,7/50 = 0,095$  мА и  $I_6 = 4,7/500 = 0,095$  мА и разветвляются в параллельных ветвях так, что через измерительный механизм проходит ток  $I_n = 42,5$  мкА, вызывающий полное отклонение указателя. Чем больше сопротивление измеряемого резистора, подключаемого к входным зажимам, тем эти токи меньше и, следовательно, числа на отметках шкалы сопротивлений возрастают справа налево.

Сопротивления от 5 до 300 Ом измеряют с погрешностью 2,5%, используя параллельную схему, которая включается при одновременном нажатии кнопок «кОм» и «Пост». Предварительно при разомкнутых входных зажимах устанавливают стрелочный указатель на конечную отметку шкалы малых сопротивлений.

Емкости от 0,5 до 30 нФ и от 30 до 500 нФ измеряют с погрешностью 4% при одновременном нажатии кнопок «кОм» и «Перем». При этом к входным зажимам прибора следует подключить напряжение сети 220 В и установить стрелочный указатель на конечную отметку шкалы. Измеряемый конденсатор (кроме электролитического) подключают к зажиму «+» и гнезду «μF». Если емкость конденсатора мала и отсчет получить не удастся, следует отключить один провод сети и в образовавшийся разрыв включить этот конденсатор.

## § 19. Электронные вольтметры

В лабораторной практике для измерений постоянных и переменных напряжений используют электронные вольтметры, которые входят также в виде отдельных блоков в схемы таких измерительных приборов, как осциллографы, измерительные генераторы, анализаторы спектра, измерители добротности, искажений, помех и др.

Электронный вольтметр состоит из усилителя, делителя напряжения, измерительного выпрямителя, магнитоэлектрического механизма и источника питания. Усилитель позволяет повысить чувствительность вольтметра и измерять весьма малые напряжения, а делитель — расширить пределы и измерять весьма большие напряжения (до тысяч и десятков тысяч вольт). Таким образом, последовательное включение усилителя и делителя, применяемое не только в электронных вольтметрах, но и в других приборах (осциллографах, измерительных генераторах, измерителях искажений и др.), позволяет значительно увеличить диапазон исследуемых напряжений. Измерительный выпрямитель служит для преобразования измеряемого переменного напряжения в постоянное, вызывающее отклонение стрелочного или светового указателя магнитоэлектрического механизма.

В зависимости от расположения усилителя и измерительного выпрямителя различают две схемы электронных вольтметров: выпрямитель-усилитель (рис. 44, а) и усилитель-выпрямитель (рис. 44, б).

Электронные вольтметры, собранные по схеме выпрямитель-усилитель (рис. 44, а), универсальны, поскольку позволяют измерять как переменные, так и постоянные на-

пряжения. Измеряемое переменное напряжение  $U_{изм}$  короткими соединительными проводами подают на выносной пробник прибора, в котором смонтирован измерительный амплитудный выпрямитель ИВ, преобразующий его в постоянное напряжение, которое по соединительному кабелю поступает на вход расположенного в основной части прибора усилителя постоянного тока УПТ, нагруженного на магнитоэлектрический механизм  $V$ . Измеряемое постоянное

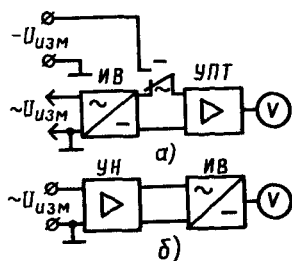


Рис. 44. Структурные схемы электронных вольтметров типов:

а — выпрямитель-усилитель, б — усилитель-выпрямитель



напряжение  $U_{\text{зм}}$ , поданное на соответствующие входные зажимы, непосредственно поступает на вход УПТ.

Чувствительность таких электронных вольтметров сравнительно невелика: на первом пределе измерений 1 В минимально измеряемые напряжения 0,2–0,4 В. Меньшие напряжения эффективно диодом измерительного выпрямителя не выпрямляются. Достоинство этих вольтметров – измерение переменных напряжений в очень широком диапазоне частот: от десятков герц до сотен мегагерц. В режиме измерения постоянного напряжения сохраняется главное достоинство схем УПТ – очень высокое и неизменное на всех пределах входное сопротивление (порядка десятков мегаом).

К электронным вольтметрам этого типа относятся приборы В7–15, В7–17, В7–26, измеряющие постоянные и среднеквадратичные переменные напряжения, а также сопротивления постоянному току. Так, прибором В7–26 (рис. 45) измеряют:

напряжения постоянного тока от 0,03 до 300 В с погрешностью 2,5%, а с резисторным делителем напряжения ДН-518 (коэффициент деления 1:1000) в виде выносного щупа – до 1000 В с погрешностью 4%;

напряжения переменного тока, подаваемые на низкочастотный вход, от 0,2 до 300 В с погрешностью до 4% в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц, а с делителем напряжения ДН-518 – до 1000 В с погрешностью 6% в диапазоне частот до 3 кГц;

напряжения переменного тока, подаваемые на выносной пробник, от 0,2 до 100 В с погрешностью 4% в диапазоне частот от 1 кГц до 1000 МГц, а с конденсаторным делителем напряжения ДН-519 (коэффициент деления 1:100) в виде цилиндрической насадки на пробник – до 1000 В с погрешностью 6% в диапазоне частот от 3 кГц до 300 МГц;

сопротивления постоянному току от 10 Ом до 1000 МОм с погрешностью 2,5%.

Входное сопротивление вольтметра при измерении постоянных напряжений равно 30 МОм, а при измерении переменных – 5 МОм на низкочастотном входе и 75 кОм при частоте 100 МГц на входе пробника.

Входные емкости прибора составляют 20; 1,5 и 3 пФ соответственно на низкочастотном входе, входах пробника и делителя напряжения ДН-519.

Измеряемое постоянное напряжение поступает непосредственно или через делитель напряжения ДН-518 (на рис. 45 не показан) на высокоомный делитель, а затем – на вход УПТ. Измеряемое переменное напряжение поступает непосредственно

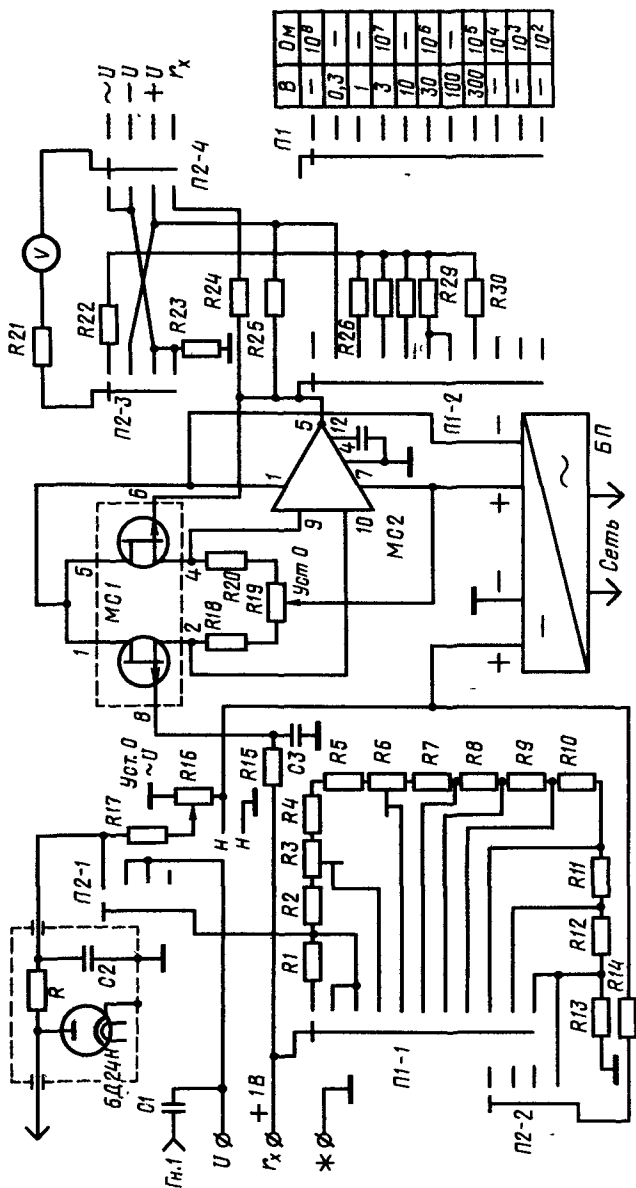


Рис. 45. Схема прибора В7-26

или через делитель напряжения ДН-519 на измерительный амплитудный выпрямитель на диодной лампе-нувисторе 6Д24Н, смонтированный в выносном пробнике. Выпрямленное напряжение подается на высокоомный делитель, а далее — на вход УПТ. Резистор  $R$  представляет собой верхнее плечо нагрузки амплитудного выпрямителя, нижним плечом которой служит высокоомный делитель  $R_2-R_{13}$ . Сопротивление резистора  $R$  подобрано так, что напряжение на нижнем плече составляет 0,707 от выпрямленного напряжения. Это позволяет градуировать шкалу в действующих значениях переменного напряжения синусоидальной формы.

Высокоомный делитель  $R_2-R_{13}$ , имеющий общее сопротивление 30 МОм и коэффициенты деления 1/1; 1/3,16; 1/10; 1/31,6; 1/100 и 1/316, образует семь пределов измерений напряжения. Резисторы этого делителя используются также при измерении сопротивлений как образцовые и имеют сопротивления 0,1; 1; 10 и 100 кОм, 1 и 10 МОм, а также 100 МОм при последовательном подключении к цепочке резисторов делителя резистора  $R_1$  на 70 МОм. При установке переключателя  $П2-2$  в положение «гх» резисторы  $R_{13}$  и  $R_{14}$  составляют делитель питающего напряжения, на котором создается требуемое при измерении сопротивлений постоянное напряжение +1 В, являющееся частью напряжения 6 В стабилизированного источника постоянного напряжения блока питания БП. Постоянное напряжение 6 В служит также для накала лампы 6Д24Н. Часть этого напряжения регулируется резистором  $R_{16}$  и через резистор  $R_{17}$  поступает на высокоомный делитель для компенсации начального тока этой лампы.

Усилитель постоянного тока (УПТ) собран на двух микросхемах  $МС1$  и  $МС2$ . Микросхема  $МС1$  (К504НТ1А) представляет собой сборку из двух идентичных полевых транзисторов, включенных в схему УПТ так, как было показано на рис. 19. Вход УПТ (выводы 8 и 6 микросхемы  $МС1$ ) защищен от перегрузок встречно-параллельным включением двух диодов (на рис. 45 не показаны). Выходы УПТ (выводы 2 и 4 микросхемы  $МС1$ ) подключены к двум входам (выводы 9 и 10) микросхемы  $МС2$  (К140УД1А), являющейся операционным усилителем. К выходу этого усилителя (выводы 5 и 4) подключен магнитоэлектрический механизм с добавочными резисторами  $R_{21}-R_{30}$ , также защищенный от перегрузок встречно-параллельным включением двух диодов (на рис. 45 не показаны). При установке переключателей  $П2-3$  и  $П2-4$  в положения «-U» и «+U» направление тока через измерительный механизм изменяется, что позволяет получить отклонение указателя вправо

от начальной отметки шкалы при любой полярности измеряемого постоянного напряжения. Обе микросхемы получают питание от стабилизированного источника постоянного напряжения 6 В блока питания БП.

Электронный вольтметр, собранный по схеме выпрямитель-усилитель, может быть выполнен на полевых транзисторах, что уменьшает его габариты и позволяет питать от сухих элементов. Таким переносным прибором, так же как и широко распространенными авометрами, можно измерять напряжения постоянного и переменного тока и сопротивления. Сохраняя достоинства, присущие электронным вольтметрам, он отличается от них малыми габаритами и массой.

Одна из схем такого вольтметра показана на рис. 46. В приборе применен УПТ на полевых транзисторах  $T1$  и  $T2$  (КП102 или КП103), схема которого была показана на рис. 19 и описана в § 13. Сопротивление добавочного резистора  $R16$  (см. рис. 46), зависящее от чувствительности магнитоэлектрического механизма, подбирают так, чтобы получить полное отклонение указателя при подаче на вход схемы постоянного напряжения 1 В, что соответствует первому пределу измерений.

Для расширения пределов измерений применяют многопредельный делитель напряжения  $R2-R7$ , сопротивления резисторов которого рассчитаны исходя из получения высокого входного сопротивления  $R_{вх} = 11 \text{ МОм}$ . При переводе переключателя  $\Pi$  в положение « $\sim$ » включается измерительный амплитудный выпрямитель и вольтметр переводится в режим измерения переменных напряжений. Электрическая прочность конденсатора  $C1$  и диода  $D1$  должна быть достаточно велика. Рабочее напряжение конденсатора должно быть не менее 600 В, а обратное напряжение диода  $D218-1000 \text{ В}$ .

Для отсчета переменных напряжений можно нанести на шкалу отдельную градуировку или использовать градуировку шкалы для постоянных напряжений, точно подобрав сопротивление резистора  $R1$ , что увеличит погрешность измерений.

Делитель питающего напряжения, составленный из резисторов  $R19$ ,  $R20$ ,  $R21$  и  $R18$ , рассчитан так, чтобы на резисторе  $R18$  было напряжение 1 В с возможностью его некоторого уменьшения или увеличения. При переводе вольтметра в режим измерения сопротивлений это напряжение подается на вход вольтметра и вызывает полное отклонение стрелочного указателя, который переменным резистором  $R21$  устанавливают на конечную отметку шкалы напряжений, что соответствует бесконечности шкалы сопротивлений. Измерение сопротивлений электронными вольтметрами будет описано в § 22.

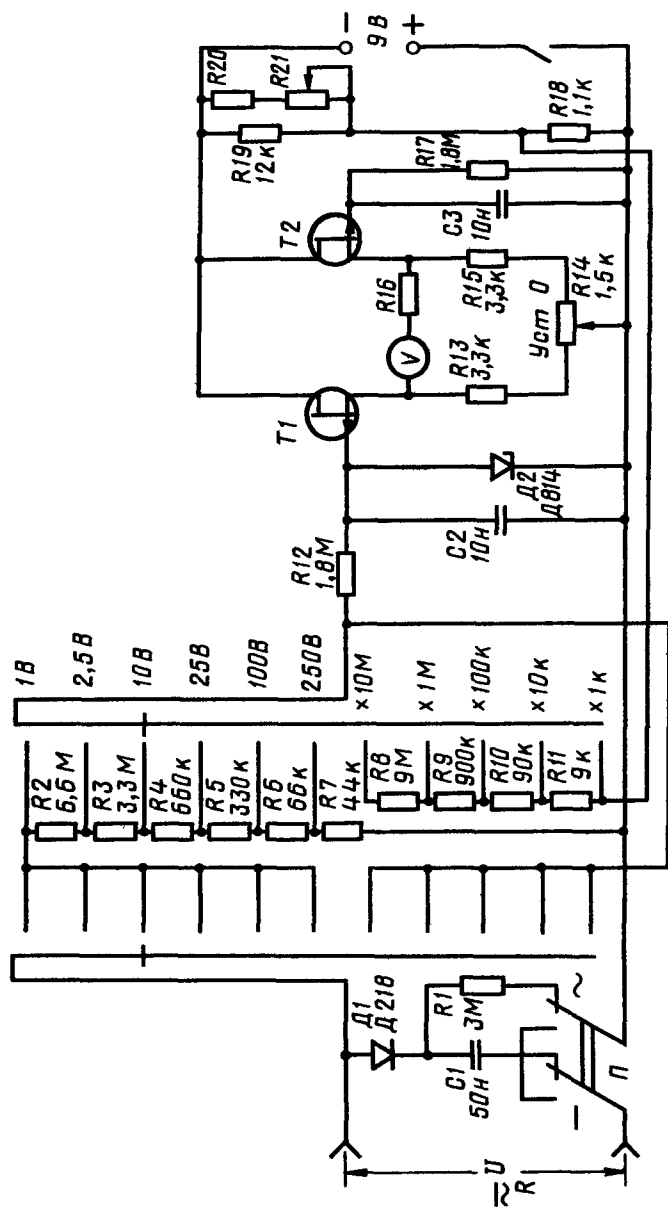


Рис. 46. Схема электронного вольтметра на полевых транзисторах

Электронные вольтметры, собранные по схеме усилитель-выпрямитель (см. рис. 44, б), служат для измерений только переменных напряжений, поступающих на вход усилителя УН. Коэффициент усиления по напряжению может быть достаточно велик (порядка 1000), что определяет основные достоинства вольтметров этого вида — высокую чувствительность и возможность измерения очень малых напряжений. Большие напряжения измеряют, используя не показанные на рис. 44, б делители напряжений. Выход усилителя нагружен на измерительный выпрямитель ИВ, собранный по одной из мостовых схем, показанных на рис. 31. В некоторых вольтметрах в качестве индикаторной части используют магнитоэлектрический механизм с термопреобразователями или конденсаторный механизм.

Диапазон частот измеряемого напряжения определяется частотными свойствами усилителя. Так, широко распространенные вольтметры, работающие в диапазоне частот от десятков герц до нескольких мегагерц, имеют широкополосные усилители с нагрузочными непервоочными резисторами, сопротивление которых неизменно в широком диапазоне частот.

В селективных вольтметрах, работающих в очень узкой полосе частот, используются резонансные усилители с нагрузкой в виде одиночного колебательного контура или многоконтурных систем, сопротивление которых резко возрастает на частоте их настройки.

К электронным вольтметрам, собранным по схеме усилитель-выпрямитель, относятся приборы В3-38—В3-48, шкалы которых отградуированы в действующих значениях напряжения переменного тока. Так, прибором В3-41 (рис. 47) измеряют переменные напряжения от 0,3 мВ до 300 В в диапазоне частот от 45 Гц до 1 МГц с погрешностью 2,5% для нижних пределов измерений 3, 10, 30, 100, 300 и 1000 мВ и с погрешностью 4% для верхних пределов измерений 3, 10, 30, 100 и 300 В. Для более низких частот — до 20 Гц и более высоких — до 10 МГц по-

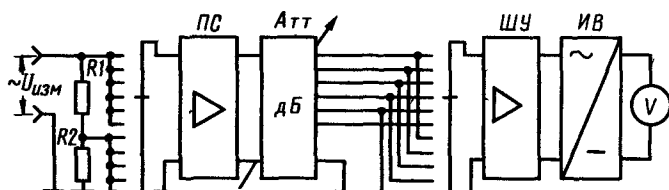


Рис. 47. Структурная схема прибора В3-41

грешность увеличивается примерно в два раза. Входное сопротивление вольтметра 5 МОм, входная емкость 35 и 15 пФ соответственно для нижних и верхних пределов измерений.

Первый делитель напряжения, составленный из резисторов  $R1$  и  $R2$ , имеет коэффициент деления  $1/1$  для шести верхних положений переключателя пределов измерений и  $1/1000$  для пяти других.

Преобразователь сопротивлений  $ПС$ , выполняемый в некоторых приборах этой группы в виде выносного пробника, представляет собой сложный повторитель напряжения на полевом транзисторе или электронной лампе. Повторитель передает напряжение без усиления с высокоомного входа на низкоомный выход и служит для согласования сопротивлений.

Высокое входное сопротивление прибора, обычно равное 1 МОм, определяется большим сопротивлением резистора  $R1 = 1$  МОм, на который не оказывает заметного шунтирующего действия высокоомный вход повторителя. Низкоомный выход повторителя позволяет применить во втором делителе напряжения высокоточные резисторы малого сопротивления.

Второй делитель напряжения, или аттенуатор  $Att$ , используется дважды — на нижних и верхних пределах измерений — и имеет коэффициенты деления  $1/1$ ;  $1/3,16$ ;  $1/10$ ;  $1/31,6$ ;  $1/100$  и  $1/316$ , т.е. уменьшает напряжения на 0; 10; 20, 30, 40 и 50 дБ. Прецизионные резисторы  $C2-13-C2-15$  с весьма малым допуском (0,2 или 0,5%) соединяют в П- или Т-образные звенья. В схеме аттенуатора, показанной на рис. 48, а, пять П-образных звеньев позволяют получить указанные выше коэф-

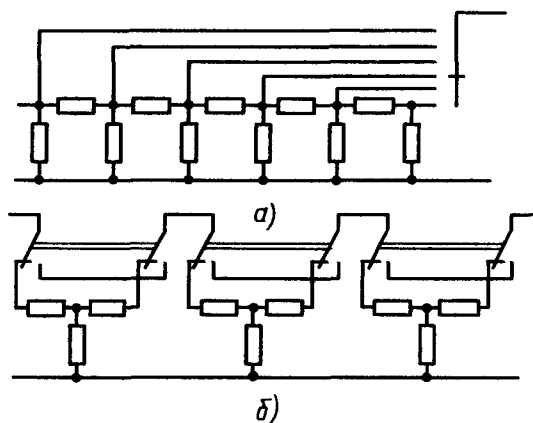


Рис. 48. Схемы аттенуаторов из П-образных (а) и Т-образных (б) звеньев

коэффициенты деления. Те же коэффициенты деления получают соответствующим переключением трех Т-образных звеньев (рис. 48, б), имеющих коэффициенты деления  $1/3,16$ ;  $1/10$  и  $1/10$ . В показанных на этой схеме положениях переключателей общее затухание составляет  $10 + 20 + 20 = 50$  дБ, что соответствует коэффициенту деления  $1/316$ .

Широкополосный усилитель ШУ выполнен на транзисторах и имеет значительный коэффициент усиления напряжений (порядка 1000), что обеспечивает высокую чувствительность вольтметра и возможность измерений очень малых напряжений.

Измерительный выпрямитель ИВ преобразует переменное напряжение в постоянное, обеспечивающее отклонение указателя магнитоэлектрического механизма.

## § 20. Цифровые вольтметры

Принцип действия цифровых измерительных приборов основан на автоматическом преобразовании непрерывной, или аналоговой, измеряемой величины в дискретные сигналы в виде кода, в соответствии с которым ее значение отображается на отсчетном устройстве в цифровой форме, что позволяет исключить субъективные ошибки (промахи), документально регистрировать (печатать) результаты измерений и в виде цифрового кода вводить их в ЭВМ или передавать по каналам телеметрии.

Цифровые вольтметры предназначены для измерений постоянных или медленно изменяющихся напряжений, а вместе с соответствующими преобразователями – сопротивлений и переменных напряжений.

Цифровые вольтметры позволяют выполнять от одного до нескольких тысяч измерений в секунду, определять напряжения в диапазоне от 1 мВ до 1 кВ с погрешностями ниже 0,1% и могут служить как образцовые. Недостатками их являются сложность схем и, как следствие, невысокая надежность, большие габариты и значительная стоимость. Применение таких элементов микроэлектроники, как большие интегральные схемы, которые заменяют несколько десятков стандартных микросхем, позволяет повысить надежность и уменьшить габариты цифровых вольтметров.

Первым этапом процесса измерений является количественная оценка измеряемой аналоговой величины (напряжения), которая преобразуется в дискретную квантованием по уровню и дискретизацией по времени. На рис. 49 показано пульсирующее напряжение в виде непрерывной кривой  $l$  и эквивалентное



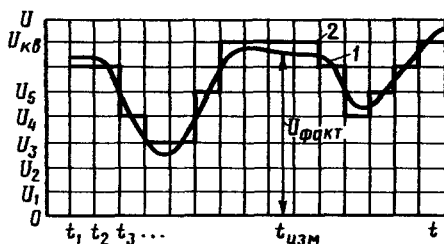


Рис. 49. Непрерывное пульсирующее напряжение и заменяющее его квантованное

ему квантованное в виде ступенчатой кривой 2. При квантовании по уровню фиксируются не все мгновенные значения напряжения, а только его дискретные уровни  $U_3$ ,  $U_4$ ,  $U_5$  и т. д. При дискретизации по времени фиксируются дискретные моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и т. д. В каждый момент времени измерения, например в  $t_{изм}$ , оценивается не фактическое мгновенное напряжение  $U_{факт}$ , а близкое к нему квантованное  $U_{кв}$ . Непрерывный сигнал заменяется сигналом с дискретными уровнями в дискретные моменты времени.

Погрешность дискретизации может быть очень малой при большом числе уровней квантования. Так, если отсчетное устройство прибора имеет три десятичных разряда с максимальными показаниями 999, значит бесконечное множество фактических значений измеряемого напряжения в пределах от 0 до 999 отражается тысячей квантованных значений. Например, вместо  $U_{факт} = 12,6$  В измеряют  $U_{кв}$ , равное 12 или 13 В, или вместо  $U_{факт} = 219,3$  В определяют  $U_{кв}$ , равное 219 или 220 В, и т. д. Следует отметить, что при измерениях аналоговыми приборами, имеющими стрелочный отсчет, также происходит округление, т. е. измеряемая величина оценивается не по фактическому положению указателя, а по ближайшему к нему делению.

Вторым этапом является кодирование (шифрование), при котором дискретные уровни напряжения преобразуются в цифровой код — определенную последовательность импульсов или комбинацию состояний таких элементов счетчика, как триггеры. Последовательность импульсов зависит от значения измеряемой величины. Процесс, включающий эти два этапа, называют *аналого-цифровым преобразованием*.

Третьим этапом является преобразование измеряемой величины, выраженной в виде цифрового кода, в измеряемую вели-

чину в виде десятичного кода (дешифрование) и отображение ее на цифровом табло отсчетного устройства.

Цифровые приборы состоят из двух основных функциональных частей: аналого-цифрового преобразователя и дешифратора с отсчетным устройством в виде цифрового табло с тремя или четырьмя цифровыми индикаторами. Аналого-цифровые преобразователи используются не только в цифровых приборах, но и в виде отдельных автономных устройств применяются в тех случаях, когда числовой результат измерения непрерывной величины удобно представить в виде цифрового кода для передачи по каналам связи и использования в информационных, управляющих, вычислительных и других системах.

По способу преобразования измеряемой величины в цифровой код цифровые вольтметры могут быть с время-импульсным преобразованием, с поразрядным кодированием и с преобразованием напряжения в частоту.

Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием широко распространены, поскольку имеют сравнительно простую схему, обладают высокой скоростью преобразования и погрешностью измерений порядка 0,05%. Принцип действия этих приборов состоит в том, что измеряемое постоянное напряжение  $U_{изм}$  преобразуется в пропорциональный ему по длительности временной интервал, в который укладывается определенное число импульсов, создаваемых генератором счетных импульсов и измеряемых счетчиком. Таким образом, показания счетчика импульсов пропорциональны измеряемому постоянному напряжению. Структурная схема цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием показана на рис. 50, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 51.

Измеряемое напряжение постоянного или переменного тока с входных зажимов поступает на входное устройство ВУ и с по-

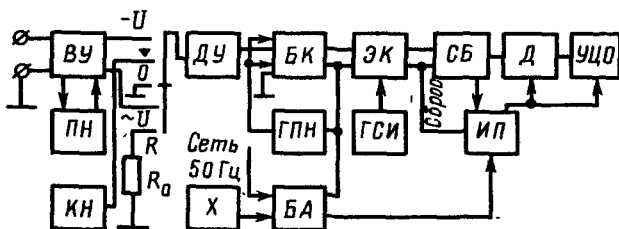


Рис. 50. Структурная схема цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием

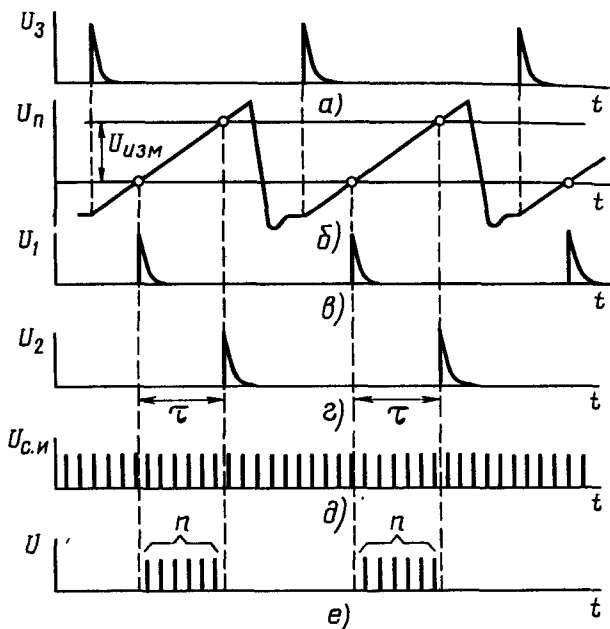


Рис. 51. Временные диаграммы импульсов цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием:  
 а—запускающих, б—пилообразного напряжения, в, г—вырабатываемых нулевым и сигнальным компараторами, д—счетных, е—на выходе электронного коммутатора

мощью делителей уменьшается до значений в пределах от 0 до 1 В. Постоянное напряжение поступает прямо на вход дифференциального усилителя ДУ, а переменное — через преобразователь ПН переменного напряжения в постоянное. В режиме измерения сопротивлений входные зажимы являются прямым входом ДУ, который сопротивление подключаемого к ним измеряемого резистора преобразует в пропорциональное напряжение постоянного тока.

Блок компараторов БК (сравнивающих устройств) состоит из сигнального и нулевого компараторов, имеющих по два входа. На первые входы обоих компараторов подается пилообразное напряжение  $U_{п}$ , создаваемое генератором пилообразного напряжения ГПН под воздействием запускающих стартовых импульсов  $U_3$ . Второй вход нулевого компаратора соединен на корпус, а сигнального подключен к выходу ДУ. Нулевой компаратор срабатывает в момент равенства пилообразного напряжения и нулевого потенциала корпуса и вы-

дает импульсы  $U_1$ . Сигнальный компаратор срабатывает в момент равенства пилообразного и измеряемого  $U_{изм}$  напряжений и выдает импульсы  $U_2$ . Интервал времени  $\tau$  между моментами срабатывания обоих компараторов пропорционален измеряемому напряжению  $U_{изм}$ .

Блок автоматики БА вырабатывает импульсы, открывающие электронный коммутатор ЭК, и импульсы, управляющие работой ГПН и БК. Работа блоков автоматики и компараторов, а также генератора пилообразного напряжения синхронизирована с частотой сети 50 Гц.

Генератор счетных импульсов ГСИ вырабатывает напряжение  $U_{си}$  в виде следующих непрерывно счетных импульсов, подаваемых в ЭК, на выходе которого образуется напряжение  $U$  в виде пачек импульсов, количество  $n$  которых в каждой пачке пропорционально измеряемому постоянному напряжению  $U_{изм}$ . Эти импульсы поступают на счетный блок СБ.

Счетный блок СБ с помощью декадных пересчетных схем подсчитывает импульсы в каждой пачке. Каждая декада делит частоту на 10 и состоит из четырех триггеров, соединенных так, что каждый десятый импульс сбрасывает все триггеры на 0 и запускает следующую декаду. Определенное количество поступающих импульсов вызывает перебрасывание соответствующих триггеров в положение 0 или 1, чем достигается запоминание информации в двоично-десятичном коде.

Дешифратор Д преобразует двоично-десятичный код с выхода декады в десятичный. На одном из десяти выходов дешифратора образуется положительный импульс, управляющий соответствующим катодным ключом. Отрицательное напряжение подается на один из десяти катодов газоразрядных цифровых индикаторов, что вызывает высвечивание соответствующих цифр в устройстве цифрового отсчета УЦО.

Индикатор полярности и перегрузок ИП имеет триггеры, состояние которых зависит от состояния счетного блока СБ. На табло прибора в зависимости от измеряемого напряжения загораются знаки «+», «-» или «~». Если измеряемое напряжение превышает установленный предел измерений, загорается знак «П» (перегрузка).

Хронизатор Х определяет длительность цикла измерений от 0,1 до 5 с в автоматическом режиме. При переходе на внешний ручной запуск каждый цикл измерений происходит в момент нажатия кнопки. Перед каждым циклом измерений происходит сброс показаний на нуль.

Универсальный вольтметр В7-16 предназначен для автома-

тического измерения напряжений постоянного и переменного тока и активных сопротивлений. Прибор имеет цифровой четырехзначный отсчет показаний при времени преобразования 20 мс и трехзначный при 2 мс. Переменные напряжения с оценкой в действующих значениях измеряются только при времени преобразования 20 мс в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц и от 10 до 100 кГц соответственно при времени установления показаний 10 и 5 с. При переключении пределов измерений запятая на цифровом табло переставляется. Измеряемые напряжения и сопротивления, а также положение запятой для каждого предела измерений приведены в табл. 6.

Основные погрешности прибора при измерении постоянных напряжений составляют  $\pm (0,05 + 0,05 U_x/U)\%$  и  $\pm (0,1 + 0,1 U_x/U)\%$ , сопротивлений —  $\pm (0,2 + 0,02 R_x/R)\%$  и  $\pm (0,2 + 0,2 R_x/R)\%$  соответственно при времени преобразования 20 и 2 мс, а переменных напряжений на пределах 10, 100 и 1000 В в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц — не более  $\pm (0,5 + 0,02 U_x/U)\%$  (где  $U_x$  и  $R_x$  — конечные значения установленного предела измерений;  $U$  и  $R$  — показания прибора). Входное сопротивление прибора при измерении постоянных и переменных напряжений не менее 10 и 1 МОм, а входная емкость не более 120 пф.

Перед измерением напряжений прибор следует прогреть не менее 30 мин и, поочередно переключая переключатель рода работы в положения «0» и «▼», соответствующими регулировками установить на цифровом табло показание «0000» или калиброванное напряжение, полученное от калибратора КН. Перед измерением сопротивлений входной зажим прибора соединяют с зажимом внутреннего образцового резистора  $R_0$ , сопротивление которого, указанное на панели прибора, с помощью органов калибровки выставляют на цифровом табло.

Цифровые вольтметры с поразрядным кодированием (рис. 52) обладают высокой точностью измерений (погрешность порядка  $\pm 0,001\%$ ) и быстродействием. Принцип действия прибора состоит в том, что измеряемое постоянное напряжение  $U_{изм}$  поочередно сравнивается с образцовыми напряжениями  $U_{обр}$ , значения которых равны или кратны ряду  $2^5, 2^4, 2^3, 2^2, 2^1, 2^0$  (32, 16, 8, 4, 2, 1). Сравнение происходит по способу «много», т.е.  $U_{обр} > U_{изм}$ , или «мало», т.е.  $U_{обр} < U_{изм}$ . В первом случае образцовое напряжение отключается, а во втором остается и к нему добавляется ближайшее меньшее значение и снова производится сравнение.

Измеряемое постоянное напряжение, например  $U_{изм} = 11$  В, поступает через входное устройство ВУ на входной делитель

86 Таблица 6. Напряжения и сопротивления, измеряемые прибором В7-16 в положение запятой на его цифровом табло

Время пре- образова- ния, мс	Пределы измерений напряжений	Напряжение постоянного тока		Напряжение переменного тока		Пределы измерений сопротивлений	Сопротивление	
		от	до	от	до		от	до
20	1000 мВ	000,1	999,9	000,1	999,9	1000 Ом	000,1	999,9
	10 В	0,001	9,999	0,001	9,999	10 кОм	0,001	9,999
	100 В	00,01	99,99	00,01	99,99	100 кОм	00,01	99,99
	1000 В	000,1	999,9	000,1	999,9	1000 кОм	000,1	999,9
2	1000 мВ	001	999	—	—	10 МОм	0,001	9,999
	10 В	0,01	9,99	—	—	1000 Ом	001	999
	100 В	00,1	99,9	—	—	10 кОм	0,01	9,99
	1000 В	001	999	—	—	100 кОм	00,1	99,9
						1000 кОм	001	999
						10 МОм	0,01	9,99

ВД, позволяющий получить пределы измерений 1, 10, 100 и 1000 В. Переключение пределов выполняется вручную или автоматически под воздействием сигналов управляющего устройства.

Источник образцовых напряжений ИОН под воздействием тактовых импульсов управляющего устройства выдает поочередно в каждый такт образцовое постоянное напряжение: например, в первый такт — 32 В, во второй — 16 В, в третий — 8 В, в четвертый — 4 В и т. д.

Сравнивающее устройство СУ производит сравнение измеряемого напряжения с одним из образцовых. Например, в первый такт, когда  $U_{обр} = 32$  В больше  $U_{изм} = 11$  В, СУ выдает сигнал управления, отключающий  $U_{обр}$ . Во второй такт, когда  $U_{обр} = 16$  В также превышает  $U_{изм} = 11$  В, сигнал СУ снова отключает его. Таким образом, поданные в оба такта два образцовых напряжения оказываются неиспользованными и в соответствии с этим в разрядах счетчика в двоичном

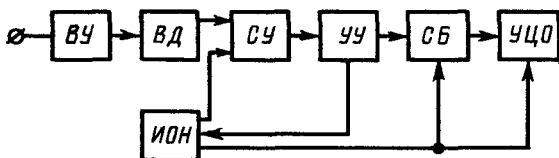


Рис. 52. Структурная схема цифрового вольтметра с поразрядным кодированием

коде появляются два нуля (00). В третий такт на СУ поступает  $U_{обр} = 8 \text{ В}$ , что меньше  $U_{изм} = 11 \text{ В}$ . При этом сигнал СУ не оказывает воздействия, это образцовое напряжение остается включенным, т. е. используется, и в разряде счетчика появляется единица (001). В четвертый такт на СУ поступает  $U_{обр} = 4 \text{ В}$  и измеряемое напряжение сравнивается с суммарным  $U_{обр} = 8 + 4 = 12 \text{ В}$ . Поскольку это напряжение превышает  $U_{изм} = 11 \text{ В}$ , СУ выдает сигнал управления, отключающий  $U_{обр} = 4 \text{ В}$ , т. е. оно не используется, и в разряде счетчика появляется еще один ноль (0010). В пятый такт на СУ поступает  $U_{обр} = 2 \text{ В}$  и измеряемое напряжение сравнивается с суммарным  $U_{обр} = 8 + 2 = 10 \text{ В}$ . Поскольку это напряжение меньше  $U_{изм} = 11 \text{ В}$ , выходной сигнал СУ не оказывает воздействия и  $U_{обр} = 2 \text{ В}$  остается включенным, т. е. используется, и в разряде счетчика появляется еще одна единица (00101). В шестой такт на СУ поступает  $U_{обр} = 1 \text{ В}$  и измеряемое напряжение сравнивается с суммарным  $U_{обр} = 8 + 2 + 1 = 11 \text{ В}$ . При этом измеряемое и суммарное напряжения оказываются равными,  $U_{обр} = 1 \text{ В}$  остается включенным, т. е. используется, и в разряде счетчика появляется еще одна единица (001011). В результате счетчик получает законченный двоичный код 1011, что соответствует числу 11 в десятичной системе.

Управляющее устройство УУ имеет генератор тактовых импульсов, определяющих ритм подачи образцовых напряжений, а также систему логических и коммутирующих устройств.

Счетный блок СБ и устройство цифрового отсчета УЦО преобразуют с помощью дешифратора двоичный код в десятичный, и на цифровом табло появляется значение измеряемого напряжения в цифровой форме.

Цифровые вольтметры с преобразованием напряжения в частоту имеют сравнительно высокую погрешность и сложную схему. Измеряемое постоянное напряжение преобразуется в последовательность импульсов, частота которых пропорциональна этому напряжению и измеряется электронно-

счетным частотомером, принцип действия которого будет рассмотрен в § 46.

Преобразовать напряжение в частоту можно, используя, например, метод управления частотой генератора, в колебательный контур которого кроме катушки индуктивности и конденсатора входит варикап—плоскостной диод, изменяющий свою емкость в зависимости от запирающего напряжения. Таким напряжением служит измеряемое, и чем оно больше, тем меньше емкость варикапа и значительно возрастает частота генератора, контролируемая электронно-счетным частотомером.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими приборами измеряют действующие переменные токи и напряжения промышленной частоты 50 Гц?
2. Как влияют на показания приборов их собственные индуктивности и емкости?
3. Каковы принцип действия, достоинства и недостатки термоэлектрических приборов?
4. Каков принцип действия измерительных выпрямителей средневыпрямленного, действующего и амплитудного напряжения?
5. Каково назначение шунтов и добавочных резисторов в выпрямительных амперметрах и вольтметрах?
6. Как рассчитывают резисторные и конденсаторные делители напряжения?
7. Каковы особенности измерительных приборов ВЗ-10А, Ц4315, В7-26 и ВЗ-41?
8. Каковы достоинства и недостатки цифровых вольтметров?
9. Из каких этапов состоит процесс измерения напряжений цифровыми вольтметрами?
10. Каков принцип действия цифровых вольтметров с время-импульсным преобразованием, поразрядным кодированием и преобразованием напряжения в частоту?

## ГЛАВА ПЯТАЯ

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

#### § 21. Общие сведения

Электрические цепи, состоящие из отдельных элементов—резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, соединенных проводниками в соответствии с принципиальной схемой, называют *цепями с сосредоточенными постоянными*. Основными параметрами этих элементов соответственно являются



ся сопротивление, емкость и индуктивность. Цепи с распределенными постоянными используют в диапазоне сверхвысоких частот, где емкости конденсаторов и индуктивности катушек малы и сопоставимы с соответствующими параметрами соединительных проводников.

Постоянные резисторы общего применения с допустимым отклонением от номинала 5–20% используются в качестве нагрузочных, гасящих, элементов фильтров, шунтов, а также в цепях формирования импульсов и делителях напряжений, а точные и прецизионные с допустимым отклонением 0,5–2% — в измерительной аппаратуре, счетно-решающих и вычислительных устройствах, а также системах автоматики. Переменные резисторы применяют в качестве регулировочных и подстроечных.

Конденсаторы постоянной емкости с допустимым отклонением от номинала до 5 и 20% используются соответственно в качестве контурных и разделительных или блокировочных. Конденсаторы переменной емкости служат для настройки частоты контуров, а подстроечные — для точной ее регулировки. Одним из параметров конденсаторов является добротность  $Q_c$ , которая зависит от качества диэлектрика и определяется через тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = 1/Q_c$ .

Маловитковые катушки индуктивности без сердечника и с ферромагнитным сердечником используются в контурах и дросселях цепей высокой частоты, а многовитковые с П- или Ш-образным сердечником из электротехнической стали — в качестве трансформаторов и дросселей цепей низкой и промышленной частоты 50 Гц. Основным параметром катушек является индуктивность  $L$ , зависящая от их размеров, формы и числа витков, а также формы и материала сердечника. Значения индуктивности катушек не стандартизованы. Высокочастотные катушки имеют индуктивность от единиц микрогенри до сотен миллигенри, а низкочастотные — от единиц до сотен генри. Кроме индуктивности параметрами катушек являются добротность  $Q_L$ , собственная емкость  $C_k$  и температурный коэффициент индуктивности ТКИ.

## § 22. Прямопоказывающие омметры

Приборы с непосредственным отсчетом сопротивления по шкале магнитоэлектрического механизма называют *омметрами*.

Последовательный электромеханический омметр, применяемый для измерения сопротивлений до 1 МОм,

является пробником (рис. 53), в схему которого входят последовательно соединенные один элемент  $E$ , эдс которого равна 1,5 В, магнитоэлектрический механизм и добавочный резистор  $R_{\text{доб}}$ , составленный из резисторов  $R$  и  $R_{\text{пер}}$ . Добавочный резистор служит для ограничения тока в цепи при короткозамкнутом входе прибора и устранения перегрузки измерительного механизма.

**Пример 9.** Рассчитаем сопротивления резисторов  $R$  и  $R_{\text{пер}}$  для получения полного отклонения стрелочного указателя при короткозамкнутом входе пробника. Параметры измерительного механизма:  $I_{\text{н}} = 50$  мкА и  $R_{\text{н}} = 2000$  Ом.

Общее внутреннее сопротивление пробника  $R_{\text{общ}} = R_{\text{доб}} + R_{\text{н}} = E/I_{\text{н}} = 1,5/0,05 = 30$  кОм, откуда  $R_{\text{доб}} = R_{\text{общ}} - R_{\text{н}} = 30 - 2 = 28$  кОм. Для точной установки стрелочного указателя на конечную отметку шкалы используем, например, переменный резистор  $R_{\text{пер}} = 8$  кОм и рассчитаем сопротивление резистора  $R = R_{\text{доб}} - R_{\text{пер}}/2 = 28 - 8/2 = 24$  кОм. Переменным резистором  $R_{\text{пер}}$  можно изменять общее внутреннее сопротивление пробника в пределах от 26 до 34 кОм и при короткозамкнутом входе устанавливать стрелочный указатель на конечную отметку шкалы.

Шкалу магнитоэлектрического механизма градуируют в килоомах и используют пробник как прямопоказывающий последовательный омметр. Числовые значения шкалы сопротивлений возрастают справа налево, потому что чем больше сопротивление подключаемого ко входу измеряемого резистора, тем меньше ток в цепи и отклонение указателя. Конечную отметку шкалы при короткозамкнутом входе обозначают 0, а начальную при разомкнутом —  $\infty$ . Отметку на середине шкалы следует обозначить 30 кОм, потому что подключение измеряемого сопротивления, равного общему внутреннему сопротивлению пробника, вызывает уменьшение тока вдвое. Поскольку погрешность отсчета вблизи начальной и конечной отметок чрезмерно велика, таким омметром можно измерять сопротивления в пределах от 10 до 100 кОм с отсчетом на центральном участке шкалы.

Пробники широко применяют для проверки исправности электрических цепей или обнаружения нежелательных соединений.

Многопредельный омметр имеет одну градуировку шкалы сопротивлений для пределов измерений  $\times 1$ ,  $\times 10$ ,  $\times 100$  и  $\times 1000$  Ом, для чего переключением шунтовых и добавочных резисторов изменяют общее внутреннее сопротивление омметра в  $10^n$  раз. Многопредельный омметр, показанный на

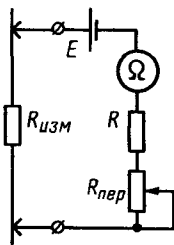


Рис. 53. Схема пробника

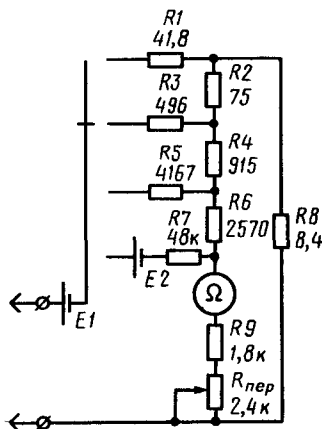


Рис. 54. Схема многопределного омметра

рис. 54, для упрощения переключения пределов выполнен так, что при переходе на больший предел измерений переключаются только добавочные резисторы  $R1$ ,  $R3$ ,  $R5$  и  $R7$ , а сопротивления шунтовых резисторов  $R2$ ,  $R4$ ,  $R6$  и  $R8$  суммируются. Для расчета сопротивлений резисторов необходимо выбрать сопротивление индикаторной цепи  $R_{\text{ц}} = R_{\text{и}} + R_9 + R_{\text{пер}}/2$  и значение средней отметки шкалы.

**Пример 10.** Рассчитаем сопротивления добавочных и шунтовых резисторов для схемы омметра, показанной на рис. 54. Параметры измерительного механизма:  $I_{\text{и}} = 50 \text{ мкА}$ ;  $R_{\text{и}} = 2000 \text{ Ом}$ .

Выберем  $R_{\text{ц}} = 5 \text{ кОм}$  и рассчитаем суммарное сопротивление  $R_9 + R_{\text{пер}}/2 = R_{\text{ц}} - R_{\text{и}} = 5 - 2 = 3 \text{ кОм}$ . При сопротивлении переменного резистора  $R_{\text{пер}} = 2,4 \text{ кОм}$  сопротивление резистора  $R_9 = 3 - 2,4/2 = 1,8 \text{ кОм}$ . При средней отметке 50 отсчет можно производить в центральной части шкалы вправо до 10 и влево до 100.

На пределе  $\times 1 \text{ Ом}$  общее внутреннее сопротивление омметра  $R_{\text{общ}} = 50 \text{ Ом}$ . При короткозамкнутом входе максимальный ток  $I_{\text{max}} = 1,5 \cdot 10^3 / 50 = 30 \text{ мА}$ . Через шунтовый резистор  $R8$  проходит ток  $I_{\text{ш}} = I_{\text{max}} - I_{\text{и}} = 30 - 0,05 = 29,95 \text{ мА}$  и его сопротивление  $R8 = R_{\text{ц}} I_{\text{и}} / I_{\text{ш}} = 5000 \cdot 0,05 / 29,95 = 8,4 \text{ Ом}$ . Сопротивление добавочного резистора  $R1 = R_{\text{общ}} - R_{\text{ц}} R8 / (R_{\text{ц}} + R8) = 50 - 5000 \cdot 8,4 / (5000 + 8,4) = 41,8 \text{ Ом}$ .

Расчет остальных резисторов для других пределов измерений выполняют аналогично; получаемые при этом сопротивления даны на схеме.

На пределе  $\times 1000$  Ом напряжение 1,5 В источника  $E_1$  суммируется с напряжением 4,5 В источника  $E_2$ , что необходимо для увеличения тока. В связи с некоторыми допущениями в расчете следует для каждого предела измерений подобрать добавочные резисторы  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  и  $R_7$  так, чтобы стрелочный указатель точно установился на среднюю отметку шкалы при подключении ко входу омметра образцовых резисторов сопротивлением 50 и 500 Ом, 5 и 50 кОм соответственно для каждого предела измерений.

Такие многопредельные омметры применяют в комбинированных приборах — ампервольтомметрах и предназначены для измерения сопротивлений от десятков ом до сотен килоом с погрешностью до 3–4%. Для измерения больших сопротивлений следует увеличить напряжение источника тока. В ампервольтомметрах предусмотрена возможность подключения внешнего источника напряжением 40–50 В, что позволяет расширить верхний предел измерений до нескольких мегаом. В приборах для измерений очень больших сопротивлений — мегаомметрах применяют источники тока напряжением сотни и тысячи вольт, в качестве которых служат индукторы — малогабаритные электрические машины с ручным приводом, высоковольтные выпрямители и преобразователи постоянного тока. Измерение последовательным омметром малых сопротивлений невозможно из-за резкого возрастания потребляемого тока и значительного влияния внутреннего сопротивления источника.

Параллельный электромеханический омметр (рис. 55), применяемый для измерения сопротивлений от единиц до сотен ом, отличается от последовательного (см. рис. 53) тем, что резистор  $R_{изм}$  включают не в разрыв последователь-

ной цепи, а параллельно магнитоэлектрическому механизму. Основным достоинством такого омметра является то, что при измерении очень малых сопротивлений потребляемый ток, ограниченный резисторами  $R$  и  $R_{пер}$ , сравнительно невелик.

Перед измерениями при разомкнутом входе омметра стрелочный указатель устанавливают перемен-

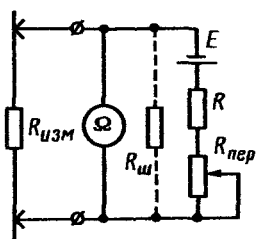


Рис. 55. Параллельная схема омметра

ным резистором  $R_{\text{пер}}$  на конечную отметку шкалы, обозначенную со. Так как шкала магнитоэлектрического механизма проградуирована в омах, прибор используют как прямопоказывающий. Значения шкалы сопротивлений параллельного омметра возрастают слева направо, поэтому комбинированные приборы имеют отдельную градуировку (см. рис. 1). Общее внутреннее сопротивление такого омметра со стороны входных зажимов  $R_{\text{общ}} = R_{\text{доб}} R_{\text{ш}} / (R_{\text{доб}} + R_{\text{ш}})$ . Обычно сопротивление добавочного резистора  $R_{\text{доб}}$  много больше сопротивления  $R_{\text{ш}}$  измерительного механизма, например, если  $R_{\text{доб}} = 28 \text{ кОм}$ , а  $R_{\text{ш}} = 2 \text{ кОм}$  (см. пример 9), то  $R_{\text{общ}} = R_{\text{ш}} = 2000 \text{ Ом}$ . Следовательно, отметку на середине шкалы следует обозначить 2000, так как подключение измеряемого резистора, сопротивление которого равно общему внутреннему сопротивлению омметра, вызывает уменьшение тока вдвое.

Очень малые сопротивления измеряют магнитоэлектрическим механизмом с небольшим сопротивлением или включают шунтовой резистор, сопротивление которого рассчитывают по формуле  $R_{\text{ш}} = R_{\text{ш}} R_{\text{сп}} / (R_{\text{ш}} - R_{\text{сп}})$ , задавшись определенным значением средней отметки шкалы  $R_{\text{сп}}$ . При измерении таких малых сопротивлений, как десятые, сотые и тысячные доли ома, следует применять мощные источники тока и уменьшать сопротивление подводящих и соединительных проводников.

Электронный омметр представляет собой электронный вольтметр постоянного тока, имеющий измерительную схему, преобразующую измеряемое сопротивление в пропорциональное ему постоянное напряжение. Шкалу такого вольтметра градуируют в единицах измеряемого сопротивления и применяют его как прямопоказывающий омметр. Образцовый  $R_0$  и измеряемый  $R_{\text{изм}}$  резисторы соединяют последовательно и подключают к источнику питающего стабилизированного напряжения  $E_{\text{ст}}$ , которое делится на две части, пропорциональные сопротивлениям этих резисторов. Если вольтметром контролируют напряжение на образцовом резисторе  $R_0$  (рис. 56, а), то чем больше сопротивление  $R_{\text{изм}}$  измеряемого резистора, тем это напряжение меньше и значения шкалы сопротивлений возрастают справа налево от нуля до бесконечности. Если вольтметром контролируют напряжение на измеряемом резисторе  $R_{\text{изм}}$  (рис. 56, б), то, наоборот, чем больше его сопротивление, тем это напряжение больше и значения шкалы сопротивлений возрастают слева направо от нуля до бесконечности. Средняя отметка шкалы в обоих случаях должна иметь обозначение 1, так как сопротивления резисторов  $R_0$  и  $R_{\text{изм}}$  равны и вольтметр измеряет половину питающего напряжения.

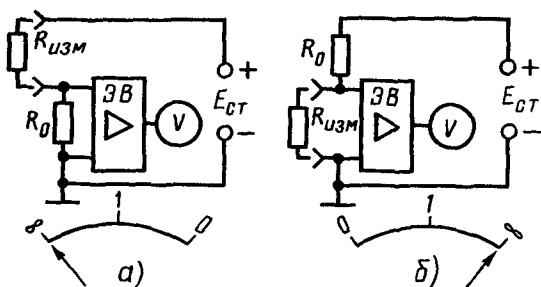


Рис. 56. Подключение электронного вольтметра к образцовому (а) и измеряемому (б) резисторам

Перед измерениями следует установить стрелочный указатель на нулевую отметку шкалы сопротивлений при короткозамкнутых входных зажимах и на отметку  $\infty$  при разомкнутых. Если первый предел измерений электронного вольтметра равен 1 В, питающее напряжение  $E_{ст}$  также должно быть равно 1 В, что позволяет при калибровке получить полное отклонение стрелочного указателя, поскольку это напряжение полностью поступает на вход вольтметра. Для расширения пределов измерений сопротивлений применяют несколько образцовых резисторов сопротивлением 0,1; 1; 10; 100 кОм; 1 и 10 Мом, что позволяет для отсчета измеряемых сопротивлений использовать одну градуировку шкалы с соответствующими множителями  $\times 100$  Ом,  $\times 1$  кОм,  $\times 10$  кОм,  $\times 100$  кОм,  $\times 1$  МОм и  $\times 10$  МОм.

Омметры, выполненные по таким схемам, были показаны на рис. 45 и 46. В приборе В7-26 (см. рис. 45) для измерения сопротивлений от 10 Ом до 1000 МОм с погрешностью до 3% резисторы входного делителя используются как образцовые. Питающее напряжение 1 В создается на резисторе  $R_{13}$ , который вместе с резистором  $R_{14}$  является делителем постоянного напряжения 6 В.

В электронном вольтметре на полевых транзисторах (см. рис. 46) для измерения сопротивлений от 100 Ом до 100 МОм в качестве образцовых используются резисторы  $R_8$ – $R_{11}$  и резистор  $R_{18}$ , сопротивление которого с учетом шунтирующего действия резисторов  $R_{19}$ – $R_{21}$  должно быть 1 кОм. Эти резисторы являются постоянно подключенным к источнику питания 9 В делителем напряжения, позволяющим получить напряжение 1 В.

Точный подбор сопротивлений резисторов  $R_{18}$ – $R_{21}$  выполняют при регулировке, добиваясь установки указателя точно на

среднюю отметку шкалы «1» при подключении к входным зажимам образцового резистора сопротивлением 1 кОм. Питающее напряжение изменяют в небольших пределах переменным резистором  $R_{21}$ , что позволяет перед измерениями при разомкнутом входе устанавливать указатель точно на конечную отметку шкалы, обозначающую предел 1 В по шкале напряжений и бесконечность по шкале сопротивлений.

## § 23. Метод вольтметра – амперметра

Методом вольтметра – амперметра определяют сопротивление резисторов на постоянном токе и емкость конденсаторов, индуктивность и взаимную индуктивность катушек на переменном. Этот метод является косвенным и состоит в том, что измеряют напряжение и ток, а искомые величины рассчитывают.

Сопротивление резисторов и других элементов цепей (рис. 57, а, б) рассчитывают по формуле  $R_{изм} = U/I$  (где  $U$  и  $I$  – напряжение и ток, соответственно отсчитанные по шкалам вольтметра  $V$  и амперметра  $A$ ). Собственное потребление мощности вольтметром и амперметром вызывает присущую этому методу погрешность измерений.

В схеме, показанной на рис. 57, а, амперметр измеряет ток  $I$ , равный сумме токов  $I_R$  и  $I_V$ , проходящих через измеряемый резистор  $R_{изм}$  и вольтметр  $V$ . Погрешность метода мала в том случае, когда сопротивление измеряемого резистора  $R_{изм}$  много меньше сопротивления вольтметра  $R_V$  и током вольтметра  $I_V$  можно пренебречь. Относительная погрешность метода  $\gamma = R_{изм}/(R_{изм} + R_V) \approx R_{изм}/R_V$ .

В схеме, показанной на рис. 57, б, вольтметр измеряет напряжение  $U$ , равное сумме напряжений  $U_A$  и  $U_R$  соответственно на амперметре  $A$  и измеряемом резисторе  $R_{изм}$ . Погреш-

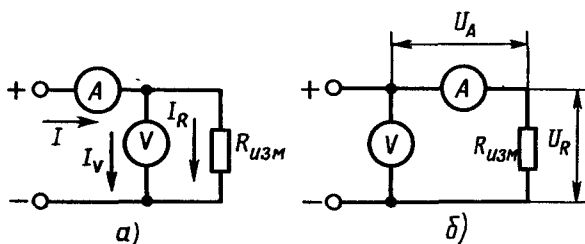


Рис. 57. Измерение сопротивлений включением амперметра:

а – до вольтметра, б – после вольтметра

ность метода мала в том случае, когда сопротивление измеряемого резистора  $R_{изм}$  много больше сопротивления амперметра  $R_A$  и напряжением  $U_A$  на амперметре можно пренебречь. Относительная погрешность метода  $\gamma = R_A / (R_{изм} + R_A) \approx R_A / R_{изм}$ .

При косвенных измерениях кроме погрешности метода  $\gamma$  следует учитывать погрешность приборов  $\gamma' = \sqrt{\gamma_V^2 + \gamma_A^2}$ , где  $\gamma_V$  и  $\gamma_A$  — относительные погрешности вольтметра и амперметра.

Емкость конденсаторов измеряют по схеме, показанной на рис. 58. Полное сопротивление конденсатора, примерно равное реактивному, определяют как отношение показаний вольтметра и амперметра  $Z \approx X_C = 1 / (2\pi f C_{изм}) = U / I$ , откуда  $C_{изм} = I / (2\pi f U)$ . При измерении сравнительно больших емкостей в качестве источника питания используют сеть переменного тока частотой 50 Гц. В тех случаях, когда показания амперметра на самом чувствительном пределе измерений недостаточны, следует в качестве источника питания использовать измерительный генератор и увеличивать частоту сигнала до 5 кГц.

Индуктивность катушек без сердечников измеряют по схеме, показанной на рис. 59. Полное сопротивление катушки, примерно равное реактивному, определяют как отношение показаний вольтметра и амперметра  $Z \approx X_L = 2\pi f L_{изм} = U / I$ , откуда  $L_{изм} \approx U / (2\pi f I)$ . В качестве источника питания в этом случае также используют сеть переменного тока или измерительный генератор, частоту сигнала которого при малых показаниях амперметра следует уменьшать.

Индуктивность катушек с сердечником зависит от их геометрических размеров и числа витков и изменяется при изменении постоянной составляющей тока, вызывающей подмагничивание сердечника. Ток подмагничивания создают включением дополнительного источника постоянного тока  $E$ , регули-

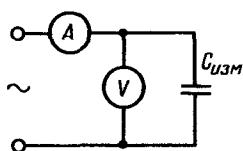


Рис. 58. Измерение емкости конденсаторов методом вольтметра — амперметра

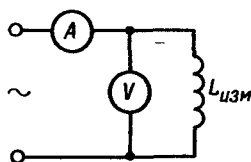


Рис. 59. Измерение индуктивности катушек без сердечника методом вольтметра — амперметра



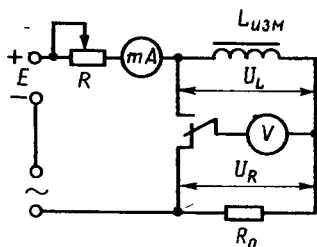


Рис. 60. Измерение индуктивности катушек с сердечником методом вольтметра – амперметра

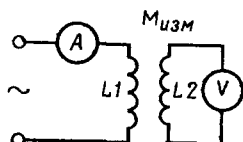


Рис. 61. Измерение взаимной индуктивности двух катушек методом вольтметра – амперметра

руют переменным резистором  $R$  и отсчитывают по миллиамперметру  $mA$  (рис. 60). В положении 1 переключателя  $\Pi$  вольтметр  $V$  измеряет переменное напряжение  $U_L$  на катушке  $L_{изм}$ , а в положении 2 – переменное напряжение  $U_R$  на образцовом резисторе  $R_0$  и переменный ток в цепи катушки  $I = U_R/R_0$ . При этом измеряемая индуктивность  $L_{изм} = U_L/(2\pi f I) = U_L R_0/(2\pi f U_R)$ .

Взаимную индуктивность измеряют по схеме, показанной на рис. 61. Наведенная во второй катушке  $L2$  эдс  $E_2$  примерно равна напряжению  $U_2$ , измеренному вольтметром  $V$ , и зависит от взаимной индуктивности  $M_{изм}$ , тока  $I_1$  первой катушки  $L1$  и частоты:  $E_2 \approx U_2 \approx I_1 2\pi f M_{изм}$ , откуда  $M_{изм} = U_2/(2\pi f I_1)$ . Если в качестве источника питания используют сеть переменного тока частотой 50 Гц, напряжение  $U_2$  может быть недостаточным. Для увеличения показаний вольтметра следует в качестве источника использовать измерительный генератор, повышая частоту сигнала до 5 кГц.

Достоинствами метода вольтметра-амперметра являются простота схем и процесса измерений, а также возможность применения широко распространенных приборов. Однако невысокая точность измерений (погрешность до 10–15%) и невозможность прямого отсчета измеряемой величины ограничивают применение этого метода.

## § 24. Мостовой метод

Мостовым методом измеряют сопротивления резисторов и других элементов цепей на постоянном токе и активные сопротивления, емкости конденсаторов, индуктивности катушек, а также их добротность на переменном.

**Мосты постоянного тока.** Схема моста постоянного тока (рис. 62) состоит из четырех резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_{изм}$ , соединенных последовательно в четырехугольник, стороны которого называют плечами моста. К одной диагонали моста (точкам  $a$  и  $b$ ) подводят постоянное питающее напряжение  $E$ , а в другую (точки  $b$  и  $z$ ) включают чувствительный магнитоэлектрический прибор  $I$ , называемый нуль-индикатором.

При определенном подборе сопротивлений резисторов создается равновесие (баланс) моста, при котором ток в индикаторной диагонали отсутствует и стрелочный указатель нуль-индикатора устанавливается на нулевую отметку шкалы. Условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч:  $R_1 R_3 = R_2 R_{изм}$ . Если одно из этих сопротивлений является измеряемым  $R_{изм}$ , его можно определить из соотношения  $R_{изм} = R_1 R_3 / R_2$ .

Для плавной регулировки равновесия в схему моста включают потенциометр  $R$  с линейным изменением сопротивления, отсчетная шкала которого проградуирована в отношениях сопротивлений его частей (рис. 63). Последовательно потенциометру включены два ограничительных резистора  $R_{огр}$ , сопротивления которых в 4 раза меньше его сопротивления. В результате уменьшается неравномерность отсчетной шкалы и ее граничные значения от 0 до  $\infty$  сужаются соответственно до 0,2 и 5. Несколько диапазонов измерений получают, переключая резисторы  $R_2$ , сопротивления которых равны 1, 10, 100 Ом и т.д.

Процесс измерений состоит в том, что, вращая ручку потенциометра  $R$ , на одном из диапазонов находят положение равновесия. Измеряемое сопротивление определяют как произведение полученного по шкале отсчетного значения на сопротивление ре-

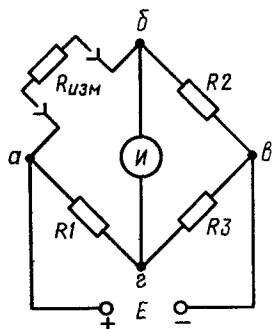


Рис. 62. Схема моста постоянного тока

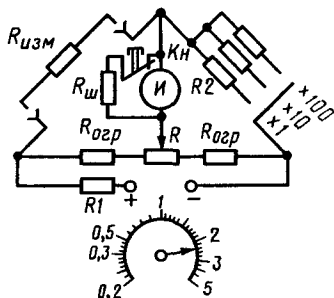


Рис. 63. Схема потенциометрического моста постоянного тока

зистора  $R_2$  данного диапазона. Применение магнитоэлектрического прибора высокой чувствительности позволяет повысить точность установки положения равновесия. Прибор защищают от перегрузок параллельным включением шунтового резистора  $R_{ш}$ , который отключают нажатием кнопки  $K_n$  только тогда, когда найдено примерное положение равновесия и стрелочный указатель близок к нулевой отметке. При этом показания прибора возрастают и, осторожно вращая ручку потенциометра, уточняют положение равновесия, снова добиваясь уменьшения показаний до нуля.

Такие одинарные мосты пригодны для измерения сопротивлений от 1 Ом до 1 МОм. Измерение больших сопротивлений ограничено чувствительностью нуль-индикатора и напряжением источника питания. При измерении малых сопротивлений из-за влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных контактов возникает дополнительная погрешность. Предварительное измерение этих сопротивлений при короткозамкнутом входе и их учет при оценке результата измерений позволяет в некоторой мере устранить эту дополнительную погрешность. Для измерения сопротивлений до 1 мкОм используют двойные мосты постоянного тока, в которых влияние указанных сопротивлений устранено.

Комбинированные мосты, например P329, применяют как одинарные при измерении сопротивлений от 50 Ом до 100 кОм с погрешностью 0,05% (до 1000 кОм с погрешностью 0,5%) и как двойные при измерении сопротивлений от 100 Ом до 1 мкОм с погрешностью 0,5–1,5%.

Основными достоинствами мостов постоянного тока являются высокие чувствительность и точность измерений. Для повышения чувствительности равноплечего моста увеличивают напряжение питания и применяют высокочувствительный магнитоэлектрический прибор — гальванометр, показания которого заметны при незначительном изменении сопротивления в одном из плеч моста. Очень малую погрешность измерений (порядка 0,5–0,05% и меньше) получают при высокой точности фиксации состояния равновесия и применении точных и стабильных резисторов и магазинов.

Мосты постоянного тока широко используются при измерении и контроле таких неэлектрических величин, как температура, давление, влажность, деформации, изменение которых специальными датчиками преобразуется в изменение сопротивления одного из плеч мостовой схемы.

**Мосты переменного тока.** В схеме моста переменного тока (рис. 64), плечами которого в общем случае служат комплексные

сопротивления  $Z_1$ – $Z_4$ , одно является объектом измерения. Подающее переменное напряжение частотой 100 или 1000 Гц подводят к одной диагонали моста, а в другую включают чувствительный нуль-индикатор  $I$  переменного тока, в качестве которого может служить головной телефон или электронный вольтметр, выполненный по схеме усилитель-выпрямитель. Равновесие мостов переменного тока обеспечивается при выполнении двух условий:  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$  и  $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$  (где  $Z$  и  $\varphi$  – модуль и фазовый сдвиг комплексных сопротивлений).

Процесс измерений мостами переменного тока такой же, как мостами постоянного тока. Для получения равновесия по модулям сопротивлений регулируют сопротивление элементов плеч моста, а по фазам (при соответствующей компоновке схемы) – фазовые сдвиги плеч. Поскольку обе регулировки взаимосвязаны, используют способ последовательных приближений, т. е. поочередно вращая отсчетную и фазовую ручки, добиваются наибольшего приближения стрелочного указателя к нулевой отметке шкалы нуль-индикатора  $I$ . Процесс регулировки трудоемок и требует определенных навыков. Наиболее удобными регулируемыми элементами являются резисторы, поэтому в схемах мостов переменного тока в двух плечах устанавливают переменные резисторы, а в двух других – реактивные элементы, из которых один является объектом измерений, а другой – образцовым высококачественным конденсатором  $C_0$  емкостью 0,1 или 1 мкФ.

В схеме моста для измерения емкости и угла потерь (рис. 65) измеряемый  $C_{изм}$  и образцовый  $C_0$  конденсаторы включены в соседние плечи, что позволяет выполнить второе условие равновесия. В два других плеча включены переменный резистор  $R_1$ , которым регулируют равновесие схемы, и резистор  $R_2$ , определяющий диапазон измерений.

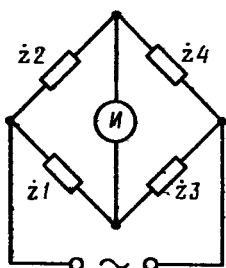


Рис. 64. Схема моста переменного тока

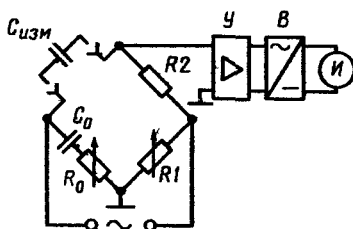


Рис. 65. Схема моста для измерения емкости и угла потерь конденсаторов

Для получения нескольких диапазонов используют переключаемые резисторы с декадными значениями сопротивлений. При измерениях, изменяя сопротивление резистора  $R_1$ , находят на одном из диапазонов примерное положение равновесия. Из первого условия равновесия мостов переменного тока следует, что  $R_1/\omega C_{\text{изм}} = R_2/\omega C_0$ , откуда  $C_{\text{изм}} = C_0 R_1/R_2$ . Таким образом, измеряемая емкость сравнивается с емкостью образцового конденсатора, при этом коэффициентом сравнения служит отношение сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Так как резистор  $R_0$  уменьшает фазовый сдвиг образцового плеча, его движок перед измерением устанавливают на нуль. После нахождения примерного положения равновесия вводят сопротивление резистора  $R_0$ , добиваясь получения более точного положения равновесия, при котором стрелочный указатель нуль-индикатора приблизится к нулевой отметке. При полном равновесии потери образцового плеча компенсируют потери измеряемого конденсатора и  $\text{tg } \delta = \omega C_{\text{изм}} R_{\text{п}} = \omega C_0 R_0$ . При неизменных емкости образцового конденсатора и частоте шкалу переменного резистора  $R_0$  градуируют в значениях тангенса угла потерь и выполняют по ней отсчет.

В схеме моста для измерения индуктивности и добротности катушек (рис. 66) в качестве образцового также используется конденсатор  $C_0$ . Для выполнения второго условия равновесия по фазовым сдвигам измеряемую катушку  $L_{\text{изм}}$  и конденсатор  $C_0$  включают в противоположные плечи. Регулировку равновесия также выполняют переменным резистором  $R_1$ . Из первого условия равновесия мостов переменного тока следует, что  $R_1 R_2 = \omega L_{\text{изм}} / \omega C_0$ , откуда  $L_{\text{изм}} = C_0 R_1 R_2$ . Таким образом, измеряемая индуктивность сравнивается с емкостью образцового конденсатора, при этом коэффициентом сравнения служит произведение сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . При измерениях переменный резистор  $R_0$ , включенный параллельно конденсатору  $C_0$ , устанавливают в произвольное положение и способом последовательных приближений, поочередно регулируя резисторы  $R_1$  и  $R_0$ , добиваются состояния равновесия. Из условия равновесия по активным сопротивлениям сопротивление потерь катушки  $R_{\text{п}} = R_1 R_2 / R_0$ , поэтому шкалу резистора  $R_0$  градуируют в значениях добротности и выполняют по ней отсчет.

Взаимную индуктивность  $M$  двух катушек  $L_1$  и  $L_2$  определяют мостом для измерения индуктивностей. Это измерение выполняют два раза при последовательном согласном (рис. 67, а) и встречном (рис. 67, б) соединении катушек. В первом случае магнитные поля складываются и общая измеренная индуктивность  $L' = L_1 + L_2 + 2M$ , а во втором вычитаются и  $L'' = L_1 + L_2 - 2M$ .

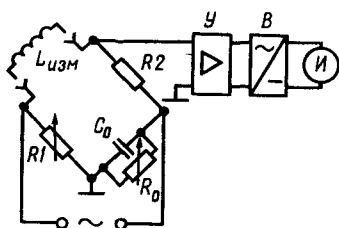


Рис. 66. Схема моста для измерения индуктивности и добротности катушек

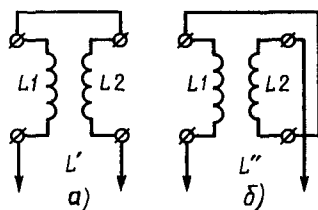


Рис. 67. Соединения катушек для измерения взаимной индуктивности:

а – согласное, б – встречное

Разность  $L' - L'' = 4M$ , откуда  $M = (L' - L'')/4$ . Таким образом взаимная индуктивность равна одной четверти разности измеренных индуктивностей при последовательном согласном и встречном соединении обеих катушек.

Измерительная схема универсального моста показана на рис. 68.

В режиме измерений емкостей («Мост С») измеряемый объект подключают к зажимам «R-C-L» плеча а-б, а в плечо б-в переключателем П1 «Множитель – пределы измерения»

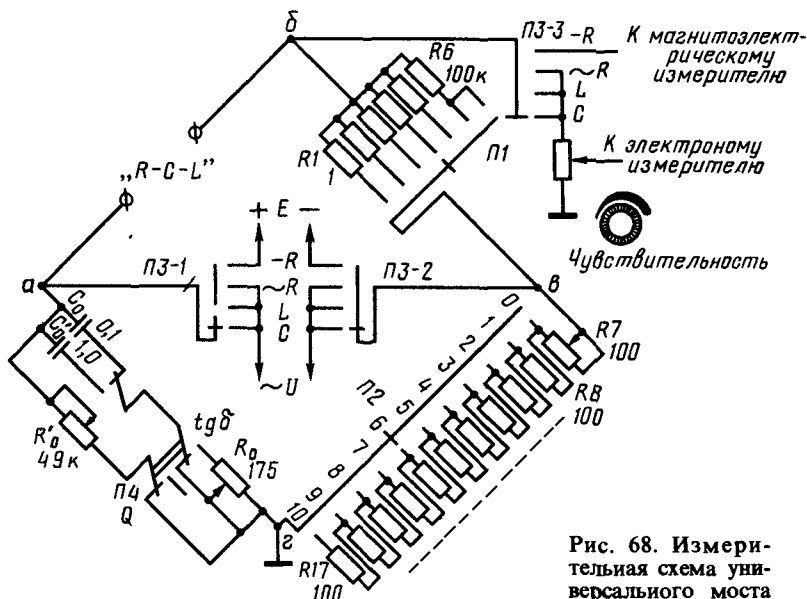


Рис. 68. Измерительная схема универсального моста

включают один из шести резисторов  $R1-R6$  соответственно сопротивлением 1, 10 и 100 Ом, 1, 10 и 100 кОм.

Отсчетное плечо  $\epsilon-z$  состоит из последовательно соединенных декадного магазина резисторов  $R8-R17$  сопротивлением 100 Ом каждый и регулировочного резистора  $R7$ . В положении 0 переключателя  $P2$  резисторы  $R8-R17$  отключены и сопротивление плеча  $\epsilon-z$  можно изменять от 0 до 100 Ом резистором  $R7$ , шкала которого проградуирована в относительных единицах от 0,1 до 1,1. В положениях 1, 2 и т. д. переключателя  $P2$  к переменному резистору  $R7$  последовательно подключаются резисторы  $R8, R9$  и т. д. При этом сопротивление плеча  $\epsilon-z$  изменяется соответственно от 100 до 200, от 200 до 300 Ом и т. д. и отсчет выполняют в пределах от 1,1 до 2,1, от 2,1 до 3,1 и т. д. Следовательно, отсчеты по шкалам резистора  $R7$  и переключателя  $P2$  следует просуммировать.

В плечо  $z-a$  включен образцовый конденсатор  $C_0$  емкостью 0,1 мкФ при питании схемы от источника частотой 1000 Гц, а при переключении на частоту 100 Гц подключается конденсатор  $C_0'$  емкостью 1 мкФ и зажигается транспарант « $LC \times 10$ », указывающий, что полученный результат измерений индуктивности или емкости следует умножить на 10.

При измерении конденсаторов и катушек большой добротности переменный резистор  $R_0$  сопротивлением 175 Ом со шкалой, проградуированной в значениях  $\operatorname{tg} \delta$  от 0,002 до 0,1, включают последовательно с образцовым конденсатором, для чего переключатель  $P4$  переводят в положение « $\operatorname{tg} \delta$ » и выполняют отсчет по его шкале. Добротность катушек и конденсаторов  $Q = 1/\operatorname{tg} \delta$ . При измерении катушек малой добротности переменный резистор  $R_0'$  сопротивлением 49 кОм со шкалой, проградуированной в значениях  $Q$  от 1 до 30, включают параллельно образцовому конденсатору, для чего переключатель  $P4$  переводят в положение « $Q$ ». Обе шкалы расположены на одном диске, поскольку резисторы имеют общую ось и общее управление.

В режиме измерений индуктивностей («Мост  $L$ ») происходит перестановка отсчетного и образцового плеч, т. е. образцовое плечо включается между точками  $\epsilon-z$ , а отсчетное — между точками  $a-z$ .

В режиме измерений активных сопротивлений («Мост  $\sim R$ ») к точкам  $a-z$  вместо показанных на рис. 68 образцовых конденсатора  $C_0$  и резистора  $R_0$  в шести положениях переключателя  $P1$  подключается резистор 100 Ом, а в седьмом — резистор 10 Ом.

В режимах измерения  $C, L$  и  $\sim R$  схема получает питание от источника переменного тока частотой 1000 или 100 Гц. Нуль-

индикатором служит электронный вольтметр, имеющий ручную и автоматическую регулировку чувствительности.

В режиме измерений омических сопротивлений («Мост =  $R$ ») схема остается такой же, как в режиме измерений активных сопротивлений («Мост  $\sim R$ »), но питание подается от источника постоянного тока напряжением 50 В, а нуль-индикатором служит магнитоэлектрический прибор.

В процессе настройки измерительной схемы универсального моста необходимо установить переключатель  $П2$  отсчетного плеча в положение 0, а резистор  $R7$  — в произвольное положение, но только не на нуль, и незначительно увеличить чувствительность до установки стрелочного указателя в пределах шкалы. Переключением пределов измерений найти такой, при котором показание нуль-индикатора будет наименьшим. Регулируя сопротивление резистора  $R7$ , определить положение равновесия и уточнить его при увеличении чувствительности нуль-индикатора. Более точный отсчет можно получить, если увеличить показания отсчетного плеча в 10 раз, например вместо полученного значения 0,63 установить  $6 + 0,3$  и во столько же раз уменьшить предел измерений. Точное положение равновесия определяют поочередной регулировкой резисторов  $R7$  и  $R_0$ . Настройка схемы окончена, если незначительный поворот ручек этих резисторов вызывает резкое увеличение показаний. Результат измерений находят как произведение суммы показаний отсчетного плеча на установленный предел измерений.

## § 25. Резонансный метод

Резонансный метод основан на измерении частоты колебательного контура, состоящего из образцового конденсатора  $C_0$  и измеряемой катушки индуктивности  $L_{изм}$  (или наоборот  $C_{изм}$  и  $L_0$ ), и определении искомого параметра по формуле  $f =$

$= 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Достоинством этого метода является то, что измерения выполняют на частотах, на которых должны работать данный конденсатор или катушка индуктивности.

Измерительная установка состоит из источника сигналов — генератора высокой частоты, измерительного контура и индикатора резонанса. В качестве источника сигналов удобен диапазонный генератор высокой частоты, позволяющий изменять частоту в широких пределах и отсчитывать ее значение по частотной шкале. В случае применения генератора фиксированной частоты следует иметь в измерительном контуре орган настройки, например конденсатор переменной емкости. Индикаторами



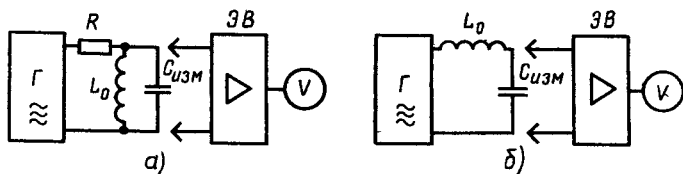


Рис 69 Подключение к генератору параллельного (а) и последовательного (б) измерительных контуров

резонанса обычно служат высокочастотные вольтметры и амперметры, контролирующие резкое возрастание напряжения или тока в измерительном контуре. Кроме того, широко применяют выпрямительные приборы и электронные вольтметры, имеющие с измерительным контуром трансформаторную или автотрансформаторную связь, что уменьшает вносимое в контур затухание. Применение термоэлектрических приборов в качестве индикаторов резонанса возможно, но ограничено, так как при перегрузках, возникающих при настройке контура в резонанс, сгорают термопреобразователи.

Измерительный колебательный контур  $L_{изм} C_0$  (или  $L_0 C_{изм}$ ) подключают к источнику сигналов  $\Gamma$ , например измерительному генератору сигналов высокой частоты Г4-102 (рис. 69, а, б). Плавное изменение частоты сигнала генератора по резкому возрастанию показаний электронного вольтметра ЭВ, замечают настройку в резонанс. Измеряемая емкость (или индуктивность)  $C_{изм} = 2,53 \cdot 10^4 / f^2 L_0$  (где  $f$  — частота сигнала генератора, МГц,  $C$  — емкость, пФ и  $L$  — индуктивность, мкГ).

Измерения емкости и индуктивности можно упростить и устранить необходимость расчетов, если включить в схему образцовый конденсатор переменной емкости и использовать метод замещения. В качестве образцового используют конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, имеющий для отсчета емкости и индуктивности шкалы, проградуированные в пикофарадах и микрогенри.

При измерениях малых емкостей (рис. 70, а) конденсатор  $C_{изм}$  подключают параллельно образцовому конденсатору

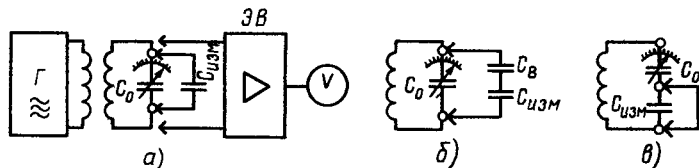


Рис 70 Измерения малых (а) и больших (б, в) емкостей конденсаторов методом замещения

$C_0$ , который устанавливают на определенную минимальную емкость, например  $C_0' = 50$  пФ, и настраивают контур в резонанс, плавно изменяя частоту генератора. Затем конденсатор  $C_{изм}$  отключают и вторично настраивают контур в резонанс, увеличивая емкость образцового конденсатора до  $C_0''$ . Емкость конденсатора  $C_{изм} = C_0'' - C_0' = C_0 - 50$ . Наименьшую измеряемую емкость порядка нескольких пикофард отсчитывают по растянутому начальному участку шкалы емкостей, а наибольшая зависит от максимальной емкости образцового конденсатора и при  $C_{0\max} = 450$  пФ составит  $C_{0\max} - C_0' = 450 - 50 = 400$  пФ.

При измерениях больших емкостей применяют вспомогательный конденсатор  $C_v$ , емкость которого порядка 200–400 пФ может быть определена предварительно. Конденсаторы  $C_{изм}$  и  $C_v$  соединяют последовательно (рис. 70, б), измеряют их общую емкость  $C_{общ}$  и рассчитывают емкость  $C_{изм} = C_v C_{общ} / (C_v - C_{общ})$ . В схеме, показанной на рис. 70, в, образцовый конденсатор  $C_0$  соединен последовательно с измеряемым конденсатором  $C_{изм}$ , который можно отключить с помощью переключки. При включенном конденсаторе  $C_{изм}$  устанавливают емкость образцового конденсатора, близкую к максимальной, например  $C_0' = 400$  пФ, и, изменяя частоту генератора, настраивают контур в резонанс. Затем измеряемый конденсатор отключают и вторично настраивают контур в резонанс, уменьшая емкость образцового конденсатора до  $C_0''$ . Емкость конденсатора  $C_{изм} = C_0' C_0'' / (C_0' - C_0'')$ . Этими способами можно измерять конденсаторы емкостью до 5000 пФ.

При измерениях индуктивностей колебательный контур составляют из измеряемой катушки  $L_{изм}$  и образцового конденсатора  $C_0$ , включают в схему, как было показано на рис. 70, а, и настраивают в резонанс изменением емкости конденсатора  $C_0$ , предварительно установив по шкале генератора рабочую частоту. При известных частоте  $f$  и емкости  $C_0$  индуктивность катушки  $L_{изм} = 2,53 \cdot 10^4 / f^2 C_0$ . Устранить расчеты и получить прямой отсчет индуктивности можно, установив по частотной шкале генератора фиксированную частоту, тогда измеряемая индуктивность  $L_{изм} = A / C_0$  (где  $A = 2,53 \cdot 10^4 / f^2$  — постоянный коэффициент). Следовательно, на диск образцового конденсатора переменной емкости кроме шкалы для отсчета емкости можно нанести вторую шкалу для отсчета индуктивности (рис. 71). Несколько фиксированных частот позволяют расширить диапазон измерений индуктивности и получить несколько пределов. Резонанс находят на одной из этих частот, устанавливая их по очереди или ближайшую к рабочей частоте.

При измерениях собственной емкости  $C_k$  катушек индуктивности, зависящей от числа витков, изоляции провода и плотности намотки, применяют схему, которая была показана на рис. 70, а. Образцовый конденсатор переменной емкости устанавливают поочередно в два произвольно выбранных положения  $C_{01}$  и  $C_{02}$  и для каждого из них определяют резонансные частоты  $f_1$  и  $f_2$ . Решив два уравнения  $1/f_1^2 = 4\pi^2 L(C_{01} + C_k)$  и  $1/f_2^2 = 4\pi^2 L(C_{02} + C_k)$ , можно получить  $C_k = [C_{01} - (f_2/f_1)^2 C_{02}] / [(f_2/f_1)^2 - 1]$ .

Расчеты можно упростить, установив по шкале образцового конденсатора емкость  $C_{01}$ , близкую к максимальной, и определив резонансную частоту  $f_1$ , а затем, вторично настроив контур в резонанс, увеличить частоту сигнала генератора до  $2f_1$  и уменьшить емкость образцового конденсатора до  $C_{02}$ . Собственная емкость катушки  $C_k = (C_{01} - 4C_{02})/3$ .

Секционирование, т. е. выполнение катушек из нескольких последовательно соединенных секций, позволяет уменьшить их собственную емкость, которая меньше емкости каждой секции в  $n$  раз (где  $n$  — число секций).

При измерениях сопротивления потерь  $R_n$  последовательного контура при резонансе, которое имеет активный характер и мало при высокой добротности контура, применяют схему, показанную на рис. 72. Последовательное включение образцового резистора  $R_0$  в контур  $LC$  вызывает ухудшение добротности и снижение резонансных напряжений на элементах контура. Контролируя электронным вольтметром ЭВ напряжение  $U_1$  на конденсаторе контура без резистора  $R_0$  и напряжение  $U_2$  при включенном резисторе, можно определить сопротивление потерь  $R_n = R_0 U_2 / (U_1 - U_2)$ . Наиболее удачен подбор сопротивления резистора  $R_0$  при  $U_2 = U_1/2$ , тогда  $R_n = R_0$ . При чрезмерно малом сопротивлении резистора  $R_0$  напряжение почти не снижается, а при чрезмерно большом — падает почти до нуля. Питающий ток контролируют миллиамперметром  $mA$  и в процессе измерений поддерживают неизменным, что обеспечивает постоянство наведенной в контуре эдс. Между катушками

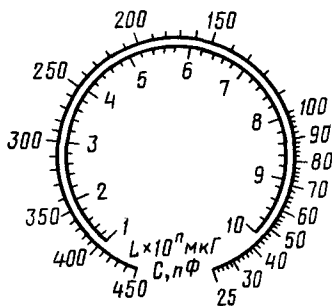


Рис 71 Шкалы отсчета емкости и индуктивности на диске образцового конденсатора переменной емкости

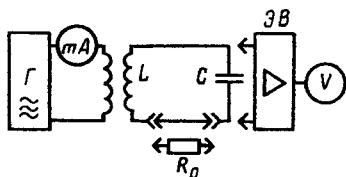


Рис. 72. Измерение сопротивления потерь контура

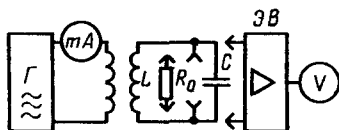


Рис. 73. Измерение резонансного сопротивления контура

устанавливают минимальную связь и используют самый чувствительный предел измерений вольтметра.

При измерениях резонансного (или эквивалентного) сопротивления  $R_{\text{кв}}$  параллельного контура, которое имеет активный характер и велико при высокой добротности, применяют схему, показанную на рис. 73. Измерение этого сопротивления представляет интерес, поскольку им определяется коэффициент усиления каскада, нагрузкой которого служит данный контур. Параллельное включение образцового резистора  $R_0$  в контур  $LC$  вызывает ухудшение добротности и снижение резонансных напряжений на элементах контура. Контролируя электронным вольтметром ЭВ напряжение  $U_1$  на конденсаторе контура без резистора  $R_0$  и напряжение  $U_2$  с включенным резистором, можно определить резонансное сопротивление  $R_{\text{кв}} = R_0(U_1 - U_2)/U_2$ . Наиболее удачен подбор сопротивления резистора  $R_0$  при  $U_2 = U_1/2$ , тогда  $R_{\text{кв}} = R_0$ . При чрезмерно большом сопротивлении резистора  $R_0$  напряжение почти не снижается, а при чрезмерно малом — падает почти до нуля.

При измерениях добротности применяют подключенный к генератору сигналов высокой частоты  $\Gamma$  последовательный контур (рис. 74), в котором резонансное напряжение на конденсаторе контролируют электронным вольтметром ЭВ. Это напряжение тем выше, чем больше добротность контура  $Q_k = f_0/(f_2 - f_1)$ , где  $f_0$ ,  $f_1$  и  $f_2$  — частоты, при которых напряжение на конденсаторе равно  $U_{\text{max}}$ ,  $0,7 U_{\text{max}}$  и  $0,7 U_{\text{max}}$  (рис. 75).

Среди приборов, основанных на резонансном методе, наиболее широкое применение получили измерители добротности — куметры.

Прибор Е4-4 имеет два одинаковых электронных вольтметра, выполненных по схеме выпрямитель-усилитель. По шкале одного вольтметра (вольтметра уровня) устанавливают нормальный уровень сигнала генератора, а по шкале другого ( $Q$ -вольтметра) отсчитывают добротность, так как известно, что при резонансе в последовательном контуре напряжение  $U_c$  на конденсаторе в  $Q$

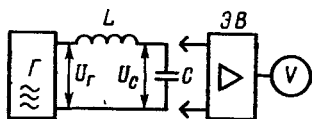


Рис 74. Контроль резонанса последовательного колебательного контура

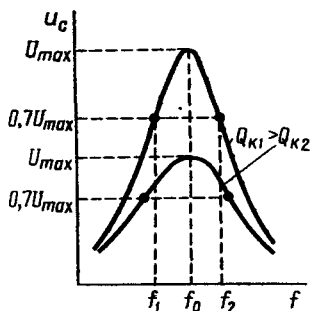


Рис 75. Резонансные кривые двух контуров разной добротности

раз больше питающего напряжения  $U_r$  генератора, т. е.  $U_c = QU_r$  и  $Q = U_c/U_r$ , или  $Q$  по значению равно  $U_c$  при напряжении генератора  $U_r = 1$  В.

Измеритель добротности Е4-7 (рис. 76), в котором использован этот же принцип, кроме непосредственного измерения добротности позволяет выполнить все описанные выше резонансные измерения. Измерительный последовательный контур состоит из двух параллельно соединенных образцовых конденсаторов переменной емкости, шкалы которых соответственно проградуированы от 30 до 450 пФ и  $\pm 10$  пФ, а также катушки индуктивности, подключаемой к зажимам « $L_x$ ». Такой катушкой может быть измеряемая катушка индуктивности или одна из катушек комплекта с обозначенными на ней значениями индуктивности и добротности. Катушки комплекта позволяют легко найти резонансную настройку контура в определенном диапазоне частот.

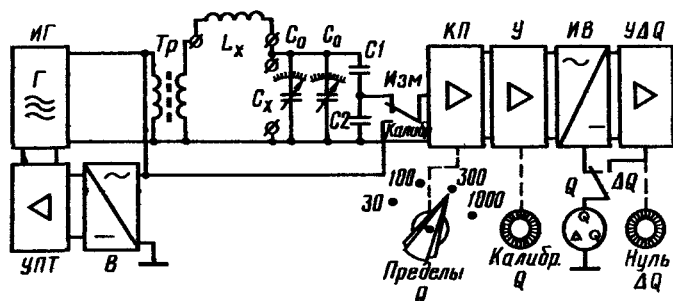


Рис. 76. Структурная схема измерителя добротности Е4-7

Сигнал измерительного генератора ИГ частотой от 50 кГц до 35 МГц вводится в измерительный контур с помощью трансформатора связи *Тр*. Система автоматической регулировки выходного напряжения (АРВ), состоящая из выпрямителя *В* и усилителя постоянного тока УПТ, поддерживает неизменным уровень выходного сигнала генератора при изменении частоты и питающего напряжения.

Вольтметр прибора, выполненный по схеме усилитель-выпрямитель, состоит из катодного повторителя *КП*, широкополосного усилителя *У* и измерительного выпрямителя *ИВ* с магнитоэлектрическим измерителем, шкала которого проградуирована в значениях добротности *Q*. В положении «Калибр.» вольтметр подключается к выходу измерительного генератора. Вольтметр калибруют, регулируя усиление усилителя *У* («Калибр *Q*») и устанавливая стрелочный указатель на отметку шкалы «▼». В положении «Изм.» вольтметр с помощью конденсаторного делителя *С1С2* подключается к образцовым конденсаторам и контролирует резко возрастающее при резонансе напряжение. Пределы измерений добротности 30, 100, 300 и 1000 получают, переключая делители напряжений на входе усилителя вольтметра.

Прибор позволяет также измерять разность добротностей двух катушек в пределах  $\pm 30$  единиц, для чего служит усилитель постоянного тока *УДQ*, к выходу которого подключают магнитоэлектрический измеритель со шкалой, имеющей градуировку 30—0—30. Частоты измерительного генератора, одну из которых следует установить при измерении индуктивности катушек, и пределы измерений индуктивности на каждой частоте приведены ниже.

Частота, МГц	25,25	7,95	2,525	0,795	0,2525	0,0795
Индук- тив- ность, мГ	$10^{-4}$ — $10^{-3}$	$10^{-3}$ — $10^{-2}$	$10^{-2}$ — $10^{-1}$	$10^{-1}$ —1	1—10	$10^{-10}$

Для настройки измерительного контура в резонанс изменяют емкость образцового конденсатора и отсчитывают индуктивность по шкале перевода «емкость—индуктивность», укрепленной на верхней крышке прибора.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности?
2. Каков принцип действия прямопоказывающих омметров?

3. Как измеряют параметры резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности методом вольтметра—амперметра?

4. Каковы особенности мостового метода измерений на постоянном и переменном токе?

5. Как настраивают измерительную схему универсальных мостов в режимах измерения параметров резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей?

6. Каковы особенности резонансного метода измерений параметров конденсаторов, катушек индуктивности и колебательных контуров?

7. Каков принцип действия измерителей добротности?

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ, ТРАНЗИСТОРОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

#### § 26. Измерение параметров диодов

Диоды—это полупроводниковые приборы, имеющие электронно-дырочный переход (*p-n*-переход) в виде границы между слоями электронной и дырочной проводимости, созданными в единой пластине полупроводника. Такой переход обладает вентильными свойствами, т. е. оказывает малое сопротивление прямому току и большое—обратному.

При простейшей проверке работоспособности диодов любым омметром измеряют прямое и обратное сопротивления, которые у исправных диодов соответственно равны десяткам ом и сотням—тысячам килоом. Отношение обратного и прямого сопротивлений, характеризующее выпрямительные свойства диодов, называют коэффициентом выпрямления  $K = R_{\text{обр}}/R_{\text{пр}}$ .

Измеряют параметры и снимают характеристику диодов по схеме, показанной на рис. 77. Низковольтное напряжение от 0 до 1,5 В для измерения прямого тока и высоковольтное от 0 до 250 В для измерения обратного регулируют потенциометрами *R*. Для одновременного переключения напряжений и полярности испытываемого диода *D* служит переключатель *П*, а для ограничения тока в цепи при возможном

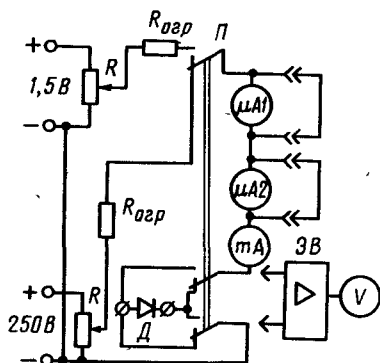


Рис. 77. Измерение параметров и снятие характеристики диодов

пробое диода – резисторы  $R_{огр}$ . Прямой ток измеряют многопредельным миллиамперметром  $mA$ , а обратный – микроамперметрами  $\mu A1$  и  $\mu A2$  соответственно с пределами 100 и 20 мкА. Снимать шунтирующие перемычки и включать микроамперметры (сначала первый, а затем второй) можно только тогда, когда показания миллиамперметра  $mA$  на первом пределе близки к нулю. После отсчета перемычки включают.

Испытателями диодов и транзисторов, например Л2–23, измеряют обратный ток  $I_{обр}$  и прямое падение напряжения  $U_{пр}$ . Схема, показанная на рис. 78, а, получает питание от преобразователя напряжений ПН. В положении переключателя «U» устанавливают паспортное значение обратного напряжения диода на шкале вольтметра, состоящего из измерителя  $I$  и добавочного резистора  $R_{доб}$ , затем переводят переключатель в положение «I» и косвенно определяют обратный ток диода  $D$  по падению напряжения на шунтовом резисторе  $R_{ш}$ , к выводам которого подключен измеритель  $I$ . Схема, показанная на рис. 78, б, получает питание от внутреннего или внешнего источника тока ИТ. В положении переключателя «I» устанавливают на шкале измерителя  $I$ , подключенного параллельно одному из шунтовых резисторов  $R_{ш}$ , паспортное значение прямого тока диода, затем переводят переключатель в положение «U» и измеряют прямое падение напряжения на диоде  $D$  вольтметром, состоящим из измерителя  $I$  и добавочного резистора  $R_{доб}$ .

Стабилитроны – кремниевые диоды, предназначенные для стабилизации постоянного напряжения при значительных изменениях проходящего через них тока. Рабочим является пробойный участок обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона (рис. 79). При наличии внешнего резистора, ограничивающего ток и предотвращающего перегрев, электрический пробой стабилитрона не опасен. Основной параметр стабилитронов – напряжение стабилизации  $U_{ст}$  – почти не изменяется при значительном изменении тока стабилизации от  $I_{ст мин}$ , при кото-

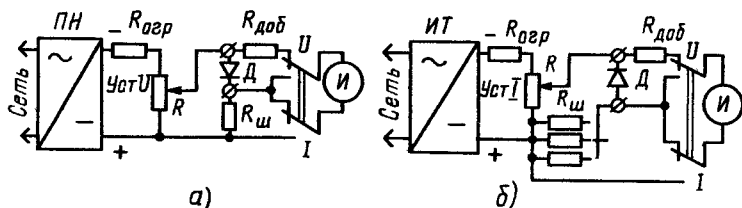


Рис. 78. Измерение обратного тока диода (а) и прямого падения напряжения на нем (б)



ром возникает устойчивый пробой, до  $I_{ст\ max}$ , ограниченном допустимым перегревом. Эффективность стабилизации напряжения тем выше, чем меньше динамическое сопротивление стабилитронов  $R_d = \Delta U / \Delta I$ .

Напряжения и токи стабилизации измеряют по схеме, показанной на рис. 77. При этом стабилитрон включают в обратном направлении и увеличивают обратное напряжение до наступления электрического пробоя. Нагрузочный резистор  $R_n$  с выбранным для данного стабилитрона сопротивлением подключают к входу электронного вольтметра, постоянство показаний которого свидетельствует о работе стабилитрона в режиме стабилизации напряжения.

Варикапы — закрытые диоды, проходная емкость которых изменяется в пределах от  $C_{д\ max}$  до  $C_{д\ min}$  соответственно при изменении запирающего постоянного напряжения от  $U_{min}$  до  $U_{max}$  (рис. 80). Эти приборы применяют для электронной настройки колебательных контуров. Основным параметром варикапов является коэффициент перекрытия по емкости  $K = C_{д\ max} / C_{д\ min}$ . Емкость и добротность варикапов, как и конденсаторов, измеряют резонансным методом (см. § 25), используя схему замещения, которая была показана на рис. 70, а. К зажимам  $C_x$  измерителя добротности подключают выводы 1-1 схемы, показанной на рис. 81. При этом варикап  $D$  закрыт постоянным напряжением, которое регулируют потенциометром  $R$  и контролируют электронным вольтметром  $V$ . Цепь постоянного тока отделена двумя разделительными конденсаторами  $C1$  и  $C2$  емкостью 0,01 мкФ. Номинальную емкость варикапа измеряют при напряжении 4 В, а граничные емкости — при указанных в паспорте на него напряжениях.

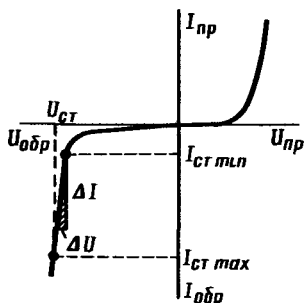


Рис. 79. Вольтамперная характеристика стабилитрона

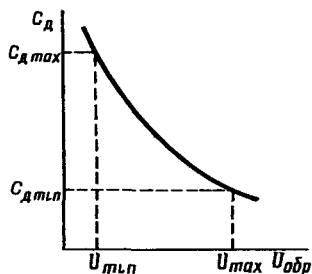


Рис. 80. Зависимость емкости варикапа от обратного напряжения

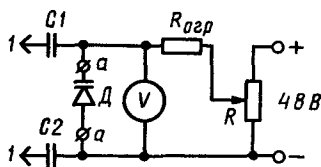


Рис. 81. Схема испытания варикапа

Туннельные диоды имеют вольтамперную характеристику (рис. 82, а) с падающим участком, т.е. участком с отрицательным сопротивлением в очень широком диапазоне частот (до тысяч мегагерц). Эти диоды используют для усиления и генерации сигналов и в быстродействующих импульсных

схемах. Параметры туннельных диодов оценивают по пиковому току  $I_n$ , току впадины  $I_B$  и соответствующим напряжениям  $U_n$  и  $U_B$ , а также по напряжению раствора  $U_p$ .

Вольтамперную характеристику туннельных диодов снимают только для восходящих ее ветвей (см. рис. 77), так как при снятии характеристики падающего участка схема неустойчива и переходит к одному из устойчивых состояний до точки А или после точки Б (рис. 82, б), т.е. наблюдаются скачки тока и напряжения. Паразитная высокочастотная генерация, вызываемая емкостью туннельного диода и очень малой индуктивностью его корпуса и выводов, а также сравнительно большое внутреннее сопротивление источника тока, превышающее отрицательное сопротивление диода, снижают устойчивость схемы.

В схеме, показанной на рис. 83, а, туннельный диод Д зашунтирован безындуктивным резистором  $R_{ш}$  в виде насаженного на его корпус керамического диска с полупроводниковым слоем. Диод с резистором для снижения индуктивности размещают в специальной головке. Статическую характеристику диода строят по результатам измерений, учитывая известное сопротивление резистора  $R_{ш}$ . Более совершенная мостовая схема (рис. 83, б) состоит из резисторов  $R1, R2, R3, R_{ш}$  и включенного в безындук-

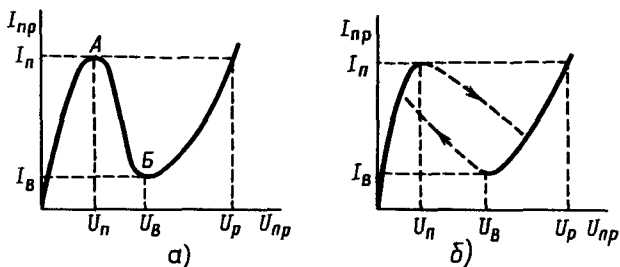


Рис. 82. Вольтамперные характеристики туннельных диодов:

а — непрерывная, б — с перескоком напряжения

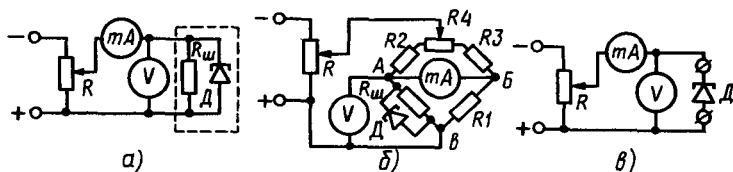


Рис. 83. Исследование туннельных диодов:

а, б — снятие характеристик, в — измерение параметров

тивную головку диода  $D$ . Характеристику диода снимают, предварительно уравневав мост потенциометром  $R_4$ . При питании от источника переменного напряжения эта схема позволяет получить осциллограмму характеристики, для чего напряжения с точек  $A-B$  и  $A-B$  соответственно подают на горизонтальный и вертикальный входы осциллографа.

В некоторых случаях необходима не вся характеристика, а только напряжения и токи в экстремальных ее точках. Для этого собирают схему, показанную на рис. 83, в, и плавно увеличивают ток диода до появления первого скачка напряжения. Предшествующие скачку напряжения и ток являются пиковыми  $U_p$  и  $I_p$ . После скачка устанавливается напряжение раствора  $U_r$ . При последующем плавном уменьшении тока наблюдают второй, обратный скачок напряжения. Предшествующие этому скачку напряжение и ток являются напряжением  $U_v$  и током  $I_v$  впадины.

Динисторы — неуправляемые переключающие диоды с двумя выводами имеют показанную на рис. 84, а вольтамперную характеристику, на которой участок  $OA$  соответствует их выключенному (закрытому) состоянию. При повышении напряжения до  $U_{вкл}$  происходит переход динистора во включенное (открытое) состояние, т.е. пробой, сопровождающийся резким снижением напряжения до  $U_{отпр}$  и увеличением тока. Обратное переключение диода в выключенное состояние происходит при снижении

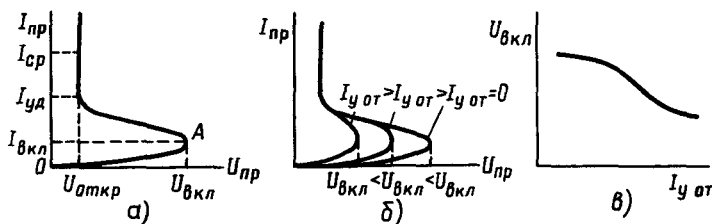


Рис. 84. Вольтамперная характеристика динистора (а) и вольтамперная и пусковая характеристики тринистора (б, в)

приложенного напряжения и уменьшении тока ниже удерживающего  $I_{уд}$ .

Тринисторы — управляемые переключающие диоды имеют дополнительный вывод от внутреннего управляющего электрода. Это позволяет открывать их не только повышением напряжения, но и пропусканием сравнительно небольшого тока отпирания управляющего электрода  $I_{у.от}$ , от которого зависит напряжение включения  $U_{вкл}$  (рис. 84, б). Важное значение имеет пусковая характеристика тринистора (рис. 84, в), показывающая зависимость напряжения включения  $U_{вкл}$  от отпирющего тока  $I_{у.от}$ .

Современные тиристоры (динисторы и тринисторы) имеют напряжения включения от 10 до 1000 В и более и используются в качестве ключевых элементов в схемах автоматики, регулируемых выпрямителей, преобразователей постоянного тока и коммутаторов, контакторов и в других случаях для замены устаревших в настоящее время газотронов и тиратронов.

Измерение прямого и обратного тока тиристоров выполняют так же, как других диодов. Показанную на рис. 85, а схему используют для измерения напряжения  $U_{отпр}$  и удерживающего тока  $I_{уд}$  открытого тиристора. Тиристор  $D$  переводят во включенное состояние, нажав кнопку  $Kn$  и пропустив управляющий ток, который подбирают, изменяя сопротивление резистора  $R_y$ . Затем, изменяя сопротивление резистора  $R$ , устанавливают средний ток тиристора  $I_{ср}$  и отсчитывают по вольтметру  $U_{отпр}$ . Далее уменьшают ток тиристора до появления скачка напряжения. Ток, предшествующий скачку напряжения, является удерживающим  $I_{уд}$ . Отпирющий ток управляющего электрода  $I_{у.от}$  и напряжение включения  $U_{вкл}$  измеряют, используя схему, приведенную на рис. 85, б. На анод тиристора  $D$  через нагрузочный резистор  $R_n$  подают постоянное напряжение 10 В и плавно увеличивают потенциометром  $R$  ток управляющего электрода до тех пор, пока не произойдет включение тиристора, сопровождаемое скачком напряжения на аноде. Ток  $I_{у.от}$  и напряжение  $U_{вкл}$ ,

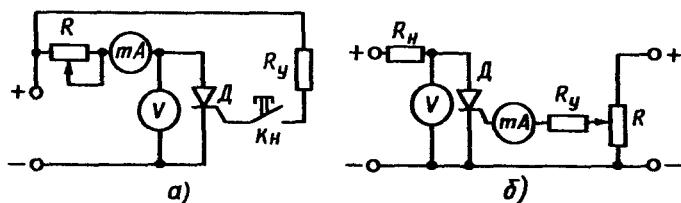


Рис. 85. Измерение параметров тиристоров:

а — удерживающего тока и напряжения в открытом состоянии, б — отпирющего тока и напряжения включения

предшествующие включению тиристора, соответственно отсчитывают по миллиамперметру  $mA$  в цепи управляющего электрода и вольтметру  $V$ . Эта схема позволяет также снять пусковую характеристику тиристора, для чего следует использовать источник регулируемого анодного напряжения.

## § 27. Измерение параметров биполярных транзисторов

Основой биполярных транзисторов являются два  $p-n$ -перехода, созданные в единой пластине полупроводника.

При простейшей проверке работоспособности транзисторов измеряют омметром прямое и обратное сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов, которые должны быть соответственно равны сотням ом и сотням—тысячам килоом. Кремниевые маломощные транзисторы могут иметь несколько большие сопротивления переходов, а мощные германиевые—меньшие.

Транзистор можно рассматривать как несимметричный четырехполюсник (рис. 86) с входными выводами 1–1 и выходными 2–2. Поскольку транзисторы имеют один общий вывод для входной и выходной цепей, возможны три схемы их включения: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Выходные (коллекторные) цепи транзисторов получают питание от источника постоянного напряжения 9–24 В, полярность включения которого должна быть такой, чтобы коллекторный переход был закрыт. В широко применяемой схеме с ОЭ входной цепью является базовая, в которую подают постоянное напряжение 0,1–0,3 В так, чтобы базовый переход был открыт. Транзисторный эффект состоит в том, что сравнительно малый ток в открытой базовой цепи вызывает появление сравнительно большого тока в закрытой коллекторной. Небольшие изменения базового (управляющего) тока вызывают значительные изменения коллекторного (управляемого).

Вольтамперные характеристики дают полную информацию о свойствах транзисторов как нелинейных элементов в широком диапазоне токов и напряжений, позволяют оценить их работу при различных токах и напряжениях во входной и выходной це-

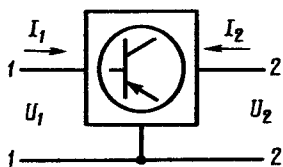


Рис. 86. Схема несимметричного четырехполюсника, эквивалентного транзистору

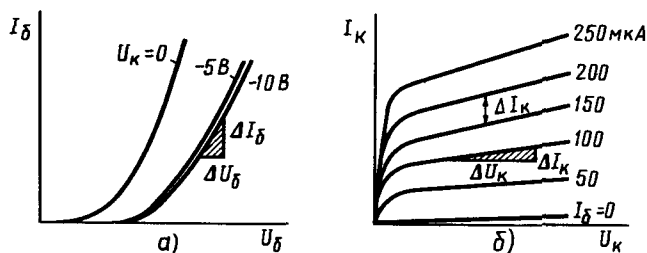


Рис. 87. Характеристики транзистора:

а - входные, б - выходные

пях, рассчитать основные параметры в любой точке и выбрать оптимальный режим работы.

Статические вольтамперные характеристики транзисторов различны для каждой из трех схем их включения. Для анализа работы и определения параметров транзисторов достаточно иметь два семейства характеристик: входные и выходные.

Входные характеристики транзисторов, показывающие зависимость тока базы  $I_b$  от напряжения на ней  $U_b$  при различных напряжениях на коллекторе  $U_c$ , показаны на рис. 87, а. При  $U_c = 0$  входная характеристика соответствует прямой характеристике открытого диода (см. рис. 29), а при  $U_c = -5$  В и  $U_c = -10$  В характеристики незначительно сдвинуты вправо.

Выходные характеристики транзисторов, показывающие зависимость тока коллектора  $I_c$  от напряжения на нем  $U_c$  при различных токах базы  $I_b$ , показаны на рис. 87, б. При  $I_b = 0$  выходная характеристика соответствует обратной характеристике закрытого диода (см. рис. 29). Появление и возрастание базового тока вызывает появление и увеличение коллекторного тока, который весьма мало изменяется при значительном изменении коллекторного напряжения.

При снятии характеристик транзисторов  $p-n-p$ -типа, включенных по схеме с ОЭ (рис. 88), базовый переход открыт отрицательным напряжением, регулируемым потенциометром  $R1$  от 0 до 0,3 В и поступающим от делителя  $RR1$ , получающего питание от одного химического элемента напряжением 1,5 В. Базовый ток  $I_b$  и напряжение  $U_b$  измеряют соответственно микроамперметром  $\mu A$  и электронным вольтметром  $V1$ . Коллекторный переход закрыт отрицательным напряжением, регулируемым потенциометром  $R2$  от 0 до 24 В. Коллекторный ток  $I_c$  и напряжение  $U_c$  измеряют соответственно миллиамперметром  $mA$  и вольтметром  $V2$ .

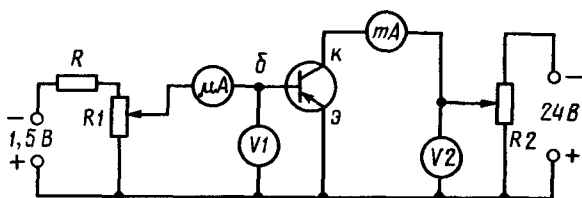


Рис. 88. Схема снятия характеристик транзистора

Статические характеристики не всегда удобны для анализа работы транзисторов, поэтому используют статические параметры.

Такие статические параметры транзисторов, как неуправляемые очень малые обратные токи переходов коллектор–база  $I_{кб0}$ , эмиттер–база  $I_{эб0}$  и коллектор–эмиттер при короткозамкнутых выводах эмиттера и базы  $I_{кэк}$ , измеряют по схемам, показанным на рис. 89, а–в. Значения этих токов отсчитывают по микроамперметру  $\mu A$  при определенных, указанных в справочнике обратных напряжениях, установленных с помощью потенциометра  $R$  по вольтметру  $V$ . Качество транзистора тем выше, чем эти токи ниже и меньше их зависимость от температуры. При измерении очень малых обратных токов кремниевых транзисторов чувствительность микроамперметра  $\mu A$  может оказаться недостаточной и вместо него применяют электронный вольтметр постоянного тока, измеряющий падение напряжения на включенном в цепь образцовом резисторе, имеющем сопротивление 0,1–1 МОм.

Параметры, характеризующие работу транзисторов как линейного активного четырехполюсника, можно определить графическим способом, по приращениям напряжений и токов, а также измерением на переменном токе при малом сигнале. Таковыми параметрами транзисторов являются входное сопроти-

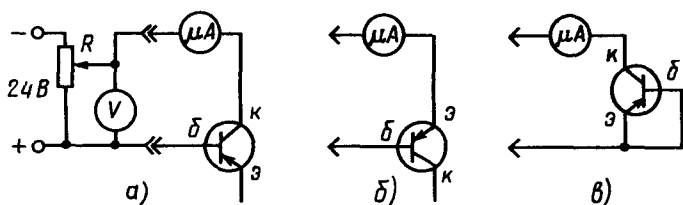


Рис. 89. Измерение обратных токов коллекторного (а) и эмиттерного (б) переходов и перехода коллектор–эмиттер (в) транзисторов

вление  $h_{11}$ , выходная проводимость  $h_{22}$ , а также коэффициенты передачи тока  $h_{21}$  и обратной связи  $h_{12}$ .

Графический способ определения параметров транзисторов по их характеристикам прост, но не дает высокой точности. Каждый параметр оценивают по углу наклона касательной к соответствующей характеристике в заданной рабочей точке. При замене касательной секущей получают треугольники (см. рис. 87), по отношению катетов которых также можно определить соответствующие параметры.

Входное сопротивление транзисторов в схеме с ОЭ—это отношение изменения напряжения на базе  $\Delta U_6$  к вызванному им изменению тока базы  $\Delta I_6$ , т.е.  $h_{113} = \Delta U_6 / \Delta I_6$ .

Выходная проводимость транзисторов в схеме с ОЭ—это отношение изменения коллекторного тока  $\Delta I_k$  к вызвавшему его изменению напряжения  $\Delta U_k$  на коллекторе, т.е.  $h_{223} = \Delta I_k / \Delta U_k$ .

Коэффициент передачи тока транзисторов в схеме с ОЭ—это отношение изменения коллекторного тока  $\Delta I_k$  к вызвавшему его изменению тока базы  $\Delta I_6$ , т.е.  $h_{213} = \Delta I_k / \Delta I_6$ .

Коэффициент обратной связи по напряжению транзисторов в схеме с ОЭ—это отношение изменения напряжения  $\Delta U_6$  на базе к вызвавшему его изменению напряжения  $\Delta U_k$  на коллекторе, т.е.  $h_{123} = \Delta U_6 / \Delta U_k$ .

Оценка параметров транзисторов по приращениям постоянных напряжений и токов достаточно точна. При измерении входного сопротивления  $h_{113}$  и выходной проводимости  $h_{223}$  транзисторов, включенных по схеме с ОЭ (рис. 90, а, б), переключатель  $\Pi$  устанавливают в положение 1, при котором обе схемы получают питание от источника постоянного тока напряжением 4,5 В. Изменяя сопротивление резистора  $R_{пер}$  в базовой цепи, устанавливают по миллиамперме-

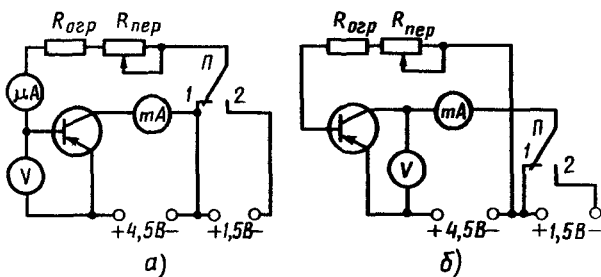


Рис. 90. Измерение входного сопротивления (а) и выходной проводимости (б) транзисторов



тру  $mA$  коллекторный ток, определяющий режим измерений (обычно для маломощных транзисторов  $I_K = 1 \text{ mA}$ ) и по соответствующим приборам в обеих схемах отсчитывают базовые и коллекторные токи  $I_{B1}$  и  $I_{K1}$  и напряжения  $U_{B1}$  и  $U_{K1}$ . Затем переводят переключатель  $\Pi$  в положение 2 и в одной схеме при неизменном напряжении коллекторной цепи напряжение базовой цепи возрастает до  $4,5 + 1,5 = 6 \text{ В}$ , а в другой при неизменном напряжении базовой цепи напряжение коллекторной цепи возрастает до такого же значения. Возросшие базовый ток  $I_{B2}$  и напряжение  $U_{B2}$  одной схемы и коллекторный ток  $I_{K2}$  и напряжение  $U_{K2}$  другой отсчитывают по соответствующим приборам. При этом входное сопротивление  $h_{113} = (U_{B2} - U_{B1}) / (I_{B2} - I_{B1})$ , а выходная проводимость  $h_{223} = (I_{K2} - I_{K1}) / (U_{K2} - U_{K1})$ .

Коэффициент передачи тока  $h_{213}$  транзисторов, включенных по схеме с ОЭ, измеряют по схемам, показанным на рис. 91, а, б. В схеме, показанной на рис. 91, а, базовый ток  $I_B = 4,5 / 45 = 0,1 \text{ mA}$ , а коэффициент передачи тока  $h_{213} \approx I_K / I_B = I_K / 0,1 = 10 I_K$ , т.е. увеличенному в 10 раз показанию миллиамперметра  $mA$ . В схеме, показанной на рис. 91, б, при двух положениях переключателя и двух базовых токах  $I_{B1} = 4,5 / 45 = 0,1 \text{ mA}$  и  $I_{B2} = 4,5 / 90 = 0,05 \text{ mA}$  миллиамперметром  $mA$  измеряют коллекторные токи  $I_{K1}$  и  $I_{K2}$  и коэффициент передачи тока  $h_{213} = (I_{K1} - I_{K2}) / (I_{B1} - I_{B2}) = (I_{K1} - I_{K2}) / 0,05 = 20 (I_{K1} - I_{K2})$ , т.е. увеличенной в 20 раз разности коллекторных токов.

Коэффициент передачи тока транзисторов, включенных по схеме с ОБ, рассчитывают по формуле  $h_{216} = h_{213} / (1 + h_{213})$ . Таким образом, коэффициентам передачи тока  $h_{213} = 10 \div 100$  транзисторов в схеме с ОЭ соответствуют коэффициенты передачи тока  $h_{216} = 0,9 \div 0,99$  транзисторов в схеме с ОБ. В усили-

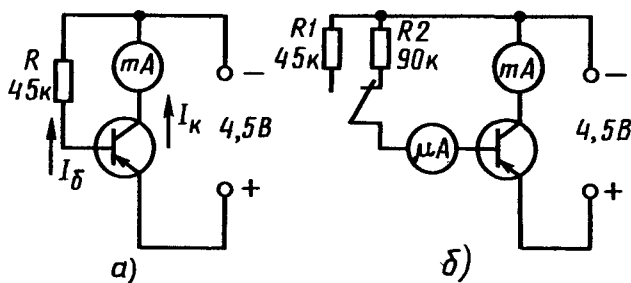


Рис. 91. Измерение коэффициента передачи тока транзисторов:

а — миллиамперметром, б — измерением токов

тельных схемах предпочтительнее применять транзисторы с коэффициентом передачи тока порядка 70–120, хотя неплохие результаты можно получить, используя транзисторы, имеющие  $h_{213} = 30 \div 70$ .

Коэффициент внутренней обратной связи  $h_{123}$  транзисторов, включенных по схеме с ОЭ, очень мал (порядка  $10^{-3} - 10^{-5}$ ), определяет небольшую часть выходного напряжения, передаваемого обратно на вход, и измерить его трудно, поскольку требуется вольтметр высокой чувствительности.

Если при измерении этих параметров транзисторов показания приборов самопроизвольно изменяются (плывут) транзисторы считают негодными.

Измерения параметров транзисторов на переменном токе низкой частоты при малом сигнале наиболее точны и отражают реальные условия их работы, так как вместе с питающими схему постоянными напряжениями от генератора сигналов низкой частоты подается переменное напряжение и в цепях измерительной схемы проходят пульсирующие токи, имеющие постоянную и переменную составляющие.

При измерении входного сопротивления  $h_{11}$  и коэффициента передачи тока  $h_{21}$  сигнал от генератора подают на вход транзистора и измеряют переменные входные ток  $I_1$  и напряжение  $U_1$ , а также выходной ток  $I_2$ , а при измерении коэффициента обратной связи  $h_{12}$  и выходной проводимости  $h_{22}$  — на выход и измеряют переменные выходные ток  $I_2$  и напряжение  $U_2$ , а также входное напряжение  $U_1$ .

Коэффициент передачи тока  $h_{216}$  и выходную проводимость  $h_{226}$  транзисторов, включенных по схеме с ОБ, измеряют по схемам, показанным на рис. 92, а, б, которые использованы в испытателе диодов и транзисторов Л2-23. Типовой режим работы транзисторов устанавливают постоянными напряжения-

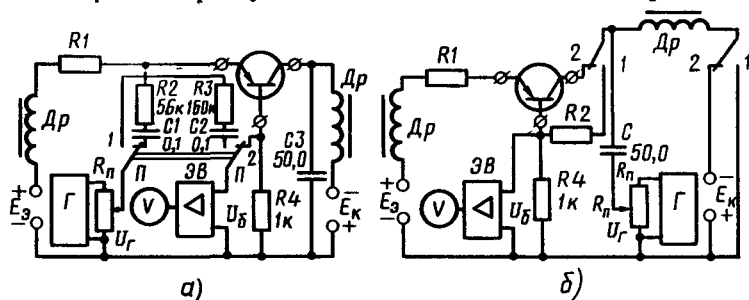


Рис. 92. Измерение коэффициента передачи тока (а) и выходной проводимости (б) транзисторов

ми  $E_3$  и  $E_K$ , подаваемыми соответственно на эмиттер и коллектор через развязывающие дроссели  $Dp$  и резисторы  $R1$ .

В схеме, показанной на рис. 92, а, включением конденсатора  $C3$  большой емкости создают требуемое при измерениях короткое замыкание выхода по переменному току. В положении 1 переключателя  $\Pi$  потенциометром  $R_n$  «Калибровка» устанавливают на шкале электронного вольтметра ЭВ определенное напряжение  $U_r$  сигнала генератора  $G$ . Затем переключатель  $\Pi$  переводят в положение 2 и сигнал генератора через разделительный конденсатор  $C1$  и резистор  $R2$  поступает в цепь эмиттера, а электронный вольтметр подключается к резистору  $R4$  в цепи базы.

Коэффициент передачи тока транзистора, включенного по схеме с ОБ,  $h_{216} = I_{кп}/I_{эп} = (I_{эп} - I_{бп})/I_{эп} = 1 - I_{бп}/I_{эп}$  (где  $I_{кп}$ ,  $I_{эп}$  и  $I_{бп}$  — переменные составляющие токов в коллекторной, эмиттерной и базовой цепях). Так как  $I_{бп} = U_6/R4$ , а  $I_{эп} = U_r/(R2 + R_{36} + R4) \approx U_r/R2$ , потому что  $R2 \gg (R_{36} + R4)$ , то  $h_{216} = 1 - U_6 R2 / U_r R4$ . При неизменных сопротивлениях резисторов  $R2$  и  $R4$  и напряжении  $U_r$  коэффициент передачи тока отсчитывают по соответствующей шкале электронного вольтметра, измеряющего напряжение  $U_6$  на резисторе  $R4$ .

Коэффициент передачи тока транзистора, включенного по схеме с ОЭ,  $h_{213} = h_{216}/(1 - h_{216})$ .

В схеме, показанной на рис. 92, б, в положении 1 переключателя  $\Pi$  устанавливают контролируемое электронным вольтметром ЭВ определенное напряжение  $U_r$  сигнала генератора  $G$ , а в положении 2 подают его в цепь коллектора. При этом переменная составляющая тока в цепи коллектора равна переменной составляющей тока в цепи базы, т.е.  $I_{кп} = I_{бп}$ .

Выходная проводимость транзистора, включенного по схеме с ОБ,  $h_{226} = I_{кп}/U_r = I_{бп}/U_r$ , а поскольку  $I_{бп} = U_6/R4$ , то  $h_{226} = U_6/U_r R4$ . При неизменных сопротивлении резистора  $R4$  и напряжении  $U_r$  выходную проводимость отсчитывают по соответствующей шкале электронного вольтметра, измеряющего напряжение  $U_6$  на резисторе  $R4$ .

Выходная проводимость транзистора, включенного по схеме с ОЭ,  $h_{223} = h_{226}(1 + h_{213})$ .

Повышение рабочей частоты  $f_0$  вызывает ухудшение параметров транзисторов. Усилительные свойства транзисторов определяются предельными и граничными частотами.

Предельными являются частоты  $f_{h_{213}}$  и  $f_{h_{216}}$ , на которых коэффициенты передачи тока  $h_{213}$  и  $h_{216}$  снижаются на 3 дБ, т.е. составляют 70% от их низкочастотных значений.

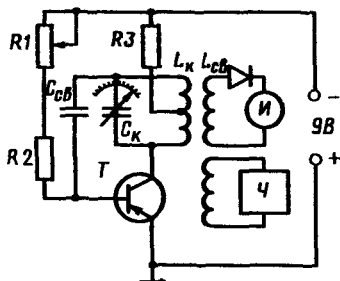


Рис. 93. Измерение максимальной частоты генерации транзисторов

Наиболее просто измеряют максимальную частоту генерации  $f_{\max}$ , так как транзисторы могут работать по схеме автогенератора только в том случае, если его коэффициент усиления по мощности  $K_p \geq 1$ . Испытываемый транзистор  $T$  включают по схеме с ОЭ в типовую трехточечную схему автогенератора высокой частоты (рис. 93), в которой переменным резистором  $R1$  устанавливают режим по постоянному току, а резистором  $R3$  ограничивают ток коллектора. Конденсатор связи  $C_{св}$  подбирают так, чтобы получить устойчивую генерацию, наличие которой контролируют выпрямительным прибором, подключенным к контуру  $L_k C_k$  индуктивно с помощью катушки связи  $L_{св}$ . Переключая диапазоны перестановкой катушек контура  $L_k$  и уменьшая емкость конденсатора контура  $C_k$ , добиваются срыва колебаний на возможно большей частоте, которую определяют частотомером  $\mathcal{C}$  или по шкале конденсатора переменной емкости  $C_k$ . Граничную частоту рассчитывают по формуле  $f_{гр} = 8\pi\sqrt{C_k} f_{\max}^2$ , а затем определяют  $f_{h_{216}} = f_{гр}/(1,2 \div 1,6)$ ,  $f_{h_{213}} = f_{гр}/h_{213}$  и  $f_{ш} = f_{гр}/\sqrt{h_{213}}$ .

## § 28. Измерение параметров полевых транзисторов

Основой полевого транзистора является канал  $n$ - или  $p$ -типа проводимости, имеющий два вывода: исток (и) и сток (с); управляющим электродом служит затвор (з), на который подают управляющее напряжение. Создаваемое между затвором и каналом электрическое поле управляет проводимостью канала, что вызывает изменение в нем тока исток-сток. В полевых канальных транзисторах затвор  $p$ - или  $n$ -типа образует с каналом  $n$ - или  $p$ -типа переход, который должен быть закрыт по-

Граничной является частота  $f_{гр}$ , на которой коэффициент передачи тока транзистора снижается до единицы, т.е.  $h_{21} = 1$ .

Максимальной является частота генерации  $f_{\max}$ , на которой транзисторы способны работать по схеме автогенератора.

Предельная частота  $f_{ш}$  коэффициента шумов—это частота, на которой начинается резкое возрастание уровня внутренних шумов транзисторов.

стоянным напряжением соответствующей полярности; при этом и ток затвора отсутствует. В полевых транзисторах с изолированным затвором затвор отделен от канала тонкой пленкой диэлектрика и ток затвора отсутствует при любой полярности управляющего напряжения.

Особенность полевых транзисторов состоит в том, что выходной ток — ток стока  $I_c$  управляется не входным током, как в биполярных, а входным напряжением, как в электронных лампах. При этом входной ток — ток затвора  $I_z$  — отсутствует и входное сопротивление достигает тысяч мегаом и более. Уровень собственных шумов у полевых транзисторов много меньше, чем у всех других полупроводниковых приборов.

Простейшую проверку работоспособности полевых транзисторов выполняют омметром с малым (меньше 1 В) напряжением внутреннего источника тока. Сопротивление канала между выводами исток — сток обычно составляет сотни — тысячи ом и примерно одинаково в прямом и обратном направлении, поскольку канал имеет однородную структуру  $n$ - или  $p$ -типа. В транзисторах с индуцированным каналом это сопротивление при отсутствии напряжения затвора должно быть очень велико, поскольку между истоком и стоком действуют два встречных  $p$ - $n$ -перехода и проводящего канала нет. Исправный  $p$ - $n$ -переход между затвором и соединенными вместе истоком и стоком канальных транзисторов должен иметь очень малое (порядка 100–200 Ом) прямое и очень большое (порядка десятков мегаом и выше) обратное сопротивление. В транзисторах с изолированным затвором при такой проверке оба сопротивления должны быть одинаково велики.

Многообразие структур полевых транзисторов требует особого внимания при составлении их схем измерения, подключении источников питающего и управляющего напряжений и прогнозировании результатов измерений. В табл. 7 приведены схемы включения, полярности напряжений и вольтамперные характеристики полевых транзисторов разных структур.

Многообразие основных параметров полевых транзисторов разных структур можно понять, проанализировав приведенные в табл. 7 характеристики.

Переходные, или стоко-затворные, характеристики показывают зависимость тока стока  $I_c$  от напряжения затвора  $U_z$ . В канальных транзисторах при  $U_z = 0$  ток стока максимален  $I_m$  и снижается до 0,1%  $I_m$  при увеличении  $U_z$  до напряжения отсечки  $U_0$ . Максимальный ток  $I_m$  измеряют при соединенных между собой выводах затвора и истока и определенном стоковом напряжении  $U_c$ , обычно равном 10 В.

Таблица 7. Схемы включения, полярности напряжений и вольтамперные характеристики полевых транзисторов разных структур

Канал	Схемы включения и вольтамперные характеристики транзисторов			
	с переходом затвор-канал	с изолированным затвором и каналом		
		встроенным	индуцированным	
p-n				
p-типа				
n-p				
n-типа				

В транзисторах с встроенным каналом при  $U_3 = 0$  (выводы затвора и истока замкнуты) в стоковой цепи проходит начальный ток стока  $I_{с.н}$ , который убывает или возрастает в зависимости от типа канала при увеличении напряжения  $U_3$  одной или другой полярности. Напряжение отсечки  $U_0$  определяют при снижении тока стока  $I_c$  до  $0,1\% I_{с.н}$ .

В транзисторах с индуцированным каналом ток стока  $I_c$  возникает и возрастает выше  $10 \text{ мкА}$  при появлении и увеличении напряжения на затворе выше определенного порогового значения  $U_{пор}$ .

Основным параметром полевых транзисторов, определяющим их усилительные свойства, является крутизна  $S$  переходной характеристики, которую находят как отношение изменения тока стока  $\Delta I_c$  к вызвавшему его изменению напряжения на затворе  $\Delta U_3$ , т. е.  $S = \Delta I_c / \Delta U_3$ . Так, крутизна  $S = 2 \text{ мА/В}$  показывает, что изменение напряжения затвора на  $1 \text{ В}$  вызывает изменение тока стока на  $2 \text{ мА}$ .

Выходные, или стоковые, характеристики показывают зависимость тока стока  $I_c$  от напряжения  $U_c$  на нем при разных напряжениях затвора  $U_3$ . Быстрое нарастание тока  $I_c$  при малом напряжении  $U_c$  и медленное при его увеличении выше напряжения насыщения  $U_{c, \text{нас}}$  вызывает резкий изгиб характеристики, определяющий переход между сравнительно малым и большим динамическими сопротивлениями канала исток–сток. Следует обратить внимание на различный характер сдвига стоковых характеристик в зависимости от напряжений на затворе транзисторов различных структур.

Примерные значения таких основных параметров, как максимальный  $I_m$  или начальный  $I_{c, n}$  токи стока транзисторов с встроенным каналом и крутизна  $S$ , могут быть измерены миллиамперметром или вольтметром по схемам, показанным на рис. 94, а, б. В схеме, показанной на рис. 94, а, при двух крайних положениях движка переменного резистора  $R$  по миллиамперметру  $mA$  отсчитывают токи  $I_m$  и  $I_c$  и рассчитывают крутизну  $S = (I_m - I_c)/U_3 = (I_m - I_c)/(I_c R)$ , где  $U_3 = I_c R$  — запирающее напряжение затвора. В схеме, показанной на рис. 94, б, те же токи определяют косвенно, измеряя вольтметром  $V$  напряжения  $U_m$  и  $U_3$  и рассчитывая  $I_m = U_m/R$  и  $I_c = U_3/R$  (где  $U_m$  и  $U_3$  — напряжения на резисторе  $R$  при двух крайних положениях движка). Крутизна  $S = (U_m/R - U_3/R)/U_3 = (U_m - U_3)/(U_3 R)$ . Сравнительно малое сопротивление резистора  $R$  (порядка 200–50 Ом и меньше) замечного влияния на ток схемы не оказывает.

Полное измерение параметров и снятие характеристик полевых транзисторов выполняют по той же схеме, что и биполярных (см. рис. 88), из которой исключают резистор  $R$ , повышая, кроме того, входное напряжение до 10–15 В. Особенно внимательным следует быть при подключении источников тока, полярность которых определена структурой транзистора и каналом.

Полевые транзисторы легко повреждаются даже при не очень сильных электрических полях, поэтому все подготовительные работы следует выполнять на заземленном металлическом листе, на котором должны располагаться инструмент и оборудование. Пай-

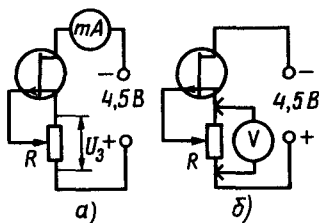


Рис. 94. Измерение максимального тока и крутизны полевых транзисторов:

а — миллиамперметром, б — вольтметром

ку выводов полевых транзисторов производят нагретым и отключенным от сети паяльником низкотемпературными припоями кратковременно.

Собственные входную  $C_{11} = C_{зи}$ , проходную  $C_{12} = C_{эс}$  и выходную  $C_{22} = C_{нс}$  емкости полевых транзисторов с индуцированным каналом измеряют так же, как емкость варикапов, подключая соответствующие выводы к зажимам *а-а* схемы, показанной на рис. 81 в такой полярности, чтобы переходы были закрыты. Более строгое и точное измерение этих емкостей выполняют при специальных испытаниях на высокой частоте, одновременно измеряя коэффициент шума  $F_{ш}$  и граничную частоту усиления  $f_{гр}$ , примерное значение которой можно вычислить из соотношения  $f_{гр} \approx 160S/C_{11}$  (где  $f_{гр}$  — частота, МГц;  $S$  — крутизна, мА/В;  $C$  — емкость, пФ). Транзисторы с изолированным затвором имеют наименьшие собственные емкости и наилучшие частотные свойства.

## § 29. Испытание электронных ламп

Простейшую проверку работоспособности электронных ламп, а также и кинескопов выполняют любым пробником или омметром, контролируя отсутствие обрыва нити накала, концы которой выведены на третий-четвертый и четвертый-пятый штырьки семи- и девятиштырьковых цоколей ламп и первый-восьмой штырьки цоколя кинескопа, замыканий между нитью накала, катодом и другими электродами.

В работающей аппаратуре отсутствие накала нити и катода определяют визуально и по температуре баллона. При исправной нити отсутствие накала может быть вызвано тем, что накальное напряжение  $U_n = 6,3$  В не поступает на лепестки ламповой панели и штырьки лампы или нарушен контакт между ними. При нарушении вакуума на стеклянном баллоне лампы появляется налет молочного оттенка.

Эмиссионную способность нормально нагретого катода при  $U_n = 6,3$  В проверяют по схеме, показанной на рис. 95, а, состоящей из последовательно включенных участка катод-анод с соединенными с ним сетками, миллиамперметра  $mA$  и источника постоянного напряжения 20–50 В, плюс которого соединен с анодом, а минус — с катодом. В работающей аппаратуре эмиссионный ток  $I_s$  проверяют, измеряя вольтметром  $V$  постоянное напряжение  $U_x$  на резисторе  $R_x$  в катодной цепи лампы (рис. 95, б). Сравнить эмиссионный ток нескольких однотипных ламп можно при поочередной их установке в одну панель. Эмиссионный ток  $I_s = U_x/R_x$ .

Эмиссионную способность телевизионной приемной труб-



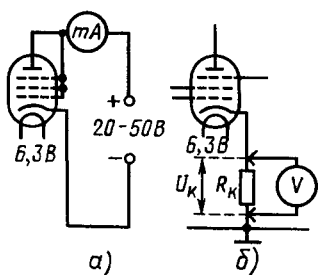


Рис. 95. Проверка эмиссионной способности катодов:

а — по эмиссионному току, б — по напряжению на катодном резисторе

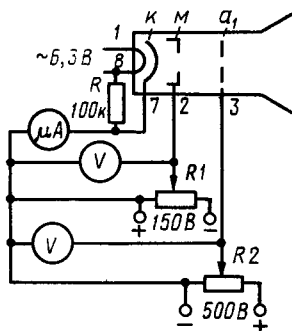


Рис. 96. Схема испытания кинескопов

ки — кинескопа проверяют, включив его в схему, показанную на рис. 96. Установкой движка потенциометра  $R1$  в крайнее левое (на схеме) положение создают короткое замыкание модулятора  $M$  и катода  $K$  и, увеличивая потенциометром  $R2$  напряжение на первом аноде  $a1$ , проверяют возможность установки максимального тока  $I_d$  электронного луча, который для кинескопов с большим экраном должен быть 250–300 мкА. Затем потенциометром  $R1$  увеличивают отрицательное напряжение на модуляторе до напряжения запирающего  $U_{зап}$ , при котором ток луча уменьшается почти до нуля. Устанавливают нормальное запирающее напряжение, равное  $U_{зап}/2$ , и замечают нормальный ток луча, который примерно равен  $I_d/2$ . Проверяют работу модулятора, изменяя запирающее напряжение от нуля до  $U_{зап}$  и контролируя изменение тока луча от  $I_d$  до нуля.

Промышленные испытатели ламп ЛЗ-1–ЛЗ-3 позволяют получить статические вольтамперные характеристики и измерить ток эмиссии, токи всех электродов, запирающее напряжение первой сетки, крутизну анодно-сеточной характеристики, выпрямленный ток диодов, а также потенциал зажигания и напряжение стабилизации газоразрядных приборов.

Из комплекта приложенных к прибору карт выбирают карту испытываемой лампы, накладывают ее на штепсельный коммутатор, а лампу вставляют в указанную на карте панель. Вставляя штепсели в отверстия карты, получают определенную схему испытаний и устанавливают нормальное напряжение сети. После пятиминутного прогрева испытывают лампу согласно инструкции и указаниям карты.

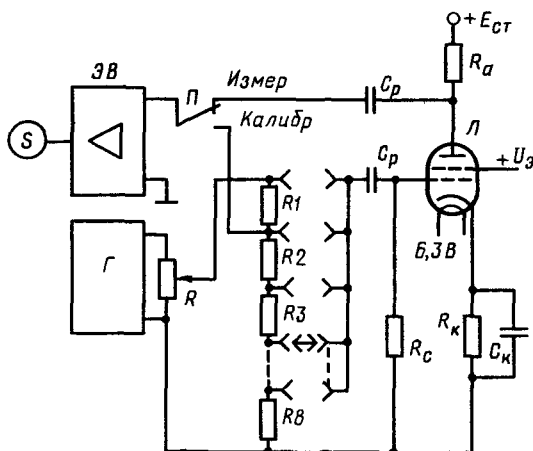


Рис. 97. Схема крутизномера прибора ЛЗ-3

Основной параметр ламп, определяющий их усилительные свойства, — крутизна анодно-сеточной характеристики  $S = \Delta I_a / \Delta U_c$  — показывает, на сколько изменяется анодный ток при изменении напряжения на сетке на 1 В. Схема крутизномера прибора ЛЗ-3 (рис. 97) позволяет получить непосредственный отсчет крутизны по углу отклонения стрелочного указателя электронного вольтметра ЭВ. От генератора Г сигнал частотой 1200 Гц поступает на делитель напряжения  $R1-R8$ , на семи выходах которого получают семь калиброванных напряжений 450; 225; 112,5 ... 4,5 мВ. Одно из этих напряжений  $U_c$ , определяемое положением соответствующего штепселя, поступает через разделительный конденсатор  $C_p$  и резистор утечки  $R_c$  на управляющую сетку лампы.

В положении «Калибр.» переключателя П электронный вольтметр ЭВ подключен к делителю; по шкале потенциометра R устанавливают точное значение калиброванных напряжений. В положении «Измер.» переключателя П электронный вольтметр через разделительный конденсатор  $C_p$  подключен к аноду лампы и измеряет выходное напряжение  $U_a = U_c S R_a$  (где  $R_a$  — сопротивление нагрузочного резистора в анодной цепи). При неизменном сопротивлении  $R_a$  и нескольких калиброванных напряжениях  $U_c$  получают несколько пределов измерений крутизны с прямым отсчетом по шкале электронного вольтметра ЭВ.

Анодную цепь усилителя, в которую входит испытываемая лампа  $L$ , питают стабилизированным напряжением  $E_{ст}$ , а экранирующую — напряжением  $U_3$ . Нормальный режим усиления устанавливают включением в цепь катода лампы резистора  $R_k$  и конденсатора  $C_k$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измеряют основные параметры диодов и снимают их вольт-амперную характеристику?
2. Как измеряют емкость и добротность варикапов?
3. Каковы свойства туннельных диодов и схемы измерения их характеристик и параметров?
4. Каковы свойства переключающих диодов и схемы измерения их характеристик и параметров?
5. Как выполняют простейшую проверку работоспособности диодов и транзисторов?
6. Как измеряют основные параметры и снимают вольт-амперные характеристики транзисторов?
7. Как определяют параметры транзисторов графическим способом, по приращению напряжений и токов и измерением на переменном токе?
8. Как оценивают высокочастотные параметры транзисторов и измеряют их максимальную частоту генерации?
9. Каковы свойства и характеристики полевых транзисторов разных структур?
10. Как измеряют параметры полевых транзисторов и снимают их вольт-амперные характеристики?
11. Как проверяют эмиссионную способность ламп и кинескопов?
12. Каковы возможности испытателя ламп ЛЗ-3 и принцип действия крутизномера?

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### § 30. Общие сведения

Измерительные генераторы представляют собой мало-мощные источники переменных напряжений с регулируемой частотой и амплитудой. Испытание, регулировку и проверку электронной аппаратуры удобно выполнять не по рабочим сигналам, а по сигналам измерительных генераторов, которые позволяют устанавливать и отсчитывать требуемые частоту и напряжение.

По форме генерируемых сигналов различают измерительные генераторы синусоидальных (гармонических), импульсных, шумовых сигналов и сигналов специальной формы,

а по диапазону частот—низко-, высоко- и сверхвысокочастотные с коаксиальным и волноводным выходами.

Генераторы сигналов низких частот создают переменные напряжения в диапазонах инфразвуковых частот от 0,001 до 20 Гц, звуковых от 20 до 20 000 Гц и ультразвуковых от 20 до 200 кГц. Эти генераторы используются при исследовании и регулировке акустической, медицинской, геофизической, радиовещательной аппаратуры, а также в вычислительной технике, позволяют испытывать и настраивать усилители и другие низкочастотные блоки радиоэлектронной аппаратуры, модулировать высокочастотные сигналы генераторов и передатчиков, градуировать электронные вольтметры и служат в качестве источников переменных напряжений низкой частоты при питании различных схем. Синусоидальная форма генерируемых сигналов позволяет контролировать нелинейные искажения, вносимые испытываемой аппаратурой, по степени изменения формы сигнала на ее выходе.

Генераторы сигналов высоких частот создают переменные напряжения в диапазоне частот от 100 кГц до 30 МГц, сверхвысоких от 30 МГц до десятков гигагерц. Эти генераторы используют при регулировке и проверке радиоприемников, видеоусилителей, настройке колебательных систем, измерении параметров четырехполюсников, а также в качестве источников питания коаксиальных и волноводных линий. Для исключения возможности настройки исследуемой аппаратуры не на основную частоту генератора, а на ее гармонику форма колебаний должна быть синусоидальной.

При изменении температуры, колебаниях напряжения питания, непостоянстве нагрузочных сопротивлений частота генератора не должна значительно изменяться, т.е. должна быть высокостабильной. В генераторах этого типа предусматривается возможность модуляции напряжения высокой частоты по амплитуде или частоте. Амплитудную модуляцию осуществляют от внутреннего или внешнего генераторов сигналов синусоидальной или импульсной формы.

Разновидностью высокочастотных генераторов являются генераторы качающейся частоты (ГКЧ), служащие источниками высокочастотных сигналов синусоидальной формы, частота которых изменяется (качается) в требуемых пределах по определенному, обычно пилообразному или синусоидальному закону. Эти генераторы используют совместно с электронными осциллографами, на экране электронно-лучевой трубки которых наблюдают частотные характеристики усилительных каскадов, фильтров и других четырехполюсников. Качание частоты полу-

чают изменением индуктивности или емкости колебательного контура задающего генератора под воздействием управляющего напряжения пилообразной или синусоидальной формы.

В одном случае катушку контура размещают в магнитном поле, создаваемом в воздушном промежутке ферромагнитного сердечника двумя вспомогательными катушками. Через одну вспомогательную катушку проходит постоянный ток, создающий начальное подмагничивание и определяющий среднюю частоту ГКЧ, а через другую — управляющий пилообразный или синусоидальный ток. Переменная составляющая магнитного поля изменяет магнитную проницаемость сердечника контурной катушки, что, в свою очередь, вызывает изменение ее индуктивности и частоты ГКЧ.

В другом случае параллельно конденсатору контура задающего генератора подключают варикап, закрытый постоянным напряжением, регулировкой которого устанавливают среднюю частоту ГКЧ. Поданное на варикап управляющее переменное напряжение вызывает соответствующее изменение его емкости и качание частоты.

Генераторы шумовых сигналов создают переменные напряжения, амплитуда и частота которых носят случайный характер, и позволяют имитировать шумовые помехи, проникающие извне или возникающие внутри радиоприемных и усилительных устройств. Эти генераторы используют также при определении напряженности поля и промышленных помех, шумов внеземного происхождения и других радиоастрономических измерениях. По диапазону частот их подразделяют на низко-, высоко- и сверхвысокочастотные. В схему генератора входят источник шумового сигнала, широкополосный аттенуатор для уменьшения уровня этого сигнала и измеритель уровня.

Источниками шумовых сигналов служат различные электронные приборы и специальные резисторы. Так, в ламповом диоде в режиме насыщения из-за неравномерности вылета электронов из катода возникают шумовые флуктуации анодного тока, уровень которых легко регулируется изменением тока накала. Специальные диоды генерируют низкочастотные шумовые сигналы, а диоды с малым временем пролета электронов позволяют расширить спектр частот до тысяч мегагерц. Фотозлектронные умножители при воздействии на них света неоновой лампы также являются источниками шумовых сигналов в диапазоне частот от десятков герц до нескольких мегагерц, уровень которых регулируют, изменяя световой поток диафрагмой с переменным диаметром отверстия. Большой

уровень шумовых сигналов можно получить с помощью газоразрядных трубок и тиратронов. Кроме того, в качестве источников шумового сигнала используют полупроводниковые приборы.

В генераторах шумовых сигналов сверхвысоких частот в качестве источников этих сигналов используют нагреваемые до определенной температуры специальные резисторы, сопротивление которых равно волновому сопротивлению коаксиальной или волноводной линии. Спектр частот таких источников шума — до десятков гигагерц.

Генераторы сигналов специальной формы имеют несколько выходов, на которых в поддиапазоне инфранизких и низких частот от 0,001 до 1000 Гц одновременно или поочередно соответственно создаются несколько напряжений синусоидальной формы, сдвинутых по фазе на 90 и 180°, или прямоугольной, пилообразной либо другой формы.

Конструкции и схемы измерительных генераторов зависят от их назначения и диапазона частот генерируемых сигналов.

Задающий генератор является основным блоком каждого генератора и служит для создания переменных напряжений требуемой формы и частоты. Задающие генераторы имеют устройства для перестройки частоты в широких или узких пределах и шкалы для ее установки и отсчета.

Предварительный и выходной усилители служат для усиления мощности генерируемых сигналов и обеспечивают получение на выходе определенного их уровня.

Вольтметр выпрямительной системы предназначен для контроля уровня сигнала на выходе усилителя.

Аттенюатор, или делитель напряжений (мощностей), включенный на выходе усилителя, позволяет уменьшать выходное напряжение в определенное число раз и получать весьма малые уровни сигналов, используемых при проверке высокочувствительной аппаратуры.

Выходные устройства — трансформаторы или схемы повторителей — позволяют согласовать внутреннее сопротивление измерительного генератора с входным сопротивлением исследуемой аппаратуры.

Генераторы синусоидальных и импульсных сигналов фиксированной частоты, модуляторы, модулометры, видеоконтрольные блоки, частотомеры, ваттметры, моторные приводы и другие дополнительные устройства используются в измерительных генераторах различного назначения.

В блок питания входит выпрямитель, служащий для преобразования переменного напряжения сети в питающие по-

стоянные напряжения, стабилизаторы напряжений, а также фильтры, устраняющие взаимосвязь других блоков через общие цепи питания.

### § 31. Генераторы сигналов низких частот

Основным блоком генераторов сигналов низких частот является задающий генератор, определяющий характеристики, тип, диапазон частот и форму генерируемых колебаний.

Задающие RC-генераторы наиболее просты и надежны, не имеют намоточных деталей (катушек и трансформаторов), генерируют напряжение синусоидальной формы, частоту которого можно перестраивать в широких пределах переменными резисторами или конденсаторами. Каждый RC-генератор в своей основе имеет резисторный усилитель с достаточно сильной положительной обратной связью. Известно, что один каскад резисторного усилителя сдвигает фазу на  $180^\circ$ , т.е. входное и выходное напряжения оказываются в противофазе. Такой усилитель можно преобразовать в RC-генератор, соединив его выход с входом через устройство, сдвигающее фазу еще на  $180^\circ$ . При этом выходное напряжение будет совпадать по фазе с входным, в результате чего создастся положительная обратная связь. Этот сдвиг фазы можно получить, применив второй усилительный каскад или включив в однокаскадный генератор фазосдвигающую RC-цепь.

Двухкаскадный RC-генератор прибора ГЗ-102 (рис. 98, а) имеет два взаимосвязанных усилительных каскада, один из которых собран на транзисторе  $T1$  по схеме с ОЭ с резистором нагрузки  $R7$  в коллекторной цепи, а второй — по каскодной схеме с ОЭ — ОБ на последовательно соединенных транзисторах  $T2$  и  $T3$ . В качестве динамической нагрузки второго каскада служит транзистор  $T4$ . Такая схема позволяет получить большой коэффициент усиления в широкой полосе частот. Прямую связь между каскадами получают соединением коллектора транзистора  $T1$  с базой транзистора  $T2$ . В цепь положительной обратной связи включают фазирующую цепь  $C1 - C8$  и  $R1 - R4$ . Фазирующая цепь  $R'C'R''C''$  одного предела измерений показана на рис. 98, б, а ее частотная характеристика — на рис. 98, в. Так как коэффициент передачи напряжения на частоте  $f_0$  наибольший, схема на этой частоте возбуждается. Частота  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{R'C'R''C''}) = 1/(2\pi RC)$ , так как  $C' = C''$  и  $R' = R''$ .

Для плавной перестройки частоты изменяют сопротивление двоекных резисторов  $R1$  и  $R3$  (регулировка частоты «Hz»), а диапазоны частот переключают переключением конденсато-

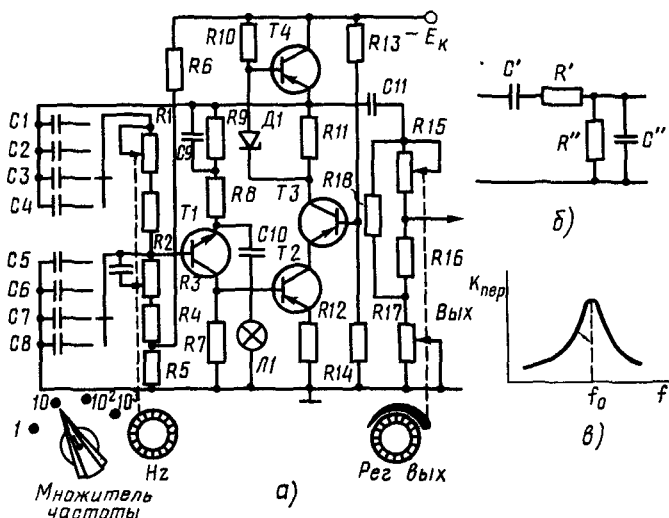


Рис 98. Двухкаскадный RC-генератор прибора ГЗ-102:

а — схема, б, в — фазировочная цепь одного предела измерений и ее частотная характеристика

ров  $C1-C4$  и  $C5-C8$  («Множитель частоты»). Амплитуда выходного сигнала стабилизируется лампой накаливания  $\Lambda 1$ , включенной в цепь отрицательной обратной связи. При увеличении амплитуды выходного сигнала возрастают ток, инерционный нагрев нити накала лампы и ее сопротивление, а при уменьшении наоборот. Глубина обратной связи и усиление схемы изменяются так, чтобы противодействовать изменению уровня выходного сигнала. Так как работа транзисторов определяется линейным участком их характеристик, искажения формы колебаний минимальны.

Режим работы на постоянном токе устанавливают подбором сопротивлений резисторов делителя  $R5R6$ . Включение резисторов  $R8$  и  $R9$  в цепь эмиттера транзистора  $T1$  обеспечивает эмиттерную стабилизацию. Резисторы  $R10$ ,  $R13$  и  $R14$  и стабилитрон  $D1$  определяют режим по постоянному току транзисторов  $T2$ ,  $T3$  и  $T4$  второго каскада. Выходной сигнал через разделительный конденсатор  $C11$  поступает на T-образную схему регулятора выходного напряжения, выполненную на резисторах  $R15-R18$  («Рег. вых.»).

Однокаскадный RC-генератор (рис. 99) имеет трехзвенную фазосдвигающую RC-цепь, связывающую выход каскада с входом. Самовозбуждение усилительного каскада наступает в том



случае, когда, во-первых, коэффициент усиления больше коэффициента ослабления  $RC$ -цепи и, во-вторых, когда фазовый сдвиг, создаваемый каждым звеном, равен  $180^\circ/n = 180^\circ/3 = 60^\circ$  (где  $n$  — количество звеньев  $RC$ -цепи — три и больше). Второе условие при определенных сопротивлении и емкости  $RC$ -элементов справедливо только для частоты  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{6RC})$ , на которой каскад будет возбуждаться.

Режим работы на постоянном токе устанавливают делителем  $R1R$ . Потенциометр  $R3$  служит для регулировки выходного напряжения, поступающего с нагрузочного резистора  $R2$  через разделительный конденсатор  $C1$ . Такие генераторы стабильны в работе и изготавливают на одну или несколько фиксированных частот.

$RC$ -генераторы используются только на звуковых и ультразвуковых частотах. На более высоких частотах стабильность работы таких генераторов резко падает, так как емкости конденсаторов фазирующих цепей малы и соизмеримы с паразитными емкостями схемы.

Задающие  $LC$ -генераторы выполняют по схемам с индуктивной, автотрансформаторной или емкостной положительной обратной связью. Последние два вида связи требуют включения колебательного контура в схему тремя точками, поэтому такие схемы называют трехточечными. Частота генерируемого сигнала обратно пропорциональна индуктивности и емкости применяемых в схеме колебательного контура  $LC$ -элементов и рассчитывается по формуле  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . В основном  $LC$ -генераторы используют на высокой частоте. Так как на низкой частоте плавное изменение индуктивности катушек со стальными сердечниками и емкости конденсаторов затруднительно,  $LC$ -генераторы изготавливают на одну или несколько фиксированных частот.

Две схемы низкочастотных  $LC$ -генераторов на 1000 Гц, которые применяют в качестве источников внутреннего модулирующего напряжения в измерительных генераторах высокой частоты, показаны на рис. 100, а, б. В ламповом генераторе, используемом, например, в приборах Г4-18, Г4-42 (рис. 100, а), положительная обратная связь создается двумя взаимосвязанными усилительными каскадами, в которых напряжения с части

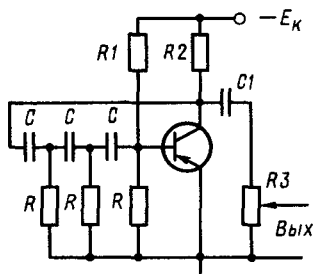


Рис. 99 Схема однокаскадного  $RC$ -генератора

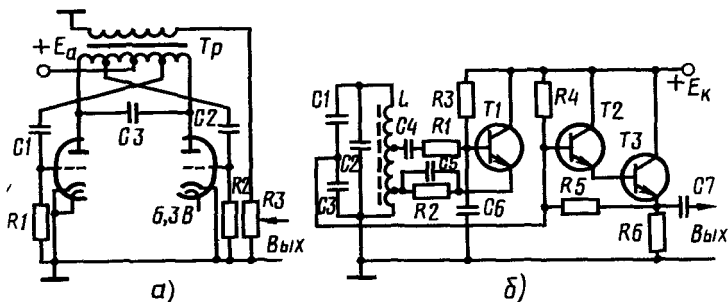


Рис. 100. Схемы низкочастотных лампового (а) и транзисторного (б) LC-генераторов

анодных полуобмоток первичной обмотки трансформатора  $Tr$  через разделительные конденсаторы  $C1$  и  $C2$  подаются на сетки ламп. Частота колебаний зависит от индуктивности первичной обмотки трансформатора и емкости конденсатора  $C3$ , составляющих колебательный контур. Для изменения уровня выходного сигнала, наведенного во вторичной обмотке трансформатора, служит потенциометр  $R3$ .

В транзисторном генераторе, используемом, например, в приборах Г4-102, Г4-106, Г4-107 (рис. 100, б), колебательный контур  $L1\ C1\ C2\ C3$  включается в схему тремя точками, что вызывает положительную обратную связь выходной и входной цепей транзистора  $T1$ , включенного по схеме с ОК. В цепь базы этого транзистора включены резистор  $R1$  и конденсатор  $C4$ , улучшающие фильтрацию высших гармоник и подавляющие возможное паразитное возбуждение. Для эмиттерной стабилизации коллекторного тока в цепь эмиттера включен резистор  $R2$ , зашунтированный конденсатором  $C5$  большой емкости. Каскодный эмиттерный повторитель на транзисторах  $T2$  и  $T3$  обеспечивает необходимое согласование выходного сопротивления генератора с нагрузкой. Смещение фиксированным током создается включением резисторов  $R3$  и  $R4$ , подбор сопротивлений которых обеспечивает требуемые базовые и коллекторные токи. Переменная составляющая выходного напряжения, создаваемого на нагрузочном резисторе  $R6$  эмиттерного повторителя, через разделительный конденсатор  $C7$  поступает на усилитель мощности.

В задающих генераторах на биениях использовано явление, называемое биением частот, сущность которого состоит в том, что при воздействии на детекторную цепь, состоящую из диода  $D$  и нагрузочного резистора  $R$  (рис. 101), двух

напряжений частотой  $f_1$  и  $f_2$  в ней возникает ток сложной формы. При этом кроме составляющих тока основных частот  $f_1$  и  $f_2$  появляются составляющие тока новых комбинационных частот  $f_1 - f_2$ ,  $f_1 + f_2$  и др. Это явление широко применяют для генерирования сигналов инфранизких, звуковых и ультразвуковых частот. Задающий генератор на биениях прибора ГЗ-53 (рис. 102) состоит из двух LC-генераторов, детектора-смесителя и фильтра нижних частот.

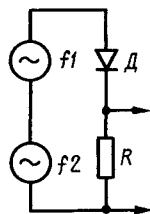


Рис. 101. Схема получения биений частот

В выполненном по емкостной трехточечной схеме LC-генераторе фиксированной частоты на транзисторе  $T_4$  последовательный колебательный контур состоит из катушки  $L_2$  и конденсаторов  $C13-C15$  и  $C19-C22$ . К этому контуру подключены два последовательно соединенных конденсатора  $C11$  и  $C12$  большой емкости, в результате чего образуются три точки его включения в схему. Для переключения диапазонов переключают конденсаторы  $C19-C22$ , при этом контур настраивается на одну из четырех фиксированных частот, разнесенных на 5 кГц. Сигнал фиксированной частоты через разделительный конденсатор  $C16$  поступает на базу транзистора  $T_5$ , включенного в схему буферного эмиттерного повторителя.

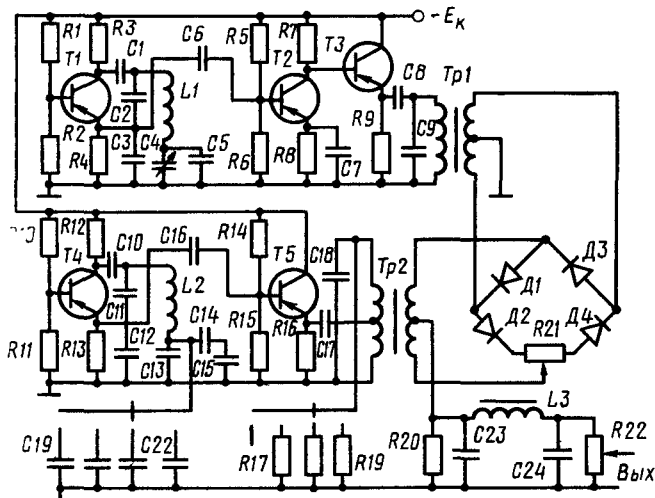


Рис. 102. Схема задающего генератора на биениях прибора ГЗ-53

Первичная обмотка трансформатора  $Tr_2$  и конденсатор  $C18$  являются контуром, настроенным на фиксированную частоту и подключенным через конденсатор  $C17$  к эмиттерной нагрузке  $R16$ . Такой дополнительный контур обеспечивает фильтрацию гармоник и уменьшение нелинейных искажений. Кроме того, буферный каскад устраняет связь между обоими генераторами через цепи детектора-смесителя.

В  $LC$ -генераторе переменной частоты на транзисторе  $T1$ , также выполненном по трехточечной схеме, последовательный контур состоит из катушки  $L1$  и конденсаторов  $C4$  и  $C5$ . Для плавного изменения частоты («Частота») служит конденсатор переменной емкости  $C4$ . Параллельно контуру подключены два последовательно соединенных конденсатора  $C2$  и  $C3$ , в результате чего образуются три точки его включения в схему. Первый каскад двухкаскадного буферного усилителя на транзисторе  $T2$  является предварительным усилителем напряжения, а второй каскад на транзисторе  $T3$  — эмиттерным повторителем и аналогичен каскаду на транзисторе  $T5$ . Первичная обмотка трансформатора  $Tr_1$  и конденсатор  $C9$  являются нагрузочным контуром.

В схемах обоих генераторов для создания смещения на базы транзисторов применены делители напряжений  $R1R2$ ,  $R5R6$ ,  $R10R11$  и  $R14R15$ .

Детектор-смеситель собран по мостовой схеме на диодах  $Д1$  —  $Д4$ . Резистор  $R21$  служит для балансировки смесителя, что улучшает симметрию схемы и снижает искажения формы выходного сигнала. Оба сигнала высокой частоты с вторичных обмоток трансформаторов  $Tr_1$  и  $Tr_2$  подаются к диагоналям мостовой схемы. Получаемый в результате биений частот сигнал звуковой частоты пропускается фильтром нижних частот, состоящим из катушки  $L3$  и конденсаторов  $C23$ ,  $C24$ , и поступает на вход усилителя звуковых частот. Для регулировки уровня выходного сигнала («Рег. вых.») служит потенциометр  $R22$ .

В приборе ГЗ-56 и заменяющем его современном приборе ГЗ-104 также применен задающий генератор на биениях частот, состоящий из двух высокочастотных  $LC$ -генераторов и детектора-смесителя. Один генератор настроен на фиксированную высокую частоту 400 кГц, а изменение высокой частоты другого в узких пределах от 400 до 360 кГц позволяет получить на выходе детектора-смесителя сигнал низкой частоты, изменяющийся в пределах от 0 до 40 кГц.

Прибор ГЗ-102 (рис. 103) является измерительным генератором и служит источником напряжения синусоидальной формы

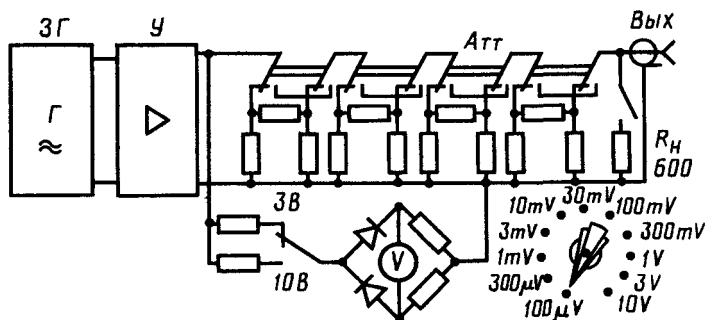


Рис. 103. Структурная схема прибора ГЗ-102

звуковых и ультразвуковых частот. Коэффициент гармоник составляет 0,2% при выходной мощности до 100 мВт на нагрузке 600 Ом. Диапазон частот от 20 Гц до 200 кГц покрывается четырьмя поддиапазонами с множителями частоты 1, 10,  $10^2$  и  $10^3$ . Выходное напряжение может быть установлено в пределах от 20 мкВ до 8 В.

Двухкаскадный задающий генератор 3Г выполнен по RC-схеме (см. рис. 98).

Усилитель У имеет три каскада предварительного усиления на транзисторах, включенных по схеме с ОЭ, и выходной эмиттерный повторитель с динамической нагрузкой. Обратные связи по постоянному току и переменному напряжению стабилизируют режим работы транзисторов и позволяют получать низкое выходное сопротивление и малые нелинейные и частотные искажения.

Индикатор выходного напряжения, включенный на выходе усилителя, представляет собой простейший выпрямительный вольтметр V, выполненный по мостовой параллельной схеме. Выходное напряжение генератора устанавливают и отсчитывают по шкале вольтметра, имеющей две градуировки: от 0 до 3 В и от 0 до 10 В.

Аттенуатор АТТ позволяет уменьшить установленное по вольтметру выходное напряжение в 1, 3, 10, 30 ... 100 000 раз, т.е. ступенями через 10 дБ до 100 дБ. Четыре П-образных звена имеют ослабление 40, 30, 20 и 10 дБ и коммутируются так, чтобы можно было получить требуемое уменьшение напряжения от 0 до 100 дБ. При включенном внутреннем нагрузочном резисторе  $R_n = 600$  Ом положения 10; 3; 1; 0,3 и т.д. переключателя звеньев являются пределами вольтметра.

Блок питания (на рис. 103 не показан) состоит из двухполупериодного выпрямителя, сглаживающего фильтра и электронного стабилизатора, обеспечивающего стабильное питающее напряжение 50 В.

Отечественной промышленностью выпускаются измерительные генераторы сигналов низкой частоты, технические характеристики которых незначительно отличаются друг от друга. Так, приборы ГЗ-105 и ГЗ-108 позволяют точно устанавливать и отсчитывать частоту генерируемых сигналов соответственно в поддиапазонах низких и видеочастот от 10 Гц до 2 МГц и инфранизких и низких от 0,01 Гц до 100 кГц. Весьма близкие к синусоидальным колебания генерирует прибор ГЗ-102, а прибор ГЗ-107 позволяет устанавливать с высокой точностью уровень выходного сигнала. Прибор Г4-117 генерирует сигналы в спектре низких и видеочастот от 20 Гц до 10 МГц, а прибор ГЗ-104 позволяет плавно перекрывать частоты от 20 Гц до 40 кГц. Портативный прибор ГЗ-106, генерирующий синусоидальные колебания в диапазоне низких частот, предназначен для жестких условий эксплуатации.

### § 32. Генераторы сигналов высокой частоты

Задающий генератор является основной частью генераторов сигналов высокой частоты и определяет форму генерируемых колебаний и пределы частот. На высокой частоте в качестве задающих используют *LC*-генераторы с индуктивной, автотрансформаторной и емкостной связью.

Схемы задающих лампового и транзисторного генераторов высокой частоты показаны на рис. 104, а, б. Такие генераторы обычно имеют шесть–восемь поддиапазонов частот, переключа-

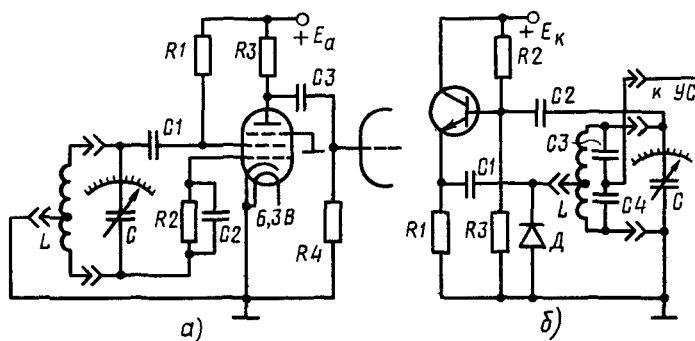


Рис. 104. Схемы высокочастотных лампового (а) и транзисторного (б) задающих *LC*-генераторов

чаемых барабанным переключателем контурных катушек  $L$ . Внутри поддиапазона частоту плавно изменяют конденсатором переменной емкости  $C$  и отсчитывают по его шкале.

Ламповый генератор (рис. 104, а) использовался в приборах прежних выпусков, например Г4-18, Г4-42 и др. Включение колебательного контура в схему генератора тремя точками обуславливает положительную обратную связь. Генерируемое высокочастотное напряжение с резистора  $R3$  анодной нагрузки через разделительный конденсатор  $C3$  подается на сетку лампы усилителя мощности. Режим работы генератора устанавливается напряжением смещения, создаваемым на резисторе  $R2$  постоянной составляющей тока сетки, переменная составляющая которого фильтруется конденсатором  $C2$ . Положительное напряжение на экранирующей сетке устанавливают, подбирая сопротивление резистора  $R1$ .

Транзисторный генератор (рис. 104, б) применяют в таких приборах, как Г4-102, Г4-106, Г4-117, Г4-118 и др., колебательный контур которых также соединен тремя точками. Положительная обратная связь создается между нижней и верхней частями контурной катушки  $L$ , включенными по переменному току в эмиттерную и базовую цепи транзистора. Диод  $D$  служит для ограничения амплитуды отрицательных импульсов на эмиттере, что улучшает форму генерируемых высокочастотных колебаний. Режим работы генератора устанавливается фиксированным напряжением на базе транзистора, создаваемым делителем  $R2R3$  питающего напряжения. Так как транзистор включен по схеме с ОК, нагрузочный резистор  $R1$  подключается в цепь эмиттера. Генерируемое высокочастотное напряжение с конденсатора  $C4$  конденсаторного делителя напряжения  $C3C4$  подается на усилитель мощности. Разделительные конденсаторы  $C1$  и  $C2$  отделяют цепи постоянных токов от цепей переменных.

Прибор Г4-102 (рис. 105) является источником переменных напряжений синусоидальной формы высокой частоты от 100 кГц до 50 МГц с погрешностью ее установки и отсчета не более 1%. Калиброванное напряжение на выходе основного канала (гнездо « $\mu V$ ») от 0,5 до 500 000 мкВ ре-

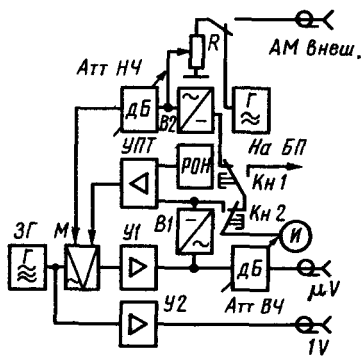


Рис. 105. Структурная схема прибора Г4-102

гулируют ступенями по 10 дБ и плавно внутри каждой ступени. Некалиброванное напряжение на выходе вспомогательного канала (гнездо «1V») равно 1 В. Прибор может работать в режимах непрерывной генерации НГ и амплитудной модуляции АМ от внутреннего звукового генератора 1000 Гц или внешнего 50–15 000 Гц. Глубину модуляции регулируют в пределах от 0 до 90%.

Задающий генератор 3Г, выполненный по индуктивной трехточечной схеме (см. рис. 104, б), определяет частоту и форму генерируемых колебаний, а трехкаскадный широкополосный усилитель У2 вспомогательного канала служит для усиления немодулированного напряжения высокой частоты. Основной канал состоит из модулятора М, усилителя У1 и аттенюатора *Атт ВЧ*. В качестве модулятора используется широкополосный усилитель с нелинейной амплитудной характеристикой, коэффициент усиления которого изменяется под воздействием большого по амплитуде модулирующего напряжения звуковой частоты, в результате чего усиливаемый сигнал высокой частоты оказывается промодулированным по амплитуде. Усилитель У1 основного канала аналогичен по схеме усилителю У2 вспомогательного канала и служит для усиления модулированного сигнала высокой частоты. Аттенюатор высокой частоты *Атт ВЧ* имеет переключаемые П-образные звенья (см. рис. 48, а и 103) и позволяет уменьшать выходной сигнал в 1, 10,  $10^2$ ,  $10^3$ ,  $10^4$  и  $10^5$  раз.

Источником модулирующего сигнала служит внутренний генератор Г, схема которого была показана на рис. 100, б, или внешний звуковой генератор, сигнал которого подают на гнездо «АМ внеш.» Магнитоэлектрический измеритель И и выпрямитель В2 являются выпрямительным вольтметром, по которому контролируют уровень модулирующего сигнала. Стрелочный указатель устанавливают на отметку «К» шкалы измерителя потенциометром R, обеспечивая этим строго определенный калиброванный уровень модулирующего сигнала на входе аттенюатора низкой частоты *Атт НЧ*. Так как глубина модуляции зависит от уровня модулирующего сигнала, положения переключателя П-образных звеньев аттенюатора *Атт НЧ* проградуированы в значениях коэффициента модуляции 0, 10, 20, 30% и т.д.

Система автоматической регулировки выходного напряжения АРВ, состоящая из выпрямителя В1, регулятора постоянного опорного напряжения РОН и усилителя постоянного тока УПТ позволяет, во-первых, поддерживать стабильным уровень выходного сигнала и, во-вторых, изменять его, изменяя по-



стоянное опорное напряжение. На вход УПТ поступает разность двух постоянных напряжений, из которых одно на выходе выпрямителя  $B1$  зависит от уровня высокочастотного сигнала, а другое устанавливают регулятором опорного напряжения  $РОН$ . При равных напряжениях их разность равна нулю и система  $APB$  не действует. При увеличении или уменьшении уровня высокочастотного сигнала соответственно изменяется постоянное напряжение на выходе выпрямителя  $B1$  и на вход УПТ поступает разностное постоянное напряжение одной или другой полярности. Усиленное постоянное напряжение воздействует на регулирующий каскад модулятора так, что его усиление уменьшается или увеличивается до тех пор, пока разностное постоянное напряжение не станет равным нулю и восстановится первоначальный уровень высокочастотного сигнала. Таким образом, при неизменном постоянном опорном напряжении система  $APB$  поддерживает стабильным уровень выходного сигнала высокой частоты.

Ручная регулировка опорного напряжения вызывает изменение уровня выходного сигнала, что позволяет проградуировать две шкалы переменного резистора регулятора  $РОН$  в пределах 0,5–1,5 В (черная) и 1,5–5 В (красная) и отсчитывать по ним уровень выходного сигнала с учетом соответствующего множителя переключателя звеньев  $Атт ВЧ$ .

Блок питания (на рис. 105 не показан) представляет собой стабилизированные выпрямители, преобразующие напряжения сети в два постоянных разнополярных напряжения +12,6 и –12,6 В. При нажатии кнопки  $Kn 1$  « $U_{пит}$ » измеритель  $I$  контролирует питающие напряжения, а при нажатии кнопки  $Kn 2$  « $U_{вых}$ » совместно с выпрямителем  $B1$  является выпрямительным вольтметром и контролирует наличие высокочастотного напряжения на выходе усилителя  $У1$ .

При такой схеме генератора взаимозависимость регулировок незначительна, что позволяет точно контролировать частоту на выходе вспомогательного канала, которая неизменна даже при глубокой модуляции в основном канале.

Отечественной промышленностью выпускаются генераторы сигналов высокой частоты, технические характеристики которых незначительно отличаются друг от друга. Так, прибор Г4-102 широкого применения генерирует сигналы высокой частоты от 100 кГц до 50 МГц; в таком же диапазоне частот генерирует сигналы повышенной мощности прибор Г4-118. Прибор Г4-117 с задающими  $RC$ - и  $LC$ -генераторами генерирует сигналы частот от 20 Гц до 10 МГц, а прибор Г4-106 с  $LC$ -генератором – от 10 кГц до 10 МГц.

### § 33. Генераторы сигналов сверхвысокой частоты

Генераторы сигналов поддиапазона метровых волн, например Г4-107, Г4-116 и Г4-119, имеют такую же схему, как генератор сигналов высокой частоты Г4-102. Усилитель вспомогательного канала прибора Г4-107 позволяет получать на его некалиброванном выходе напряжение от 0,1 до 1 В, а на калиброванном выходе основного канала переключением звеньев аттенуатора высокой частоты устанавливается напряжение от 1 мкВ до 1 В. Кроме амплитудной модуляции в приборе предусмотрена импульсная модуляция, для чего в основной канал включены два модулятора — специальные аттенуаторы, коэффициент ослабления которых зависит от модулирующих напряжений. На амплитудный модулятор через аттенуатор низкой частоты от внутреннего или внешнего генератора подают модулирующий синусоидальный сигнал соответственно частотой 1000 Гц или 50 Гц — 200 кГц. На импульсный модулятор от внутреннего или внешнего генератора подают модулирующие импульсы длительностью от 1 до 1000 мкс соответственно частотой 1000 Гц или 50–10 000 Гц. Модулированный сигнал высокой частоты усиливается широкополосным усилителем, имеющим автоматическую регулировку выходного напряжения, состоящую из выпрямителя, усилителя постоянного тока и регулятора опорного напряжения, обеспечивающую стабильный уровень выходного сигнала при неизменном опорном напряжении и его регулировку при изменении этого напряжения. Система индикации служит для контроля опорного, модулирующего, выходного и питающих напряжений.

Задающий генератор прибора Г4-107 позволяет плавно перестраивать частоту генерируемого сигнала от 12,5 до 400 МГц на пяти поддиапазонах: 12,5–25, 25–50, 50–100, 100–200 и 200–400 МГц. Многодиапазонные колебательные контуры с плавной перестройкой частоты конденсатором переменной емкости и барабанным или кнопочным переключателем контурных катушек широко применяются в таких многодиапазонных устройствах, как генераторы высокой частоты, радио- и телевизионные приемники и др. В задающем генераторе прибора Г4-107 используется другой принцип — деление частоты, что позволяет исключить из контура коммутирующие элементы, которые, например, в радио- и телевизионных приемниках вызывают трески и неустойчивость работы.

Схема задающего генератора с делением частоты показана на рис. 106. Генератор верхнего поддиапазона частот

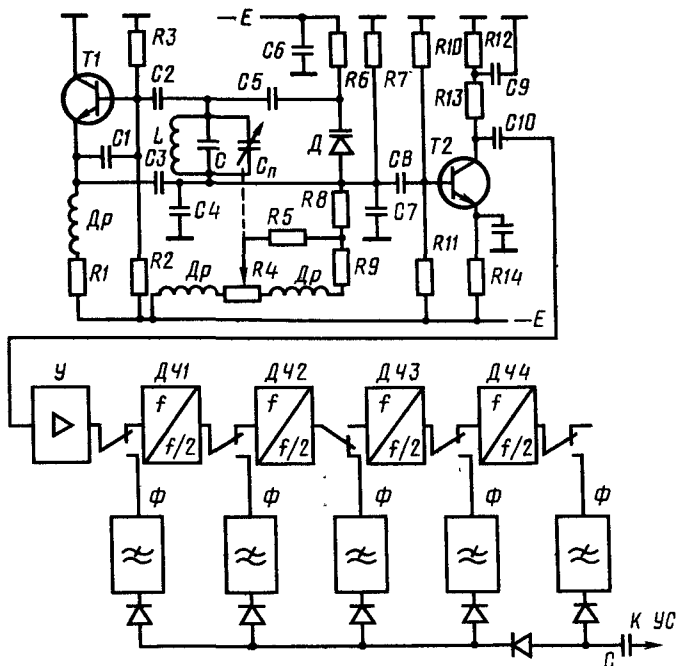


Рис. 106. Схема задающего генератора с делением частоты

400–200 МГц выполнен по емкостной трехточечной схеме на транзисторе  $T_1$ , включенном по схеме с ОК. Колебательный контур  $LCC_n$  и конденсаторы  $C_1$ – $C_4$  обратной связи соединены звездой, что увеличивает перекрытие частот и улучшает равномерность уровня сигнала. Частоту контура изменяют, регулируя переменным резистором  $R_4$  закрывающее варикап  $D$  напряжение. Для улучшения равномерности перестройки частоты ось движка резистора  $R_4$  механически соединяют с осью ротора конденсатора  $C_n$  переменной емкости. Буферный усилитель на транзисторе  $T_2$  устраняет влияние последующих каскадов на работу генератора. Требуемые смещения на базы транзисторов и варикап устанавливают с помощью делителей напряжения, состоящих из резисторов  $R_2R_3$ ,  $R_7R_8$  и  $R_{10}R_{11}$ .

Сигнал высокой частоты верхнего поддиапазона 400–200 МГц через разделительный конденсатор  $C_{10}$  подается на вход двухкаскадного усилителя  $У$ , который усиливает его до уровня, достаточного для запуска делителей частоты  $DЧ_1$ – $DЧ_4$ . Делители частоты представляют собой триггерные

схемы с однокаскадным буферным усилителем, уменьшают частоту приходящего сигнала в два раза и на их выходах образуются сигналы в четырех других поддиапазонах. При нажатии кнопки нужного поддиапазона подключаются соответствующие делители частоты и один фильтр нижних частот, отфильтровывающий верхние гармоники, обеспечивая синусоидальную форму выходного сигнала; остальные фильтры при этом отключены. Одновременно на соответствующий диод через катушки индуктивности включенного фильтра подается открывающее напряжение, сопротивление диода резко падает и выход фильтра через разделительный конденсатор  $C$  подключается к входу усилителя. Остальные диоды при этом закрыты и их сопротивления велики.

Способ формирования поддиапазонов с применением деления частоты упрощает установку граничных частот верхнего поддиапазона и, следовательно, связанных с ним четырех других поддиапазонов, позволяет улучшить стабильность частоты и устранить переключение контурных катушек. Такая схема довольно сложна, однако применение интегральных микросхем дает возможность уменьшить массу приборов и повысить их надежность.

В генераторах сигналов поддиапазонов дециметровых и сантиметровых волн в качестве колебательных систем используются отрезки коаксиальных или волноводных линий, а для генерации сигналов СВЧ — электровакуумные приборы с малым временем пролета электронов и дисковыми выводами.

Генераторы с коаксиальным выходом применяют на частотах до 10–15 ГГц, т. е. верхнем участке дециметрового и нижнем сантиметрового диапазонов волн. Колебательные системы в виде короткозамкнутых коаксиальных отрезков (резонаторов) настраивают линейным перемещением короткозамыкателя — металлического поршня. Это перемещение с помощью зубчатой передачи преобразуется во вращательное движение указателя частотной шкалы. Для генерации сигнала СВЧ применяют маячковые или металлокерамические лампы и клистроны, дисковые выводы которых соединяют с внешними резонаторами.

Генераторы с волноводным выходом применяют на частотах до 70–80 ГГц, т. е. верхнем участке сантиметрового и нижнем миллиметрового диапазонов волн. Сигналы СВЧ генерируют клистроны с внутренним объемным резонатором; внешних колебательных систем эти генераторы не имеют. Перестройку частоты выполняют механическим изменением положения упругого резонатора и регулировкой постоянного

напряжения на отражателе клистрона. Генерируемый сигнал выводят из резонатора петель связи или с помощью штыря, вводимого в волновод. Волновод — металлическая труба обычно прямоугольного сечения — служит для передачи электромагнитной энергии и соединения между собой частей прибора. Для модуляции сигнала СВЧ по амплитуде и частоте на отражателе клистрона от внутреннего или внешнего генератора подают соответствующее модулирующее напряжение.

Такие генераторы СВЧ имеют один поддиапазон с небольшим перекрытием по частоте и изготавливаются сериями из однотипных приборов, генерирующих сигналы последовательно расположенных поддиапазонов частот. Например, приборы Г4-119—Г4-127 соответственно генерируют сигналы поддиапазонов частот 0,03–0,2; 0,2–0,82; 0,82–1,8 и т. д. до 12–16,6 ГГц.

Типовая схема этих приборов состоит из задающего генератора, аттенуатора и выходного фланца, связанных коаксиальной или волноводной линией. В прибор встраивают постоянно подключенные к главному тракту измерители частоты и мощности сигнала СВЧ. Органы управления, шкальные устройства и регулирующие элементы (поршни, штыри, петли связи и др.) соединяются безлюфтовыми механическими передачами.

Приборы Г4-114 и Г4-115 (рис. 107) генерируют сигналы СВЧ в поддиапазонах частот 16,6–25,8 и 25,8–32 ГГц и имеют соответственно волноводы сечением  $11 \times 5,5$  и  $7,2 \times 3,9$  мм. Уровень мощности  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт ослабляется аттенуатором в пределах от 0 до 30 дБ или от 1 до 1000 раз. Для импульсной модуляции используются импульсы длительностью 0,2–10 мкс, напряжением 5–10 В, частотой 1000 или 500–10 000 Гц соответственно от внутреннего или внешнего импульсного генератора, а для амплитудной — сигналы синусоидальной формы напряжением 80 В, частотой 500–10 000 Гц от внешнего генератора.

Основной тракт этих приборов состоит из задающего генератора ЗГ, направленного ответвителя и аттенуатора *Атт.* Сигнал СВЧ генерирует один из трех клистронов, размещенных в генераторной камере, обеспечивающей нормальный режим работы, управление ими, переключение волноводных каналов, механическую перестройку частоты и подачу питающих напряжений. Напра-

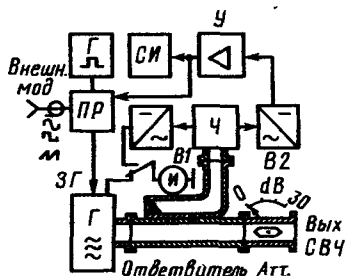


Рис. 107. Структурная схема приборов Г4-114 и Г4-115

вленный ответвитель отводит часть мощности СВЧ из главного тракта во вспомогательный и подает ее на частотомер Ч. Аттенюатор *Атт* поглощающего типа создает переменное ослабление от 0 до 30 дБ или от 1 до 1000 раз, для чего в волновод вводят поршень из поглощающего энергию СВЧ материала.

Вспомогательный тракт состоит из частотометра Ч резонансного типа и двух выпрямительных головок В1 и В2. Стрелочный измеритель И контролирует ток резонатора работающего клистрона или наличие генерации СВЧ. Постоянное напряжение с выхода выпрямительной головки В2 поступает на усилитель У, преобразуется в переменное частотой 1000 Гц, усиливается и воздействует на световой индикатор СИ и переключатель рода работы ПР. Для модуляции сигнала СВЧ на отражатель клистрона подают модулирующее импульсное напряжение от внутреннего генератора Г или синусоидальное, импульсное либо пилообразное от внешнего.

### § 34. Генераторы импульсных сигналов

Источниками несинусоидальных колебаний служат мульти-вибраторы и блокинг-генераторы, имеющие сравнительно простые схемы и генерирующие импульсные сигналы почти прямоугольной формы. Получить импульсы строго прямоугольной формы невозможно из-за собственных индуктивностей и емкостей элементов схем и соединительных проводов.

Основными параметрами однополярных импульсных сигналов прямоугольной формы (рис. 108) являются:  $U_m$  — высота (амплитуда) импульса, В;  $\tau$  — длительность импульса при  $0,5 U_m$ , мкс;  $T_n$  — период повторения импульсов, с или мс;  $f = 1/T_n$  — частота импульсов, Гц или кГц;  $t_f$  — длительность фронта импульса при  $(0,1 - 0,9) U_m$ ;  $t_c$  — длительность среза импульса при  $(0,1 - 0,9) U_m$ ;  $Q = T_n/\tau$  — скважность.

Измерительные генераторы импульсных сигналов, являющиеся источниками напряжений прямоугольной формы с регулируемыми в широких пределах длительностью, частотой следования и высотой импульсов, представляют собой сложные многоэлементные приборы.

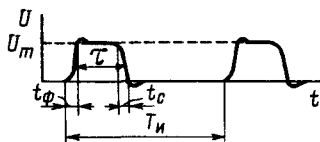


Рис 108 Однополярные импульсы прямоугольной формы

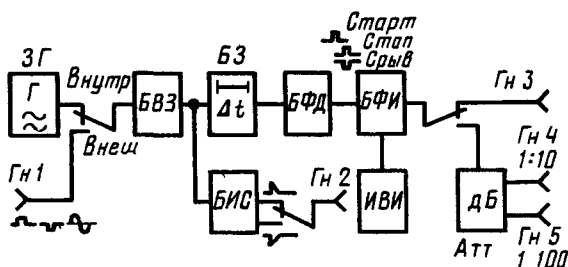


Рис 109 Структурная схема прибора Г5-54

Прибор Г5-54 (рис. 109) широкого применения служит источником видеоимпульсов прямоугольной формы положительной или отрицательной полярности. Высота импульсов на основном выходе (гнездо Гн.3) при внешней нагрузке 500 Ом плавно регулируется от 15 до 50 В. Выходной аттенуатор *Атт* позволяет уменьшить высоту импульсов в 1, 3, 10 и 30 раз и подать их на два дополнительных выхода – гнезда Гн.4 и Гн.5 с коэффициентами деления 1:10 и 1:100. Длительность выходных импульсов от 0,1 до 1000 мкс плавно регулируют на восьми поддиапазонах 0,1–0,3; 0,3–1; 1–3 мкс и т.д. При нажатой кнопке «0» выходные импульсы совпадают по времени с импульсами синхронизации или, если кнопка не нажата, имеют временной сдвиг – плавно регулируемый на восьми поддиапазонах 0,1–0,3; 0,3–1; 1–3 и т.д. задержку от 0,1 до 1000 мкс. При внутреннем запуске задающего генератора частоту повторения импульсов от 10 Гц до 100 кГц плавно регулируют на восьми поддиапазонах 10–30, 30–100, 100–300 Гц и т.д. Возможен также его внешний запуск импульсным или синусоидальным напряжением до 20 В либо механическим однократным пускателем (кнопкой). Импульсы синхронизации положительной или отрицательной полярности длительностью 0,3–1 мкс и высотой 10–15 В снимают с гнезда Гн.2.

Задающий генератор 3Г прибора Г5-54 состоит из мультивибратора (микросхема 2КГФ181) на два основных поддиапазона частот 100–30 и 30–10 кГц и трех делительных декад (микросхемы К2ТК171Д), каждая из которых понижает частоту в 10 раз, в результате чего формируются вышеуказанные восемь поддиапазонов частот. Задающий генератор работает в режиме внутреннего запуска и генерирует тактовые запускающие импульсы. В режиме внешнего запуска тактовым запускающим напряжением служит импульсное или синусоидальное напряжение, подаваемое от внешнего генератора на гнездо

**Гн.1.** Возможен также одnorазовый запуск при нажатии кнопки.

Блок внутреннего или внешнего запуска *БВЗ* формирует фиксированные по длительности и высоте импульсы, одновременно поступающие на блок задержки *БЗ* и блок формирования импульсов синхронизации *БИС*. Сформированные импульсы синхронизации положительной или отрицательной полярности снимают с гнезда *Гн.2*. Импульсы на выходе блока задержки сдвинуты по времени по отношению к входным или импульсам синхронизации с регулируемым временным сдвигом. Импульсы с выхода блока *БЗ* запускают блок формирования длительности *БФД*, на выходе которого создаются стартовые и сдвинутые по времени стоповые импульсы с регулируемым временным сдвигом между ними.

Блок формирования импульсов *БФИ* формирует выходные импульсы прямоугольной формы, фронт и срез которых определяют стартовые и стоповые импульсы. Регулировкой временного сдвига между ними изменяют длительность выходных импульсов. Импульсы срыва, совпадающие по времени со стоповыми, воздействуют на *БФИ* и восстанавливают его исходное состояние для приема очередного стартового импульса. Регулируемые по высоте выходные импульсы поступают на гнездо *Гн.3* (1:1) или на аттенуатор *Атт* и далее — на гнезда *Гн.4* (1:10) и *Гн.5* (1:100). Измеритель выходных импульсов *ИВИ* — импульсный вольтметр — служит для измерения высоты импульсов на выходе *БФИ*, которую отсчитывают в вольтах по шкале магнитозлектрического измерителя с учетом соответствующего коэффициента деления.

Генераторы импульсных сигналов применяют для запуска и исследования триггерных, счетных, релейных, запоминающих и других подобных устройств, при испытаниях импульсной аппаратуры различного назначения в вычислительной технике и автоматике, а также устройствах импульсной модуляции и при измерениях импульсных характеристик усилителей, полупроводниковых и электровакуумных приборов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как классифицируют измерительные генераторы по форме генерируемых сигналов и диапазону частот?
2. Каково назначение основных частей измерительных генераторов?
3. Как работают задающие *RC*- и *LC*-генераторы и генераторы на бинариях?
4. Каковы основные характеристики и схемы низкочастотных ге-



нераторов ГЗ-102, ГЗ-104, ГЗ-105, ГЗ-106, ГЗ-107, ГЗ-108, и высокочастотных Г4-102, Г4-106, Г4-117, Г4-118?

5. Каковы основные характеристики прибора Г4-107 метровых волн и особенности схемы его задающего генератора?

6. Какие колебательные системы и электровакуумные приборы используются в измерительных генераторах деци- и сантиметровых волн?

7. Какими параметрами характеризуется импульсный сигнал?

8. Каков принцип действия генератора импульсных сигналов Г5-54?

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ ЭЛЕКТРОННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

### § 35. Общие сведения

Основой электронных осциллографов является электронно-лучевая трубка, на экране которой можно получить осциллограмму исследуемого процесса, наблюдать и фиксировать (фотографировать) его. Наиболее часто осциллографы используются для исследования зависимости мгновенных значений напряжений от времени, для чего применяют создаваемую генератором развертки линейную (временную) развертку. Синусоидальная и круговая развертки позволяют также исследовать зависимость напряжений от других факторов. Таким образом, осциллографические методы служат для наблюдения и исследования функциональных зависимостей двух электрических величин, а также неэлектрических, преобразуемых в электрические.

Так как инерция движения луча в электронно-лучевой трубке незначительна, электронные осциллографы применяют в диапазоне частот от нуля до сотен мегагерц и с их помощью наблюдают процессы длительностью в миллионные доли секунды и меньше. Для повышения чувствительности осциллографов в их схему вводят усилители, входное сопротивление которых велико (порядка 1 МОм), поэтому подключение осциллографа не влияет на режим работы испытываемой аппаратуры.

Современные электронные осциллографы помимо качественной оценки позволяют получить количественную, т.е. измерять параметры по вертикальному и горизонтальному отклонениям луча.

Таким образом, осциллографы являются универсальными измерительными приборами, позволяющими определять мгно-

венные и амплитудные напряжения, токи, мощности, глубину амплитудной модуляции, длительность импульсов, фазовые сдвиги. Кроме того, осциллографы применяют для высокоточного сравнения частот, получения осциллограмм вольт-амперных характеристик электронных приборов, а также частотных, амплитудных и других характеристик четырехполосников.

По количеству исследуемых сигналов электронные осциллографы подразделяют на одно-, двух- и многолучевые, а по назначению — на универсальные, скоростные стробоскопические и запоминающие. Выпускаемые отечественной промышленностью различные типы осциллографов в основном имеют одинаковые структурные схемы (рис. 110) и состоят из электронно-лучевой трубки с высоковольтным выпрямителем питающих напряжений, каналов вертикального и горизонтального отклонения луча и управления яркостью, калибраторов длительности и амплитуды и блока питания.

При подаче на электроды электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) питающих напряжений появляется электронный луч, фокусирующийся на экране в световое пятно диаметром 0,5–0,8 мм.

В канал  $Y$  вертикального отклонения луча входят делитель напряжения  $ДН$  и усилитель вертикального отклонения  $УВО$ , выход которого соединен с вертикально отклоняющими пластинами ЭЛТ. Исследуемый сигнал подают на вход канала  $Y$ , выбирают коэффициент деления и, регулируя усиление, получают необходимый для наблюдения размер изображения по вертикали.

В канал  $X$  горизонтального отклонения луча входят блок синхронизации и запуска  $БСЗ$ , генератор развертки  $ГР$  и усили-

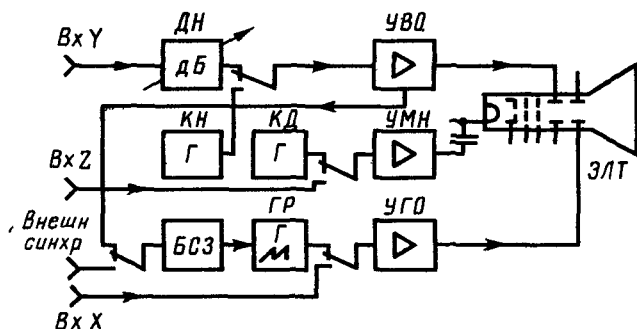


Рис. 110. Структурная схема электронного осциллографа

тель горизонтального отклонения УГО, выход которого соединен с горизонтально отклоняющими пластинами ЭЛТ. Характер движения луча по горизонтали определяется напряжением генератора развертки или, если он выключен, любым внешним напряжением, подаваемым на вход УГО.

Одновременное движение луча по вертикали и горизонтали соответственно под воздействием исследуемого  $U_{ис}$  и развертывающего  $U_p$  напряжений вызывает появление осциллограммы, отображающей зависимость  $U_{ис} = \varphi(U_p)$ . Изображение на экране будет устойчивым только в том случае, если частота развертывающего напряжения, определяемая частотой синхронизирующих или запускающих импульсов, будет равна частоте исследуемого напряжения или в 2, 3, 4 и т. д. раза меньше ее. В качестве напряжения, преобразуемого БСЗ в синхронизирующие или запускающие импульсы, используют исследуемый сигнал, поступающий от УВО, или внешний сигнал.

Каналом Z управления яркостью является усилитель модулирующего напряжения УМН, выход которого соединен с катодом ЭЛТ, служащим модулятором яркости. Поданное на вход УМН переменное напряжение вызывает изменение яркости и появление вместо сплошной светящейся линии пунктирной.

Калибратор длительности КД является генератором сигналов строго определенных фиксированных частот. Подаваемый в канал Z сигнал КД вызывает появление на экране ЭЛТ яркостных меток. Цена деления между соседними метками равна периоду сигнала КД, т. е. отклонение луча по горизонтали калибруется по времени.

Калибратор напряжения КН является источником образцового переменного напряжения, которое подают на вход УВО для калибровки отклонения луча по вертикали.

Блок питания БП (на рис. 110 не показан) состоит из двух выпрямителей, преобразующих переменное напряжение сети в постоянное для питания цепей ЭЛТ (2000–3000 В) и транзисторных (10–15 В) или ламповых (250 В) электронных схем.

### § 36. Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевые трубки осциллографов имеют электростатические фокусировку и управление. В горловине стеклянного баллона трубки размещены электронный прожектор и две пары расположенных взаимно перпендикулярно отклоняющих пластин. Двух-, трех- и многолучевые трубки имеют соответствующее количество электронных прожекторов, которые со-

стоят из катода косвенного нагрева, управляющего электрода и системы анодов.

Предварительная фокусировка луча создается подаваемым на управляющий электрод отрицательным по отношению к катоду напряжением, увеличение которого вызывает уменьшение интенсивности электронного потока и снижение яркости светового пятна, и наоборот. Для ускорения движения электронов на аноды подают положительное напряжение, причем на каждом последующем аноде это напряжение должно быть больше. Регулируя напряжение на первом аноде, фокусируют луч в плоскости экрана, на который нанесен люминофор, светящийся под ударами электронов.

Схема питания электродов трубки от высоковольтного выпрямителя показана на рис. 111. Выпрямители напряжений —  $-650$  В и  $+2500$  В выполнены соответственно на диоде  $D1$  и по однополупериодной схеме с утроением напряжения. Эти напряжения соответственно подаются через фильтры  $R1C5$  и  $R2C6$  на делительную цепь  $R3-R7$  и на третий анод ЭЛТ. Для регулировки яркости изменяют потенциометром  $R3$  отрицательное по отношению к катоду напряжение на управляющем электроде. Резистор  $R4$  служит для ограничения максимальной яркости. Фокусируют луч потенциометром  $R6$ , изменяя в определенных пределах, зависящих от сопротивлений резисторов  $R5$  и  $R7$  (например, от  $300$  до  $500$  В), отрицательное по отношению к корпусу и положительное по отношению к катоду напряжение на первом аноде.

Управляют лучом, т. е. перемещением и движением светового пятна по вертикали и горизонтали, электростатическими полями, создаваемыми между каждой парой отклоняющих пластин при подаче на них постоянных и переменных напряжений.

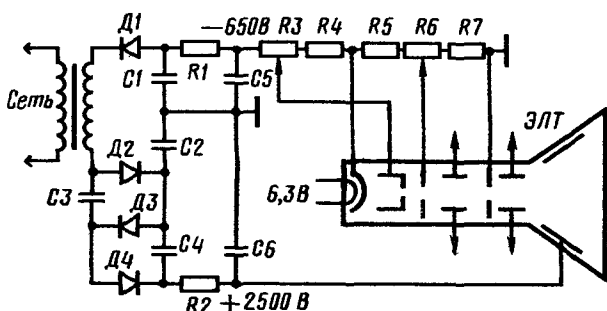


Рис. 111. Схема питания электродов ЭЛТ от высоковольтного выпрямителя

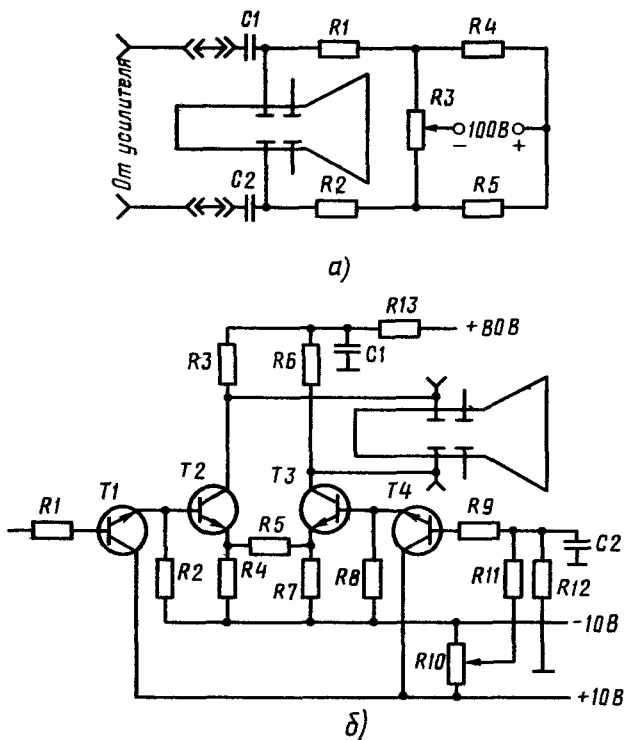


Рис. 112. Схемы установки луча:  
а — мостом постоянного тока, б — балансным выходным каскадом

Перемещают пятно с помощью схем установки луча (рис. 112, а, б). Если движки переменных резисторов  $R_3$  и  $R_{10}$  установлены в среднее положение, положительные напряжения на обеих пластинах равны (например,  $+50$  В), разность их равна нулю и пятно находится в центре экрана. При изменении положения движков этих резисторов напряжение на одной пластине, например, увеличивается до  $+60$  В, а на другой уменьшается до  $+40$  В и разность  $+20$  В вызывает перемещение пятна от центра экрана. Аналогично пятно перемещается в другую от центра экрана сторону, если разность напряжений составляет  $-20$  В.

В схеме установки луча, показанной на рис. 112, а, применен мост постоянного тока, составленный из резисторов  $R_4$ ,  $R_5$  и двух частей переменного резистора  $R_3$ . К одной диагонали моста подводится от вспомогательного источника постоянное

питающее напряжение 100 В, а к другой подключаются отклоняющие пластины, на которые через резисторы  $R1$  и  $R2$  от выходного каскада усилителя также подают переменное напряжение. Входное сопротивление пластин  $R_{вх} = R1 + R2 + R3(R4 + R5)/(R3 + R4 + R5)$ .

В схеме установки луча, показанной на рис. 112. 6, перемещение пятна по вертикали осуществляют балансным выходным каскадом УВО (по горизонтали — выходным каскадом УГО), собранном на транзисторах  $T2$  и  $T3$ , коллекторы которых соединены с обеими пластинами. При среднем положении движка резистора  $R10$ , когда напряжения на нагрузочных резисторах  $R2$  и  $R8$  эмиттерных повторителей равны, напряжения на коллекторах транзисторов  $T2$  и  $T3$  также равны. Перемещение движка в ту или другую сторону вызывает увеличение одного и уменьшение другого напряжения на коллекторах (или наоборот) и соответствующее перемещение светового пятна.

Движение пятна по вертикали и горизонтали получают при подаче на обе пары отклоняющих пластин противоположных по фазе переменных напряжений, для создания которых в усилителях вертикального и горизонтального отклонения служат балансные выходные каскады. Двухтактное действие пластин (одна пластина притягивает электронный луч, а другая отталкивает, и наоборот) улучшает фокусировку луча и удваивает его отклонение. При частоте выше 10–15 Гц вызываемое переменным напряжением движение пятна сливается в светящуюся линию.

Основным параметром электронно-лучевых трубок является чувствительность  $S_T = h/U$  (где  $h$  — отклонение светового пятна, мм;  $U$  — вызвавшее это отклонение напряжение на пластинах, В). Чувствительность электронно-лучевых трубок зависит от их конструкции и ускоряющих напряжений на анодах и обычно равна 0,1–0,5 мм/В. Для повышения чувствительности создают значительное послеускорение электронов на участке между отклоняющими пластинами и экраном, для чего на третий анод, выполненный в виде металлизированного кольца, подают высокое напряжение + 2500 В (см. рис. 111).

При измерениях используют величину, обратную чувствительности и называемую коэффициентом отклонения  $K_T = 1/S_T$ , который соответственно равен 10–2 В/мм. Обычно отклонение светового пятна измеряют не в миллиметрах, а в делениях масштабной сетки экрана и при делениях, равных, например, 5 мм, коэффициент отклонения  $K_T = 50 \div 10$  В/дел. Для увеличения чувствительности и улучшения коэффициента отклонения по вертикали служит усилитель вертикального от-

клонения. Так, при коэффициенте усиления, равном 1000, коэффициент отклонения по вертикали  $K = 10/1000 = 0,01$  В/дел = 10 мВ/дел.

Электронно-лучевые трубки широкого применения предназначены для исследования сигналов частотой до 200 МГц. На более высоких частотах оказывают влияние время пролета электронов от одной пары пластин к другой и резонансные явления, вызываемые индуктивностью ввода и емкостью пластин. Входное сопротивление пластин очень велико и зависит от емкости между ними, обычно равной 3–6 пФ. Для визуального наблюдения процессов используют трубки с зеленым цветом свечения экрана, а для фотографирования – с синим. В универсальных осциллографах применяют электронно-лучевые трубки со средним послесвечением до 0,1 с, а в специальных, предназначенных для исследования непериодических и медленно изменяющихся процессов, – с послесвечением до 1 с.

Маркировка электронно-лучевых трубок состоит из цифр и букв, указывающих размер экрана (диаметр круглого и диагональ прямоугольного), назначение, номер конструктивной разработки и цвет свечения экрана. Например, маркировку ВЛОБИ расшифровывают так: 8 – диагональ прямоугольного экрана, см; ЛО – лучевая осциллографическая, 6 – номер разработки, И – зеленый цвет свечения экрана.

### § 37. Осциллографические развертки

Развертка – это движение луча и соответственно светового пятна на экране по определенной траектории, зависящей от формы развертывающего напряжения. В осциллографической технике измерений в основном применяют линейную непрерывную и ждущую развертку, а также синусоидальную и круговую.

Линейная развертка позволяет воспроизводить на экране формы кривых переменных напряжений. При отсутствии развертывающего напряжения  $U_p$  (рис. 113, а) подведенное к вертикально отклоняющим пластинам исследуемое напряжение  $U_{ис}$  вызывает движение луча по вертикали и появление на экране вертикального светового отрезка, длина которого пропорциональна удвоенной амплитуде исследуемого напряжения. Для воспроизведения на экране формы кривой исследуемого напряжения к горизонтально отклоняющим пластинам подводят линейно нарастающее напряжение, называемое непрерывной линейной разверткой и вызывающее периодически повторяющееся равномерное движение луча по горизонтали слева направо и быстрый его возврат справа налево. Обязательным

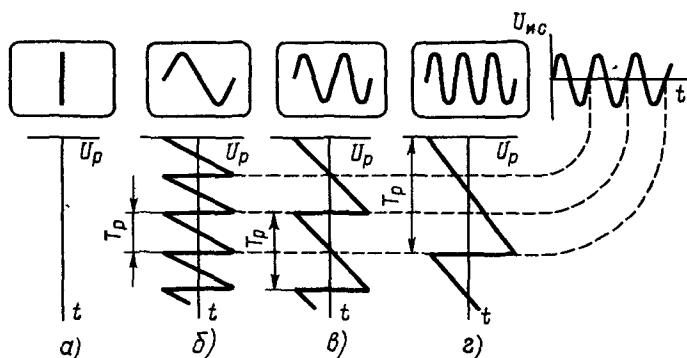


Рис. 113. Осциллограммы синусоидального напряжения при отсутствии развертывающего напряжения (а), при частоте развертывающего напряжения, равной частоте исследуемого сигнала (б), и при его частоте, в два и три раза меньшей (в, г)

условием получения устойчивого изображения является то, что частота развертывающего линейно нарастающего напряжения  $U_p$  должна быть точно равна частоте исследуемого сигнала  $U_{ис}$  или в 2, 3 и т. д. раз меньше ее (рис. 113, б, в, г).

При работе с осциллографом частоту развертки регулируют до получения на экране изображения одного или нескольких периодов исследуемого сигнала. Однако характерная для генераторов развертки нестабильность частоты вызывает неустойчивость изображения и оно перемещается по горизонтали влево или вправо. Синхронизация частоты генератора развертки позволяет получить на экране устойчивое изображение. Для этого частоту развертки регулируют до получения изображения, близкого к устойчивому, подводят к генератору развертки напряжение синхронизации и частота развертки становится равной или кратной частоте этого напряжения. Обычно используют внутреннюю синхронизацию, при которой напряжением синхронизации служит исследуемый сигнал, полученный с выхода одного из каскадов УВО. Возможная нестабильность частоты исследуемого сигнала вызывает такую же нестабильность частоты развертки, кратность частот сохраняется и изображение становится устойчивым. В качестве напряжения синхронизации можно использовать также напряжение сети частотой 50 Гц или подаваемое на вход внешней синхронизации внешнее напряжение.

Непрерывная линейная развертка пригодна при наблюдении непрерывных периодических сигналов и импульсных сигналов



малой скважности и непригодна при исследовании случайных непериодических и однократных процессов. Импульсные сигналы большой скважности, частота которых равна частоте развертки, вызывают соответствующие кратковременные вертикальные выбросы луча и светового пятна (рис. 114, а).

Ждущая линейная развертка позволяет осциллографировать кратковременные импульсы большой скважности и случайные непериодические процессы. При этом несложными схемными изменениями генератор развертки переводят из автоколебательного режима в ждущий и на экране вместо горизонтальной линии развертки появляется световое пятно. Каждый импульс исследуемого сигнала, отклоняющий луч по вертикали, одновременно запускает генератор развертки, вырабатывающий импульс линейно нарастающего напряжения, однократно отклоняющий луч по горизонтали. Поскольку каждое однократное движение луча по горизонтали вызывается каждым исследуемым импульсом, создается жесткая синхронизация развертки и исследуемого сигнала.

Из рис. 114, б, в видно, что каждый импульс исследуемого напряжения  $U_{ис}$  вызывает один проход луча по вертикали и один цикл его движения по горизонтали, длительность которого определяется периодом ждущей развертки  $T_{жр}$ . Если, например, длительность  $\tau$  исследуемого импульса в четыре раза меньше периода ждущей развертки  $T_{жр}$ , как это показано на рис. 114, б, импульс занимает одну четвертую линии развертки. Переключив развертку на меньшую длительность, получают более быстрый проход луча по горизонтали и наблюдают тот

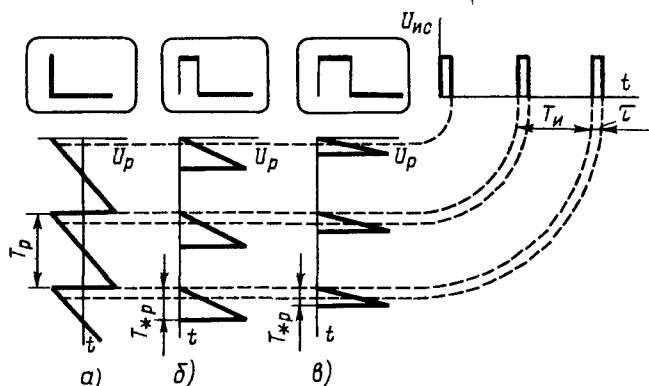


Рис 114 Осциллограммы импульсного напряжения:

а — при непрерывной развертке, б, в — при ждущей развертке разной длительности

же импульс, занимающий почти половину линии развертки (рис. 114, в). Следовательно, изменяя период ждущей развертки, можно изменять скорость движения луча по горизонтали и наблюдать импульс в разных масштабах времени. Запуск развертки происходит при определенном уровне исследуемого импульса и для того, чтобы на экране воспроизводился полностью его передний фронт, в тракт УВО включают линию задержки, задерживающую начало движения луча по вертикали по отношению к моменту запуска.

При синусоидальной развертке световое пятно под воздействием подведенного к горизонтально отклоняющим пластинам напряжения синусоидальной формы движется от центра экрана влево и вправо с изменяющейся скоростью, вызывая появление горизонтальной световой линии развертки. Количество проходов по горизонтали за 1 с равно частоте развертывающего синусоидального напряжения, источником которого служит сеть переменного тока частотой 50 Гц или генератор сигналов низкой частоты от 20 Гц до 200 кГц. Такую развертку применяют при осциллографировании вольт-амперных характеристик электронных приборов и амплитудно-частотных характеристик четырехполюсников.

При круговой развертке световое пятно движется по окружности с равномерной скоростью. Такое движение по эллипсу или при равных отклонениях по окружности можно получить, подавая на обе пары пластин два синусоидальных, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , напряжения, которые создаются на конденсаторе  $C$  и резисторе  $R$  (рис. 115, б) последовательной  $RC$ -цепи, питаемой синусоидальным напряжением развертки  $U_p$  (рис. 115, а). Частота вращения светового пятна равна частоте напряжения развертки, а радиус окружности зависит от амплитуды этого напряжения. Круговую развертку применяют при сравнении частот, а также измерениях фазового сдвига

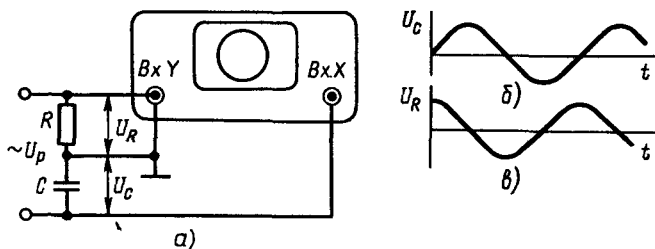


Рис 115. Круговая развертка:

а — схема, б, в — временные диаграммы напряжений на конденсаторе и резисторе

и малых интервалов времени. Для получения на окружности яркостных меток в канал  $Z$  подают управляющее напряжение. При этом длина окружности в единицах времени соответствует периоду развертывающего напряжения. Так, при частотах 1 или 10 кГц длина окружности соответствует 1 или 0,1 мс.

### § 38. Генераторы линейно нарастающего напряжения

Применяемое в осциллографах для получения линейной развертки линейно нарастающее, или пилообразное, напряжение формируется на конденсаторе  $C$  при длительном его заряде от источника постоянного напряжения  $E$  через большое сопротивление резистора  $R_{зар}$  и быстром разряде на малое сопротивление резистора  $R_{раз}$  при кратковременном замыкании контакта  $K$  (рис. 116, а). Для автоматического разряда конденсатора используют неоновые лампы, несимметричные мультивибраторы и блокинг-генераторы.

В простейшей схеме получения линейно нарастающего напряжения с автоматическим разрядом на неоновую лампу (рис. 116, б) один из времязадающих конденсаторов  $C$  заряжается через последовательно соединенные зарядные резисторы  $R1$  и  $R2$ . Напряжение на этом конденсаторе возрастает по экспоненте до напряжения зажигания  $U_{зж}$ . Неоновая лампа  $L$  зажигается, ее сопротивление резко падает, конденсатор разряжается и процесс повторяется. При этом на конденсаторе  $C$  создается пульсирующее напряжение, форма которого близка к линейно нарастающему.

Для уменьшения искажения осциллограммы, вызываемого нелинейностью нарастания напряжения на конденсаторе за вре-

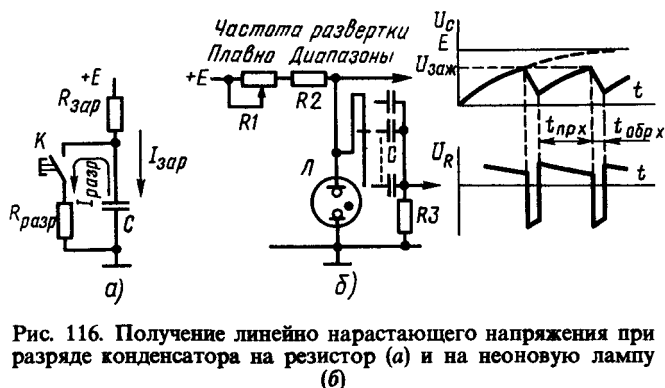


Рис. 116. Получение линейно нарастающего напряжения при разряде конденсатора на резистор (а) и на неоновую лампу (б)

прямого хода луча  $t_{пр х}$ , увеличивают постоянное напряжение  $E$  источника питания. В результате напряжение на конденсаторе нарастает в пределах небольшого, почти линейного начального участка экспоненты. Быстрый, но не мгновенный разряд конденсатора и соответствующий обратный ход луча справа налево за время  $t_{обр х}$  вызывает на экране засветку, которую устраняют гашением луча. Для этого на модулятор ЭЛТ подают импульсное гасящее напряжение  $U_R$ , создаваемое на резисторе  $R3$  заряд-разрядным током конденсатора или другим способом.

Переключением времязадающих конденсаторов  $C$  и изменением сопротивления зарядного резистора  $R1$  частоту развертывающего напряжения изменяют от единиц герц до десятков килогерц. Так как на более высоких частотах газонаполненные лампы не работают, в современных осциллографах такие генераторы не применяют.

В ламповом генераторе линейно нарастающего напряжения (рис. 117) для автоматического разряда конденсатора используется несимметричный мультивибратор на лампах  $Л1$  и  $Л2$ , представляющий собой взаимосвязанные каскады, в которых прямая связь выполняется соединением анода лампы  $Л1$  с сеткой лампы  $Л2$ , а обратная — через разделительный конденсатор  $C3$ . При закрытой лампе  $Л1$  один из конденсаторов  $C$  быстро заряжается через нагрузочный резистр  $R5$  и открытую лампу  $Л2$  и напряжение на нем возрастает, что приводит к лавинообразному закрытию  $Л2$  и открытию лампы  $Л1$ . После этого конденсатор начинает медленно разряжаться через линейаризирующий пентод  $Л3$ , в цепь катода которого для создания глубокой отрицательной обратной свя-

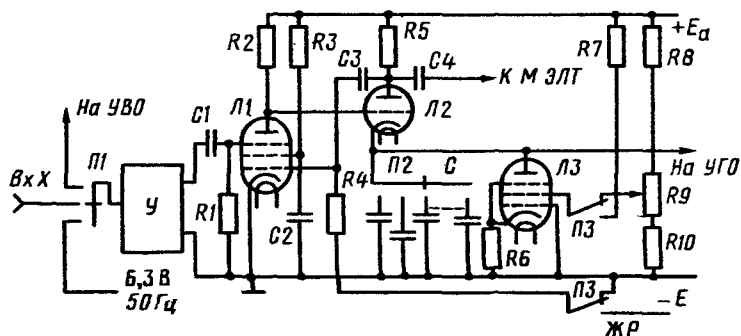


Рис. 117. Схема лампового генератора линейно нарастающего напряжения

зи, улучшающей линейность спадающего напряжения на конденсаторе, включен резистор  $R_6$ . При появлении анодного тока лампы  $L_2$  напряжение на ее аноде снижается, что приводит к лавинообразному открытию лампы  $L_2$  и закрытию  $L_1$ , и начинается новый цикл.

Кратковременный заряд конденсатора большим током лампы  $L_2$  определяет малое время обратного хода луча  $t_{обр х}$ , а длительный разряд через большое внутреннее сопротивление лампы  $L_3$  — большое время его прямого хода  $t_{пр х}$ . Переключением времязадающих конденсаторов  $C$  и изменением сопротивления резистора  $R_9$  частоту развертывающего напряжения изменяют от десятков герц до сотен килогерц. Сформированное на конденсаторе  $C$  напряжение поступает на вход УГО, а созданные его балансным выходным каскадом два противоположных по фазе линейно нарастающих напряжения — на горизонтально отклоняющие пластины.

Для перевода генератора в ждущий режим подают переключателем  $L_3$  на сетку лампы  $L_1$  запирающее отрицательное напряжение —  $E$ . Экранирующую сетку лампы  $L_3$  питают через резистор  $R_7$ .

В режиме непрерывной развертки частоту линейно нарастающего напряжения стабилизируют, подавая на лампу  $L_1$  усиленное усилителем  $У$  напряжение синхронизации. В режиме ждущей развертки исследуемый импульс с усилителя вертикального отклонения поступает через усилитель  $У$  на лампу  $L_1$  и открывают ее, определяя этим начало разряда конденсатора  $C$ , т.е. начало прямого хода луча. В рассмотренной несколько упрощенной схеме запуск развертки происходит только положительным импульсом. При работе генератора прямоугольные импульсы с анода лампы  $L_2$  через разделительный конденсатор  $C_4$  поступают на модулятор ЭЛТ (катод или управляющий электрод) и увеличивают яркость светового пятна во время прямого хода луча.

Транзисторный генератор линейно нарастающего напряжения универсального осциллографа  $C1-73$  (рис. 118) состоит из триггера развертки на туннельном диоде  $D_2$  и транзисторе  $T_1$ , схемы создания линейно нарастающего напряжения на диодах  $D_3$ ,  $D_4$ , времязадающих конденсаторах  $C$  и резисторах  $R_{30}$ ,  $R_{29}$ , истокового повторителя, усилителя и выходного эмиттерного повторителя на транзисторах  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  и схемы блокировки обратного хода на транзисторах  $T_5$ ,  $T_6$ ,  $T_7$ .

Блок синхронизации и запуска (на рис. 118 не показан) служит для преобразования сигналов любой формы и полярности

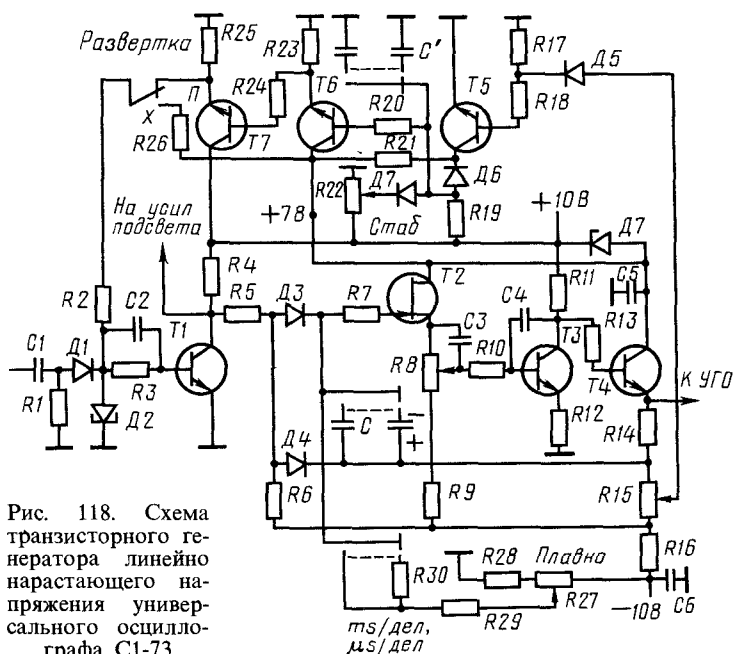


Рис. 118. Схема транзисторного генератора линейно нарастающего напряжения универсального осциллографа С1-73

в остроконечные положительные импульсы с амплитудой, достаточной для запуска генератора развертки. При внутренней синхронизации синхронизация и запуск генератора происходят исследуемым сигналом, поступающим с усилителя вертикального отклонения, а при внешней используется внешний источник, сигнал которого подводят к гнезду «1:1» или «1:10».

Генератор может работать в ждущем и автоколебательном режимах.

Ждущий режим устанавливают, перемещая движок резистора R22 «Стаб.» вверх до срыва колебаний и исчезновения линии развертки. В исходном состоянии (при отсутствии запускающих импульсов) транзистор T1 триггера развертки закрыт. Запускающие импульсы с выхода схемы синхронизации и запуска дифференцируются цепочкой C1R1 и через открытый диод D1 воздействуют на триггер развертки, который из исходного состояния лавинообразно переходит в рабочее, и транзистор T1 открывается. Напряжение на его коллекторе резко падает, в результате чего формируется фронт отрицательных импульсов, длительность которых определяется длительностью раз-

вертки. Эти импульсы, во-первых, подаются через усилитель подсвета на модулятор ЭЛТ и открывают луч во время прямого хода и, во-вторых, закрывают диоды  $D3$  и  $D4$ , определяя этим начало заряда от источника питания — 10 В через резисторы  $R29$ ,  $R30$  одного из времязадающих конденсаторов  $C$ , напряжение на котором линейно нарастает.

Сформированные отрицательные импульсы линейно нарастающего напряжения подаются на вход истокового повторителя на транзисторе  $T2$ , а с его выхода — нагрузочного резистора  $R8$  — на вход усилительного каскада на транзисторе  $T3$ . Усиленные до 6 В положительные импульсы линейно нарастающего напряжения подаются на вход эмиттерного повторителя на транзисторе  $T4$  и с его выхода — нагрузочных резисторов  $R14$ ,  $R15$ ,  $R16$  — на усилитель горизонтального отклонения. Эти же импульсы подаются обратно на времязадающий конденсатор  $C$  и препятствуют снижению зарядного тока, улучшая этим линейность нарастания напряжения.

Блокируют обратный ход развертки ключевой схемой на транзисторе  $T5$  с набором переключаемых блокировочных конденсаторов  $C'$  и двумя эмиттерными повторителями на транзисторах  $T6$  и  $T7$ . Положительные импульсы линейно нарастающего напряжения с выхода эмиттерного повторителя — резистора  $R15$  — подаются на диод  $D5$  и в конце прямого хода развертки открывают этот диод и транзистор  $T5$ . Напряжение на коллекторе транзистора  $T5$  уменьшается и соответствующий блокировочный конденсатор  $C'$  разряжается через открытый диод  $D6$ . Потенциалы на базах транзисторов  $T6$  и  $T7$  снижаются, токи транзистора  $T7$  и туннельного диода  $D2$  уменьшаются и триггер лавинообразно переходит в исходное состояние, определяя этим окончание формирования прямоугольного импульса и прямого хода развертки.

Восстановление начального состояния схемы начинается с того, что возрастает положительное напряжение на коллекторе закрытого транзистора  $T1$ , открывается диод  $D3$ , а также транзистор  $T3$  и напряжение на его коллекторе падает. Через открытый диод  $D3$  разряжается времязадающий конденсатор  $C$  и напряжение на нем и диоде  $D5$  резко спадает. Диод  $D5$  закрывается, отключая выход генератора от ключевой схемы. Транзистор  $T5$  закрывается, напряжение на его коллекторе повышается, диод  $D6$  закрывается и блокировочный конденсатор  $C'$  подзарядается до напряжения, установленного потенциометром  $R22$  «Стаб.».

Автоколебательный режим работы генератора устанавливают потенциометром  $R22$  «Стаб.», увеличивая положительное

напряжение на диоде  $D7$  и базе транзистора  $T6$  до уровня, при котором максимальный ток эмиттерного повторителя  $T7$  превышает пиковый ток туннельного диода  $D2$ .

Для измерения временных параметров исследуемого сигнала отклонение луча по горизонтали калибруют в крайнем правом положении движка переменного резистора  $R27$  «Плавно». Коэффициент отклонения луча по горизонтали, или коэффициент развертки, определяет время в милли- и микросекундах, за которое световое пятно проходит одно деление масштабной сетки экрана. Переключением времязадающих конденсаторов  $C$  и резисторов  $R29, R30$  в пределах от 40 до 2000 кОм устанавливают калиброванные коэффициенты развертки от 50 мс/дел до 0,1 мкс/дел (переключатель длительности «ms/дел,  $\mu$ s/дел»). При замене диодов и транзисторов выполняют дополнительную регулировку, причем потенциометром  $R8$  устанавливают начальный уровень и форму пилообразного импульса, а потенциометром  $R15$  изменяют амплитуду импульса и, следовательно, длину горизонтальной линии развертки.

Отклонять луч по горизонтали можно также внешним развертывающим напряжением, подавая его на гнездо «Вх. X», к которому переключателем  $\Pi$  подключается вход усилителя горизонтального отклонения. При этом на туннельный диод  $D2$  через резисторы  $R26, R2$  подается напряжение + 7 В и внутренний генератор линейно нарастающего напряжения не работает.

### § 39. Каналы управления

Канал вертикального отклонения служит для передачи исследуемого сигнала со входа прибора на вертикально отклоняющие пластины. Так как уровень сигналов может быть от сотых долей вольта до сотен вольт, необходимо для ослабления сильных сигналов применять делители, а для усиления слабых — усилители. Современные универсальные осциллографы имеют полосу пропускания от 0 до 5 МГц, что позволяет исследовать сигналы инфранизких, низких и высоких частот. Входное сопротивление канала порядка 1 МОм получают, применяя на входе усилителя вертикального отклонения истоковые, эмиттерные или катодные повторители. Как уже отмечалось, канал вертикального отклонения современных универсальных осциллографов, например С1-73, состоит из делителя и усилителя, в который входят повторитель, два-три каскада предварительного усиления, линия задержки и балансный выходной каскад.



Делитель напряжения (рис. 119) имеет переключатель на двенадцать положений и три резисторных делителя. Одиннадцать положений переключателя проградуированы в калиброванных коэффициентах отклонения от 0,01 до 20 В/дел. Коэффициенты деления трех резисторных делителей  $R1R2$ ,  $R3R4$  и  $R5R6$  (см. рис. 21 и 40) соответственно равны 1:10, 1:100 и 1:1000. Включение резистора  $R8$  или  $R9$  в схему предварительного усилителя увеличивает коэффициент усиления соответственно в 2 или 5 раз, что позволяет получать при трех делителях одиннадцать неизменных в рабочей полосе частот коэффициентов отклонения, для чего подключают конденсаторы  $C1-C6$ . В одиннадцати положениях переключателя  $P2$  через резистор  $R7$  на вход истокового повторителя  $ИП$  поступает исследуемый сигнал, а в двенадцатом « $\nabla 5$  дел» от калибратора напряжения и длительности  $КНД$  — импульсный сигнал прямоугольной формы частотой 1 кГц, амплитуда и период которого калиброваны и равны 0,05 В и 1 мс.

Переключателем  $P1$  можно выбрать вход, открытый для постоянных и переменных напряжений или закрытый конденсатором  $C7$  для постоянных напряжений либо для проверки положения линии развертки замкнуть вход на корпус.

В истоковом повторителе  $ИП$  и первом каскаде предварительного усилителя  $ПУ$  (рис. 120), так же как и в остальных каскадах, используются балансные мостовые усилители постоянного тока (см. рис. 13 и 19), которые служат для усиления постоянных напряжений и переменных в полосе частот от инфранизких до высоких. Истоковый повторитель выполнен на полевых транзисторах  $T1$  и  $T2$ , позволяющих получать большое (порядка сотен мегаом) входное сопротивление и малую входную емкость. Резисторы  $R1-R4$  и диоды  $D1-D4$  ограничивают входной ток в цепи затвора полевого транзистора  $T1$  и защищают его от перегрузок. Исследуемый сигнал с выхода истокового повторителя поступает на балансный предвари-

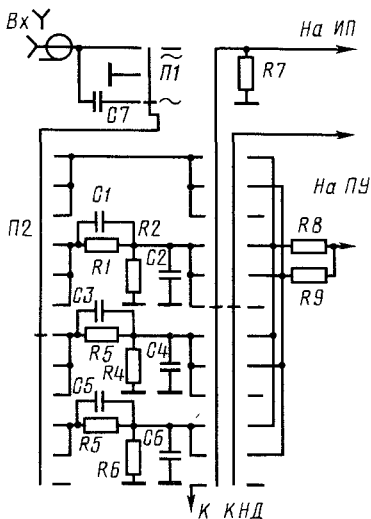


Рис. 119. Схема делителя напряжения канала вертикального отклонения прибора С1-73

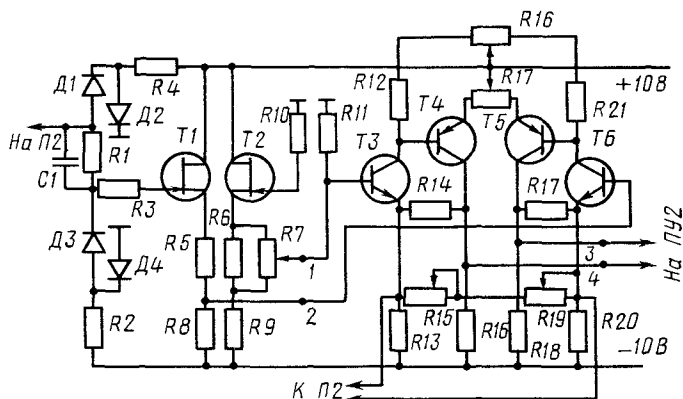


Рис. 120. Схемы истокового повторителя и первого каскада предварительного усилителя прибора С1-73

тельный усилитель с обратной связью, собранный на транзисторах  $T3$  и  $T6$   $n-p-n$ -типа и  $T4$  и  $T5$   $p-n-p$ -типа. Такой усилитель обладает высокой стабильностью, широкополосностью коэффициента усиления, большим входным и малым выходным сопротивлениями и не повышает потенциального уровня передачи сигнала.

При подготовке прибора к работе уравнивают резистором  $R7$  «Баланс.» напряжения на выходах истокового повторителя (точки 1 и 2), а резистором  $R16$  — на выходах предварительного усилителя (точки 3 и 4) и устанавливают резистором  $R17$  на них нулевые потенциалы.

Линия задержки исследуемого сигнала на 0,1–0,15 мкс, включенная между вторым каскадом предварительного усилителя и балансным выходным каскадом, представляет собой коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 900 Ом.

Коэффициент усиления калибруют резистором  $R19$  « $\nabla$   $V/\text{дел}$ », установив регулятор усиления  $R15$  «Усиление» в крайнее правое положение и переключатель  $\Pi2$  « $V/\text{дел}$ » в положение « $\nabla$  5 дел». Коэффициент усиления считают откалиброванным, если высота осциллограммы равна точно пяти делениям. Если такую калибровку выполнить нельзя, следует, изменяя сопротивление резистора  $R5$ , увеличить или уменьшить коэффициент усиления балансного выходного каскада усилителя вертикального отклонения (см. рис. 112, б).

Канал горизонтального отклонения служит для подачи линейно нарастающего напряжения от внутреннего гене-

ратора развертки или любого внешнего развертывающего напряжения на горизонтально отклоняющие пластины и состоит из блока синхронизации и запуска, генератора развертки и усилителя горизонтального отклонения, балансный выходной каскад которого не отличается от аналогичного каскада усилителя вертикального отклонения. Линейно нарастающее напряжение, создаваемое внутренним генератором развертки, или внешнее развертывающее напряжение усиливается выходным каскадом усилителя горизонтального отклонения и преобразуется в два противоположных по фазе напряжения, амплитуда которых достаточна для горизонтального перемещения светового пятна до краев экрана.

Коэффициент развертки калибруют, установив переключатели длительности «ms/дел,  $\mu$ s/дел» и делителя напряжения «V/дел» соответственно в положения «1 мс/дел» и « $\nabla$  5 дел». Десять периодов импульсного сигнала калибратора напряжения и длительности должны совпадать с десятью делениями масштабной сетки экрана. Если такую установку выполнить нельзя, следует увеличить или уменьшить коэффициент усиления балансного выходного каскада усилителя горизонтального отклонения, регулируя сопротивление резистора, включенного между эмиттерами выходных транзисторов так же, как резистор  $R5$  в выходном каскаде усилителя вертикального отклонения.

Канал управления яркостью служит для создания яркостных меток на экране, а также гашения или подсветки светового пятна соответственно во время обратного и прямого хода луча. Яркостные метки создаются при внешнем модулирующем напряжении, частота которого в целое число раз больше частоты развертки. Количество меток соответствует количеству периодов внешнего напряжения, укладывающихся по длине калиброванной по длительности линии развертки. Подсветка светового пятна или его гашение создается импульсными напряжениями прямоугольной формы, вырабатываемыми генератором развертки, причем длительности подведенных к катоду ЭЛТ отрицательных подсвечивающих или положительных гасящих импульсов должны быть равны времени прямого и обратного ходов луча.

#### § 40. Измерение напряжений и временных интервалов

При измерении напряжений и временных интервалов на вертикальный вход осциллографа через внешний делитель напряжения с коэффициентом деления 1:10 подают исследуемый

сигнал, что повышает его входное сопротивление до 10 МОм и уменьшает входную емкость до 10 пФ. Переключатели длительности «ms/дел,  $\mu$ s/дел» и делителя напряжений «V/дел» устанавливают так, чтобы на экране появилось изображение нескольких периодов исследуемого сигнала, занимающее около пяти делений по вертикали.

Наличие или отсутствие постоянной составляющей в исследуемом сигнале определяют по сдвигу осциллограммы по вертикали или отсутствию этого сдвига при переключении входа с открытого на закрытый. Промежуточное положение переключателя входа позволяет убедиться в том, что линия развертки совпадает с центральной или другой контрольной линией, на которую она была установлена.

Постоянную составляющую определяют как произведение числа делений, соответствующих сдвигу осциллограммы по вертикали, на установленный переключателем «V/дел» коэффициент отклонения.

Мгновенное напряжение в любой временной точке, в том числе и амплитудное, определяют как произведение числа делений отклонения по вертикали на установленный коэффициент отклонения. Так, если на осциллограмме периодического сигнала (рис. 121, а) размеры по вертикали в точках А и Б соответственно равны 2 делениям и 2,3 деления, то при включенном внешнем делителе и коэффициенте отклонения, равном, например, 0,5 В/дел, искомые напряжения соответственно составят  $2 \cdot 0,5 \cdot 10 = 10$  В и  $2,3 \cdot 0,5 \cdot 10 = 11,5$  В. Аналогично можно измерить амплитуду импульса (рис. 121, б), отсчитав в точках А и Б, расположенных на контрольной линии, с которой совпадает линия развертки, размеры по вертикали 3,6 и 3,4 деления.

Временные интервалы определяют как произведение соответствующего числа делений по горизонтали между двумя временными точками на установленный переключателем дли-

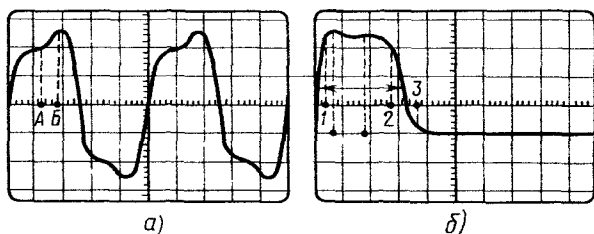


Рис. 121. Осциллограммы периодического (а) и импульсного (б) сигналов

тельности «мс/дел, мс/дел» коэффициент развертки. Период сигнала, показанного на рис. 121, а, при коэффициенте развертки, равном, например, 50 мкс/дел, составит  $5 \cdot 50 = 250$  мкс, а частота  $-1/250 \cdot 10^{-6} = 4000$  Гц. Длительность импульса (см. рис. 121, б) при коэффициенте развертки, равном, например, 2 мкс/дел, составит  $3 \cdot 2 = 6$  мкс (где 3 деления — размер по стрелке), а длительности фронта и среза — соответственно  $0,4 \cdot 2 = 0,8$  и  $0,8 \cdot 2 = 1,6$  мкс (где 0,4 и 0,8 деления — размеры до точки 1 и между точками 2 и 3). Повысить точность отсчета можно, изменив коэффициент развертки с 2 мкс/дел на 1 или 0,5 мкс/дел и увеличив этим размеры по горизонтали соответственно в 2 или 4 раза.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение электронного осциллографа?
2. Каковы схемы включения ЭЛТ и управления лучом?
3. Каково назначение линейной синусоидальной и круговой разверток?
4. Как работают ламповый и транзисторный генераторы развертки?
5. Каково назначение каналов управления?
6. Как измеряют электронным осциллографом напряжения и временные интервалы?

## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ

### § 41. Общие сведения

Основным параметром периодических процессов является частота  $f$ , определяемая числом колебаний за 1 с. Время одного колебания — период  $T = 1/f$ . Следовательно, измерения частоты тесно связаны с измерениями времени. Кроме того, измеряя частоту, можно определить длину волны, поскольку эти величины связаны соотношением  $\lambda = c/f$  (где  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения электромагнитных колебаний;  $\lambda$  — длина волны, м).

Характерной особенностью измерений частоты и времени является высокая точность. Так, сравнительно малая погрешность 1% при измерении таких величин, как напряжение, ток, сопротивление, емкость, индуктивность, чрезмерно велика при измерении частоты и времени. В современной измерительной технике никакие другие величины не определяют с такой малой относительной погрешностью, достигающей  $10^{-11}$ , как частоту и временной интервал.

Первичными и вторичными эталонами частоты служат опорные атомные, молекулярные и кварцевые генераторы – источники сигналов высокостабильных образцовых (погрешность  $10^{-11}$ – $10^{-9}$ ) частот. Поверку частотно-измерительных приборов выполняют по сигналам этих генераторов, передаваемым по радио Государственной службой времени и частоты СССР. В качестве образцовых можно также использовать сигналы мощных радиопередатчиков и опорных кварцевых генераторов, погрешность частоты которых соответственно равна  $10^{-6}$  и  $10^{-5}$ . Так, кварцевый генератор калибратора является источником сигналов несинусоидальной формы частотой 125 или 1250 кГц и соответствующих гармонических составляющих кратных частот 250, 375, 500, 625... и 2500, 3750, 5000, 6250... кГц.

В электро- и радиотехнике для измерения частоты в диапазоне от десятков герц до тысяч гигагерц используют различные методы и приборы.

При непосредственном методе частоту определяют прямым отсчетом по шкале частотомеров, имеющих различные принципы действия и конструкции. Щитовые электромагнитные резонансные частотомеры служат для измерения частоты генераторов переменного тока в пределах от 45 до 55 Гц или от 350 до 450 Гц. Аналоговые частотомеры со стрелочным указателем предназначены для измерения частоты периодических сигналов от десятков герц до сотен килогерц. Электронно-счетные частотомеры позволяют измерять с высокой точностью частоту от десятков герц до сотен мегагерц и соответствующие временные интервалы.

При методе сравнения измеряемую частоту сравнивают с образцовой опорного генератора сигналов и отсчитывают по его шкале. Для сравнения низких частот служат электронные осциллографы, а высоких – детекторы-смесители.

При резонансном методе измерений высокие и сверхвысокие частоты определяют по шкале элемента, который колебательную систему настраивают в резонанс. Для прямого определения длин волн на частотах выше 3000 МГц измеряют расстояние между узлами (пучностями), которые создаются вдоль измерительной линии.

## **§ 42. Осциллографический метод сравнения частот**

Электронный осциллограф можно использовать для сравнения с высокой точностью измеряемой  $f_{\text{изм}}$  и образцовой  $f_0$  частот по фигурам Лиссажу и круговой развертке. При этом по-

грешность измерений мала и в основном определяется нестабильностью образцовой частоты опорного генератора.

При сравнении частот по фигурам Лиссажу отключают внутренний генератор непрерывной развертки и на оба входа осциллографа подают напряжения измеряемой и образцовой частоты. В результате воздействия на электронный луч двух переменных напряжений световое пятно на экране описывает фигуры Лиссажу, вид которых зависит от формы этих напряжений и соотношения их частот и фаз. Рассмотрим фигуры Лиссажу при синусоидальной форме напряжений.

В общем случае при случайных соотношениях частот на экране наблюдают светящийся прямоугольник, который, регулируя усиление в каналах управления, можно преобразовать в квадрат.

При точном равенстве частот обоих напряжений в зависимости от их фазового сдвига на экране образуются неподвижные простые фигуры — наклонная прямая, наклонный эллипс, окружность. Построение простейших фигур Лиссажу — наклонной прямой и окружности при фазовых сдвигах, соответственно равных 0 и  $90^\circ$ , показано на рис. 122, а, б. При неточном равенстве частот плавное изменение фазового сдвига от 0 до  $360^\circ$  вызывает плавный переход наклонной прямой в эллипс, окружность, снова в эллипс и т. д. (рис. 123). При полном переходе фигуры за 10, 100 или 1000 с разность частот соответственно равна 1/10, 1/100 или 1/1000 Гц. Так определяют любую малую разность двух почти равных частот, т. е. сличают их.

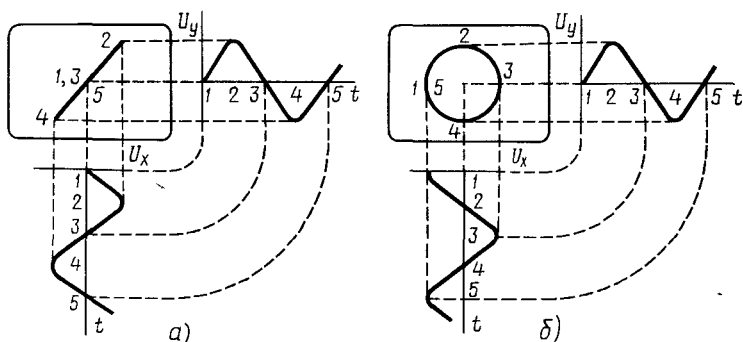


Рис. 122. Построение простейших фигур Лиссажу при фазовых сдвигах, равных:

а — нулю, б —  $90^\circ$

$f_x/f_y$	Фазовый сдвиг								
	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$	$225^\circ$	$270^\circ$	$315^\circ$	$360^\circ$
$1/1$									
$1/2$									
$1/3$									

Рис. 123. Фигуры Лиссажу при разных отношениях частот и фазовых сдвигов

Если одна частота в 2, 3 и т. д. раз больше или меньше другой, на экране наблюдают простые фигуры, форма которых зависит от фазовых сдвигов (рис. 123). Отношение частот определяют как отношение точек пересечения фигуры с горизонтальной и вертикальной осями координат. При отношении частот, большем 5–8, фигуры на экране неустойчивы и определить точную кратность нельзя.

При сравнении частот по круговой развертке, создаваемой напряжением опорного генератора образцовой частоты  $f_0$ , подключенным, как показано на рис. 115, а, напряжением измеряемой частоты  $f_{изм}$  подводят к входу канала Z или к модулятору электронно-лучевой трубки. При точном равенстве обеих частот половина окружности затемняется, а при частоте  $f_{изм}$ , в 2, 3 и т. д. раз большей  $f_0$ , на окружности появляются темные и светлые участки – штрихи, количество которых определяет отношение частот (рис. 124). При точной кратности частот  $f_{изм}$  и  $f_0$  окружность неподвижна, а при незначительном изменении одной из них вращается.

Осциллографический метод сравнения частот нагляден, дает высокую точность и позволяет определять равенство и кратности частот от 1:5 до 5:1 по фигурам Лиссажу и от 1:1 до 1:20 по круговой развертке. В основном этот метод применяют на низких частотах, так как на высоких при значительной их неустойчивости получить на экране устойчивые фигуры нельзя.

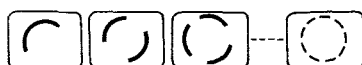


Рис. 124. Пунктирные окружности при отношениях частот  $f_{изм}/f_0$ , равных 1, 2, 3 ... 9



### § 43. Сравнение частот по нулевым биениям

При сравнении частот по нулевым биениям, создаваемым детектором-смесителем двух напряжений образцовой  $f_0$  и измеряемой  $f_{изм}$  частот, контролируют переменный ток биений, частота  $F$  которого равна разности сравниваемых частот  $f_0$  и  $f_{изм}$  и уменьшается, приближаясь к нулю, если одна из них приближается к другой. Область нулевых биений от верхней частоты  $F_B$  до нижней  $F_H$  и от нижней  $F_H$  до верхней  $F_B$  показана на рис. 125.

Сравнение частот по нулевым биениям в основном используют при измерениях высоких частот. В качестве индикатора нулевых биений обычно служит телефон. При разности образцовой  $f_0$  и измеряемой  $f_{изм}$  частот, примерно равной 10 кГц, в телефоне появляется звук высокого тона. Изменение образцовой частоты  $f_0$  должно происходить таким образом, чтобы тон понижался до исчезновения звука (при разности частот до 15–20 Гц). При дальнейшем изменении частоты снова появляется звук низкого тона. Разница порядка 15–20 Гц определяет сравнительно малую относительную погрешность измерения высоких частот.

Гетеродинный частотомер Ч4-1А (рис. 126), предназначенный для измерения частоты и контроля градуировки частотных шкал в диапазоне от 125 до 20 000 кГц, состоит из измерительного гетеродина, кварцевого генератора, детектора-смесителя и блока питания.

Измерительный гетеродин ИГ генерирует напряжение несинусоидальной формы в поддиапазонах от 125 до 250 и от 2000 до 4000 кГц основных частот, перестраиваемых поворотом ротора конденсатора переменной емкости. Перекрытие частот от 250 до 2000 и от 4000 до 20 000 кГц получают, используя высшие гармоники основных частот. Верньерный механизм

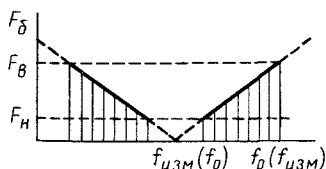


Рис. 125. Область нулевых биений

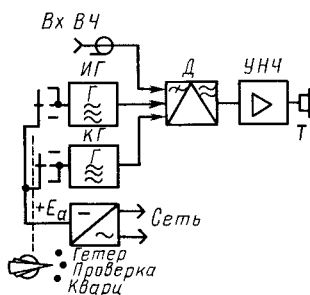


Рис. 126. Структурная схема прибора Ч4-1А

поворота ротора конденсатора переменной емкости измерительного гетеродина имеет две шкалы с нанесенными на них 5000 отсчетными делениями, цена которых для первого и второго поддиапазонов соответственно равна 25 и 400 Гц. Пересчет числа делений в частоту или наоборот выполняют по градуировочной книге, в которой даны частоты всех гармоник и соответствующие им числа делений.

Кварцевый генератор *КГ* генерирует напряжение несинусоидальной формы частотой 1 МГц, содержащее большое количество гармоник. В градуировочной книге на каждой странице красным шрифтом приведена используемая для проверки гетеродина гармоника и соответствующее ей число делений.

Детектор-смеситель *Д* служит для создания биений частот при подаче на него двух высокочастотных напряжений от *ИГ* и *КГ* либо от исследуемого устройства и *ИГ* или *КГ*.

В положении «Проверка» переключателя операций анодное напряжение поступает на *ИГ* и *КГ*. При этом оба генератора работают. Частоту *ИГ* проверяют по гармоникам *КГ*, для чего устанавливают по шкалам *ИГ* приведенное красным шрифтом на соответствующей странице градуировочной книги число делений и поворотом ручки «Корректор» изменяют частоту гетеродина до совпадения ее с частотой гармоника *КГ*. В положении «Гетер.» переключателя операций анодное напряжение подается на *ИГ*, частота которого сравнивается с частотой исследуемого напряжения, подаваемого на гнезда «Вх. ВЧ». При этом частоту *ИГ* изменяют до совпадения с измеряемой частотой, которую определяют по градуировочной книге для полученного числа делений.

В положении «Кварц» прибор используют как кварцевый генератор или калибратор.

#### § 44. Резонансный метод измерения частоты

Резонансный метод измерения частоты основан на явлении резонанса, возникающего в связанной с внешним источником сигналов колебательной системе, органы настройки которой имеют шкалу, проградуированную в единицах частоты или делениях, пересчитываемых в частоту по градуировочной книге либо таблицам. Индикатором резонанса служит выпрямительный прибор, который состоит из соединенных между собой диода и магнитоэлектрического механизма и имеет слабую индуктивную или автотрансформаторную связь с колебательной системой, в результате чего ее добротность снижается незначительно.

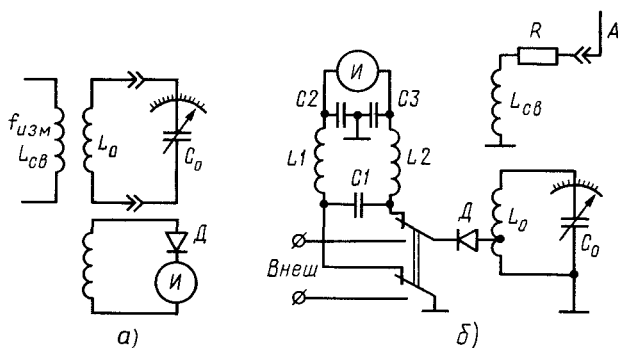


Рис. 127. Схемы резонансных частотомеров:  
а — Ч2-1, б — Ч2-2

Резонансный частотомер Ч2-1 с сосредоточенными постоянными (рис. 127, а) имеет колебательный контур из конденсатора переменной емкости  $C_0$  и шести сменных катушек индуктивности  $L_0$  и служит для измерения частоты от 50 кГц до 50 МГц с погрешностью 0,25%. Контур связывают с источником высокочастотных колебаний индуктивно и, поочередно подключая катушки  $L_0$  и вращая ротор конденсатора  $C_0$ , по резкому отклонению стрелочного указателя выпрямительного прибора определяют резонанс. По таблице, соответствующей номеру включенной катушки, определяют частоту для полученного числа делений шкалы конденсатора.

Резонансный частотомер с сосредоточенными постоянными Ч2-2 (рис. 127, б) выполнен в виде двух блоков для измерения частоты от 40 до 85 и от 85 до 180 МГц. Конденсатор переменной емкости от 12 до 70 пФ имеет такое же отсчетное устройство, как гетеродинный частотомер Ч4-1А. Погрешность измерений при непосредственном отсчете частоты по шкале конденсатора 0,5%, а по градуировочной книге 0,075%.

Колебательный контур  $L_0C_0$  этого частотомера связан с источником высокочастотных колебаний витком связи  $L_{св}$  или небольшой штыревой антенной А. Для согласования волнового сопротивления соединительного кабеля и входного сопротивления катушки служит резистор R. Индикатор резонанса, состоящий из магнитоэлектрического механизма И и кремниевых диодов Д с дисковыми вводами, подключен к контурной катушке  $L_0$  с помощью автотрансформаторной связи. Индуктивно-емкостной фильтр  $L1L2C1C2C3$  защищает индикатор резонанса от наводок в сильных высокочастотных полях. К прибору

можно подключить внешний индикатор резонанса, при этом переключатель следует установить в положение «Внеш.»

Резонансные частотомеры с контурами смешанного типа применяют в диапазоне частот от 200 до 1000 МГц. Колебательный контур этих приборов состоит из конденсатора постоянной емкости и распределенной индуктивности в виде витка или полувитка посеребренной медной трубки. Для настройки контура в резонанс плавным поворотом движка со скользящим контактом изменяют рабочую длину витка. Кроме того, контуры смешанного типа могут состоять из конденсатора переменной емкости, к статору которого одним концом подсоединена изогнутая дугой массивная медная пластина. При повороте ротора его контакт скользит по пластине, в результате чего изменяется емкость конденсатора и соответственно длина дуги, т.е. распределенная индуктивность. Такой контур имеет большой коэффициент перекрытия частот и высокую добротность.

Резонансные частотомеры с распределенными постоянными контурами применяют в диапазоне частот от 1 до 80 ГГц. Колебательная система — резонатор — представляет собой отрезок коаксиальной или волноводной линии соответственно для частот до 15 и от 15 до 80 ГГц. При настройке коаксиальной линии изменяют ее длину, перемещая внутри нее металлический поршень или стержень. Замкнутый отрезок волноводной линии представляет собой объемный резонатор, настраиваемый изменением объема камеры или введением металлической пластины либо стержня. Точный механизм настройки с микрометрическим винтом и безлюфтовыми передачами имеет шкалу, проградуированную в безразмерных делениях с большим числом отсчетных точек и нониусом. Полученное при настройке в резонанс число делений переводят в частоту по градуировочным таблицам или графикам. Возможна также градуировка шкал непосредственно в единицах частоты или длины волны.

Для связи частотомеров с источниками колебаний используют штыревые или рупорные антенны, а также элементы связи, в качестве которых служат петли, зонды, щели, отверстия и направленные ответвители.

Частотомер Ч2-9А (рис. 128), применяемый в диапазоне частот от 1750 до 3750 МГц (погрешность измерений 0,05%), имеет колебательную систему — резонатор — в виде отрезка коаксиальной линии. Высокочастотный сигнал через кабель связи и аттенуатор *Атт* вводят с помощью петли связи 6 в резонатор — металлический цилиндр 5 с двумя боковыми отверстиями,

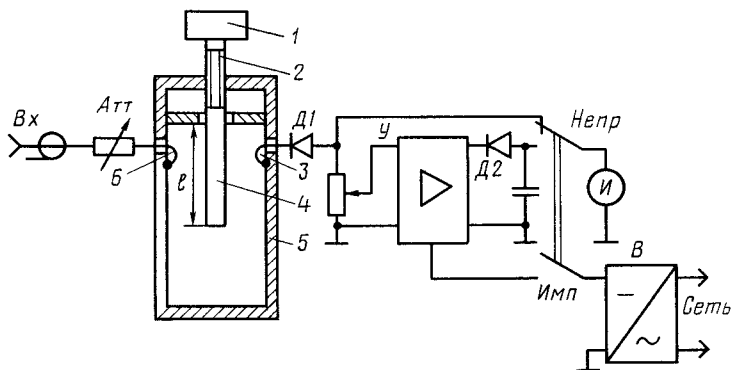


Рис. 128. Схема частотомера Ч2-9А

в которых укреплены петли связи 3 и 6. Настраивают резонатор, перемещая внутри него стержень 4, для чего вращают микрометрический винт 2, механизм вращения 1 которого имеет замедляющую передачу и диски с нанесенными на них делениями. Резонанс наступает при длине внутреннего стержня, равной нечетному числу четвертей волн. Разность длин стержня, измеренная при двух соседних резонансах, определяет половину длины волны, т.е.  $\Delta l = \lambda/2$ .

При измерении частоты немодулированных колебаний устанавливают переключатель в положение «Непр.» и по максимальному показанию выпрямительного прибора, состоящего из диода Д1, связанного с резонатором петель связи 3, и стрелочного измерителя И, определяют резонанс. При измерении частоты колебаний, модулированных по амплитуде, переводят переключатель в положение «Имп.» и видеосигнал, выделенный диодом Д1, через регулятор усиления поступает на вход трехкаскадного усилителя У, а далее — на выпрямительный прибор, состоящий из диода Д2 и стрелочного измерителя И. Одновременно на усилитель от выпрямителя В или внешнего источника поступает питающее напряжение 12 В.

Резонансные частотомеры в основном применяют на сверхвысоких частотах как самостоятельные приборы или встраивают в аппаратуру.

#### § 45. Прямопоказывающие аналоговые частотомеры

В аналоговых частотомерах частоту отсчитывают по шкале магнитоэлектрического механизма И, на который периодически разряжается конденсатор  $C_0$ , заряжаемый от источника по-

стоянного напряжения  $E$  (рис. 129). Если перезаряд конденсатора  $C_0$  происходит при частоте, равной частоте исследуемого сигнала  $f_{изм}$ , средний разрядный ток, проходящий через магнитоэлектрический механизм, пропорционален частоте переключения  $f_{изм}$  и заряду конденсатора  $q = C_0 U$  за один период, т.е.  $I = q f_{изм} = C_0 U f_{изм}$ , откуда измеряемая частота  $f_{изм} = I / C_0 U$ . Таким образом, при неизменных емкости конденсатора  $C_0$  и напряжении  $U$  на нем проходящий через магнитоэлектрический механизм ток пропорционален частоте и его шкалу можно проградуировать в единицах частоты. В реальных схемах для периодического переключения конденсатора с заряда на разряд используют быстродействующие электронные коммутаторы.

Ламповый частотомер ЧЗ-7 (рис. 130) предназначен для измерения частоты синусоидальных и импульсных сигналов, а также частоты вращения механических устройств с погрешностью до 2% соответственно от 10 Гц до 500 кГц, от 10 Гц до 20 кГц и от 2,5 до 165 с<sup>-1</sup>. Частота внутреннего образцового генератора, по которой калибруют шкалу прибора, равна 10 кГц. Входное сопротивление прибора не менее 0,5 МОм, а входная емкость не более 15 пФ. Входной каскад является катодным повторителем КП и служит для увеличения входного сопротивления и уменьшения входной емкости прибора. Предварительный усилитель-ограничитель У служит для усиления малых входных напряжений и ограничения амплитуды больших, что позволяет измерять частоту напряжений от 0,1 до 300 В. При установке переключателя в положение «10 кГц» в первый каскад трехкаскадного усилителя включается колебательный контур и этот каскад преобразуется в генератор Г частоты 10 кГц. При калибровке прибора стрелочный указатель должен быть установлен на отметку шкалы «10 кГц».

Электронный коммутатор ЭК (рис. 131) является основной частью прибора. На управляющую сетку коммутаторной лампы-пентода ЛП1 поступает усиленное напряжение измеря-

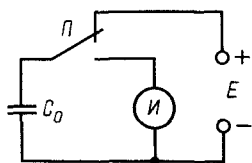


Рис. 129. Схема переключения конденсатора с заряда на разряд

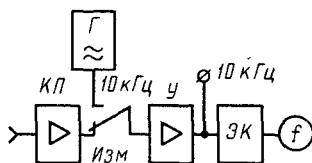


Рис. 130. Структурная схема частотомера ЧЗ-7

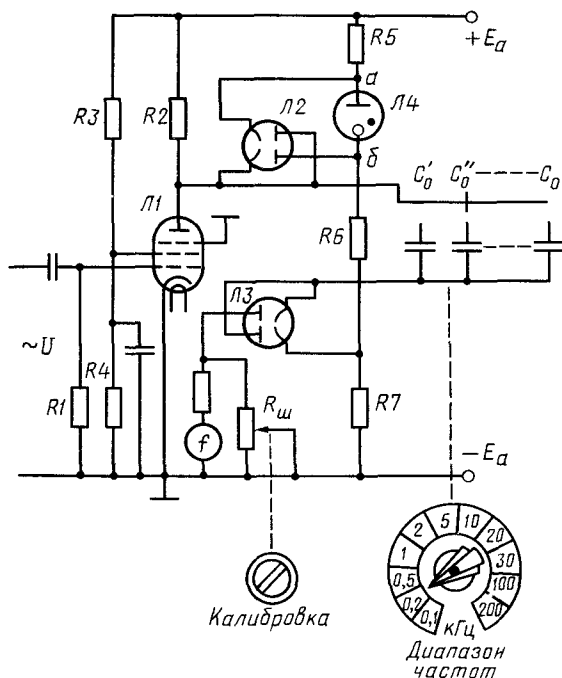


Рис. 131. Схема электронного коммутатора прибора ЧЗ-7

мой частоты  $f_{\text{изм}}$ , которое вызывает ее периодическое закрывание и открывание. При закрытой лампе Л1 происходит заряд одного из конденсаторов  $C_0$  по цепи:  $+E_a$ , резистор  $R_2$ , конденсатор  $C_0$ , нижний диод Л3, резистор  $R_7$ ,  $-E$ . При открытой лампе Л1 конденсатор  $C_0$  разряжается по цепи: конденсатор  $C_0$ , лампа Л1, стрелочный измеритель, верхний диод Л3, конденсатор  $C_0$ . Средний ток через стрелочный измеритель пропорционален частоте. Так как максимальное и минимальное напряжения на конденсаторе  $C_0$  имеют неизменные уровни, определяемые напряжениями на аноде и катоде стабилитрона Л4 (точки а и б) и ограничительными диодами Л2, угол отклонения стрелочного указателя зависит только от частоты.

Для измерения частоты вращения механических устройств прибор имеет датчик-фоторезистор ФС-А4, подключаемый к зажиму «+ 15 В» и корпусу. На вращающейся детали укрепляют диск с зубцами, по разные стороны которого установлены осветительная лампочка и фоторезистор, преобразующий

щий прерывающийся луч света в положительные электрические импульсы, поступающие на вход второго усилительного каскада частотомера. При этом частота вращения механического устройства  $n = f/N$  (где  $f$  — измеренная частота импульсов,  $N$  — число зубцов в диске).

Транзисторный частотомер Ф433/3 (рис. 132) предназначен для измерений частоты в диапазонах от 20 Гц до 300 кГц и до 1 МГц соответственно с погрешностью до 1,5 и 6%. Прибором можно также измерять другие электрические и неэлектрические величины, которые специальными датчиками преобразуются в частоту. Прибор получает питание от двух батарей напряжением 4,5 В или через преобразователь Ф4361 от сети переменного тока 220 В и, как прибор ЧЗ-7, основан на периодическом заряде и разряде конденсатора. При подаче напряжения на входные зажимы «0,1–10 В» и «3–300 В» входное сопротивление прибора соответственно равно 50 и 2000 кОм, а входная емкость составляет не более 50 пФ.

Частотомер состоит из входного устройства, усилителя-ограничителя и электронного коммутатора.

Входное устройство имеет делитель напряжения  $R1R2$ , разделительный конденсатор  $C1$  и частотнозависимую цепь  $R3C2$  для повышения напряжений верхних частот. Диоды  $D1$  и  $D2$  служат для ограничения амплитуды входного напряжения и защищают вход прибора от чрезмерных напряжений.

В усилитель-ограничитель входят четыре одинаковых каскада на транзисторах  $T1$ – $T4$ , включенных по схеме с общим эмиттером. В коллекторные цепи транзисторов включены нагрузочные резисторы  $R5$ ,  $R8$ ,  $R11$  и  $R14$ . Режим работы транзисторов устанавливают подбором сопротивлений резисторов

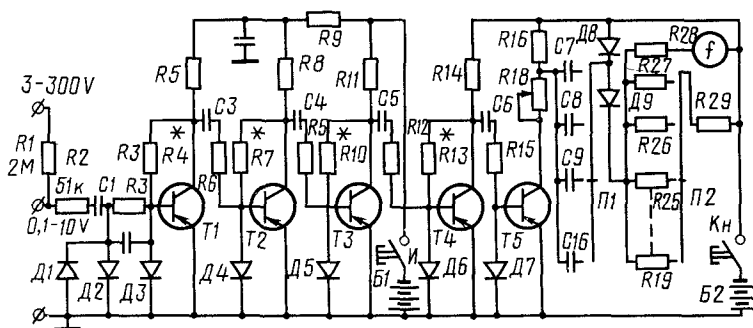


Рис. 132. Схема частотомера Ф433/3



*R4, R7, R10 и R13. Каждый усилительный каскад имеет коллекторную стабилизацию по постоянному току. Диоды Д3–Д7 обеспечивают разряд разделительных конденсаторов С3–С6, а резисторы R6, R8, R12 и R15 ограничивают ток разряда и защищают диоды от повреждения.*

Электронный коммутатор выполнен на работающем в ключевом режиме транзисторе *T5*, на базу которого с выхода усилителя через разделительный конденсатор *C6* поступают усиленные и ограниченные по амплитуде импульсы переменного напряжения измеряемой частоты. В отрицательный полупериод напряжения транзистор *T5* открыт и заряд одного из конденсаторов *C7–C16*, например *C9*, происходит по цепи:  $+E_k$ , эмиттер-коллектор *T5*, резистор *R18*, конденсатор *C9*, диод *D9*, резистор *R28*, стрелочный измеритель,  $-E_k$ . В положительный полупериод напряжения транзистор *T5* закрыт и разряд конденсатора *C9* происходит по цепи: конденсатор *C9*, резистор *R17*, диод *D8*, конденсатор *C9*. Таким образом, через стрелочный измеритель проходит средний ток, пропорциональный частоте переключений, поэтому шкалу градуируют в единицах частоты.

При переходе на другой предел измерений подключают другой конденсатор и один из шунтовых резисторов *R19–R29*, сопротивления которых подобраны так, чтобы при максимальных частотах каждого предела измерений стрелочный указатель устанавливался на конечную отметку шкалы. Перед измерениями прибор калибруют переменным резистором *R18*, устанавливая при нажатой кнопке *Кн* стрелочный указатель на конечную отметку шкалы. Для контроля питающих напряжений следует нажимать кнопки *B1* и *B2* (на рис. 132 не показаны) и отсчитать напряжение по шкале 0–5 В. Частоту измеряют при нажатой кнопке *И*. Переключая пределы измерений, добиваются наиболее полного отклонения указателя и отсчитывают частоту по шкале установленного предела.

#### **§ 46. Прямопоказывающие электронно-счетные частотомеры**

Электронно-счетный метод измерения частоты основан на счете количества периодов измеряемого сигнала за образцовый интервал времени  $T_0$ . При интервале времени  $T_0$ , равном 1 с, количество подсчитанных периодов есть значение измеряемой частоты в герцах, а при  $T_0$ , равном 10; 0,1 или 0,01 с, для получения прямого отсчета автоматически переносится запятая.

Основными преимуществами электронно-счетного метода, получившего широкое распространение, являются очень высо-

кая точность измерений и цифровая форма отсчета, при которой исключены субъективные ошибки. Кроме того, результаты измерений можно получить в виде цифрового кода.

Кроме частоты электронно-счетными приборами измеряют период колебаний  $T$ , любой другой интервал времени  $t$ , длительность импульсов  $\tau$ , отношения частот  $f_1/f_2$  и интервалов времени  $t_1/t_2$ . Для перехода от одного режима измерений к другому переключают блоки прибора.

Используемый при всех режимах измерений генератор меток времени (ГМВ) состоит из опорного кварцевого генератора сигнала частотой 1 МГц и ряда последовательно включенных декадных делителей частоты. Незначительная суточная нестабильность частоты генератора (до  $10^{-7}$ – $10^{-8}$ ) обеспечивается размещением его кварца и колебательной системы в термостате, нормальную работу которого контролируют по периодическому загоранию контрольной лампочки.

На выходах делителей частоты генератора меток создаются сигналы образцовых частот 100 кГц, 10 кГц... 0,1 Гц, которые определяют соответствующие образцовые интервалы времени 10 мкс... 10 с, служащие интервалами времени счета или метками заполнения.

Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерений частоты показана на рис. 133. Поданный на вход А или Б прибора измеряемый сигнал любой формы поступает на соответствующее входное формирующее устройство ВФУА или ВФУБ, которое усиливает и преобразует его в остроконечные импульсы малой длительности (счетные импульсы заполнения), следующие с измеряемой частотой  $f_{изм}$  на электронный коммутатор ЭК. Вырабатываемые блоком автоматики БА прямоугольные стробирующие импульсы, длительность которых равна одному из образцовых интервалов времени  $T_0$ , открывают электронный коммутатор ЭК, который пропускает определенное количество счетных импульсов, заполняющих этот образцовый интервал времени. Счетный блок СБ подсчитывает импульсы, число которых определяет состояние его триггерных декад в двоично-десятичном коде. Устройство цифрового отсчета ЦО преобразует этот код в десятичный, отображаемый на цифровом табло прибора.

Так, если за интервал  $T_0 = 0,01$  с подсчитано, например, 4653 импульса, то  $f_{изм} = 465,3$  кГц. При изменении интервала времени на  $T_0 = 0,1$  или  $T_0 = 1$  с точность измерений повышается, поскольку подсчитывается, например, 46 528 или 465 286 импульсов, и измеряемая частота  $f_{изм}$  будет соответственно равна 465,28 или 465,286 кГц.

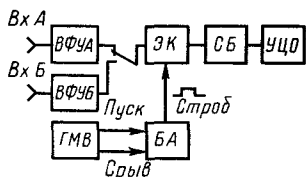


Рис. 133. Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерения частоты

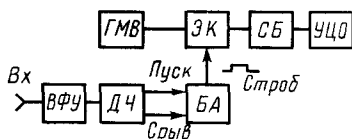


Рис. 134. Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерения периода

Импульсные сигналы образцовых частот генератора меток времени *ГМВ* служат метками времени счета и управляют работой блока автоматики *БА*, который вырабатывает стробирующие импульсы, а также импульсы автоматического сброса показаний и установления времени индикации, регулируемого от 0,5 до 5 с. При ручном управлении время индикации длится до нажатия кнопки «Пуск».

Следует отметить, что электронно-счетный прибор в режиме измерений низкой частоты дает большую погрешность и совершенно неприемлем при измерениях инфранизких частот. Действительно, при  $T_0 = 1$  с и  $f_{изм} = 100$  Гц количество счетных импульсов заполнения равно  $100 \pm 1$ , т.е. погрешность дискретизации равна 1%. При  $f_{изм} = 10$  Гц погрешность увеличивается до 10%. Поэтому вместо низких и инфранизких частот измеряют их период  $T_{изм} = 1/f_{изм}$ .

Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерений периода показана на рис. 134. Измеряемый сигнал любой формы поступает на входное формирующее устройство *ВФУ*, которое усиливает и преобразует его в остроконечные импульсы малой длительности (управляющие импульсы), следующие через  $T_{изм}$  на блок автоматики *БА*. Для повышения точности измерений применяют декадные делители частоты *ДЧ*, увеличивающие измеряемый период в 10, 100 раз и т.д. Интервалы времени счета определяются длительностью вырабатываемых блоком автоматики *БА* стробирующих импульсов, равной  $T_{изм}$ ,  $10T_{изм}$ ,  $100T_{изм}$  и т.д.

Импульсные сигналы одной из образцовых частот генератора меток времени *ГМВ* служат метками заполнения и подаются на вход электронного коммутатора *ЭК*, который под воздействием прямоугольного стробирующего импульса открывается и пропускает определенное количество счетных импульсов *ГМВ*, заполняющих интервал времени счета. Счетный блок *СБ* подсчитывает импульсы, и результат измерений в десятич-

ном коде отображается на цифровом табло устройства цифрового отсчета УЦО. Так, если за  $T_{изм}$  подсчитано, например, 87 635 импульсов образцовой частоты 1 МГц, то  $T_{изм} = 87\,635 \text{ мкс} = 0,087635 \text{ с}$  и частота  $f_{изм} = 1/T_{изм} = 1/0,087635 = 11,4018 \text{ Гц}$ .

Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерений интервала времени и длительности импульса показана на рис. 135. Интервал времени может быть задан сдвинутыми по времени двумя периодическими, непериодическими или импульсными сигналами, которые подают на входы А и Б прибора, или длительностью импульсного сигнала на определенной высоте, который подают на запараллеленные входы. Формирующие устройства ВФУА и ВФУБ формируют соответственно опорный (стартовый) и интервальный (стоповый) импульсы, определяющие начало и конец измеряемого интервала времени  $t_{изм}$ . Длительность вырабатываемого блоком автоматики БА стробирующего импульса равна измеряемому интервалу времени  $t_{изм}$  и определяет интервал времени счета.

Импульсные сигналы одной из образцовых частот генератора меток времени ГМВ служат метками заполнения и подаются на вход электронного коммутатора ЭК, который под воздействием стробирующего импульса открывается и пропускает определенное количество счетных импульсов ГМВ, заполняющих измеряемый интервал времени  $t_{изм}$ . Счетный блок СБ подсчитывает импульсы и результат измерений в десятичном коде отображается на цифровом табло устройства цифрового отсчета УЦО.

Отношение двух разных частот определяют примерно так же, как период. Длительность стробирующего импульса, открывающего электронный коммутатор, равна периоду меньшей частоты, который определяет интервал времени счета. При этом генератор меток времени из схемы исключают и в качестве меток заполнения, подаваемых на электронный коммутатор, используют сформированные импульсные сигналы большей частоты. Счетный блок подсчитывает счетные импульсы сигнала большей частоты, заполняющие период сигнала мень-

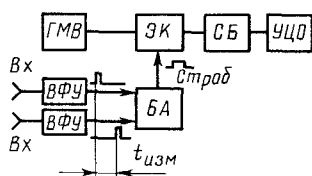


Рис. 135. Структурная схема электронно-счетного прибора в режиме измерения интервала времени и длительности импульса

шей частоты, и отображает результат измерения на цифровом табло.

Количество импульсов или периодов синусоидального сигнала за определенный интервал времени подсчитывают при открытом электронном коммутаторе, который открывают и закрывают вручную в определенные моменты времени, определяющие начало и конец счета.

При самоконтроле прибора импульсный сигнал генератора меток времени сравнительно низкой частоты, например  $f_0 = 1$  кГц, подают на блок автоматики, вырабатывающий стробирующий импульс длительностью  $T_0 = 1/f_0 = 1/1000 = 1$  мс и открывающий на это время электронный коммутатор. Импульсные сигналы генератора меток времени более высокой частоты, например 10, 100 кГц и т.д., подаваемые на электронный коммутатор, служат метками заполнения и на цифровом табло прибора должны появиться числа 10, 100 и т.д.

Наиболее распространены выпускаемые нашей промышленностью электронно-счетные частотомеры ЧЗ-32–ЧЗ-36. Прибор ЧЗ-36 предназначен для измерений частоты периодических и импульсных сигналов в диапазоне от 10 Гц до 50 МГц и длительности импульсов от 1 мкс до 10 с с погрешностью  $5 \cdot 10^{-8} \pm 1$  счета, а также периода от  $10^{-5}$  до 10 с с погрешностью  $5 \cdot 10^{-8} \pm (3 \cdot 10^{-3})/10^n \pm 1$  счета (где  $n$ —степень деления частоты).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяют частоту при различных методах измерений?
2. Какие генераторы используют в качестве опорных и какова нестабильность их частоты?
3. Как сравнивают частоты электронным осциллографом?
4. Как сравнивают частоты по нулевым биениям?
5. Как измеряют частоты гетеродинным частотомером Ч4-1А?
6. Каков принцип действия резонансных частотомеров с сосредоточенными и распределенными постоянными?
7. Каковы принципы действия прямопоказывающих лампового ЧЗ-7 и транзисторного Ф433/3 частотомеров?
8. Как измеряют частоту, период, интервал времени и длительность импульсов прямопоказывающими электронно-счетными приборами?

# ГЛАВА ДЕСЯТАЯ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ И СПЕКТРА

## § 47. Измерение параметров модулированных колебаний

Изменение амплитуды, частоты или другого параметра высокочастотного колебания в зависимости от характера передаваемой информации называют *модуляцией*. Высокочастотные сигналы, или сигналы несущей частоты, модулированные синусоидальным модулирующим напряжением  $U_{\text{мод}}$  по амплитуде и частоте, показаны на рис. 136, а, б.

Глубину амплитудной модуляции оценивают коэффициентом модуляции  $m = \Delta U / U$  (где  $U$  — амплитуда немодулированного сигнала несущей,  $\Delta U$  — максимальное ее приращение, пропорциональное амплитуде модулирующего напряжения). Поскольку  $\Delta U = (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) / 2$ , а  $U = (U_{\text{max}} + U_{\text{min}}) / 2$ , то  $m = \Delta U / U = (2U_{\text{max}} - 2U_{\text{min}}) / (2U_{\text{max}} + 2U_{\text{min}}) = (A - B) / (A + B)$  (где  $A = 2U_{\text{max}}$  и  $B = 2U_{\text{min}}$  — удвоенные наибольшая и наименьшая амплитуды модулированного сигнала).

Глубину частотной модуляции оценивают по девиации  $\Delta f$ , т.е. наибольшему и пропорциональному амплитуде модулирующего напряжения отклонению частоты от среднего значе-

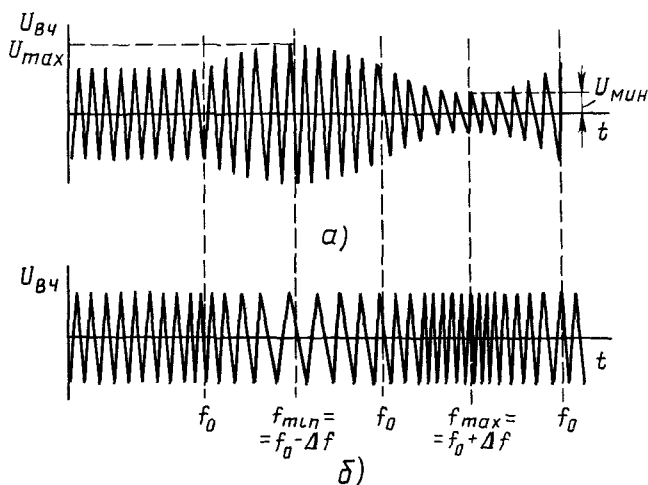


Рис. 136. Сигналы высокой частоты, модулированные по амплитуде (а) и по частоте (б)

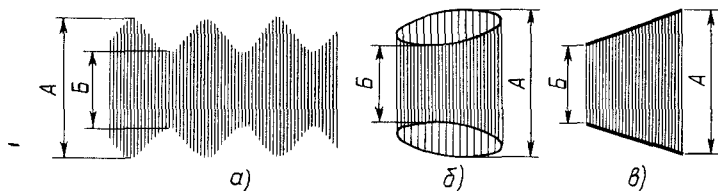


Рис. 137. Осциллограммы амплитудно-модулированного сигнала высокой частоты при пилообразной (а) и синусоидальных (б, в) развертках

ния  $f_0$ . При точных измерениях в процессе регулировки передающих и калибровке измерительных устройств измеряют индекс частотной модуляции  $\Delta f/F$  (где  $F$  — частота модулирующего напряжения).

При осциллографическом методе измерений коэффициента амплитудной модуляции модулированный по амплитуде сигнал несущей частоты подводят к вертикальному входу электронного осциллографа и регулируют усиление до получения достаточного для наблюдения размера изображения по вертикали. Форма наблюдаемого на экране изображения зависит от характера напряжения развертки, поступающего на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. Осциллограмму амплитудно-модулированного сигнала (рис. 137, а) получают при линейно нарастающем напряжении внутреннего генератора развертки. Количество наблюдаемых периодов (на рис. 137, а — три периода) определяется кратностью частот развертки и модулирующего напряжения. Синусоидальное напряжение развертки подают от внешнего генератора на горизонтальный вход осциллографа, и при выключенном внутреннем генераторе развертки и точном равенстве частот развертки и модулирующего напряжения наблюдают фигуры, показанные на рис. 137, б, в. Коэффициент модуляции  $m = (A - B)/(A + B)$  (где  $A$  и  $B$  — размеры фигур, измеренные по масштабной сетке экрана).

Осциллографический метод удобен, прост и нагляден, однако погрешность измерений сравнительно велика (порядка 5–10%). Этот метод применяют при исследовании генераторов и передатчиков, высокочастотный сигнал которых модулирован синусоидальным или импульсным напряжением.

При непосредственном методе измерений коэффициента амплитудной модуляции используют модулометры с прямым отсчетом этого коэффициента по шкале магнитоэлектрического измерителя. Эти приборы основаны на

измерении модулирующего напряжения, амплитуда которого линейно зависит от коэффициента модуляции. Модулирующее напряжение получают детектированием модулированного сигнала несущей частоты и последующим его усилением. Таким образом, как это видно из схемы модулометра (рис. 138), применяют двукратное детектирование. Модулированный сигнал несущей частоты, наведенный в катушке связи  $L$ , поступает на первый детектор, выполненный на диоде  $D1$ . В результате детектирования выделяется модулирующее напряжение, которое после фильтрации высокочастотных составляющих фильтром  $R1C1C2$  подается на вход усилителя  $У$ . Второй детектор, выполненный на диоде  $D2$ , является измерительным выпрямителем, преобразующим усиленное модулирующее напряжение в постоянное, которое контролируют по магнитоэлектрическому измерителю. В положении 1 переключателя  $\Pi$  изменяют уровень сигнала несущей частоты и устанавливают стрелочный указатель на красную отметку шкалы. Затем переводят переключатель  $\Pi$  в положение 2 и отсчитывают коэффициент амплитудной модуляции по шкале, проградуированной в значениях  $m\%$ .

При непосредственном методе измерений девиации частоты используют девиометры, имеющие прямой отсчет  $\Delta f$  по шкале магнитоэлектрического измерителя. Эти приборы основаны на применении частотного детектора (дискриминатора), преобразующего изменение частоты  $\Delta f$  в постоянное напряжение  $U$ . Девиометр представляет собой калиброванный радиоприемник частотно-модулированных сигналов (рис. 139). При сопряженном изменении частот подаваемого во входную цепь  $Вх$ .  $\mathcal{C}$  входного сигнала и сигнала гетеродина  $\Gamma$  на выходе смесителя  $См$  создается сигнал фиксированной промежуточной частоты, усиливаемый  $УПЧ$ . Ограничитель амплитуды  $Огр$  служит для устранения паразитной амплитудной модуляции. Модулированный только по частоте сигнал поступает на частотный детектор  $ЧД$ , на выходе которого звуковое напряжение зависит от девиации частоты. Усиленное

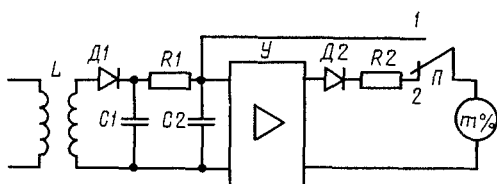


Рис. 138. Схема модулометра



звуковое напряжение отсчитывают по шкале электронного вольтметра ЭВ, прогнанируванной в значениях девиации частоты.

Модулометр С2-12 предназначен для измерений коэффициента амплитудной модуляции от 10 до 100% с погрешностью 3% в диапазоне высоких частот от 0,15 до 15 МГц при напряжениях входных сигналов от 1 до 30 В и частотах модулирующего сигнала от 0,03 до 15 кГц. Возможно объединение модулометра и девиометра в одном приборе. Таким комбинированным измерителем модуляций является прибор СК3-26, предназначенный для измерений коэффициента амплитудной модуляции от 1 до 100% и девиации частоты от 1 до 150 кГц при напряжениях входных сигналов от 0,05 до 2,5 В и частотах модулирующего сигнала от 0,05 до 20 кГц.

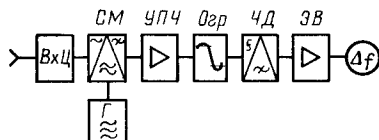


Рис. 139. Структурная схема девиометра

#### § 48. Исследование спектра

Простейшее колебание синусоидальной формы называют *гармоническим*. В электро- и радиотехнике, а также и других областях исследуют колебания сложной формы, полученные от соответствующих источников колебаний или в результате искажений формы синусоидального колебания при прохождении через нелинейную систему. Анализ показывает, что всякое сложное колебание состоит из суммы бесконечного числа гармонических с определенными амплитудами и кратными частотами (гармоник). Исследование спектра предусматривает измерение нескольких гармоник, составляющих в сумме исследуемое сложное колебание. В качестве примера на рис. 140 показано прямоугольное напряжение частотой  $f$  и три его гармоники, амплитуды которых  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$ ,  $U_{m3}$ , а частоты  $f$ ,  $3f$ ,  $5f$ .

Для исследования колебаний сложной формы, т. е. поочередного определения частоты и напряжения каждой гармонической составляющей исследуемого сигнала, применяют анализаторы гармоник. Низкочастотными анализаторами исследуют звуковые колебания, что позволяет определять влияние интенсивности отдельных гармоник на качество звучания, разборчивость речи и другие характеристики звуковых трактов. Высокочастотные анализаторы позволяют исследовать модулированные колебания и определять их составляющие, интенсивность гармоник и их характер при различных формах модулирующего сигнала. Анализ гармоник особенно важен при

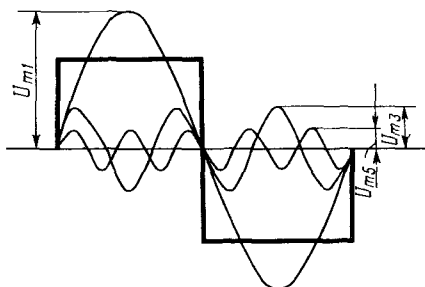


Рис. 140. Колебание прямоугольной формы и его три гармонические составляющие

исследовании импульсных сигналов с различной формой импульса. Анализаторы гармоник находят применение в различных отраслях техники, так как дают возможность исследовать различного рода механические колебания и вибрации, которые могут быть преобразованы в электрические и подвергнуты спектральному анализу.

Гетеродинные анализаторы гармоник основаны на поочередном выделении гармонических составляющих и измерении их частоты и амплитуды. Исследуемый сигнал, содержащий ряд гармонических составляющих, и сигнал гетеродина  $\Gamma$  подают на оба входа смесителя  $См$  (рис. 141). Включенные в тракт промежуточной частоты полосовые фильтры  $\Phi$  имеют узкую и неизменную полосу пропускания. Часть схемы, в которую входят оба фильтра, усилитель промежуточной частоты  $УПЧ$ , детектор  $Д$  и магнитоэлектрический измеритель  $V$ , представляет собой селективный вольтметр для измерения напряжения в узкой полосе частот (20–30 Гц). При измерениях, изменяя частоту гетеродина в широких пределах и поочередно настраиваясь на каждую гармоническую составляющую, определяют ее напряжение по наибольшему отклонению указателя вольтметра  $V$ , а частоту — по шкале гетеродина.

Анализаторы спектра позволяют наблюдать на экране электронно-лучевой трубки одновременно весь спектр исследуемого сигнала. Структурная схема анализатора спектра с автоматической перестройкой частоты гетеродина показана на рис. 142. Линейно нарастающее напряжение от генератора развертки  $ГР$  поступает на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки и одновременно на управитель  $Ун$ , управляющий частотой гетеродина  $\Gamma$ . В качестве управителя используют варикап, подключаемый через разделительный конденсатор к контуру гетеродина. Емкость варикапа и частота гетероди-

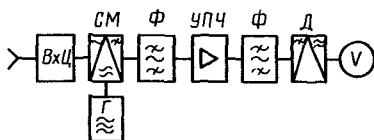


Рис. 141. Структурная схема гетеродинного анализатора гармоник

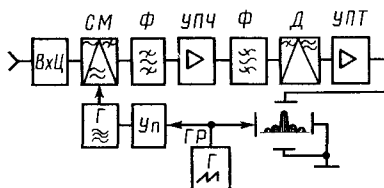


Рис. 142. Структурная схема анализатора спектра

на изменяются линейно и синхронно равномерному движению луча по горизонтали. Таким образом, горизонтальная линия на экране является осью частот. Включение кварцевого калибратора (на рис. 142 не показан) позволяет получить на экране вертикальные метки частот. Напряжения настроек после детектирования и усиления по постоянному току в каскаде УПТ поступают на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки и создают отклонения луча по вертикали, пропорциональные интенсивности каждой гармоники. При этом на экране наблюдают основной наибольший и несколько боковых выбросов, или так называемых лепестков, размер которых по вертикали зависит от уровня гармоник, а расположение по горизонтали позволяет определять частоту по частотным меткам.

#### § 49. Измерение нелинейных искажений

Нелинейные искажения синусоидального сигнала — искажения формы — возникают при его прохождении через тракт передачи, в котором рабочие участки характеристик транзисторов, электронных ламп, трансформаторов и других нелинейных элементов не строго линейны. Искаженный сигнал на выходе исследуемого тракта, например усилителя низкой частоты, можно наблюдать на экране электронного осциллографа, подав от измерительного генератора на вход тракта сигнал синусоидальной формы.

Искаженный сигнал кроме основного гармонического колебания частотой  $f$  содержит меньшие по амплитуде гармонические составляющие частотой  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$  ... при искажении одной полуволны или частотой  $3f$ ,  $5f$ ,  $7f$  ... при одинаковом искажении обеих полуволн.

Коэффициент нелинейных искажений, или коэффициент гармоник  $K_{\Gamma} = 100\% U_{\Gamma} / U_1 = 100\% \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} / U_1$ , определяют как отношение среднеквадратичной суммы напряжений  $U_{\Gamma} =$

$= \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}$  всех гармоник от второй и выше к напряжению первой гармоники  $U_1$ . При  $K_r \geq 5 \div 6\%$  искажения формы видны на осциллограмме выходного сигнала и воспринимаются органами слуха как изменение тембра звука.

Коэффициент гармоник можно измерить косвенно анализаторами гармоник и спектра, однако этот способ трудоемок. Специальные приборы — измерители нелинейных искажений — позволяют непосредственно отсчитывать коэффициент гармоник по шкале электронного вольтметра, измеряющего среднеквадратичную сумму напряжений  $U_r$  всех гармоник, кроме первой, которая подавляется заграждающим фильтром и не поступает на вход вольтметра. Таким образом, прибор измеряет коэффициент искажений  $K = 100\% \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} / \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$ , который несколько отличается от коэффициента гармоник  $K_r$ . При малых значениях коэффициента искажений можно считать, что  $K \approx K_r$ ; при  $K > 10 \div 15\%$  пересчет выполняют по формуле  $K_r = K / \sqrt{1 - K^2}$ .

Этот принцип используется в измерителе нелинейных искажений С6-1А (рис. 143), которым измеряют напряжения искаженного сигнала и гармоник. Коэффициент искажений отсчитывают по шкале электронного вольтметра, измеряющего напряжение гармоник, предварительно откалибровывая искаженный сигнал.

Прибор предназначен для измерений коэффициента искажений от 0,1 до 100% с погрешностью 5 и 9% соответственно в диапазоне низких частот от 50 до 10 000 и от 10 000 до

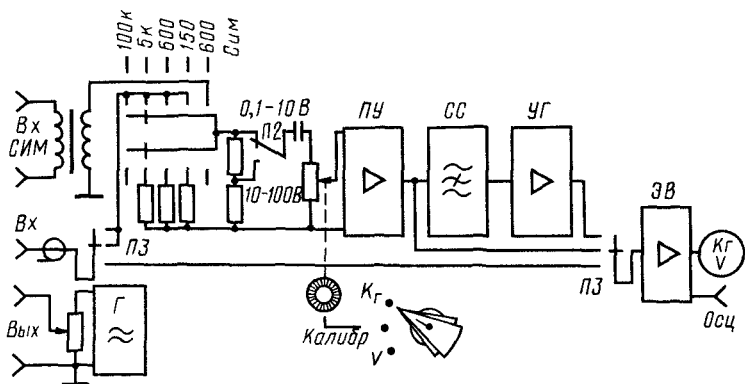


Рис. 143. Структурная схема прибора С6-1А

20 000 Гц при уровнях исследуемого напряжения от 0,1 до 100 В и может быть использован как электронный вольтметр для измерений переменных напряжений от 1 мВ до 100 В с погрешностью 10% в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц. В прибор встроен генератор синусоидальных ( $K_r < 0,1\%$ ) напряжений частотой 1 кГц. Это напряжение плавно регулируется от 0,1 до 3 В и подается на гнездо «Вых. генератора».

Искаженное по форме напряжение с выхода исследуемого усилителя подают на вход прибора. Переключатель входа *П1* на пять положений позволяет выбрать симметричный вход 600 Ом или несимметричные высокоомный 0,1–1 МОм и низкоомные – 5 кОм, 600 и 150 Ом. При подаче напряжений больше 10 В тумблером *П2* подключают делитель напряжения.

Для предварительного усиления исследуемого напряжения служит четырехкаскадный усилитель *ПУ*, который охвачен глубокой отрицательной обратной связью и не вносит дополнительных искажений. Первый и последний каскады – катодные повторители – позволяют улучшить входные характеристики усилителя *ПУ* и согласовать его выход с входом селективной системы. При калибровке усиление регулируют потенциометром «Калибр».

Селективная система *СС* (рис. 144) представляет собой мостовой *RC*-фильтр, обеспечивающий резкое снижение усиления на частоте настройки фильтра и достаточную равномерность прохождения всех гармоник. Фильтр настраивают на частоту исследуемого сигнала, плавно изменяя емкость сдвоенного конденсатора переменной емкости *C* и переключая ступенями резисторы *R*. Балансируют мост ручками «Баланс» до полного подавления первой гармоники, что определяют по минимуму показаний электронного вольтметра.

Усилитель гармоник *УГ* (см. рис. 143) обеспечивает необходимое усиление гармоник в широком диапазоне частот и охвачен глубокой отрицательной обратной связью.

Высокочувствительный вольтметр *ЭВ*, выполненный по схеме усилитель-выпрямитель, имеет переключатель пределов измерений на 10 положений: от 3 мВ до 100 В. На выходе усилителя вольтметра для измерения действующих значений переменных напряжений включен квадратичный диодный выпрямитель.

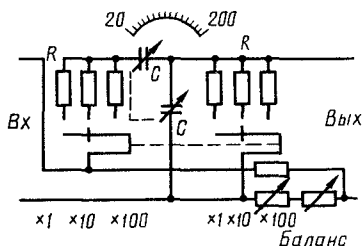


Рис. 144. Селективная система прибора С6-1А

При измерениях вход вольтметра подключают к выходу предварительного усилителя ПУ, для чего переключатель ПЗ устанавливают в положение «Калибр.». Регулируя потенциометром «Калибр.» усиление ПУ, устанавливают стрелочный указатель вольтметра, включенного на предел «3V, 100%», на отметку 10. Затем переводят переключатель ПЗ в положение  $K_r$  и между ПУ и вольтметром включается селективная система СС, которую настраивают на частоту первой гармоники. Так как на вход вольтметра поступают напряжения гармоник, его показания резко падают. Точно настраивая RC-фильтр и переключая вольтметр на более чувствительный предел, добиваются полного подавления первой гармоники и отсчитывают коэффициент гармоник  $K_r$  в процентах по соответствующей шкале для выбранного предела измерений вольтметра.

В положении «V» переключателя ПЗ вход вольтметра подключается к входному гнезду прибора «Вх», на которое подается измеряемое напряжение, при этом прибор используют как чувствительный электронный вольтметр.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как оценивают глубину амплитудной модуляции и девиацию частотной?
2. Как измеряют коэффициент амплитудной модуляции и девиацию частоты?
3. Как работают анализаторы гармоник и спектра?
4. В чем сущность нелинейных искажений и как их оценивают?
5. Как измеряют коэффициент гармоник прибором С6-1А?

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ

### § 50. Измерительные линии

Как уже отмечалось, в диапазоне СВЧ для передачи энергии используют цепи с распределенными постоянными — коаксиальные и волноводные линии, отрезки которых служат в качестве колебательных систем. При этом в основном измеряют мощность, частоту, длину волны и рассогласование в линиях передачи, используя такие приборы, как ваттметры, резонансные частотомеры и измерительные линии. Вспомогательными элементами при измерениях служат соединительные

и переходные фланцы, отрезки линий, тройники, волноводно-коаксиальные переходы, постоянные и переменные ослабители мощности (аттенюаторы), направленные ответвители, детекторные и термисторные головки, а также поглощающие нагрузки с поглотителями мощности в виде диэлектрика, объемного резистора, водяной нагрузки.

Измерительная линия (рис. 145, а) является прибором для оценки распределения электрического поля вдоль линии передачи и состоит из отрезка коаксиальной или волноводной линии 8 с концевыми фланцами 9 и перемещающейся вдоль нее каретки с детекторной головкой 1. Зонд детекторной головки — металлическая игла 2 входит в продольную щель отрезка линии и перемещается вдоль нее вместе с кареткой, положение которой определяют по линейке с миллиметровыми делениями с погрешностью 0,1–0,05 мм. Глубину погружения зонда регулируют винтом 6. Наводимая в зонде полем СВЧ основной линии эдс возбуждает в резонаторе 3 детекторной головки электромагнитные колебания, индуктирующие в цепи диода 7 ток, постоянная составляющая которого вызывает отклонение указателя микроамперметра  $\mu A$ . Для получения максимальных отклонений стрелочного указателя резонатор настраивают, вращая винт 5 и перемещая поршень 4. При модулированных по амплитуде колебаниях СВЧ можно использовать внешний индикатор — электронный осциллограф, вольтметр, телефон, подключаемые к зажимам «Внеш.» непосредственно или через усилитель.

Характер распределения напряженности поля вдоль линии определяют по показаниям микроамперметра или внешнего индикатора при перемещении каретки вместе с зондом. Выпускаемые промышленностью коаксиальные и плоскопараллельные измерительные линии с волновым сопротивлением 50

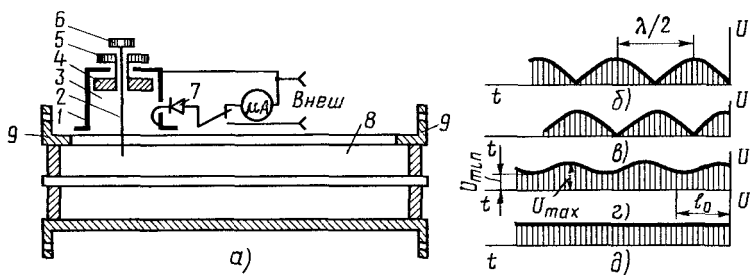


Рис. 145. Устройство измерительной линии (а) и характер напряжений вдоль нее при коротком замыкании (б), холостом ходе (в), небольшом рассогласовании (г) и полном согласовании (д)

и 75 Ом применяют на частоте от 0,1 до 10 ГГц, а волноводные — от 4 до 50 ГГц.

При измерении длины волны выходной фланец генератора СВЧ соединяют с левым фланцем измерительной линии, а к правому подключают короткозамыкатель или оставляют его свободным. Электромагнитная энергия распространяется в линии в виде двух волн напряжения — падающей и отраженной, которые соответственно движутся от генератора к нагрузке и от нагрузки к генератору. В результате их сложения в линии создается неравномерная напряженность электрического поля.

При коротком замыкании ( $Z_n = 0$ ) или холостом ходе ( $Z_n = \infty$ ) происходит полное отражение и в линии устанавливается режим стоячей волны. Распределение напряжения вдоль линии в обоих случаях показано на рис. 145, б, в. Положение узлов и пучностей определяют по минимальному и максимальному показаниям микроамперметра или внешнего индикатора при перемещении каретки вдоль линии. Расстояние между двумя соседними узлами или пучностями  $l = \lambda/2$ , откуда длина волны  $\lambda = 2l$ , а частота  $f = c/\lambda$ .

При равенстве волновых сопротивлений  $\rho$  влево и вправо от внутренних стыков линии и сопротивлению нагрузки  $Z_n = \rho$  отражения нет. При этом в линии устанавливается режим бегущей волны, вся энергия передается от генератора к нагрузке, напряжения вдоль линии во всех точках одинаковы и показания индикатора неизменны.

При измерении рассогласования в линиях передачи линию включают в исследуемый стык. Неточное равенство волновых сопротивлений и сопротивления нагрузки, наличие щелей и изгибов, а также неплотные соединения фланцев вызывают нежелательное отражение части энергии, в линии передачи устанавливается режим смешанных волн и индикатор измерительной линии показывает слабо выраженные узлы при  $U = U_{\min}$  и пучности при  $U = U_{\max}$  (рис. 145, з). Степень рассогласования оценивают коэффициентами стоячей волны  $K_c = \alpha_{\max}/\alpha_{\min}$  или бегущей  $K_b = 1/K_c = \alpha_{\min}/\alpha_{\max}$  (где  $\alpha_{\max}$  и  $\alpha_{\min}$  — наибольшее и наименьшее отклонения указателя микроамперметра или внешнего индикатора, отсчитываемые при перемещении каретки вдоль линии). При полном согласовании (рис. 145, д)  $\alpha_{\max} = \alpha_{\min}$ , поэтому  $K_c = K_b = 1$ . При увеличении или уменьшении сопротивления нагрузки  $Z_n$  в конечном стыке соответственно до бесконечности и нуля коэффициент стоячей волны возрастает от 1 до  $\infty$ , а бегущей уменьшается от 1 до 0.



Отражение энергии оценивают модулем коэффициента отражения  $\Gamma = (K_c - 1)/(K_c + 1)$  или  $\Gamma = (1 - K_6)/(1 + K_6)$ . При полном согласовании отражения нет и  $\Gamma = 0$ . При увеличении рассогласования коэффициент отражения возрастает от 0 до 1 (до 100%).

При измерении полного сопротивления к измерительной линии, питаемой генератором СВЧ, подключают исследуемую нагрузку — входное сопротивление радиоприемников, линий передачи, антенных систем или других устройств, имеющее комплексный характер, модуль которого  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  (где  $R$  и  $X$  — активная и реактивная составляющие полного сопротивления). Подключение такой нагрузки к измерительной линии сдвигает первый узел напряжения на некоторое расстояние  $l_0$  по отношению к тому положению, которое он занимал при коротком замыкании (рис. 145, б, з).

Измерив при исследуемом устройстве коэффициент  $K_c$ , рассчитав фазовый угол  $\varphi = 4\pi l_0/\lambda$  и зная волновое сопротивление  $\rho$  измерительной линии, можно по довольно сложным формулам рассчитать активную  $R$  и реактивную  $X$  составляющие полного сопротивления или по круговой номограмме, приводимой в специальной литературе, определить их значение.

## § 51. Измерение мощности

В цепях постоянного тока и переменного низкой и высокой частоты в основном измеряют напряжение  $U$  и ток  $I$  и косвенно при известном сопротивлении нагрузки  $R$  определяют мощность  $P = UI = U^2/R = I^2R$  (см. рис. 11, 15, 36, 38 и 57). Прямое измерение мощности на постоянном токе и переменном низкой частоты (до 5 кГц) выполняют ваттметрами электродинамической системы, включая их неподвижную катушку последовательно, а подвижную вместе с добавочным резистором — параллельно.

Так как в цепях с распределенными постоянными токи и напряжения вдоль линии различны, основными измерениями являются определение средней за период мощности  $P_{\text{ср}}$ . При импульсных сигналах мощность в импульсе, значительно превышающая среднюю,  $P_{\text{и}} = P_{\text{ср}}T/\tau$  (где  $T$  и  $\tau$  — период повторения и длительность импульсов).

Измерители мощности подразделяют на ваттметры поглощаемой мощности, являющиеся оконечной нагрузкой линий передачи, и проходящей, измеряющие малую часть проходящей по основному тракту мощности, ответвляемой направленными ответвителями.

Термисторный и болометрический методы измерения мощности основаны на преобразовании энергии СВЧ в тепловую энергию, которую оценивают по изменению сопротивления болометра или термистора. Болометр представляет собой стеклянный баллон, в который заключена тонкая металлическая (вольфрамовая либо платиновая) нить или пленка на слюде либо стекле. Сопротивление болометра, равное при нормальной температуре 50–200 Ом, при нагреве возрастает. Термистор представляет собой заключенный в стеклянный баллон кристалл полупроводникового материала с впрыснутыми в него выводами. Сопротивление термистора при нормальной температуре равно нескольким килоомам, а при нагреве уменьшается. Высокая чувствительность термистора, определяемая значительным снижением сопротивления при нагреве, позволяет использовать его для измерения мощностей от единиц микроватт до десятков милливольт в диапазоне частот до десятков гигагерц.

Термисторный измеритель мощности (рис. 146) состоит из измерительной головки с размещенным в ней термистором, и моста постоянного тока, в плечи которого включены равные по сопротивлению резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и термистор  $R_T$ .

В качестве измерительной головки используется короткозамкнутый отрезок коаксиальной или волноводной линии, входной фланец которой подключают к линии передачи. На рис. 146 показан волноводный отрезок с двумя коаксиальными вставками, в разрыв внутренней жилы которых включен термистор  $R_T$ . Полное согласование и режим бегущей волны в линии устанавливают изменением положения поршней  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$ . Кроме того, используют набор нерегулируемых измерительных головок, обеспечивающих согласование термистора с линией в широком диапазоне частот.

Перед измерениями входной фланец закрывают металлической крышкой и, регулируя переменным резистором  $R_4$  («Уст. 0») постоянный питающий ток и нагрев термистора, снижают его сопротивление до начального значения  $R_T$ , равного сопротивлению резисторов  $R_1 = R_2 = R_3$ . При этом мост постоянного тока уравновешивается и стрелочный указатель милливаттметра  $mW$  устанавливается на нулевую отметку.

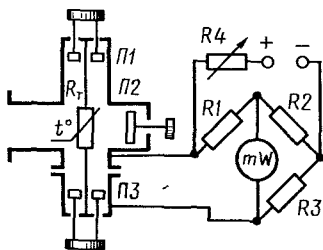


Рис. 146. Термисторный измеритель мощности

Затем входной фланец подключают к линии передачи, при этом измеряемая мощность СВЧ вызывает дополнительный нагрев термистора и дальнейшее снижение его сопротивления. Равновесие моста нарушается и стрелочный указатель прибора  $mW$  отклоняется. Изменяя положения поршней  $P1$ ,  $P2$  и  $P3$ , добиваются наибольшего отклонения стрелочного указателя и отсчитывают измеряемую мощность по шкале милливаттметра  $mW$ , проградуированной на постоянном или переменном токе. Измеряемую мощность можно также отсчитывать по шкале переменного резистора  $R4$ , которым уменьшают ток и нагрев термистора до восстановления его начального сопротивления  $R_T$  и равновесия моста.

Чувствительность термисторного измерителя мощности очень высока. Для уменьшения чувствительности и расширения пределов измерений к входу измерителя мощности подключают аттенуатор.

Непосредственный метод измерений мощности (рис. 147) основан на определении напряжения на эквиваленте нагрузки, в качестве которого используют специальный резистор  $R_n$  с поверхностным углеродистым слоем на керамическом трубчатом основании, заключенный в металлический экран Э, который улучшает условия согласования и служит продолжением внешнего проводника коаксиальной линии.

Напряжение измеряют электронным вольтметром, выполненным по схеме выпрямитель-усилитель и состоящим из измерительного амплитудного выпрямителя и усилителя постоянного тока УПТ, нагруженного на магнитоэлектрический измеритель  $W$ , шкала которого проградуирована в единицах мощности. Анод диода измерительного амплитудного выпрямителя подключен к части резистора  $R_n$ , что расширяет пределы измерений и улучшает условия согласования. В некоторых ваттметрах для расширения пределов измерений используют два амплитудных выпрямителя, подключенных к разным точкам резистора  $R_n$ . Такие ваттметры предназначены для измерений мощности от 0,1 до 500 Вт в диапазоне частот до 1000 МГц и удобны для определения мощности источников энергии — генераторов и радиопередатчиков.

Калориметрический метод измерений мощности основан на преобразовании энергии СВЧ в тепловую энергию, которую оценивают по степени нагрева воды в коаксиальных (рис. 148, а) или волноводных (рис. 148, б) водяных нагрузках. При постоянной скорости течения воды разность ее температур на входе и выходе нагрузки пропорциональна измеряемой мощности и может быть измерена двумя термометрами или

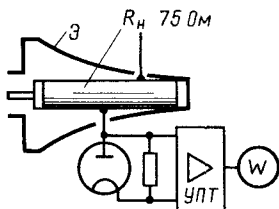


Рис. 147. Ваттметр поглощаемой мощности

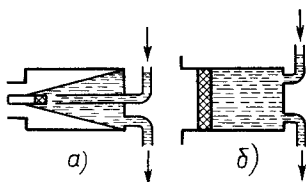


Рис. 148. Оконечные водяные нагрузки:

а – коаксиальная, б – волноводная

термопреобразователями с микроамперметром, шкала которого проградуирована в единицах мощности. Более точные калориметрические ваттметры с косвенным отсчетом основаны на сравнении разности температур воды, нагреваемой энергией СВЧ и специальным подогревателем, питаемым от сети переменного тока. При равенстве температур мощность СВЧ отсчитывают по ваттметру, измеряющему мощность подогревателя.

Недостатками калориметрических ваттметров, предназначенных для измерений мощности от единиц до сотен ватт в диапазоне частот до 30 ГГц с погрешностью до 2%, являются сложность, громоздкость, а также значительная инерционность, т.е. длительность установления показаний.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково устройство измерительной линии и какие измерения ею выполняют?
2. Что такое согласование в линиях передачи и как используют измерительные линии для определения рассогласования?
3. Как работают термисторные измерители мощности?
4. Каковы особенности непосредственного и калориметрического методов измерений мощности?

## ЛИТЕРАТУРА

- Касаткин А. С. Электротехника. М., 1982.
- Толкачев Г. Б., Ковалев В. Н. Радиоэлектроника. М., 1983.
- Фремке А. В., Душин Е. М. Электрические измерения. Л., 1980.
- Кушнир Ф. В., Савенко В. Г. Электрорадиоизмерения. Л., 1975.
- Меерсон А. М. Радиоизмерительная техника. Л., 1978.
- Насонов В. С. Справочник по радиоизмерительным приборам. М., 1976.
- Мардин В. В., Кривоносов А. И. Справочник по электронным измерительным приборам. М., 1978.
- Горюнов Н. Н. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам. М., 1972.
- Телешевский Б. Е. Лабораторные работы по электро- и радиоизмерениям. М., 1980.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Глава первая. Общие сведения об измерениях . . . . .	6
§ 1. Основные определения. Особенности и методы измерений . . . . .	6
§ 2. Физические величины и их единицы измерения . . . . .	10
§ 3. Погрешности измерений . . . . .	12
§ 4. Классификация и система обозначений измерительных приборов . . . . .	16
Глава вторая. Электромеханические измерительные приборы . . . . .	22
§ 5. Общие сведения . . . . .	22
§ 6. Приборы магнитоэлектрической системы . . . . .	25
§ 7. Приборы электромагнитной системы . . . . .	28
§ 8. Приборы электро-, ферродинамической и индукционной систем . . . . .	29
§ 9. Приборы электростатической системы . . . . .	32
Глава третья. Измерение постоянного тока и напряжения . . . . .	34
§ 10. Измерение постоянного тока магнитоэлектрическим прибором . . . . .	34
§ 11. Измерение постоянного тока электронным микроамперметром . . . . .	37
§ 12. Измерение постоянного напряжения магнитоэлектрическим прибором . . . . .	39
§ 13. Измерение постоянного напряжения электронными приборами . . . . .	43
Глава четвертая. Измерение переменного тока и напряжения . . . . .	50
§ 14. Общие сведения . . . . .	50
§ 15. Приборы термоэлектрической системы . . . . .	54
§ 16. Приборы выпрямительной системы . . . . .	56
§ 17. Амперметры и вольтметры выпрямительной системы . . . . .	62
§ 18. Комбинированные приборы . . . . .	68
§ 19. Электронные вольтметры . . . . .	72
§ 20. Цифровые вольтметры . . . . .	80
Глава пятая. Измерение параметров элементов электрических и радиотехнических цепей . . . . .	88
§ 21. Общие сведения . . . . .	88
§ 22. Прямопоказывающие омметры . . . . .	89
§ 23. Метод вольтметра — амперметра . . . . .	95
§ 24. Мостовой метод . . . . .	97
§ 25. Резонансный метод . . . . .	104

<b>Глава шестая. Измерение параметров диодов, транзисторов и электронных ламп . . . . .</b>	<b>111</b>
§ 26. Измерение параметров диодов . . . . .	111
§ 27. Измерение параметров биполярных транзисторов . . . . .	117
§ 28. Измерение параметров полевых транзисторов . . . . .	124
§ 29. Испытание электронных ламп . . . . .	128
<b>Глава седьмая. Измерительные генераторы . . . . .</b>	<b>131</b>
§ 30. Общие сведения . . . . .	131
§ 31. Генераторы сигналов низких частот . . . . .	135
§ 32. Генераторы сигналов высокой частоты . . . . .	142
§ 33. Генераторы сигналов сверхвысокой частоты . . . . .	146
§ 34. Генераторы импульсных сигналов . . . . .	150
<b>Глава восьмая. Электронные осциллографы . . . . .</b>	<b>153</b>
§ 35. Общие сведения . . . . .	153
§ 36. Электронно-лучевая трубка . . . . .	155
§ 37. Осциллографические развертки . . . . .	159
§ 38. Генераторы линейно нарастающего напряжения . . . . .	163
§ 39. Каналы управления . . . . .	168
§ 40. Измерение напряжений и временных интервалов . . . . .	171
<b>Глава девятая. Измерение частоты . . . . .</b>	<b>173</b>
§ 41. Общие сведения . . . . .	173
§ 42. Осциллографический метод сравнения частот . . . . .	174
§ 43. Сравнение частот по нулевым биениям . . . . .	177
§ 44. Резонансный метод измерений частоты . . . . .	178
§ 45. Прямопоказывающие аналоговые частотомеры . . . . .	181
§ 46. Прямопоказывающие электронно-счетные частотомеры . . . . .	185
<b>Глава десятая. Измерение параметров модулированных колебаний и спектра . . . . .</b>	<b>190</b>
§ 47. Измерение параметров модулированных колебаний . . . . .	190
§ 48. Исследование спектра . . . . .	193
§ 49. Измерение нелинейных искажений . . . . .	195
<b>Глава одиннадцатая. Измерения в цепях с распределенными постоянными . . . . .</b>	<b>198</b>
§ 50. Измерительные линии . . . . .	198
§ 51. Измерение мощности . . . . .	201
<b>Литература . . . . .</b>	<b>205</b>

Со всеми предложениями и замечаниями просим обращаться по адресу: 101430, Москва, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

**Борис Ефимович Телешевский**

## **ИЗМЕРЕНИЯ В ЭЛЕКТРО- И РАДИОТЕХНИКЕ**

Заведующая редакцией Э. М. Концевая. Редактор А. Ш. Долгова. Младшие редакторы: Р. К. Сапожникова, Л. Б. Успенская. Художник А. И. Шавард. Художественный редактор Т. В. Панина. Технический редактор Н. А. Битюкова. Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 4571

Изд. № ЭГ-40. Сдано в набор 10.05.83. Подп. в печать 10.10.83. Т-20006. Формат 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 10,92 усл. печ. л. 22,05 усл. кр.-отг. 11,06 уч. изд. л. Тираж 60000 экз. Зак. № 423. Цена 25 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР по делам издательства,  
полиграфии и книжной торговли.  
143200, г. Можайск, ул. Мира, 93.