

СПРАВОЧНИК

А.И.ЛАДИК
А.И.СТАШКЕВИЧ

ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

•
**ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРИБОРЫ**



МОСКВА „РАДИО И СВЯЗЬ”
1993

БК 32.844
Л15
ДК 621.372.412

Федеральная целевая программа книгоиздания России

Рецензент канд. техн. наук А. А. Толкачев

Редакция литературы по электронике

Ладик А. И., Сташкевич А. И.

15 Изделия электронной техники. Пьезоэлектрические и электро-механические приборы: Справочник. — М.: Радио и связь, 1993. — 104 с.: ил.

ISBN 5-256-01145-6.

ISBN 5-256-00588-X (общ.).

Приводятся сведения о принципах работы, устройстве, назначении пьезоэлектрических и электро-механических приборов, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре. Даются схемы включения и основные справочные сведения (габаритные размеры, электрические параметры и другие характеристики) о наиболее широко применяемых приборах отечественного производства и их новых разработках. Дается сравнительная оценка приборов одного класса.

Для широкого круга инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, эксплуатацией и ремонтом радиоэлектронной аппаратуры, а также радиолюбителей.

2302030000—086
046(01)—93 10—93

ББК 32.844

Справочное издание

**Ладик Александр Иванович
Сташкевич Александр Иванович**

ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
Пьезоэлектрические и электро-механические приборы

Справочник

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев
Редактор Г. Н. Астафуров
Художественный редактор В. И. Мусиенко
Обложка художника Н. А. Пашуро
Технический редактор Л. А. Горшкова
Корректор З. Г. Галушкина

ИБ № 2568

Дано в набор 17.12.92. Подписано в печать 13.10.93. Формат 60×88¹/₁₆. Бумага газетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная: Усл. печ. л. 6,37. Усл. кр.-отт. 6,62. Уч.-изд. л. 7,10. Тираж 3000 экз. Изд. № 23235/3. Зак. 2035. С-086.

Издательство «Радио и связь». 101000, Москва, Почтамт, а/я 693
Московская типография № 4 Министерства печати и информации РФ
129041, Москва, Б. Переяславская, 46

SBN 5-256-01145-6
SBN 5-256-00588-X (общ.)

© Ладик А. И., Сташкевич А. И., 1993

Содержание

Предисловие	4
1. Назначение и общая классификация	5
2. Приборы стабилизации частоты..... /	10
2.1. Пьезоэлектрические резонаторы	10
Принцип работы. Классификация	10
Основные параметры	11
Основные типы резонаторов	16
Резонаторы на ПАВ	17
Справочные данные	19
2.2. Диэлектрические резонаторы ...	26
2.3. Пьезоэлектрические генераторы	29
Назначение. Классификация	29
Основные параметры	31
Генераторы на ПАВ	31
Справочные данные	34
3. Приборы селекции частоты	38
Назначение. Классификация	38
Основные параметры и характеристики	40
Фильтры на ПАВ	43
Справочные данные	56
4. Приборы обработки сложных сигналов на ПАВ	65
5. Пьезоэлектрические датчики и преобразователи	70
5.1. Термочувствительные датчики	72
5.2. Тензочувствительные датчики	73
5.3. Массочувствительные датчики	74
5.4. Акусто- и гирочувствительные датчики	76
5.5. Датчики на ПАВ	77
6. Перспективы развития пьезоэлектрических приборов	89
7. Электромеханические фильтры	90
7.1. Принцип работы. Классификация	90
7.2. Справочные данные	96
Список литературы	104

Предисловие

Создание современных радиотехнических систем, электронных вычислительных комплексов и устройств автоматики немыслимо без применения пьезоэлектрических приборов. Обладая уникальными свойствами, эти приборы вытесняют традиционные узлы аппаратуры, выполненные на катушках индуктивности и конденсаторах: колебательные контуры, фильтры, линии задержки, обеспечивая при этом существенно лучшие качества аппаратуры: высокие избирательность радиоприемников и стабильность частоты генераторов, меньшие массу и габариты. Пьезокристаллы используются также в приборах на поверхностных акустических волнах (ПАВ), на основе которых создаются электронные устройства различного назначения: автогенераторы, резонаторы, фильтры, устройства обработки сигналов и др.

В справочнике приведены также сведения об электромеханических фильтрах и диэлектрических резонаторах.

Особенностью настоящего издания по отношению к другим публикациям по пьезоэлектрическим приборам являются краткость и простота изложения физических принципов действия приборов. Справочные же сведения приводятся только для тех приборов, которые уже приняты к производству за последние годы, или будут приняты к производству ко времени выхода справочника в свет.

Справочные сведения включают в себя электрические параметры и характеристики пьезоэлектрических приборов и электромеханических фильтров, габаритные чертежи и варианты конструктивного исполнения, особенности включения и области применения. Эти сведения помогут специалистам выбрать из существующего ряда приборов необходимый для конкретного применения.

Настоящая книга является первой публикацией из серии книг "Изделия электронной техники", охватывающей всю современную элементную базу.

Авторы благодарны А. А. Липатову за помощь в подготовке материалов по СВЧ приборам.

1. Назначение и общая классификация

Основное назначение пьезоэлектрических приборов (ПЭП) — высокостабильная генерация, селекция, обработка и преобразование сигналов.

Пьезоэлектрический прибор представляет собой электромеханическое устройство, основой которого является пьезоэлектрический элемент, изготовленный из кристалла пьезоэлектрика. Этот элемент является преобразователем механической энергии в электрическую и наоборот. Работа его основана на прямом и обратном пьезоэлектрическом эффекте.

Прямой пьезоэлектрический эффект возникает в пьезоэлементе, имеющем механический вход и электрический выход. Под действием внешних механических сил, приложенных к пьезоэлементу, на его поверхности образуются электрические заряды. Этот эффект используется в микрофонах, звукозаписывающих устройствах, датчиках и т. п.

Обратный пьезоэлектрический эффект возникает в пьезоэлементе, имеющем электрический вход и механический выход. Под действием внешнего электрического напряжения, приложенного к пьезоэлементу, он деформируется. Этот эффект используется в телефонах, ультразвуковых излучателях и т. п. Несмотря на то, что величины деформаций, получаемые за счет пьезоэффекта, крайне малы (например, пластина кварца длиной 1 см, помещенная в электрическое поле с напряженностью 100 В/см, удлинится лишь на $2,25 \cdot 10^{-4}$ мкм), возникающее при этом напряжение достаточно для практического использования.

При воздействии на пьезоэлектрик переменного напряжения с частотой, равной или близкой к частоте его собственных колебаний, в нем возникают резонансные механические колебания. Благодаря прямому пьезоэффекту они обуславливают электрические колебания, оказывающие воздействие на возбуждающую их электрическую цепь так, что частота электрических колебаний в этой цепи стабилизируется частотой собственных механических колебаний пьезоэлемента, которая определяется его физическими свойствами и геометрическими размерами.

Для получения пьезоэлементов с различными параметрами их вырезают из кристалла пьезоэлектрика под различными углами относительно кристаллографических осей: электрической X , механической Y и оптической Z (рис. 1.1). Ориентация элемента относительно кристаллографических осей пьезоэлектрика называется срезом. Для обозначения срезов элементов, вырезанных из кристаллов, вводится понятие *первоначальная ориентация кристаллического элемента*. Это такое положение элемента, имеющего форму параллелепипеда, по отношению к координатным осям, при котором все его ребра параллельны этим осям. Длина элемента обозначается буквой l , ширина — b , толщина — s . Любое расположение элемента может быть получено его поворотом относительно осей X , Y , Z .

Условное обозначение первоначальной ориентации элемента состоит из двух букв, обозначающих кристаллографические оси, вдоль которых он расположен. Первая буква показывает, вдоль какой оси направлена толщина элемента, вторая буква — вдоль какой оси направлена его длина. За толщину принимают наименьший размер, а за длину — наибольший. Далее к обозначению добавляется одна, две или три буквы (l , b , s). Первая буква указывает, какое направление вдоль длины, ширины или толщины имеет то ребро элемента, которое служит осью первого его поворота из положения первоначальной ориентации. Остальные буквы показывают, вокруг каких ребер элемента производятся остальные повороты. Далее в обозначении через косые линии указываются последовательно углы первого, второго и третьего поворотов со знаком "+", если поворот будет происходить по часовой стрелке, и со знаком "—" — если против часовой стрелки. Угол поворота вокруг толщины элемента s

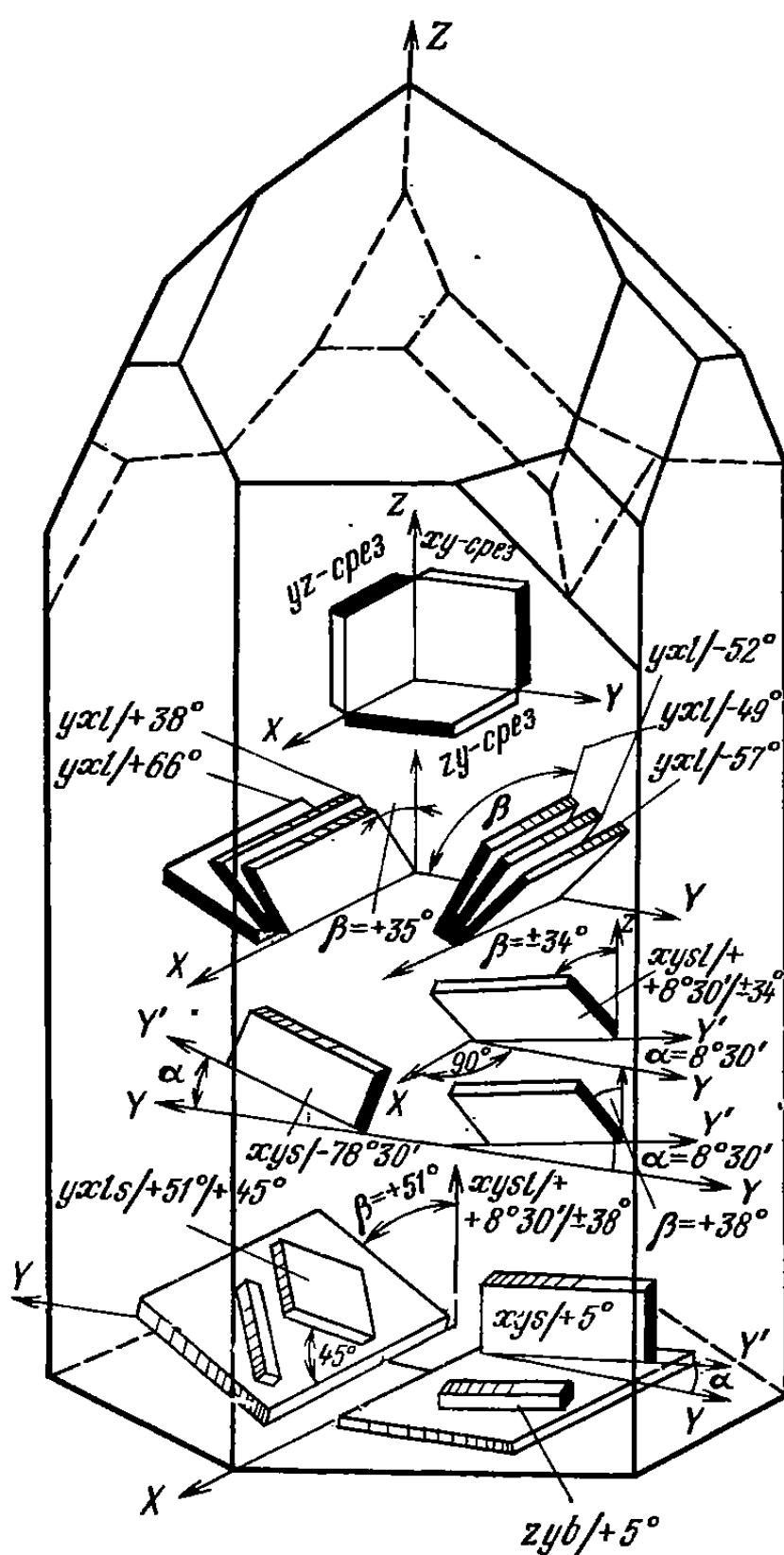


Рис. 1.1. Ориентация осей пьезокристалла

обозначается буквой α° , вокруг длины элемента l — буквой β° , вокруг ширины элемента b — буквой γ° . Углы поворота измеряются в градусах и минутах.

Для возбуждения колебаний к пьезоэлементу подводится через электроды переменное напряжение. Пьезоэлемент в соответствии с обратным пьезоэффектом начинает колебаться; при этом форма его изменяется. Различают *продольные колебания* (сжатие — растяжение), происходящие по длине (рис. 1.2, а), — здесь частоту колебаний определяет длина пьезоэлемента; *поперечные колебания* (колебания сдвига по толщине) (рис. 1.2, б), — здесь частоту колебаний определяет толщина; *колебания сдвига по контуру* (по грани в плоскости колебаний) (рис. 1.2, в) — здесь частоту колебаний определяет контурный размер; *колебания изгиба* (изгиб элемен-

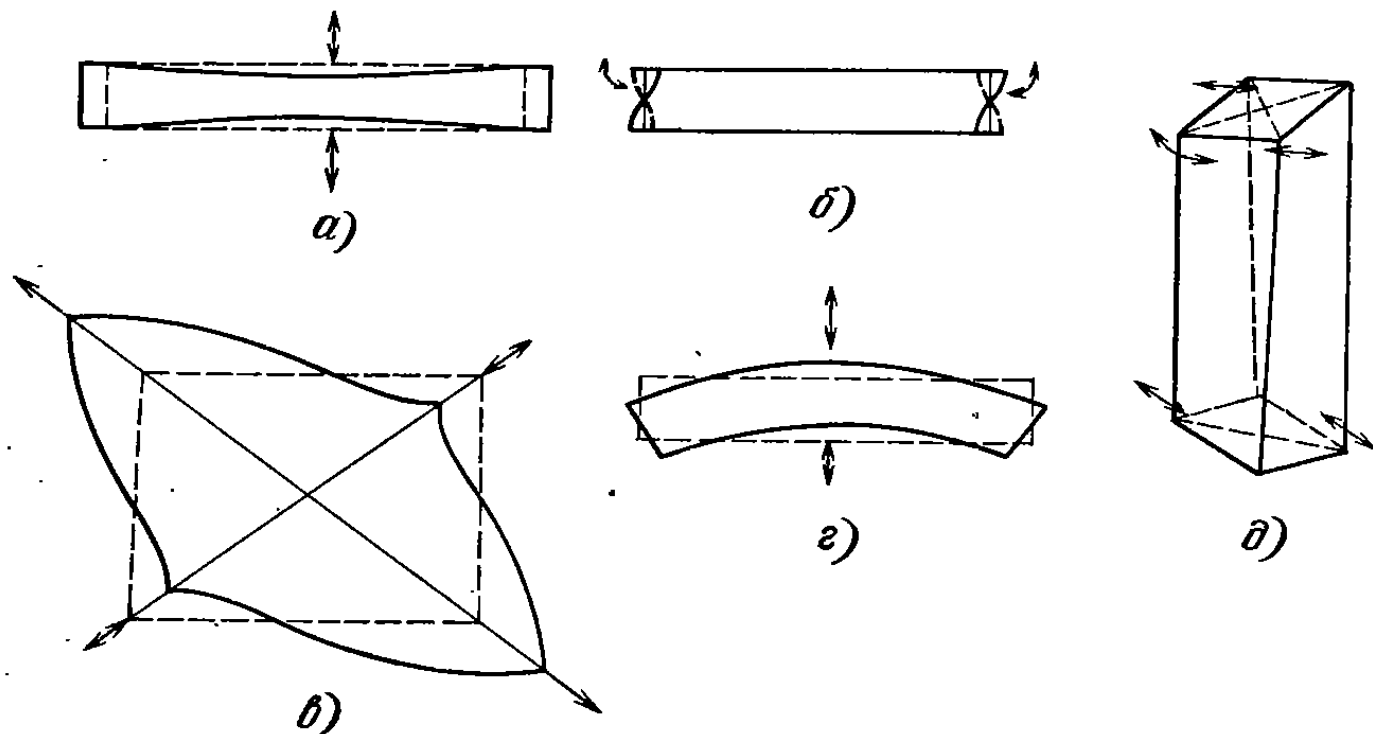


Рис. 1.2. Характер механических колебаний пьезоэлемента

тов в плоскости колебаний по грани или толщине в различных плоскостях) (рис. 1.2, а); колебания кручения (при четырех электродах) (рис. 1.2, г).

Вид колебаний определяется срезом, числом электродов и их расположением.

Пьезоэлементы вырезают в виде прямоугольных пластин, брусков, колец, цилиндров, сфер, трубок, стержней, дисков. От типа среза зависят диапазон частот, температурная стабильность и другие параметры. Параметры пьезоэлементов наиболее употребительных срезов и виды их механических колебаний приведены в табл. 1.1, из которой следует, что наиболее низкие частоты возникают при изгибе, а высокие — при сдвиге по толщине.

Электроды пьезоэлементов, к которым прикладывается внешнее электрическое поле, представляют собой токопроводящую пленку, нанесенную на боковые поверхности пьезоэлектрической пластины. Пластина устанавливается в кварцевый держатель и помещается в корпус. Корпус состоит из основания с выводами и кожуха (баллона). Выводы могут быть жесткие для разъемных соединений (Ж), гибкие (Г) и жесткие для припайки (П).

Корпуса пьезоэлектрических приборов (ПЭП) герметизируются. Они могут быть вакуумными и газонаполненными; по материалу — стеклянными, металло-стеклянными, металлическими, керамическими и пластмассовыми. Для стеклянных корпусов используются колбы электровакуумных ламп или специальные конструкции. Они завариваются токами высокой частоты или газоплазменной сваркой. Микроминиатюрные корпуса являются металлическими вакуумными.

В основу классификации пьезоэлектрических приборов положены основные признаки: функциональное назначение, материал, конструктивно-технологическое исполнение (рис. 1.3). Кроме того, ПЭП классифицируются по возбуждению: возбуждаемые на основной частоте (первый порядок колебаний) и гармониках (высшие порядки колебаний).

Дискретные ПЭП содержат конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы, пьезоэлектрические элементы, имеющие гальванические связи. Интегральные ПЭП имеют твердотельные монолитные конструкции. Гибридные ПЭП сочетают в себе элементы дискретных и интегральных приборов.

Приборы на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) конструктивно представляют собой пьезоэлектрические пластины с нанесенными на них тонкопленочными электродами специальной формы.

По электрическим параметрам ПЭП сведены в унифицированные ряды базовых изделий.

Параметры презоэлементов с различными срезами

Тип среза		Значения углов ориентации	Вид колебаний	Емкостный коэффициент	Частотный коэффициент N_f , кГц·мм	Диапазон частот f , кГц
Обозначение по стандарту	Обозначение для справок					
$xys / \pm \alpha^\circ$	$+5^\circ$	$\alpha^\circ = -2...+9^\circ$	Продольные по длине	—	2760...2830	50...250
$xys / \pm \alpha^\circ$	$+5^\circ$	$\alpha^\circ = -5...+6^\circ 30'$	Изгиб по толщине	—	5525...6200	2...60
$xys / +\alpha^\circ$	$+5^\circ$	$\alpha^\circ = +5^\circ$	Изгиб по грани	—	5545	2...50
$xys / -\alpha^\circ$	$-18^\circ 30'$	$\alpha^\circ = -18^\circ 30'$	Продольные по длине	—	2510...2560	60...120
$xy(xz)$	Х	—	То же	125...165	2715	100...200
$yz(yx)$	У	—	Сдвиг по толщине	83	1975...1980	1000...20 000
$yx / +\beta^\circ$	АТ	$\beta^\circ = +34...+35^\circ 30'$	То же	250...450	1670...2060	500...20000
					5010 (при третьем порядке колебаний), 8350 (при пятом порядке колебаний)	15000...100000
$yx / -\beta^\circ$	БТ	$\beta^\circ = -47...-50^\circ$	"	400...875	2560...2666	1000...50 000
$yx / +\beta^\circ$	ЦТ	$\beta^\circ = +36...+38^\circ$	Сдвиг по контуру	—	3080...3100	150...850
$yx / -\beta^\circ$	ДТ	$\beta^\circ = -51...-53^\circ$	То же	400	2465...2475	100...800
$yx / \pm \beta^\circ$	—	$\beta^\circ \leq \pm 45^\circ 10'$	Кручение	—	1810...1845	40...120
$yx / \pm \beta^\circ$	ЖТ	$\beta^\circ = \pm 51...+52^\circ$	Продольные по ширине	—	3283...3293	100...300
$yx / +\alpha^\circ / \pm \beta^\circ$	МТ	$\alpha^\circ = 0...+8^\circ 30'$	Продольные по длине	180	2650...2850	50...250
$yx / +\alpha^\circ / \pm \beta^\circ$	НТ	$\beta^\circ = \pm 30... \pm 50^\circ$, $\alpha^\circ = 0...+8^\circ 30'$	Изгиб по ширине	—	400...2200, 2560...5600	10...300
$yx / -\gamma^\circ / +\beta^\circ$	ИТ	$\beta^\circ = \pm 38... \pm 70^\circ$, $\gamma^\circ = -20^\circ$	Сдвиг по толщине	—	1770...2100	1000...20 000
$yx / +\beta^\circ$	ЕТ	$\beta^\circ = +34...+35^\circ$, $\beta^\circ = +65...+69^\circ$	Сдвиг по контуру (при втором порядке колебаний)	—	5320...5440	500...850

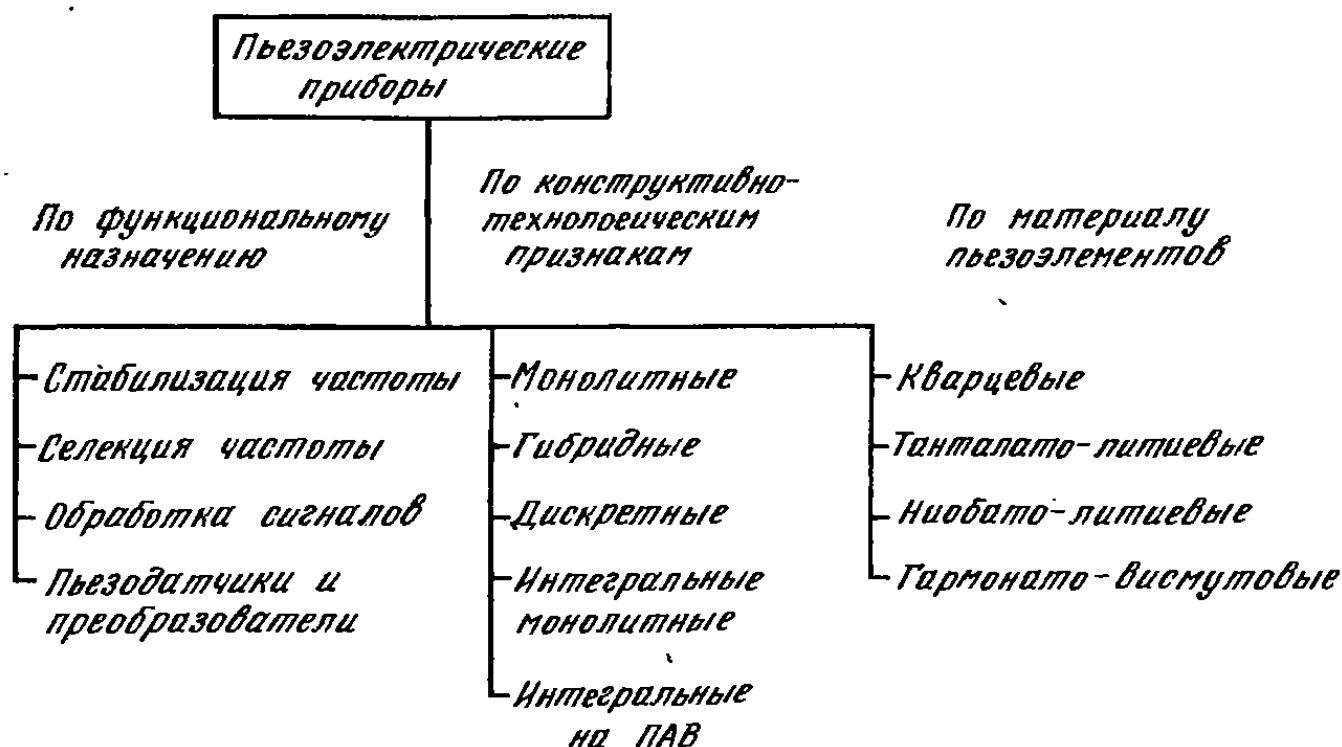


Рис. 1.3. Классификация пьезоэлектрических приборов

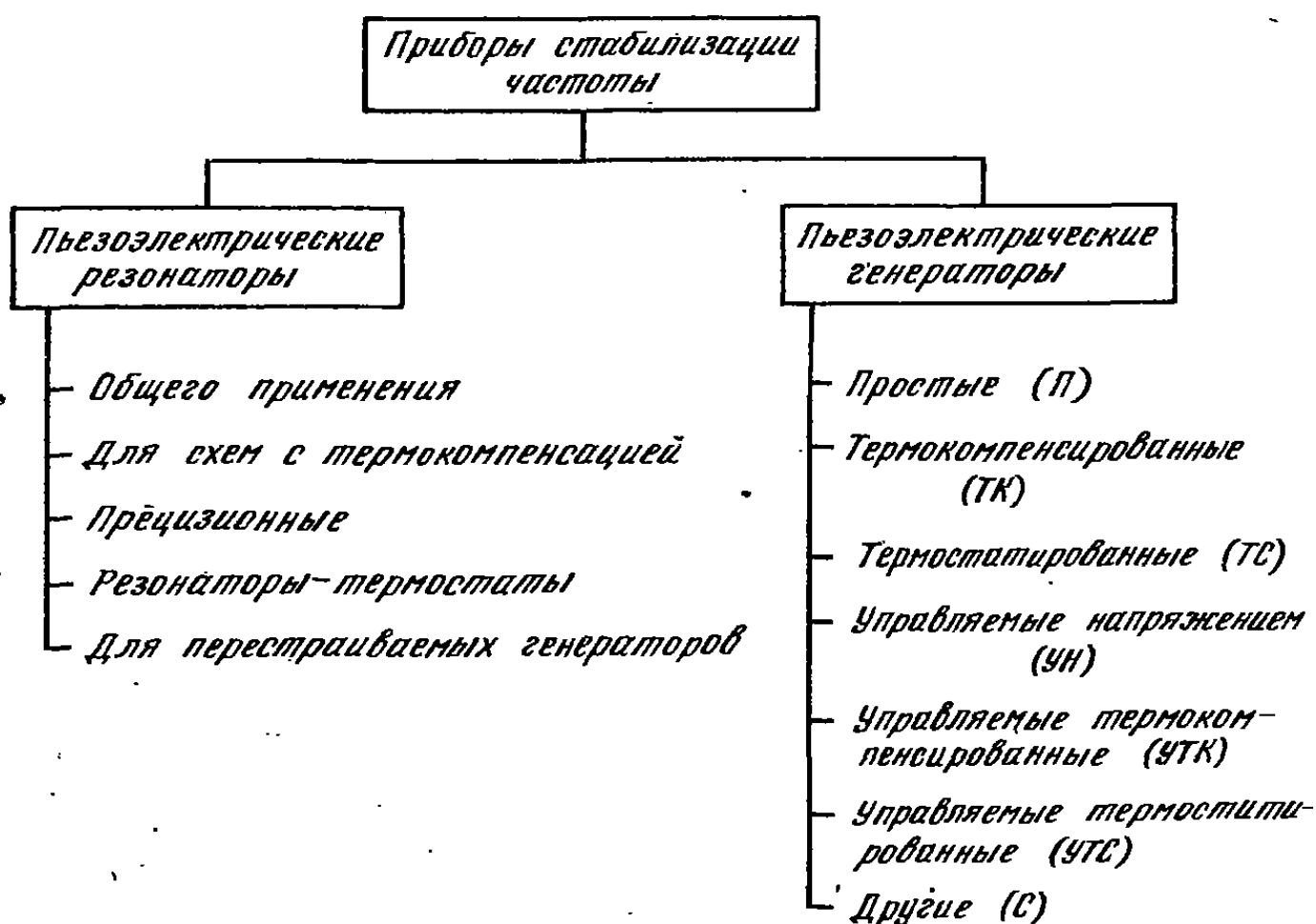


Рис. 1.4. Классификация приборов стабилизации частоты

2. Приборы стабилизации частоты

Такие приборы используются в аппаратуре, основное назначение которой — генерирование напряжения, частота которого при изменении условий эксплуатации поддерживается близкой к постоянному значению. Они находят применение в радиолокации, телеметрии, измерительной и вычислительной технике, аппаратуре радиосвязи, электронных часах и т. п.

Приборы стабилизации частоты делятся на пьезоэлектрические резонаторы и пьезоэлектрические генераторы (см. рис. 1.4).

2.1. Пьезоэлектрические резонаторы

Принцип работы. Классификация

Основной частью пьезоэлектрического резонатора является пьезоэлемент (ПЭ). В простейшем случае он представляет собой пластину из пьезоэлектрика определенной формы, снабженную двумя обкладками (электродами) 1 (рис. 2.1). При воздействии на обкладки ПЭ гармонического напряжения в течение первой четверти периода колебания (от нуля до максимального значения) ПЭ действует в режиме обратного пьезоэффекта (рис. 2.1, а). В течение второй четверти периода энергия отдается во внешнюю цепь и ПЭ работает в режиме прямого пьезоэффекта (рис. 2.1, б).

Гармонические колебания пластины обуславливают появление на ее обкладках электрического напряжения, которое вызывает ток во внешней цепи. Обратимость пьезоэлектрических эффектов позволяет представить ПЭ в виде двухполюсника, объединяющего системы электрического возбуждения механических колебаний и съема электрического напряжения. Опытным путем установлено, что зависимость проводимости ПЭ от частоты носит резонансный характер. Это означает, что при совпадении частоты внешнего электрического напряжения с частотой механических собственных колебаний пьезоэлемента возникает резонанс на частоте собственных колебаний, который слабо зависит от внешних условий. Это качество пьезоэлемента используется для стабилизации частоты. Пьезоэлемент представляет собой механи-

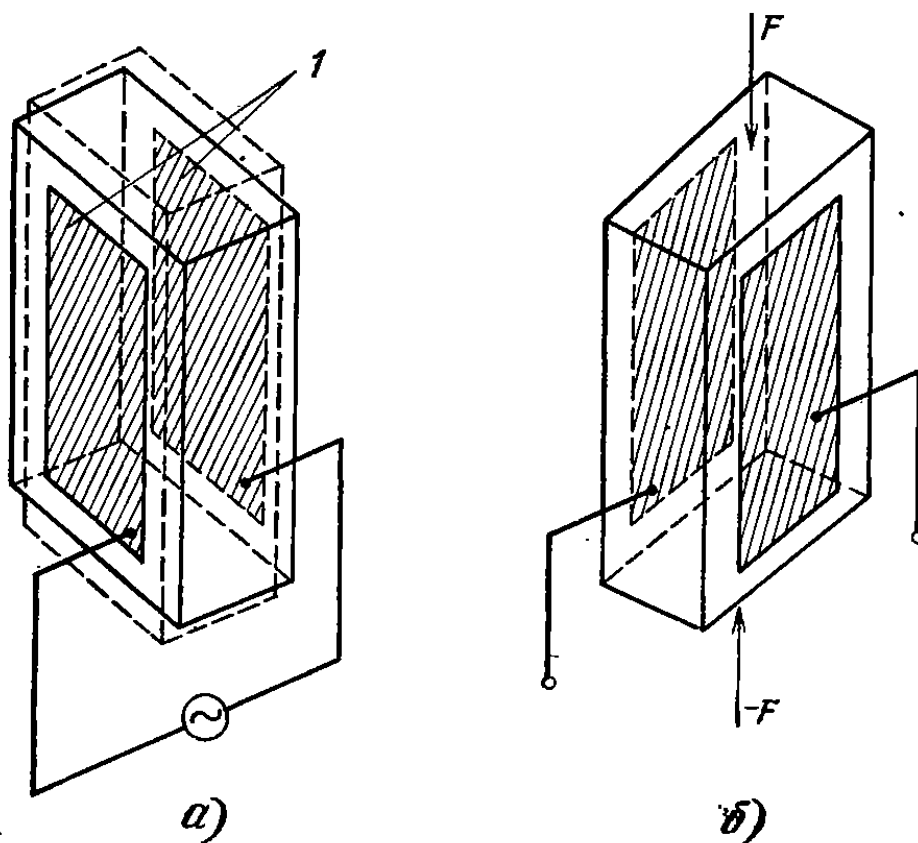


Рис. 2.1. Принципы работы пьезорезонатора

Связь формы пластины с частотным диапазоном

Форма пластины	Частотный диапазон
Двояковыпуклая	500 Гц...1,5 МГц
Плосковыпуклая	1,5...6 МГц
Плоская	Более 6 МГц

ческую колебательную систему с распределенными параметрами, поэтому он имеет бесконечное число собственных колебаний. Колебание с низшей (первой) частотой называют *колебаниями первого порядка*, все остальные колебания — *колебаниями высшего порядка*. В устройствах используются колебания с одной частотой, все остальные колебания нежелательны.

Высокочастотные пьезоэлементы, совершающие колебания сдвига по толщине, могут возбуждаться только на нечетных гармониках основной частоты, так как при возбуждении на четных гармониках на обеих гранях пьезоэлемента будут одинаковые потенциалы и явление пьезоэффекта не возникает.

Форма пластины пьезоэлемента связана с частотным диапазоном (табл. 2.1).

О частотном диапазоне можно косвенно судить по типу корпуса (рис. 2.2). Корпуса ПЭР могут быть нескольких типов и иметь различное число выводов (табл. 2.2).

Условное обозначение кварцевого резонатора включает в себя следующие элементы:

- первый элемент — буквы РК (резонатор кварцевый);
- второй элемент — двух- или трехзначное число, обозначающее регистрационный номер типа резонатора;
- третий элемент — число, обозначающее класс точности настройки (1-й класс — $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$, ..., 22-й класс — $\pm 5000 \cdot 10^{-6}$);
- четвертый элемент — буква, обозначающая интервал рабочих температур (Л — $0...+45^\circ\text{C}$, ..., Е — $-60...+100^\circ\text{C}$);
- пятый элемент — буква, обозначающая класс максимального относительного изменения рабочей частоты в интервале рабочих температур, $\Delta f/f$ (А — $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$, ..., Б — $\pm 1000 \cdot 10^{-6}$);
- шестой элемент — число, обозначающее частоту, и буква, обозначающая единицу измерения частоты (для резонаторов, работающих на колебаниях первого порядка К, — кГц, на колебаниях высшего порядка М — МГц);
- седьмой элемент — буква В, обозначающая всеклиматическое исполнение резонатора.

Между 2-м и 3-м, 5-м и 6-м, 6-м и 7-м элементами ставится дефис.

Пример полного обозначения резонатора: РК16-13ЕР-5М-В — резонатор кварцевый с регистрационным номером 16, точность настройки $\pm 10 \cdot 10^{-6}$, предназначен для работы в интервале температур $-60...+85^\circ\text{C}$, максимальное относительное изменение рабочей частоты $\pm 25 \cdot 10^{-6}$, номинальная частота колебаний 5 МГц, имеет всеклиматическое исполнение.

В сокращенное обозначение резонатора входят 1-й, 2-й и 6-й элементы.

Основные параметры

Основными параметрами пьезоэлектрических резонаторов являются: номинальная f_n и рабочая f_p частоты; точность настройки Δf ; статическая емкость C_0 ; емкостный коэффициент r ; динамическое сопротивление R , индуктивность L и емкость C ; добротность Q ; резонансный промежуток; мощность рассеяния.

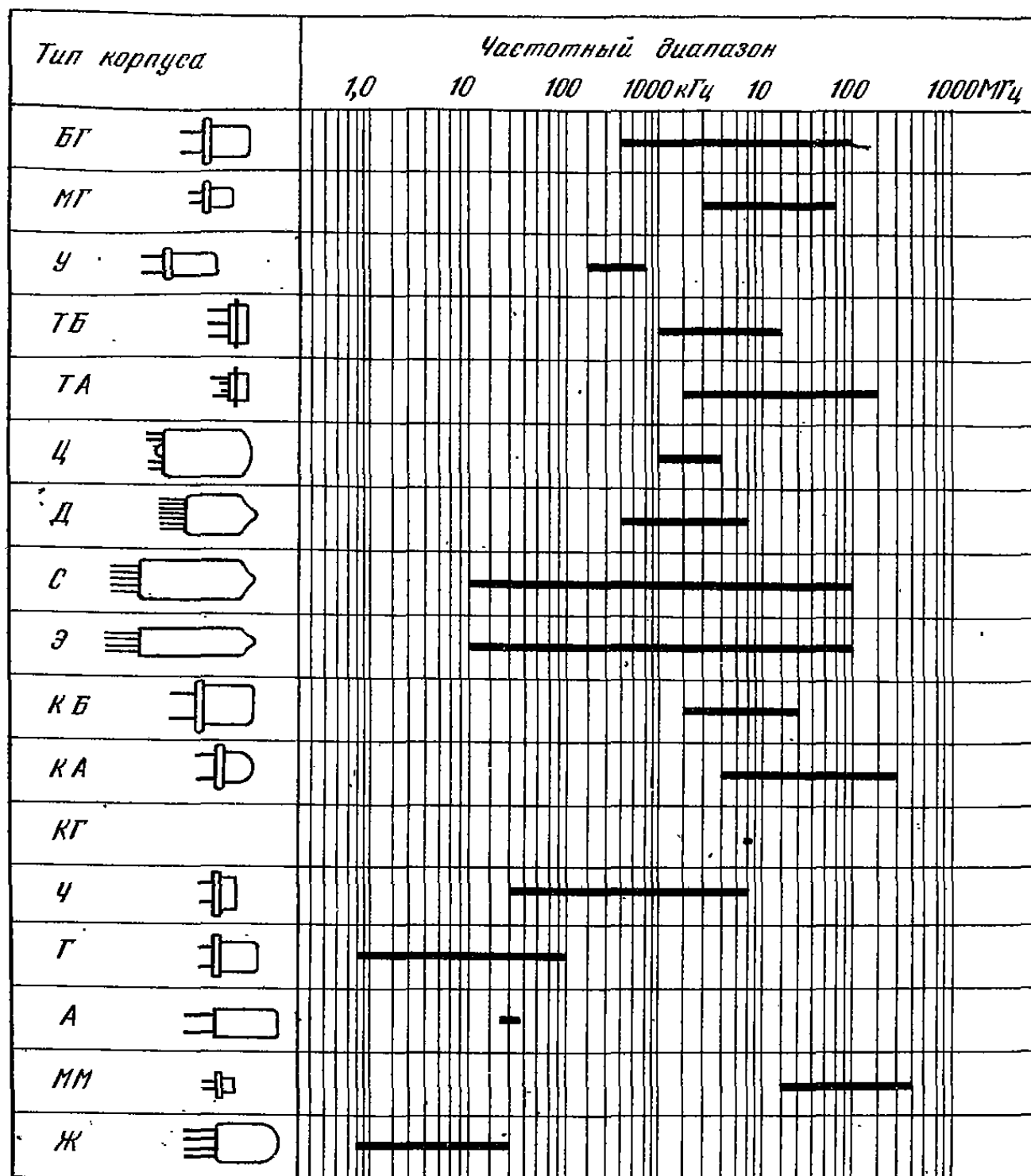


Рис. 2.2. Частотный диапазон пьезорезонатора

Численные значения параметров резонатора зависят от частоты, размеров пьезоэлемента, вида среза, формы электродов, конструктивного исполнения и др.

Номинальная частота f_n — частота, которой задаются при изготовлении резонатора. Нижняя граница номинальной частоты (1 кГц) определяется возможностью применения пьезоэлементов больших размеров и их механической прочностью, верхняя граница определяется уровнем технологии производства, обеспечивающим возможность выполнения пьезоэлемента с малыми размерами:

$$f_n = N_f / a,$$

где N_f — частотный коэффициент, кГц·мм (см. табл. 2.1), зависящий от плотности материала пьезоэлектрика, угла среза и др.; a — размер пьезоэлемента (для пластин $a=l$, l — длина пластин; для дисков $a=d$, d — диаметр диска; для прямоугольника $a=w$, w — толщина прямоугольника)

Для получения частот выше 30 МГц используются нечетные порядки колебаний (3, 5, 7 и 9).

Типы корпусов пьезорезонаторов

Стеклянные		Металлические	
Тип корпуса	Конструкция	Тип корпуса	Конструкция
Д	С девятью выводами	А	Цилиндрические с двумя выводами
Э	С восемью выводами	Б	Плоские с двумя выводами
С	С семью выводами	М	Плоские с тремя выводами
Ц	С четырьмя выводами	Т	Транзисторные
К	Плоские миниатюрные	Г	Плоские сдвоенные с четырьмя выводами
Ж	С двенадцатью выводами	У	Модульные квадратные
		Ч	Плоские восьмигранники или овальные

Рабочая частота f_p — значение частоты колебаний резонатора, измеренное в заданном рабочем режиме. Она отличается от номинальной на величину точности настройки (допуска). Допуск выражается в относительных величинах, обычно — в миллионных долях, реже — в процентах.

Как было указано ранее, **проводимость резонатора** при изменении частоты изменяется. При низких частотах она мала и имеет емкостный характер, с ростом частоты возрастает и достигает некоторого максимального значения. При дальнейшем повышении частоты проводимость уменьшается, меняет знак (становится индуктивной), достигает минимального значения. Дальнейшее повышение частоты приводит к повышению проводимости при емкостном характере.

Первый резонанс (характеризующийся высокой проводимостью) напоминает резонанс напряжений последовательного колебательного контура. Второй резонанс (с низкой проводимостью) подобен резонансу токов параллельного колебательного контура. С дальнейшим ростом частоты закон изменения проводимости сохраняется. Исходя из этого можно изобразить схему замещения резонатора (до 100 МГц): В общем случае она содержит ветвь с конденсатором C_0 и параллельно ей соединенными ветвями с элементами $L_1, \dots, L_n; C_1, \dots, C_n; R_1, \dots, R_n$. Схема замещения на основной частоте состоит из двух параллельных ветвей, одна из которых содержит емкость C_0 ; вторая — элементы L, C_1, R_1 (рис. 2.3). Это колебательный контур 3-го вида, в котором может возникнуть как последовательный, так и параллельный резонанс.

Емкость C_0 является статической емкостью, а элементы L_1, C_1, R_1 — динамическими параметрами. Динамические параметры — это параметры возбужденного резонатора, определяемые его физическими свойствами и конструкцией.

Емкость C_0 можно представить емкостью конденсатора, образованного пьезоэлементом и его электродами вдали от резонансных частот. Она может быть рассчитана по формуле плоского конденсатора

$$C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая постоянная пьезоэлемента; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; S — площадь электродов; d — расстояние между электродами.

Комплексное сопротивление резонатора на основной частоте

$$Z(j\omega) = \frac{1}{Y(j\omega)} = \frac{1}{j\omega C_0 + \frac{1}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}} = \frac{1}{j\omega C_0 \left(1 + \frac{C_1/C_0}{1 - \omega^2 L_1 C_1} \right)} =$$

$$= \frac{1}{j\omega C_0} \frac{\frac{1}{L_1 C_1} - \omega^2}{1 + \frac{C_1/C_0}{L_1 C_1} - \omega^2} = \frac{1}{j\omega C_0} \frac{\omega_s^2 - \omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2},$$

где $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ — частота последовательного резонанса;

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_1 \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}}} \text{ — частота параллельного резонанса.}$$

Примем в качестве рабочей частоту последовательного резонанса.

Частотная зависимость сопротивления резонатора изображена на рис. 2.4. Интервал между частотами резонансов $\omega_n - \omega_s$ называется *резонансным промежутком*, а величина $(\omega_n - \omega_s) / \omega_s$ — *относительным резонансным промежутком*.

Емкостный коэффициент резонатора r определяется отношением его статической и динамической емкостей:

$$r = \frac{C_0}{C_1} = \frac{\omega_s^2}{\omega_n^2 - \omega_s^2} = \frac{\omega_s}{\omega_n + \omega_s} \frac{\omega_s}{\omega_n - \omega_s}.$$

Так как $\omega_n \approx \omega_s$, то

$$r \approx \frac{\omega_s}{2(\omega_n - \omega_s)}.$$

Динамическое сопротивление R_1 характеризует потери на трение в колеблющейся пластине и на излучение колебаний в окружающую среду.

Значения динамической емкости C_1 индуктивности L_1 зависят от физических свойств и размера пьезоэлемента, способа его крепления, формы электродов, качества обработки поверхности, типа среза:

$$C_1 = \frac{C_0}{r}, L_1 = \frac{1}{\omega_s^2 C_1}.$$

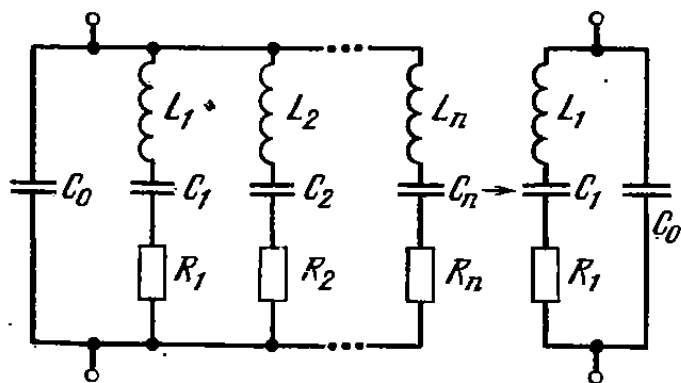


Рис. 2.3. Схема замещения пьезорезонатора

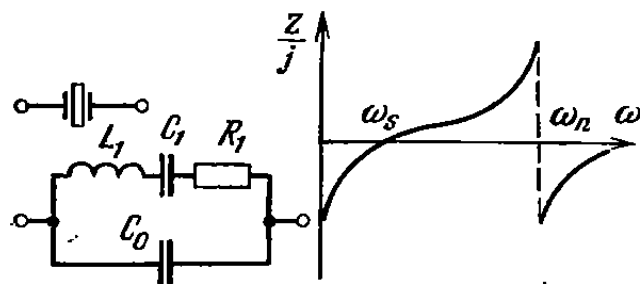


Рис. 2.4. Частотная зависимость сопротивления пьезорезонатора

Добротность резонаторов Q характеризует потери колебательной системы:

$$Q_1 = \frac{\omega_s L_1}{R_1} = \frac{1}{\omega_s C_1 R_1} = 10^4 \dots 10^6.$$

С повышением температуры добротность уменьшается, так как увеличивается сопротивление R_1 .

Параметры резонаторов при порядках колебаний выше первого связаны с параметрами резонаторов при первом порядке колебаний:

$$Q_n \approx Q_1 / n; R_{1n} \approx n^2 R_1; C_{1n} \approx \frac{C_1}{n^2}; L_{1n} \approx L_1,$$

где n — номер порядка колебаний; Q_1, R_1, L_1, C_1 — параметры резонатора при первом порядке колебаний; Q_n, R_n, L_n, C_n — параметры резонатора при n -м порядке колебаний.

Таким образом, с ростом порядка колебаний добротность уменьшается, так как растет сопротивление потерь R_1 и уменьшается динамическая емкость C_1 .

В конкретной схеме включения резонатора для настройки частоты к резонатору могут быть подключены последовательно или параллельно внешние элементы: емкость C_n или индуктивность L_n .

При последовательном подключении C_n частота резонанса ω'_n увеличивается (рис. 2.5, а). При этом изменяются относительная расстройка и параметры резонатора:

$$\frac{\omega'_n - \omega_s}{\omega_s} = \frac{1}{2} \frac{C_1}{C_0 + C_n};$$

$$R'_1 = R_1 \varepsilon^2, L'_1 = L_1 \varepsilon^2, C'_1 = C_1 / 2, C'_0 = C_0 / \varepsilon,$$

где $\varepsilon = 1 + C_0 / C_n$.

При параллельном подключении конденсатора C_n (рис. 2.5, б) частота параллельного резонанса ω'_n смещается в сторону нижних частот.

Резонансное сопротивление при параллельном резонансе

$$R_p = \frac{1}{R_1 \omega^2 (C_0 + C_n)^2}$$

составляет 3,5...50 кОм и уменьшается с ростом частоты.

Любой пьезоэлемент дает спектр частот, т. е. колебания первого и высших порядков. Для ослабления колебаний нежелательных порядков пьезоэлементы изготавливают различной формы, на них наносят демпфирующие массы, уменьшают размеры электродов, высверливают отверстия, делают прорезы в местах пучности соответствующих гармоник и т. п. Генераторные резонаторы имеют уровень подавления колебаний нежелательных порядков до 6 дБ. Для фильтров и перестраиваемых генераторов разработаны специальные резонаторы с уровнем подавления до 50 дБ.

Мощность рассеяния. При работе в схеме через резонатор протекает ток, пропорциональный амплитуде механических колебаний. Чрезмерно большой ток ускоряет процесс старения и может привести к повреждению резонатора. Максимальные токи, при которых обеспечивается длительная работа резонатора с допустимыми изменениями параметров, составляют: с изгибными колебаниями 50 мкА, с продольными колебаниями и со сдвигом по контуру 1 мкА, со сдвигом по толщине 3 мА. При низких уровнях возбуждения резонатор работает неустойчиво. Из этого следует, что пьезоэлемент целесообразно нагружать оптимальной мощностью — несколько милливатт.

Основной характеристикой резонатора является температурно-частотная (ТЧХ). Ее форма зависит от типа среза (рис. 2.6). Сравнительно малый уход частоты (до $2 \cdot 10^{-5}$) в интервале рабочих температур $-60 \dots +80^\circ \text{C}$ имеют пьезоэлементы со срезом АТ и ЖТ.

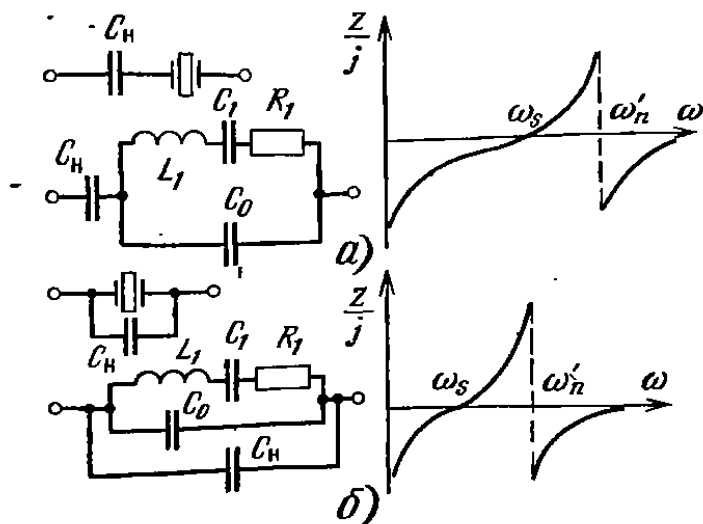


Рис. 2.5. Эквивалентные схемы и частотные зависимости нагруженного пьезорезонатора

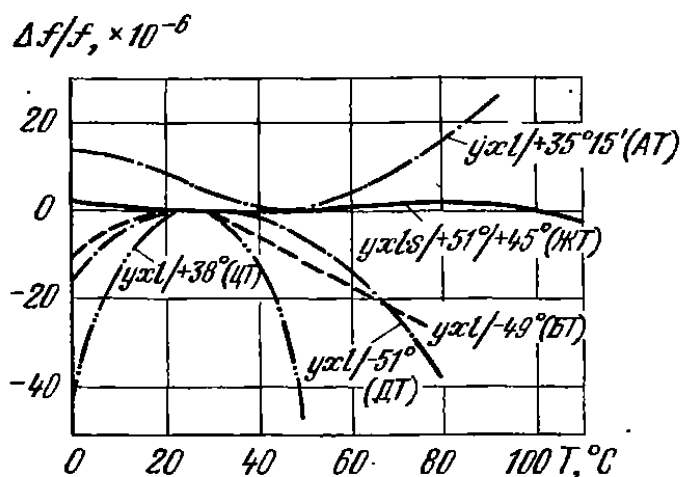


Рис. 2.6. Температурно-частотные характеристики пьезоэлементов

Основные типы резонаторов

Генераторные пьезоэлектрические резонаторы изготавливают различных типов (см. рис. 1.4). Частота резонатора для схем с термокомпенсацией подстраивается в соответствии с изменением температуры с помощью специальной электрической цепи. Верхнее значение стабильности частоты этих резонаторов составляет $\pm 5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C.

Прецизионные резонаторы имеют наивысшую стабильность. Они предназначены для вторичных эталонов частоты и наиболее точных хронометров. Верхнее значение стабильности частоты прецизионных резонаторов составляет $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/°C.

Для достижения высоких требований по стабильности частоты резонаторы термостатируют, используя внутреннее (собственное) и внешнее термостатирование.

При внутреннем термостатировании резонатор функционально и технологически совмещен с термостатом в единой конструкции (в общем корпусе). Резонаторы-термостаты изготавливают в корпусах пальчиковых девятиштырьковых ламп с использованием позисторного подогрева. Позисторы (терморезисторы с большим положительным ТКС) являются саморегулирующими нагревателями. Они выполняются из резистивной пленки, которую приклеивают к основанию пьезоэлементов. При этом осуществляется грубое термостатирование с точностью $\pm (3...5)^\circ\text{C}$ в интервале температур $-60...+60^\circ\text{C}$, обеспечивая температурную стабильность до $\pm (1,5...10)10^{-6}$ 1/°C.

Резонаторы для перестраиваемых генераторов изготавливают на сегнетоэлектрических монокристаллах танталата лития, обеспечивающих широкий резонансный промежуток (в 20...50 раз шире, чем у кварца с такими же размерами). Они имеют высокую добротность ($Q=20...50$ тыс.) и относительное изменение частоты в интервале температур $-60...+85^\circ\text{C}$ не более $1 \cdot 10^{-9}$.

Для современных радиоэлектронных устройств разработаны резонаторы в микрорезонаторе; они отличаются малыми размерами и высокой стабильностью. Такие резонаторы, применяемые в электронных наручных часах, работают на частоте 32,768 кГц. Параметры этих резонаторов приведены ниже.

Микроэлектронные устройства разрабатываются совместно с резонатором по единой технологии.

Традиционная технология изготовления пьезоэлектрических приборов позволяет достичь минимальной толщины пьезоэлемента 30...50 мкм, что обеспечивает их возбуждение на основных частотах до 50 МГц. Ионная технология обработки позволяет достичь толщины 0,5 мкм, что обеспечивает получение частот до 5 ГГц. Повышение частотного диапазона пьезорезонаторов обеспечивается также при использовании поверхностных акустических волн (ПАВ).

Конструктивно резонаторы на ПАВ представляют собой подложку из пьезокристаллического материала, на поверхности которой располагаются гребенчатые токопроводящие электроды. Они называются встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) и предназначены для преобразования электрической энергии в акустическую и наоборот. Входной ВШП преобразует входной сигнал в переменное в пространстве и времени электрическое поле, которое за счет обратного пьезоэффекта вызывает в подэлектродной области упругие деформации, распространяющиеся в виде поверхностных акустических волн до выходного ВШП, где происходит обратное преобразование волн в электрическое напряжение.

Чаще всего применяются однофазные и двухфазные встречно-штыревые преобразователи. Однофазный преобразователь (рис. 2.7, а) представляет собой пьезоэлектрическую пластину 2 с нанесенной на ее рабочую поверхность гребенкой металлических электродов 1, а на обратную сторону — сплошного электрода 3. Двухфазный преобразователь (рис. 2.7, б) имеет на поверхности пьезопластины две гребенки электродов: 1 и 3.

Возбуждаемые за счет обратного пьезоэффекта две поверхностные волны распространяются в противоположные стороны. Суммарная волна получается в результате сложения этих волн. Упругая деформация пьезоэлектрического материала при приложении к ВШП переменного напряжения частотой f возбуждает ПАВ той же частоты, если пространственный период решетки ВШП L равен длине ПАВ в среде λ_c . Работа двухфазного преобразователя соответствует условию $L = \lambda_c / 2$. Обычно ширина электродов ВШП равна расстоянию между ними и является шагом ПАВ-структуры, который равен четверти длины волны ПАВ. Локальная деформация звукопровода, возникшая под парой соседних штырей, пройдя расстояние $\lambda_c / 2$ до следующего промежутка, оказывается там в тот момент, когда следующая полуволна внешнего напряжения достигает максимума и создает там новую деформацию, синфазную с пришедшей. При распространении ПАВ вдоль звукопровода этот процесс многократно повторяется, и в результате к концу ВШП амплитуда ПАВ, постепенно нарастая, достигнет максимума. Чем больше пар штырей, тем больше амплитуда напряжения ПАВ частоты $f_0 = v / \lambda_c$ и сильнее подавляются ПАВ, частоты которых отличаются от f_0 (в этом случае нарушается синхронность движения ПАВ и изменения электрического поля между штырями). Это приводит к сужению полосы пропускания ВШП. Число пар штырей N и полоса пропускания Δf связаны соотношением $\Delta f = f_0 / N$. Сопоставив его с выражением для добротности LC-контура $Q = f_0 / \Delta f$, имеем, что число пар штырей соответствует ($Q = N$) значению добротности ВШП. Таким образом, частотно-селективные свойства ВШП определяются шагом штырей h и числом их пар.

Частота, на которой преобразование высокочастотного колебания в ПАВ наиболее эффективна, называется частотой акустического синхронизма. При отклоне-

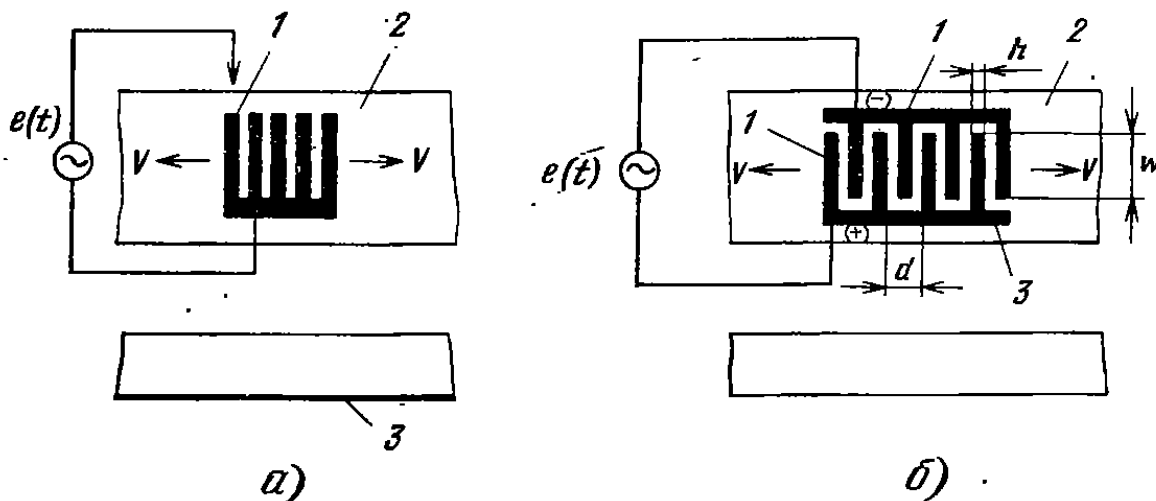


Рис. 2.7. Электромеханические встречно-штыревые преобразователи:
а — однофазный; б — двухфазный

нии от нее частоты входного колебания эффективность преобразования падает тем больше, чем больше расстояние между штырями и дальше частота входного колебания отстоит от частоты акустического синхронизма. Этот фактор определяет частотные свойства прибора на ПАВ.

При существующей технологии получить шаг менее 1 мкм затруднительно. Этому шагу соответствует частота около 2 ГГц. Нижняя рабочая частота определяется реализуемой длиной звукопровода и выбирается около 10 МГц.

Кроме ВШП приборы на ПАВ содержат многополосковые ответвители (МПО) (рис. 2.8). Они представляют собой решетки изолированных металлических полосок, нанесенные между входным и выходным ВШП на поверхность пьезоэлектрического звукопровода на пути распространения ПАВ параллельно ее фронту. С помощью МПО можно расширять и сжимать фронт ПАВ, изменять их траекторию, осуществлять их отражение, производить частотную фильтрацию, переизлучать энергию ПАВ из одного пространственного канала в другой. Это позволяет, в частности, смещать входной и выходной ВШП относительно друг друга в поперечном направлении, размещая их в различных акустических потоках и уменьшая тем самым прямую электромагнитную связь между ВШП и влияние паразитных объемных волн. После многополоскового ответвителя энергия попадает на выходной ВШП или в акустический волновод, представляющий собой геометрическую структуру, расположенную вдоль направления распространения ПАВ и локализирующую ее энергию в ограниченном по ширине участке звукопровода. Он может быть образован за счет формирования предельного выступа на поверхности звукопровода из того же материала, что и подложка, или другого, скорость распространения волны в котором меньше, чем в звукопроводе. Чаще используется волновод с металлической узкой продольной полоской.

Резонаторы на ПАВ могут быть одноходовые и двухходовые. В одноходовом резонаторе функции ввода и вывода энергии осуществляются одним двухфазным ВШП (рис. 2.9, а), в двухходовом (рис. 2.9, б) один ВШП обеспечивает генерацию, второй — прием акустических волн и их преобразование в электрический сигнал.

Одноходовые резонаторы на ПАВ реализуются в виде протяженного ВШП с большим числом электродов. При этом возникает последовательный резонанс на частоте акустического синхронизма f_0 или параллельный резонанс на частоте $f_{\text{пар}} = f_0(1 + \frac{f}{N})$. Частотные свойства резонаторов на ПАВ определяются в основном частотной зависимостью коэффициента отражения отражателей 4, ВШП же являются элементами связи с резонансной полостью.

Для уменьшения потерь используются многоэлементные ВШП с "расщепленными" электродами, подложки с малым коэффициентом электромеханической связи и распределенные отражатели с большим коэффициентом отражения.

Резонаторы на ПАВ в зависимости от предъявляемых требований по температурной неустойчивости могут изготавливаться на любом пьезоэлектрике. Чаще всего

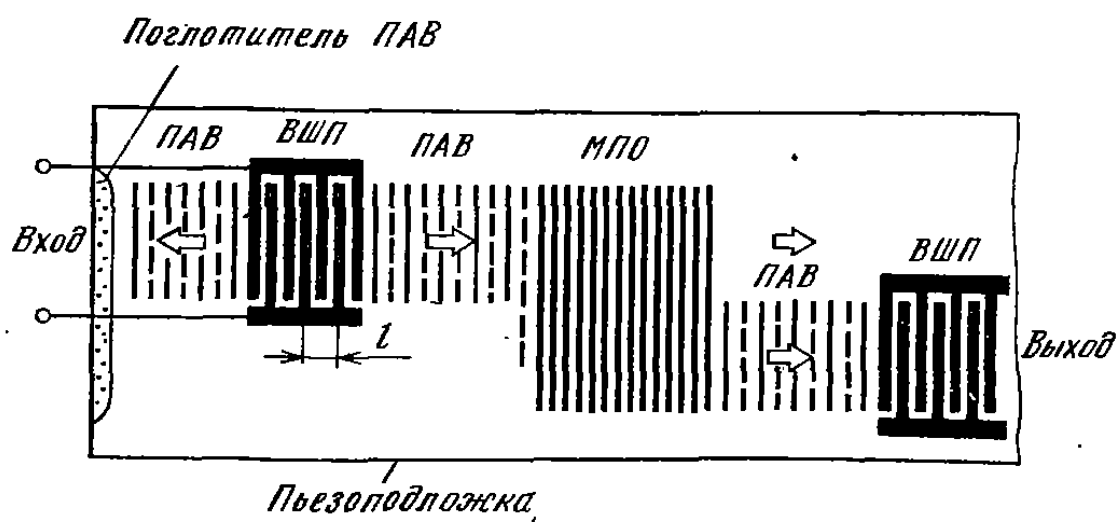


Рис. 2.8. Прибор на поверхностных акустических волнах

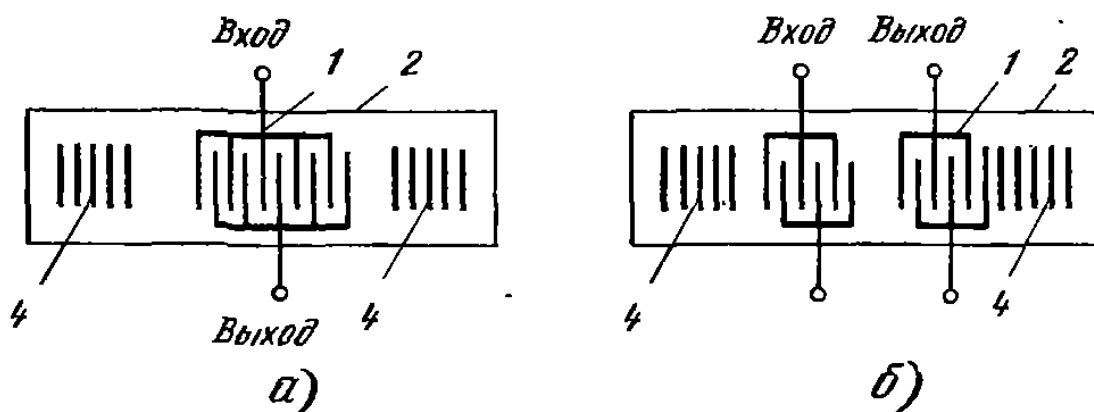


Рис. 2.9. Резонаторы на поверхностных акустических волнах:
а — одноходовые; б — двухходовые

при их изготовлении применяют кварц среза *ST*, как наиболее температурно стабильный.

При включении резонатора на ПАВ в электрическую цепь на его выход последовательно с сопротивлением нагрузки включают индуктивность, которая компенсирует статическую емкость ВШП.

Основными параметрами резонаторов на ПАВ являются:

диапазон рабочих частот: от единиц мегагерц до единиц гигагерц;

стабильность частоты: $(1...10) \cdot 10^{-6}$ за год;

добротность: зависит от частоты ($Q = 10400/f$) и принимает значения, большие 10^4 . Большие значения добротности связаны с возвратом акустической энергии к резонансной полости от отражательных элементов;

точность настройки: зависит от частоты и находится в пределах $(150...1000) \cdot 10^{-6}$. Подстройка частоты допускается в пределах $(1...10) \cdot 10^{-3}$ за счет введения дополнительного преобразователя с изменяющимся сопротивлением нагрузки.

Преимуществами резонаторов на ПАВ являются: широкий диапазон частот, высокие стабильность и точность настройки частоты, высокая добротность, малые размеры и масса, высокая устойчивость к механическим воздействиям, сочетаемость с микросхемами.

Справочные данные

Ниже приводятся таблицы значений параметров основных типов резонаторов отечественного производства (табл. 2.3) и их габаритные чертежи, а также резонаторов для электронных часов отечественного и зарубежного производства (табл. 2.4).

Параметры основных типов резонаторов

Тип резонатора	Номинальная частота f_n		Точность настройки $\Delta f \times 10^6$	ТКЧ, $\times 10^6$ 1/°C	Ослабление нежелательных резонансов по отношению к основному, дБ	Добротность $Q \times 10^{-6}$, не менее	Габаритный чертёж
	при первом порядке колебаний	при высших порядках колебаний					
РК-07 РК-22	— 5...20 МГц	8 МГц (5-й) 20...60 МГц (3-й) 60...100 МГц (5-й)	$\pm(1...0,5)$ $\pm(5...10)$	$\pm 7,5$ ± 25	— 6...10 $f_n \pm (150...50 \text{ кГц})$ $6(f_n \pm 500 \text{ кГц})$ 30	1,0 —	1 12
РК-32 КБ РК-34Э РК-34СП	— 4...75 кГц —	— 18...30 МГц (5-й) 5 МГц (5-й)	$\pm(5...10)$ $\pm(20...50)$ $\pm 0,5$	± 10 ± 250 $\pm(0,2...1,0)$	$f_n \pm (150...50 \text{ кГц})$ $6(f_n \pm 500 \text{ кГц})$ 30 50 ($f_n \pm 100 \text{ кГц}$)	0,2 — 1,5	12 2 1
РК-39МА РК-40ЭБ РК-45ММ	50 МГц 20...35 МГц 15...25 МГц	— — 25...75 МГц (3-й), 75...100 МГц (5-й)	± 100 ± 10 ± 15	— ± 30 ± 40	— 40 ($f_n \pm 30 \text{ кГц}$) 3...6 ($f_n \pm 500 \text{ кГц}$)	— — —	10 4 11
РК-46ЧВ РК-62КА	256...550 кГц —	— 100...150 МГц (5-й), 150...230 МГц (7-й), 230...300 МГц (9-й)	± 20 $\pm(10...15)$	± 50 ± 6	40 ($100 \text{ кГц}...2f_n$) 3...6 ($f_n \pm 0,03 f_n$)	— —	14 12
РК-65 РК-66 РК-67 РК-68 РК-69 РК-70 РК-72ЧА	10...40 кГц 40...200 кГц 40...120 кГц 60...160 кГц 160...200 кГц 200...216 кГц 30,72...32,8 кГц	— — — — — — —	$\pm(15...30)$ $\pm(15...30)$ $\pm(15...30)$ $\pm(15...30)$ $\pm(15...30)$ $\pm(15...30)$ ± 30	± 300 ± 300 ± 300 ± 300 ± 400 $\pm(35...50)$ ± 100	40 ($f_n \pm 10 \%$) 40 ($f_n \pm 10 \%$) 40 ($f_n \pm 10 \%$) 40 ($f_n \pm 10 \%$) 40 ($f_n \pm 10 \%$) 40 ($f_n \pm 10 \%$) 6 ($f_n \pm 1 \text{ кГц}$)	— — — — — — 40	2 4 4 4 4 4 6

Продолжение табл. 2.3

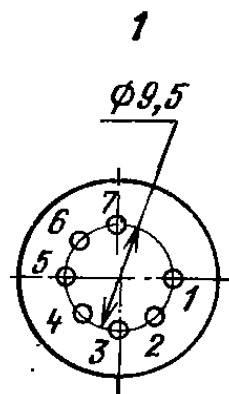
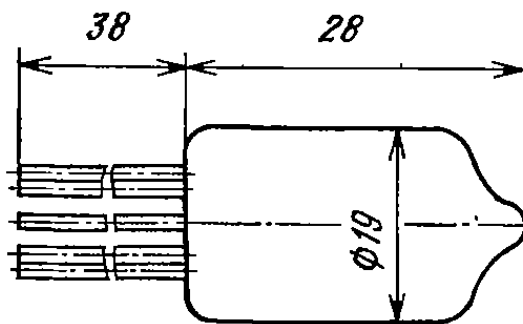
Тип резонатора	Номинальная частота f_n		Точность настройки $\Delta f \times 10^6$	ТКЧ, $\times 10^6$ 1/°C	Ослабление нежелательных резонансов по отношению к основному, дБ	Добротность $Q \times 10^{-6}$, не менее	Габаритный чертёж
	при первом порядке колебаний	при высших порядках колебаний					
РК-100КА	5...20 МГц	20,5...60 МГц (3-й), 60...100 МГц (5-й)	$\pm(5...10)$	± 30	6...100 ($f_n \pm 150...500$ кГц)	—	12
РК-104	— 5,0 МГц	—	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	—	—	5
РК-168	50...750 кГц	—	± 30	± 300	—	—	9
РК-169	5...100 МГц	—	± 15	± 100	—	—	13
РК-170	750...7999 кГц	—	± 15	± 50	—	—	11
РК-171	8...20 МГц	20...50 МГц (3-й) 50...100 МГц (5-й)	± 15	± 100	—	—	11
РК-172	4432...8862 кГц	—	± 15	± 15	40 ($f_n \pm 1$ МГц) 50 ($f_n \pm 50$ кГц)	—	11
РК-178*	5 МГц	—	$\pm 1,5$	± 20	—	1,5	3
РК-180ДГ*	2; 4; 5 МГц	—	$\pm(5...10)$	$-0,5...+1,0$	—	—	3
РК-187	—	4,6...5,3 МГц (7-й)	$\pm(0,4...2,0)$	± 3	10 ($f_n \pm 10$ %)	—	4
РК-188	4434; 4432; 3599 кГц	—	± 15	$\pm 0,05$	—	1,5	10
РК-230	256...550 кГц	—	± 20	± 150	—	0,07	14
РК-233	32; 7686 кГц	—	± 30	± 40	—	0,03	8
РК-241ПА	30...50 МГц	—	± 15	± 50	40 ($f_n \pm 4,5...6$ %) 34...40 ($f_n \pm 5$ МГц)	—	11
РК-241МА	3,28...150 МГц	—	± 15	—	—	—	10
РК-258КБ	3,0...8,0 кГц	—	—	—	—	—	12
РК-259КА	3,0...8,0 ГГц	—	± 5	± 25	—	—	12

Тип резонатора	Номинальная частота f_n		Точность настройки $\Delta f \times 10^6$	ТКЧ, $\times 10^6$ 1/°C	Ослабление нежелательных резонансов по отношению к основному, дБ	Добротность $Q \times 10^{-6}$, не менее	Таблицный чертеж
	при первом порядке колебаний	при высших порядках колебаний					
РК-272Э	75...550 кГц	—	$\pm(20...50)$	± 250	6 ($f_n \pm 2\%$)	—	2
РК-296	32,7...32,768 кГц	—	$\pm(20...30)$	—	—	—	14
РК-297	5,0 МГц	—	$\pm 0,4$	$\pm 2,5$	50 ($f_n \pm 150$ кГц)	1,8	1
РК-308	4194 кГц	—	± 15	± 50	—	—	10
РК-318ЧА	51...69 кГц	—	± 30	± 100	6 ($f_n \pm 1$ кГц)	40	6
РК-319	4...20 МГц	—	± 10	± 75	—	0,04	14
РК-320	—	50 МГц (3-й)	± 10	± 30	7 ($f_n \pm 0,2$ МГц)	2	1
РК-332КА	30...83 МГц	—	± 20	± 20	6 ($f_n \pm 500$ кГц)	0,02	12
РК-336	3,5...5 МГц	—	± 15	± 20	—	—	10
РК-356	—	—	± 10	$\pm(20...40)$	20 ($f_n \pm 20$ кГц)	—	7
РТ-2	128...300 кГц	—	± 100	± 900	10 ($0,5f_n...1,5f_n$)	—	2
РТ-3	210...500 кГц	—	± 100	± 900	20 ($0,5f_n...3f_n$)	—	6
РТа-1МА	9...10 МГц	—	± 600	± 800	30 ($f_n \pm 1,2$ МГц)	—	10

Примечания. 1. Для резонатора РК-178 максимальная мощность нагревателя 6,5 Вт, время установления частоты не более 10 мин.
2. Для резонатора РК-180ДГ напряжение позисторного нагревателя может быть 9; 12; 18 В.

* Резонаторы-термостаты вакуумные.

PK-07, PK-34СП,
PK-187, PK-297,
PK-320



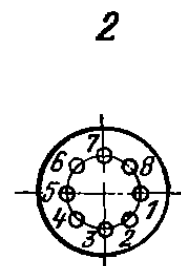
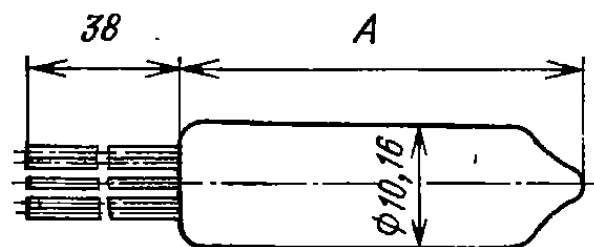
PK-07

PK-187У

PK-187М, PK-187Р, PK-34СП,
PK-297, PK-320

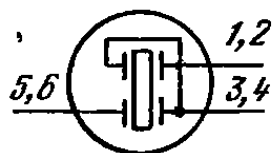


PK-34З, PK-65,
PK-272З, PT-2



PK-65

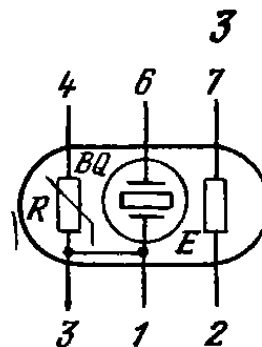
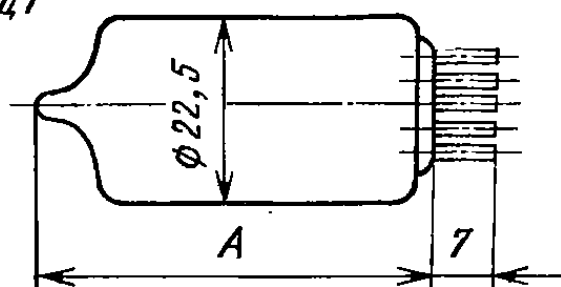
PK-34З, PK-272З,
PT-2



Тип	PK-34З PK-272З	PK-65	PT-2
Размер А, мм	52... 92	52... 72	47

PK

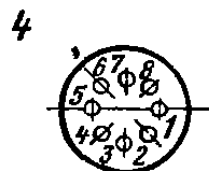
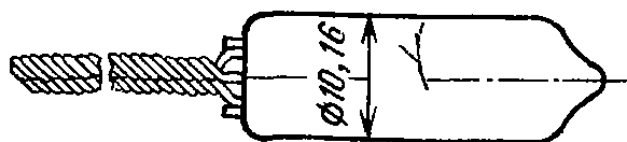
PK-178, PK-180ДГ



Тип	PK-178	PK-180ДГ
Размер А, мм	49,2	43

R - резисторный
нагреватель
E - газопоглотитель
BQ - пьезоэлемент

PK-403Б,
PK-66- PK-70,
PK-187

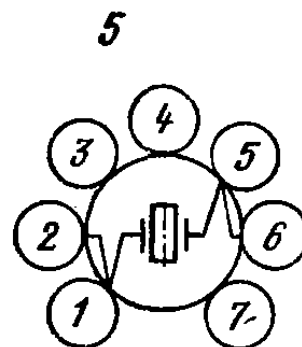
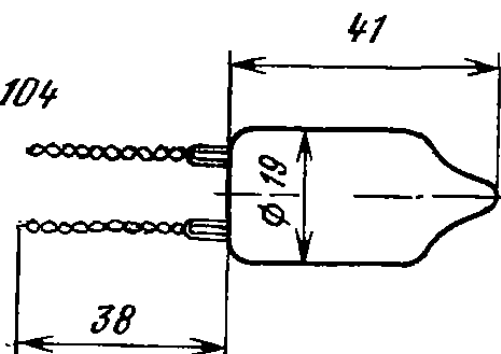


PK66, PK67

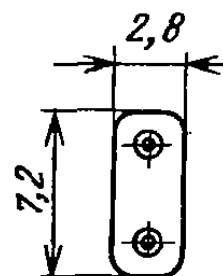
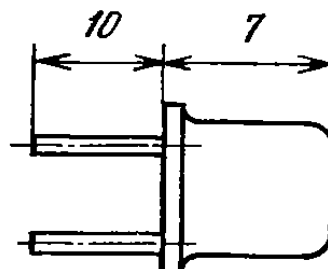
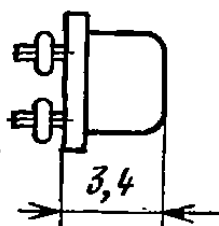
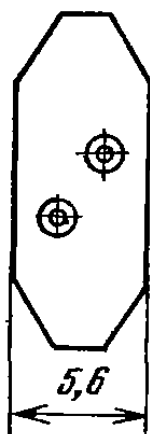
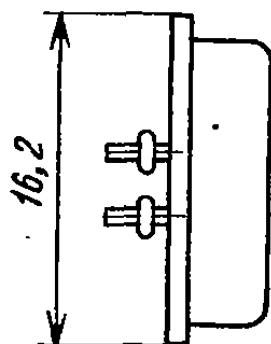
PK-403Б, PK-68- PK-70,
PK-187



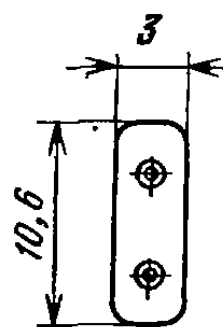
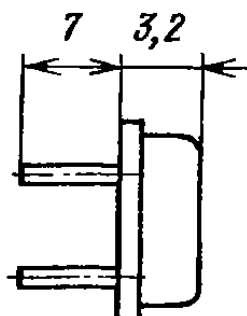
PK-104



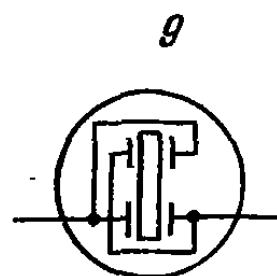
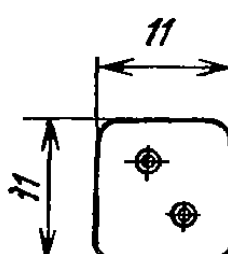
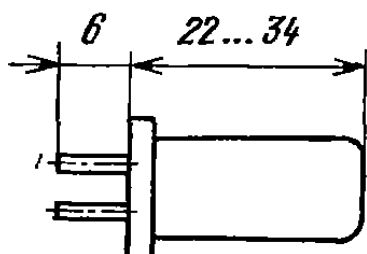
PK-724A, PK-3184A, PT-3



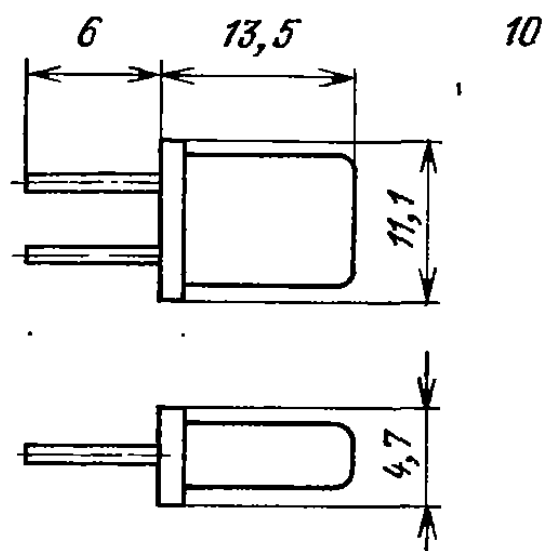
PK-233



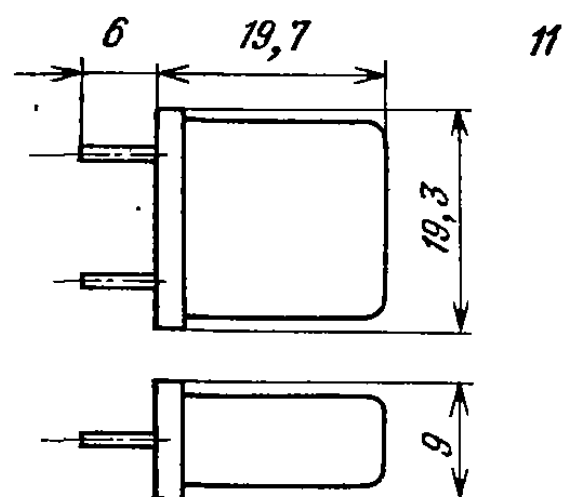
PK-168



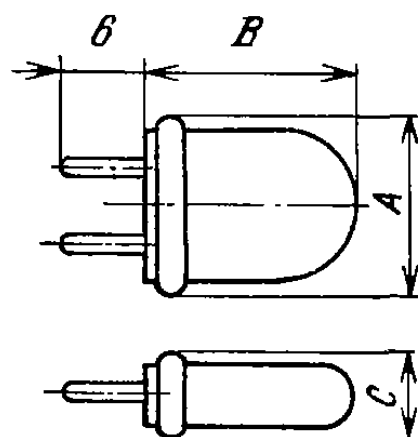
PK-39MA, PK-188, PK-241MA,
PK-308, PK-336, PTa-1MA



PK-45MM, PK-170,
PK-171, PK-172, PK-241ПА

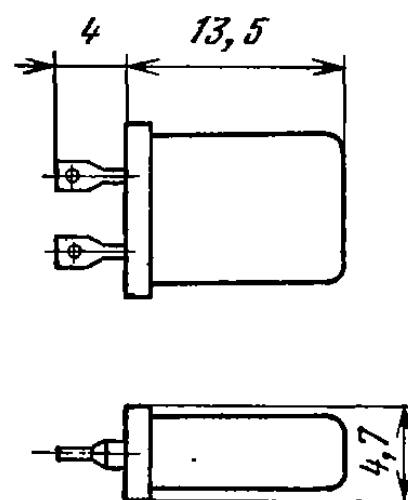


PK-22, PK-32КБ,
PK-62КА, PK-100КА,
PK-258КБ, PK-259КА,
PK-332КА

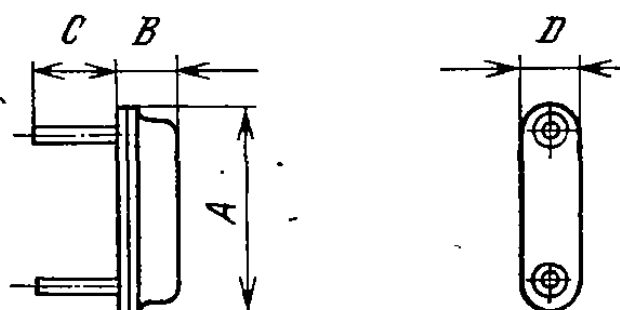


Тип	Размеры, мм		
	A	B	C
PK32-КБ PK-258КБ	20,5	22	11
PK-259КА	12	14	4,4
PK-22	10,7	14	4,7
PK-62КА PK-100КА PK-332КА	12	14	5,8

PK-169



PK-464B, PK-230, PK-296, PK-319



Тип	Размеры, мм			
	A	B	C	D
PK-464B	13,3	3,6	6	3,4
PK-230 PK-319	13,6	3,6	10	3,4
PK-296	13,6	2,7	—	3,6

Параметры резонаторов для электронных часов

Тип резонатора (фирма, страна)	Допустимое отклонение частоты $\delta f, \times 10^6$	Сопротивление $R, \text{кОм}$, не более	Добротность Q $\times 10^{-3}$, не менее	Точка нулевого ТКЧ, °С	Размеры, мм
РВ-72 ("Фонон")	± 40	20	30	27 ± 5	$16,1 \times 5,6 \times 3,1$
РВ-720К ("Фонон")	± 20	10	60	27 ± 3	$16,1 \times 5,6 \times 3,1$
SQM-32 ("SSIH-Quartz", Швейцария)	± 20	15	100	25 ± 3	$13,6 \times 3,6 \times 3,0$
MTQ-32 ("Motorola", США)	± 30	50	12,5	28 ± 7	$10,2 \times 3,3 \times 3,4$
4VHCB ("Oscilloquartz", Швейцария)	± 20	30	120	25 ± 5	$16,7 \times 5,2 \times 3,1$
W-2 ("Kinsekisha", Япония)	± 15 ± 20 ± 30	31 41 41	150	27 ± 3 27 ± 5 27 ± 7	$13,7 \times 4,17 \times 4,1$
Р-3 ("Kinsekisha", Япония)	± 15	31	70	25 ± 5	$3 \times 8,0$

2.2. Диэлектрические резонаторы

Диэлектрические резонаторы (ДР) изготавливаются из диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \gg 1$) в форме шара, параллелепипеда, диска, цилиндра, кольца и т. п. [38 — 40]. Форма и размер ДР таковы, что в нем за счет эффекта полного внутреннего отражения возникает объемный резонанс электромагнитного поля, возбуждаются электромагнитные колебания с различными собственными частотами и структурами электрического и магнитного полей. На практике используются низшие виды колебаний полей, собственные частоты которых в 1,2...1,4 раза меньше частот ближайших высших видов.

Электромагнитное поле возбуждателя должно быть сходно по структуре с полем возбуждаемого вида колебаний, а частота равна собственной частоте этого вида.

Диэлектрические резонаторы имеют небольшие массу и габариты, высокую температурную стабильность (ТК_с). Они могут быть подключены к линии передачи без элементов связи, поскольку резонирующие электромагнитное поле сосредоточено не только внутри ДР, но и в некоторой области пространства вне его, убывая по экспоненте с увеличением расстояния от ДР. Существование внешнего поля приводит к тому, что расположенные в нем элементы влияют на его структуру и резонансную частоту ДР f_0 . Это позволяет подстраивать резонансную частоту, но в ряде случаев может привести к ее непредусмотренному смещению.

Для устранения влияния внешних факторов и предотвращения излучения поля резонатор помещают в металлический корпус (экран). Это приводит к изменению резонансных частот и потерям энергии в стенках экрана, обусловленным наведе-

ными токами проводимости. Для снижения потерь экран изготавливают из хорошо проводящих и тщательно обработанных материалов, отдаляют его от ДР (диаметр экрана и его длину принимают в 1,3...1,6 раз больше, чем у ДР), а сам резонатор размещают на подставках из диэлектрика с малыми потерями ($\epsilon = 2...4$, фторопласт, кварц, полистирол и т. п.). Для подстройки частоты используют различные способы. Например, введение в электрическое поле диэлектрика с диэлектрической проницаемостью, большей, чем у ДР, понижает его рабочую частоту, а создание отверстий, полостей — повышает ее. Более разряженный спектр собственных частот и возможность простой перестройки частоты имеют ДР в виде шайб, коаксиальных конструкций. Добротность ДР зависит от потерь в диэлектрике и потерь на излучение. На нее оказывают влияние элементы связи, близость экрана, материал держателей, подложек и т. п. В сантиметровом диапазоне добротность ДР $Q = 10^3...10^4$.

С линиями передачи ДР может быть связан двумя способами. При первом способе ДР включают между электромагнитно несвязанными линиями (разделенными отрезком заградительного волновода, диафрагмой, ортогональной ориентацией полей и т. п.). Связь между такими линиями осуществляется только на частоте f_0 полем ДР. Этот способ включения ДР применяется в полосовых фильтрах.

При втором способе резонатор устанавливают в регулярную линию передачи так, чтобы при частоте f_0 возбуждаемое и переизлучаемое им поле взаимодействовало с полем волны линии. Если амплитуды этих полей будут равны, то в линии до резонатора установится режим стоячей волны. При $f \neq f_0$ возбуждение резонатора не происходит и электрическая энергия беспрепятственно проходит в нагрузку. Такое включение резонатора используется в режекторных фильтрах.

Степень связи ДР с линией передачи характеризуется коэффициентом связи $K = P_0/P_n$, равным отношению мощности, передаваемой по линии, к мощности потерь в резонаторе. Резонаторы с $\epsilon \approx 80$ используют, как правило, в дециметровом диапазоне, где их применение ограничено вследствие больших размеров; резонаторы с $\epsilon = 30...40$ — в сантиметровом диапазоне в качестве высокодобротных колебательных систем узкополосных фильтров и высокостабильных генераторов; резонаторы с $\epsilon < 30$ — на миллиметровых волнах.

Параметры диэлектрических резонаторов. Промышленность выпускает ДР двух размерно-параметрических рядов — цилиндры "Ц" и шайбы "Ш" из материалов АЛТК и ТБНС. Их усредненными электрофизическими параметрами являются:

	АЛТК	ТБНС
ϵ	38...42	78...84
$TK\epsilon, \times 10^6 1/^\circ C$	$0... \pm 15$	$0... \pm 15$
$tg\delta, \times 10^4$, на частоте $f_0 = 4000$ МГц	0,8...1	4
Q_0/f_0 , ГГц, не менее:		
категория "а"	32 000	10 000
категория "б"	28 000	8000

Диэлектрические резонаторы в виде шайб имеют более разреженный спектр собственных частот; они удобнее для перестройки частоты, чем цилиндрические.

Эксплуатационные параметры ДР

Интервал рабочих температур	$-80...+125^\circ C$
Рассеиваемая мощность	До 50 мВт
Интенсивность отказов	До $2 \cdot 10^{-9} 1/ч$
Гарантированная наработка на отказ	До 150 000 ч
Гарантийный срок хранения	До 20 лет

В табл. 2.5. и 2.6 приведены параметры основных типов резонаторов в виде шайб и цилиндров.

Т а б л и ц а 2.5

Параметры диэлектрических резонаторов типа "Ш"

Тип резонатора	Собственная частота f_0 , МГц		Размеры, мм			Масса, г, не более
	АЛТК ($\epsilon = 40$)	ТБНС ($\epsilon = 81$)	D	d	H	
Ш-1	11,98	8,44	5,0	2,0	3,0	0,6
Ш-2	12,05	8,50	5,0	3,0	4,0	0,6
Ш-3	10,06	7,08	6,0	2,0	2,0	1,0
Ш-4	10,06	7,08	6,0	2,0	4,0	1,0
Ш-5	8,68	6,11	7,1	2,0	2,0	1,0
Ш-6	7,23	5,09	7,1	2,0	4,0	1,2
Ш-7	7,49	5,28	8,0	3,0	3,0	3,0
Ш-8	6,39	4,51	8,0	3,0	6,0	3,0
Ш-9	6,10	4,30	10	3,0	3,0	6,0
Ш-10	5,11	3,60	10	3,0	6,0	6,0
Ш-11	5,25	3,69	12	3,0	3,0	6,6
Ш-12	4,81	3,39	12	3,0	4,0	6,6
Ш-13	4,52	3,19	12	3,0	5,0	6,6
Ш-14	4,33	3,05	12	3,0	6,0	6,6
Ш-15	3,88	2,73	15	4,0	5,0	19
Ш-16	3,28	2,31	15	4,0	10	19
Ш-17	3,50	2,46	17	4,0	5,0	19
Ш-18	2,92	2,06	17	4,0	10	19
Ш-19	3,20	2,26	19	4,0	5,0	25
Ш-20	2,65	1,87	19	4,0	10	25
Ш-21	2,97	2,09	21	4,0	5,0	50
Ш-22	2,44	1,72	21	4,0	10	50
Ш-23	2,52	1,77	25	5,5	6,0	50
Ш-24	2,17	1,53	25	5,5	10	50
Ш-25	2,03	1,43	27	5,5	14	50
Ш-26	1,87	1,32	27	5,5	10	50

Параметры диэлектрических резонаторов типа "Ц"

Тип резонатора	Собственная частота f_0 , МГц		Размеры, мм		Масса, г, не более	Тип резонатора	Собственная частота f_0 , МГц		Размеры, мм		Масса, г, не более
	АЛТК	ТБНС	D	H			АЛТК	ТБНС	D	H	
Ц-1	18,1	12,75	3,0	1,0	0,8	Ц-16	5,61	3,95	8,0	6,0	3,0
Ц-2	15,29	10,78	3,0	2,0	0,8	Ц-17	5,60	3,95	10	3,0	5,0
Ц-3	14,57	10,26	4,1	1,0	0,8	Ц-18	4,69	3,31	10	6,0	5,0
Ц-4	11,98	8,45	4,1	2,0	0,8	Ц-19	4,43	3,13	10	8,0	5,0
Ц-5	11,61	8,18	4,1	2,3	0,8	Ц-20	4,94	3,48	12	3,0	19
Ц-6	12,77	8,99	5,0	1,0	1,0	Ц-21	4,07	2,87	12	6,0	19
Ц-7	10,33	7,28	5,0	2,0	1,0	Ц-22	3,63	2,55	15	5,0	19
Ц-8	8,86	6,25	5,0	4,0	1,0	Ц-23	3,06	2,16	15	10	19
Ц-9	9,05	6,50	6,0	2,0	1,5	Ц-24	3,31	2,33	17	5,0	20
Ц-9а	8,52	6,00	6,0	2,5	1,5	Ц-25	2,77	1,95	17	10	20
Ц-10	8,14	5,74	6,0	3,0	1,5	Ц-26	3,07	2,16	19	5,0	25
Ц-11	7,65	5,39	6,0	4,0	1,5	Ц-27	2,54	1,79	19	10	25
Ц-12	8,04	5,66	7,1	2,0	2,0	Ц-28	2,87	2,02	21	5,0	50
Ц-13	6,70	4,72	7,1	4,0	2,0	Ц-29	2,35	1,66	21	10	50
Ц-14	6,18	4,36	7,1	6,0	2,0	Ц-30	2,40	1,69	25	6,0	50
Ц-15	6,57	4,63	8,0	3,0	3,0	Ц-31	1,90	1,34	25	14	50

2.3. Пьезоэлектрические генераторы

Пьезоэлектрические генераторы (ПЭГ) — генераторы переменного напряжения, стабилизирующим элементом частоты которых является пьезоэлемент. Они используются для возбуждателей, гетеродинов, синтезаторов частоты, датчиков.

Назначение. Классификация

Классификация пьезоэлектрических генераторов (ПЭГ) приведена на рис. 1.4. Простые ПЭГ собирают чаще всего по схеме емкостной трехточки (рис. 2.10), в которой резонатор ZQ включают между базой и коллектором транзистора. Физические возможности снижения температурного дрейфа частоты простых генераторов ограничены.

Более высокую температурную стабильность обеспечивают термокомпенсированные и термостатированные генераторы.

В термокомпенсированных ПЭГ отклонение частоты в интервале рабочих температур можно уменьшить с помощью специальной электрической схемы (рис. 2.11). Здесь подстройка частоты осуществляется варикапом $KВ$, включенным в колебательный контур I автогенератора последовательно с резонатором ZQ . К варикапу прикладывается напряжение с термозависимой цепи 2, значение которого зависит от температуры. Такие генераторы могут быть с цифровым управлением. В этом случае управляющее напряжение формируется на выходе аналого-цифрового пре-

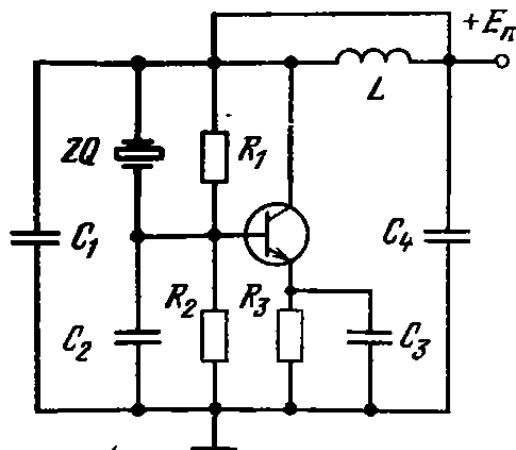


Рис. 2.10. Схема простого пьезо-электрического генератора

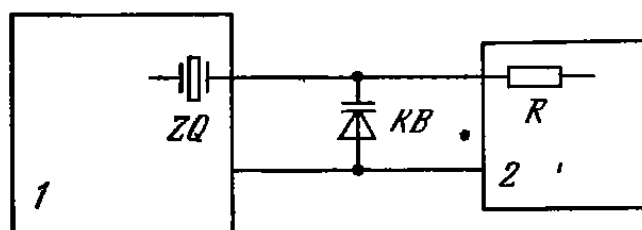


Рис. 2.11. Схема термокомпенсированного генератора

образователя в виде цифрового кода, который изменяется в соответствии с температурой. Такая схема обеспечивает более высокую стабильность частоты генератора $(1...2) \cdot 10^{-7}$.

Наиболее высокую стабильность частоты $(1...10) \cdot 10^{-8}$ обеспечивают термостабилизированные ПЭГ. В них термостабилизирован пьезоэлемент и при необходимости термостатируются и другие элементы электрической схемы. Термостатирование может быть внутреннее и внешнее. При внутреннем термостатировании резонатор с нанесенными на него пьезосторными пленками помещают в вакуумный стеклянный баллон. Терморегулятор обеспечивает поддержание температуры резонатора с большой точностью.

В управляемых ПЭГ частоту можно изменять внешним воздействием. Они используются для получения частотно-модулированного (манипулированного) сигнала. Первичный сигнал подается на варикап, включенный в цепь резонатора. Несущая частота модулированного колебания может быть до 50 МГц, а частота первичного сигнала — от 20 до нескольких сотен килогерц. Девиация частоты при модуляции находится в пределах 0,05...0,3 % от номинальной частоты, разнос частот при манипуляции не превышает 0,05...0,1 %.

Конструктивно ПЭГ выполняют дискретными, гибридными и интегральными. Лучшими характеристиками обладают интегральные ПЭГ. Здесь элементы схемы (за исключением активных) выполнены на одной пьезоэлектрической подложке методом планарной технологии. Активные элементы располагаются внутри корпуса ПЭГ. Интегральные ПЭГ работают в диапазоне частот 10...20 МГц, имеют $U_n = 3...7$ В, $U_{\text{вых}} = 0,002...0,3$ В, стабильность частоты в интервале температур $-50...+85$ °С менее $100 \cdot 10^{-6}$, а при изменении напряжения питания на ± 10 % не более $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$.

Обозначение пьезоэлектрических генераторов может быть полным и сокращенным. Полное обозначение содержит семь элементов:

- первый элемент — буквы ГК (генератор кварцевый);
- второй элемент — число, обозначающее регистрационный номер генератора;
- третий элемент — буква или сочетание букв, обозначающая (ее) функциональную особенность генератора (см. рис. 1.4);
- четвертый элемент — число, обозначающее класс точности настройки генератора (для 1-го класса точность настройки $\pm 1 \cdot 10^{-10}$, для 25-го класса $\pm 100 \cdot 10^{-6}$);
- пятый элемент — буква, обозначающая интервал рабочих температур (А — $+1...+55$ °С, ..., Н — $+75...+85$ °С);
- шестой элемент — буква, обозначающая температурную нестабильность частоты генератора в интервале рабочих температур (А — $\pm 1,0 \cdot 10^{-8}$, ..., Ц — $\pm 0,02$ %);
- седьмой элемент — число, обозначающее частоту (или шифр частоты генератора). При всеклиматическом исполнении генератора в конце обозначения указывается буква В.

Между элементами 2, 3, 4, 6, 7 и 8 ставится дефис.

Пример обозначения генератора: ГК12-ТК-17ЕМ-5М-В — термокомпенсированный кварцевый генератор с регистрационным номером 12, точность настройки $\pm 5 \cdot 10^{-6}$, предназначен для работы в интервале температур $-60 \dots +85^\circ\text{C}$, температурная нестабильность частоты в интервале рабочих температур $\pm 5 \cdot 10^{-6}$, номинальная частота 5 МГц, всеклиматического исполнения.

Сокращенное обозначение содержит элементы 1, 2, 3 и 7. Пример сокращенного обозначения: КГ17-УН-5М — управляемый напряжением кварцевый генератор с регистрационным номером 17, номинальная частота 5 МГц.

Основные параметры

Номинальная частота f_n — устанавливается нормативно-технической документацией.

Рабочая частота f_p — частота, измеренная в заданном рабочем режиме.

Точность настройки Δf — максимальное отклонение рабочей частоты от номинальной при температуре настройки.

Допускаемое отклонение частоты — максимальное отклонение частоты ПЭГ, работающего в заданных условиях, относительно номинальной частоты при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

Температурный коэффициент частоты — отношение производной частоты по температуре при заданной температуре к рабочей частоте ПЭГ.

Нестабильность частоты δ — изменение рабочей частоты, вызванное изменением напряжения питания, нагрузки, температуры.

Генераторы на ПАВ

Для генерации напряжения стабильной частоты в диапазоне СВЧ используются генераторы на ПАВ. Они находят применение в синтезаторах частоты, гетеродинах фиксированных и перестраиваемых частот, генераторах для датчиков температуры, давления, импульсных генераторах СВЧ. Генераторы на ПАВ в цепи положительной обратной связи имеют резонатор либо линию задержки на ПАВ.

Структурная схема генератора с резонатором на ПАВ приведена на рис. 2.12, а. Резонатор, выполненный на пьезоэлектрической подложке 4 с нанесенными на нее встречно-штыревыми преобразователями 3 и отражательными решетками 2, включен в цепь положительной обратной связи усилителя 1. При наличии на подложке нескольких различных ВШП можно получать различные частоты генератора.

Структурная схема генератора на ПАВ с частотной модуляцией (рис. 2.12, б) содержит линию задержки на ПАВ, включенную в цепь положительной обратной

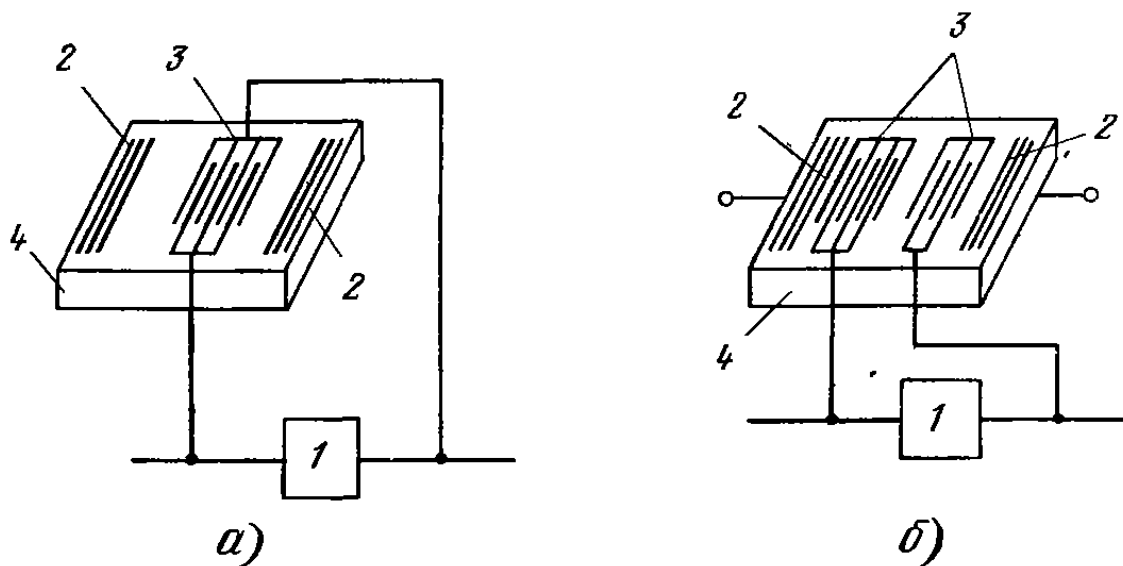


Рис. 2.12. Структурные схемы генераторов на ПАВ:

а — с резонатором; б — с линией задержки

Тип генератора	f_n , МГц	Δf , $\times 10^6$, не более	Температурная не- стабиль- ность частоты δ , $\times 10^6$	Пределы пере- стройки частоты ($f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}}$), $\times 10^6$	$U_{\text{вых}}$, В
Простые					
ГК17-П-П	10	—	± 40	—	0,15(25 $\pm 5^\circ$ C)
ГК17-П-И	10	—	± 10	—	0,15(25 $\pm 5^\circ$ C)
ГК17-01-П-Р	10...13,2	—	± 50	—	0,2...0,4
ГК17-01-П-М	10...13,2	—	± 25	—	0,2...0,4
ГК17-01-П-И	10...13,2	—	± 10	—	0,2...0,4
ГК17-01-П-К	10...13,2	—	± 15	—	0,2...0,4
ГК17-01-П-АИ	10...13,2	—	± 10	—	0,2...0,4
ГК17-02-П-И	100...132	—	± 10	—	0,15...0,3
ГК17-03-П-Н	100...132	—	± 30	—	0,3...0,6
ГК19-П-11АИ	50	± 5	± 10	—	4
ГК19-П-ВАК	50	± 10	± 15	—	4
ГК25-П	5	± 20	± 25	—	лог. 0 — 0,4 В; лог. 1 — 2,4 В
Прецизионные					
ГК18-П	0,08...5	± 10	± 40	± 20	лог. 0 — 0,4 В; лог. 1 — 2,4 В
ГК28-П	0,00122...5	± 10	± 40	± 20	лог. 0 — 0,1 В; лог. 1 — 4 В
Управляемые напря- жением					
ГК23-УН	5...14	± 10	} ± 40	± 100	0,15...1
ГК24-УН-11БЛ	11...18,5	± 5		± 100	0,15...1
ГК24-УН-13БР	18,5	± 10		—	—
Термокомпенсирован- ные					
ГК21-ТК	2...30	—	± 5	± 5	0,15
ГК25-ТК	0,01...5	—	± 1	—	0,5...1,5
ГК26-ТК-ГЕ	10	—	$\pm 2,5$	—	лог. 0 — 0,4 В; лог. 1 — 2,4 В
Термостатированные					
ГК27-ТС-А	5/10	—	$\pm 0,75$	$\pm 0,5$	0,165 $\pm 0,04$ 0,225 $\pm 0,05$
ГК27-ТС-Б			$\pm 0,2$		
ГК27-ТС-В			$\pm 0,2$		
ГК27-ТС-Г			$\pm 0,05$		
ГК31-ТС-А	5	—	$\pm 0,01$	$\pm 0,35$	0,15
ГК31-ТС-Б			$\pm 0,05$	$\pm 0,55$	
ГК31-ТС-В			$\pm 0,025$	$\pm 0,35$	
Управляемый на ПАВ					
ГУПВ-1	10...300	± 20	± 400	0,015 %	$P_{\text{вых}}=5...10$ мВт

генераторов

$U_{\text{ип}}, \text{В}$	$I_{\text{пот}}, \text{мА},$ не более	$R_{\text{н}}, \text{кОм}$	$C_{\text{н}}, \text{пФ}$	Смена температур, $^{\circ}\text{С}$	Габарит- ный чер- теж кор- пуса
$5 \pm 5 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 60...+60	2
$5 \pm 5 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 10...+60	2
$5 \pm 10 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 50...+60	2
$5 \pm 10 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 30...+60	2
$5 \pm 10 \%$	15	$1 \pm 20 \%$	—	— 30...+60	2
$5 \pm 10 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 10...+60	2
$5 \pm 10 \%$	—	$1 \pm 20 \%$	—	— 10...+60	2
$5 \pm 1 \%$	—	$0,05 \pm 20 \%$	—	—	2
$5 \pm 5 \%$	—	$0,05 \pm 20 \%$	—	—	2
$6 \pm 10 \%$	1,5	51	—	— 50...+60	2
$6 \pm 10 \%$	1,5	51	—	— 60...+60	2
$5 \pm 10 \%$	50	—	—	— 10...+50	2
$5 \pm 10 \%$	65	$2 \pm 20 \%$	$15 \pm 20 \%$	— 60.. +85	2
$5 \pm 10 \%$	9	$2 \pm 20 \%$	$15 \pm 20 \%$	— 60...+85	2
$6,3 \pm 1 \%$	5	$1 \pm 20 \%$	—	— 60...+70	3
—	2	$0,47 \pm 0,02$	—	— 40...+70	3
$6 \pm 1 \%$	2,5	$1 \pm 0,02$	—	— 60...+70	3
$12 \pm 5 \%$ ($5 \pm 5 \%$)	12	$1 \pm 20 \%$	$20 \pm 20 \%$	— 60...+85	2
$12 \pm 5 \%$ ($5 \pm 5 \%$)	12	$0,6 \pm 20 \%$	$20 \pm 20 \%$	— 60...+85	2
$12 \pm 5 \%$ ($5 \pm 5 \%$)	10	$0,026 \pm 20 \%$	$10 \pm 20 \%$	— 60...+85	2
$12 \pm 1,2$	—	0,05	—	— 60...+70	4
$12 \pm 10 \%$	—	$0,045 \pm 10 \%$	—	— 10...+55 — 60...+70 — 60...+70	4
$12 \pm 1 \%$	40	0,05	—	— 60...+85	1

связи усилителя. Торцы подложки линии задержки металлизировуют и подают на них модулирующее напряжение, под действием которого (вследствие пьезоэффекта) изменяется длина линии задержки, что приводит к изменению времени задержки, а следовательно, к изменению частоты генератора.

Изменение частоты генераторов на ПАВ во времени из-за старения, обусловленное изменением параметров звукопровода (подложки), примерно на порядок больше изменения частоты генераторов с кварцевыми резонаторами, использующими объемную волну. Поэтому основной областью их применения следует считать устройства, где необходимы широкие пределы перестройки по частоте, а к стабильности частоты жестких требований не предъявляется.

Справочные данные

Ниже приводятся таблицы значений параметров основных типов генераторов отечественного производства (табл. 2.7) и назначения выводов корпусов (табл. 2.8).

Назначение выводов генераторов

Тип генератора	1	2	3	4	5	6
ГК17-П	Выход	— 12 В	—	— 5 В	Подстройка	—
ГК17-01-П	То же	— 5,2 В	—	—	—	—
ГК17-02-П	”	— 5 В	—	Подстройка	—	—
ГК17-03-П	”	—	—	То же	—	—
ГК18-П	—	5,12...2,56 МГц	2,56...1,28 МГц	1,28...0,64 кГц	640...320 кГц	320...160 кГц
ГК19-П	—	+6 В	—	Общий	Выход	—
ГК21-ТК	— 12 В	+12 В	—	Выход	Общий	—
ГК23-УН	Выход	—	+6,3 В	—	— 6,3 В	—
ГК24-УН	1...5 В	—	—	— 6 В	Выход	—
	0...16 В					
ГК25-П	—	—	—	—	—	—
ГК26-ТК	— 12 В	+12 В	—	Выход	—	—
ГК27-ТС	+8 В; $U_{оп. вых}$	+12 В	5 МГц	10 МГц	+ $U_{упр}$	—
ГК28-П	—	5,0...2,5 МГц	2,5...1,25 МГц	1,25...0,625 кГц	625...312 кГц	312,5...156,25 кГц
ГК31-ТС	+ $U_{упр}$	8 В; $U_{оп. вых}$	+12 В	5 МГц	Контроль	+27 В
ГЧПБ-1	+ $U_{упр}$	$U_{ин}$	Выход	—	—	—

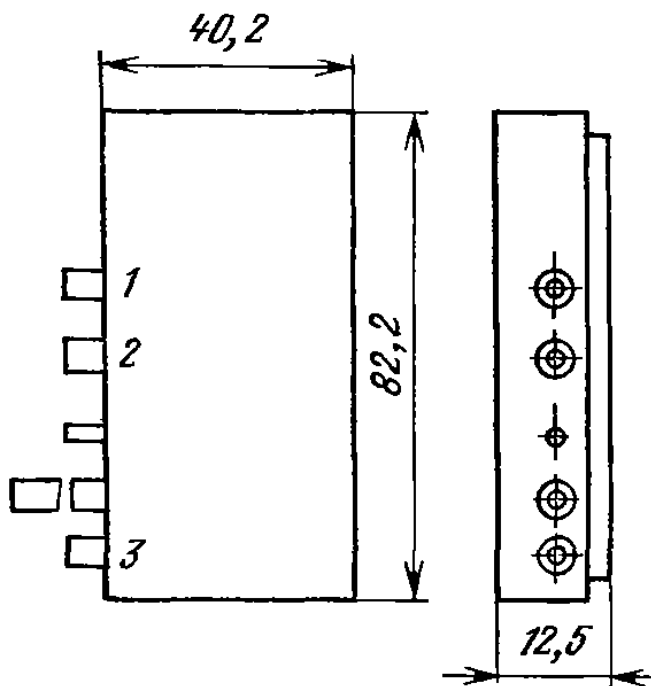
Окончание табл. 2.8

[illegible]

Габаритные чертежи корпусов генераторов

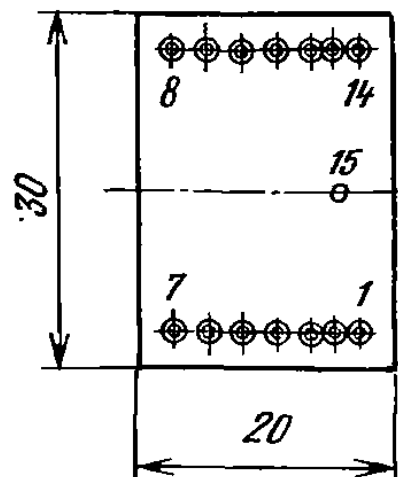
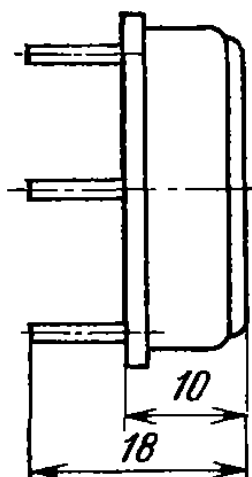
ГУПВ-1

1



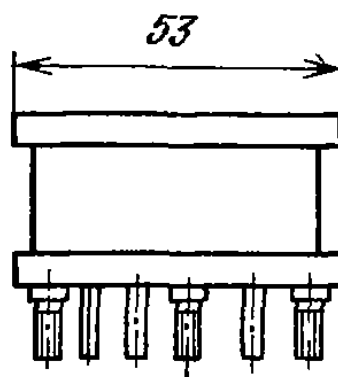
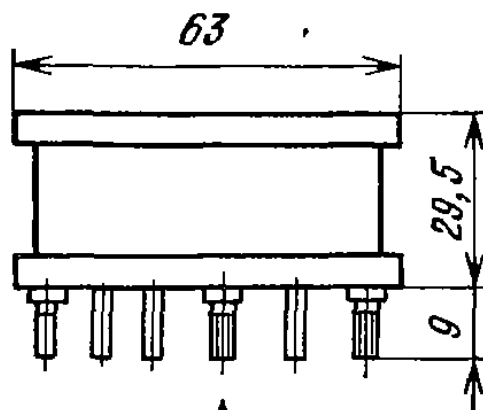
ГК17-П, ГК18-П, ГК19-П, ГК21-ТК,
ГК25-П, ГК26-ТК, ГК28-П,
ГК25-ТК

2



ГК27-ТС, ГК31-ТС

4

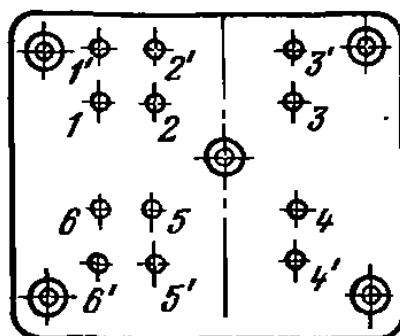
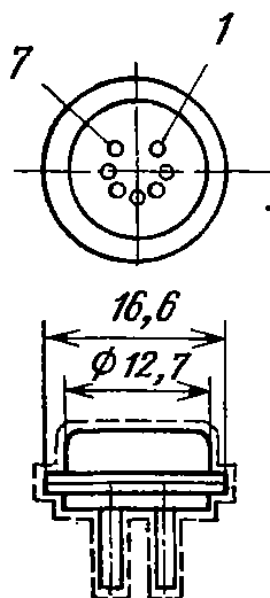


Вид А

↑ A

ГК23-УН,
ГК24-УН

3



3. Приборы селекции частоты

Назначение. Классификация

К приборам селекции частоты относятся пьезоэлектрические фильтры (ПЭФ), служащие для выделения (подавления) определенного спектра колебаний. Эти фильтры благодаря высокой добротности пьезоэлектрических резонаторов, входящих в их состав, имеют значительно большую крутизну частотной характеристики затухания, большее затухание в полосе задерживания и большую стабильность характеристик, чем фильтры, изготовленные на катушках индуктивности и конденсаторах.

Классификация пьезоэлектрических фильтров производится по различным признакам (рис. 3.1): материалу пьезоэлектрика; функциональному назначению;

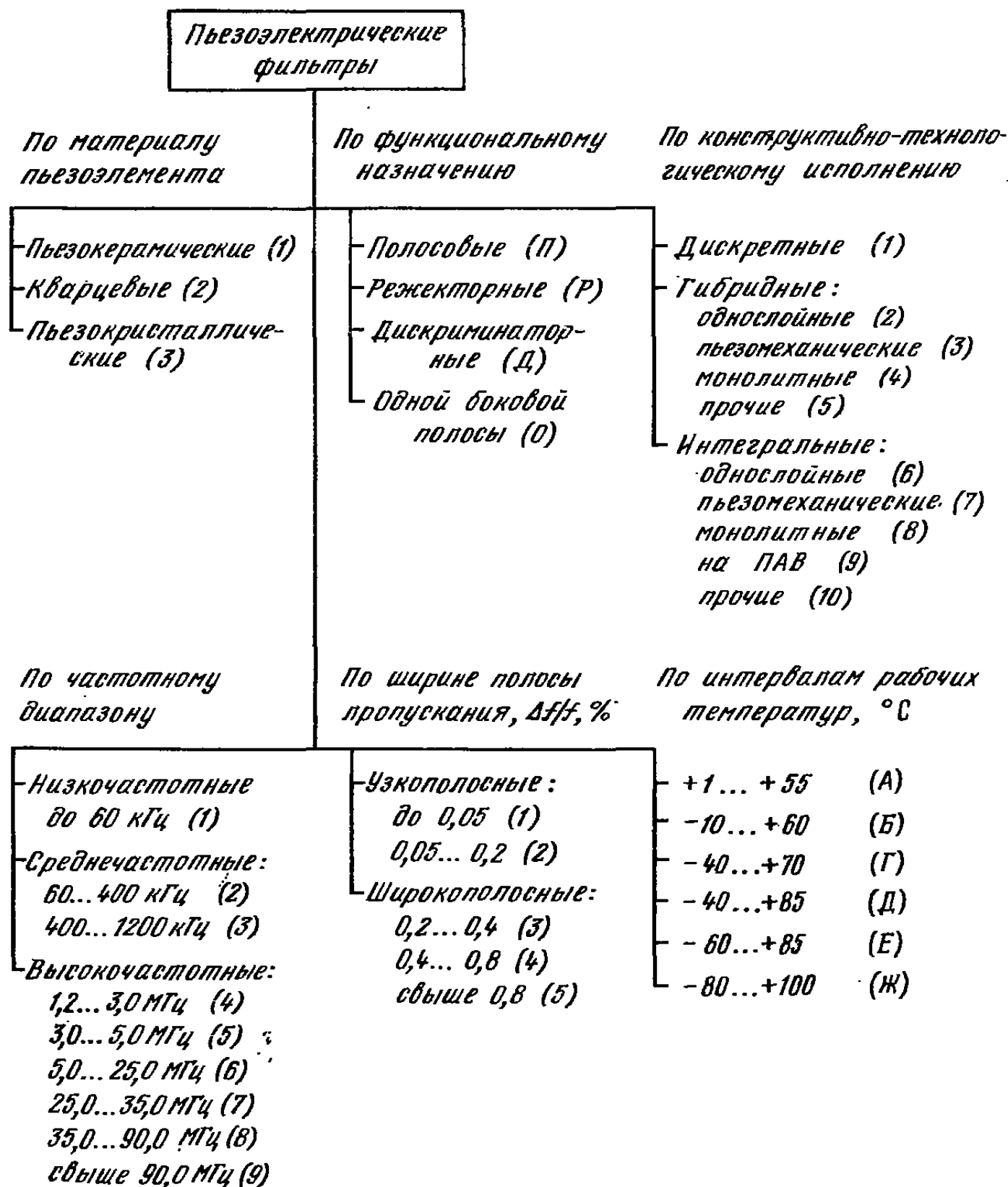


Рис. 3.1. Классификация пьезоэлектрических фильтров

частотному диапазону; ширине полосы пропускания; конструктивно-технологическому исполнению; интервалу рабочих температур.

Полосовой ПЭФ имеет одну или более полос пропускания, расположенных между заданными полосами задерживания. ПЭФ одной боковой полосы предназначен для выделения верхней или нижней боковой полосы спектра модулированного сигнала. Режекторный ПЭФ имеет одну или более полос задерживания, расположенных между заданными полосами пропускания. Дискриминаторный ПЭФ обеспечивает на выходе постоянное напряжение, изменяющееся по уровню и знаку в зависимости от частоты входного переменного напряжения. Гребенка ПЭФ — это полосовые или (и) режекторные ПЭФ с определенным законом расположения полос пропускания или (и) задерживания с заданным уровнем пересечения частотных характеристик затухания.

Однослойный ПЭФ имеет гальваническую, а монолитный ПЭФ — акустическую связь между точечными резонаторами, установленными на пьезоэлектрической подложке. Однослойные ПЭФ изготавливают на частоты 3...30 кГц, монолитные — 2...150 кГц.

Указанная классификация положена в основу условного обозначения ПЭФ. Оно включает несколько элементов:

первый элемент — буквы ФП (фильтр пьезоэлектрический);

второй элемент — цифра, обозначающая материал пьезоэлемента: 1 — керамика, 2 — кварц, 3 — пьезокристаллы, отличные от кварца и керамики;

третий элемент — буква, обозначающая функциональное назначение фильтра: П — полосовой, Р — режекторный, Д — дискриминаторный, Г — гребенчатый, О — одной боковой полосы;

четвертый элемент — цифра, обозначающая конструктивно-технологическое исполнение фильтра;

пятый элемент — двух- или трехзначное число, обозначающее порядковый регистрационный номер разработки;

шестой элемент — число, обозначающее номинальную частоту (или шифр), и буква, обозначающая единицу измерения частоты: К (кГц) или М (МГц);

седьмой элемент — число, соответствующее ширине полосы пропускания (задерживания) в килогерцах или герцах;

восьмой элемент — буква, характеризующая условия эксплуатации (В — всеклиматические);

девятый элемент — буква, обозначающая интервал рабочих температур.

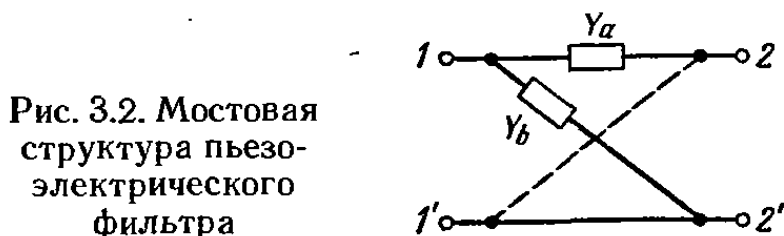
Между элементами 4 и 5, 5 и 6, 6 и 7, 7 и 8 ставится дефис.

Пример обозначения пьезоэлектрического фильтра: ФП2П2-06-500К-300ВЕ — фильтр пьезоэлектрический кварцевый, полосовой, гибридный, однополосный, с регистрационным номером 06, номинальная частота 500 кГц, полоса пропускания 300 Гц, всеклиматического исполнения, интервал рабочих температур — 60...+85 °С.

Применяется также сокращенное обозначение фильтров, состоящее из пяти первых элементов.

Большинство ПЭФ имеют мостовую структуру (рис. 3.2). В качестве элементов с проводимостями Y_a и Y_b используются один или несколько пьезоэлектрических резонаторов и другие элементы.

С целью экономии резонаторов в структуру фильтра вводят дифференциальный трансформатор TV . Его получают из обычного трансформатора с малой индуктивностью рассеяния, в котором индуктивность холостого хода компенсируется емкостью конденсатора, включенного параллельно первичной обмотке. В результате образуется параллельный колебательный контур, который настраивается на среднюю частоту полосы пропускания фильтра.



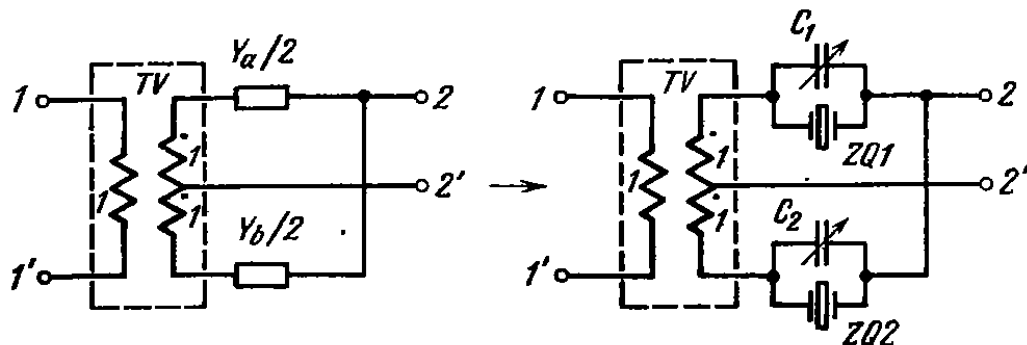


Рис. 3.3. Схема мостового фильтра

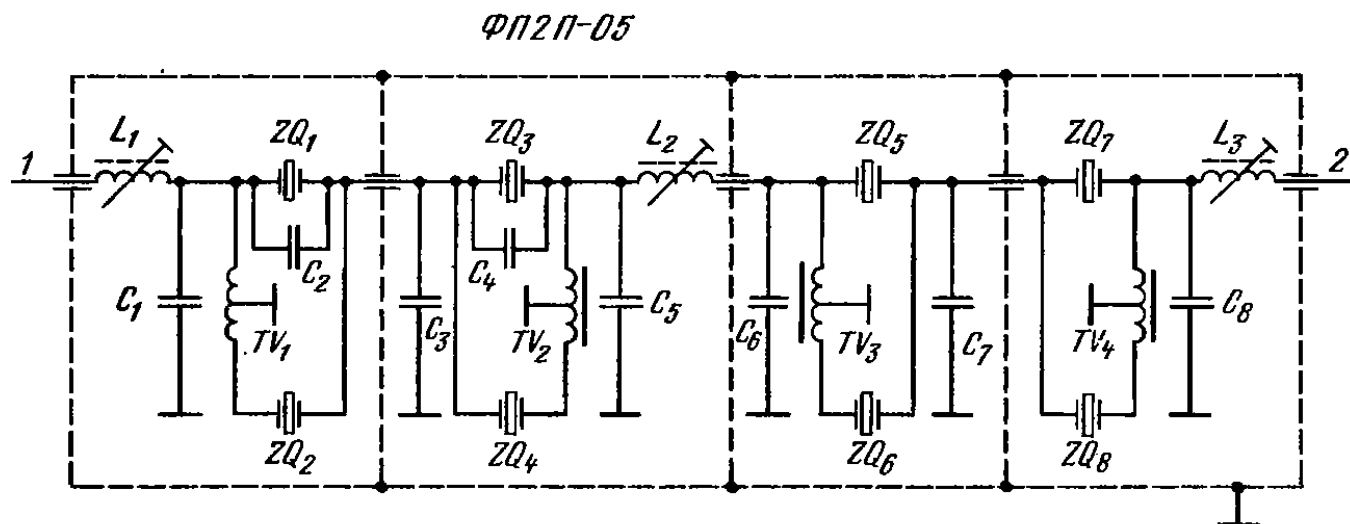


Рис. 3.4. Схема полосового фильтра ФП2П-05

Для эквивалентности мостовой схемы и схемы с дифференциальным трансформатором проводимости двухполюсников в ветвях схемы с дифференциальным трансформатором должны быть в 2 раза меньше проводимостей двухполюсников Y_a и Y_b мостовой схемы. Схема ПЭФ с дифференциальным трансформатором изображена на рис. 3.3. Она содержит в каждой ветви резонаторы $ZQ1$, $ZQ2$ с параллельно подключенными конденсаторами $C1$, $C2$. На рис. 3.4 в качестве примера изображена принципиальная электрическая схема полосового фильтра ФП2П-05.

Основные параметры и характеристики

Основной характеристикой ПЭФ является зависимость затухания a (степень уменьшения амплитуды сигнала) от частоты. Эта характеристика называется *частотной характеристикой затухания* (ЧХЗ). При согласованной нагрузке ($R_n = R_0$)

$$a = \lg \left[1 + \frac{(R_0^2 + X_a X_b)^2}{R_0^2 (X_b - X_a)^2} \right], \quad (3.1)$$

где $X_a = 1/jY_a$; $X_b = 1/jY_b$; R_0 — характеристическое сопротивление фильтра.

Из выражения (3.1) следует, что фильтр может иметь всплески затухания ($a \rightarrow \infty$), если на соответствующих частотах выполняется соотношение $X_a = X_b$, и нули затухания ($a \rightarrow 0$) на частотах, на которых $X_a X_b = -R_0^2$.

Частотные характеристики затухания реальных фильтров имеют конечные значения затухания в полосе задерживания и отличное от нуля затухание в полосе пропускания.

Частоты среза чаще всего определяются на нижних уровнях $f_{c1} = 3$ дБ (6 дБ) и верхних уровнях $f_{c2} = 50$ дБ (60 дБ).

Средняя частота полосы пропускания (задерживания) определяется как среднее арифметическое значение частот среза f_{c1} и f_{c2} :

$$f_{cp} = (f_{c1} + f_{c2}) / 2.$$

Отклонение средней частоты от номинальной $\delta f = f - f_{ном}$; $\delta f = \pm(0,1 \dots 1,5)\%$.

Ширина полосы пропускания (задерживания) $\Delta f = f_{c2} - f_{c1}$.

Отклонение ширины полосы пропускания (задерживания) от номинального значения $\delta \Delta f = \Delta f - \Delta f_{ном}$.

Максимальное значение относительной ширины полосы пропускания фильтра примерно вдвое превышает ширину относительного резонансного промежутка резонаторов, т. е.

$$\left(\frac{f_{c2} - f_{c1}}{f_s} \right)_{\max} \approx 2 \frac{f_n - f_s}{f_s},$$

где f_s — частота последовательного резонанса; f_n — частота параллельного резонанса.

Минимальная и максимальная допустимая ширина полосы пропускания на уровне 3 дБ

$$\Delta f_{\min} = \frac{\sqrt{2} f_{\Phi}}{Q} = (0,001 \dots 0,005) \% f_{cp},$$

$$\Delta f_{\max} = \frac{f_{\Phi}}{\sqrt{2} r} = (0,25 \dots 0,3) \% f_{cp}.$$

Вносимое затухание определяется как десять логарифмов отношения мощности P_0 , развиваемой источником сигнала на выходном нагрузочном сопротивлении (равном сопротивлению источника сигнала) без фильтра, к мощности $P_{вых}$, развиваемой на том же сопротивлении после включения фильтра:

$$a_{вн} = 10 \lg \frac{P_0}{P_{вых}} = 20 \lg \left| \frac{E_0}{2 U_{вых}} \right| + 10 \lg \frac{R_2}{R_1} - 20 \lg \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

где E_0 — напряжение источника сигнала.

Неравномерность затухания определяется в полосе пропускания как разность между максимальным и минимальным вносимыми затуханиями:

$$\Delta a = a_{вн. \max} - a_{вн. \min}; \quad \Delta a = 0,25 \dots 3,0 \text{ дБ}.$$

Относительное затухание ПЭФ — разность между вносимым затуханием на заданной частоте и вносимым затуханием в полосе пропускания (задерживания).

Гарантированное затухание $a_{гар}$ в полосе задерживания зависит от числа звеньев фильтра и принимает значение 20...80 дБ.

Затухание передачи определяется как двадцать логарифмов отношения напряжения $U_{вх}$ на входном нагрузочном сопротивлении R_1 фильтра к напряжению $U_{вых}$ на выходном нагрузочном сопротивлении R_2 при $f = f_{ном}$:

$$a_{пер} = 20 \lg \frac{U_{вх}}{U_{вых}}; \quad a_{пер} = 3 \dots 20 \text{ дБ}.$$

Коэффициент передачи является отношением выходного напряжения к входному:

$$K_{пер} = U_{вых} / U_{вх}; \quad K_{пер} = 0,01 \dots 10.$$

Коэффициент прямоугольности определяет крутизну частотной характеристики затухания фильтра (ЧХЗ):

$$K_{п} = \Delta f_1 / \Delta f; \quad K_{п} = 1,2 \dots 10,$$

где Δf_1 — полоса пропускания (задерживания) по заданному верхнему уровню относительного затухания (20...100 дБ); Δf — полоса пропускания (задерживания) по нижнему уровню относительного затухания 3 или 6 дБ.

Коэффициент прямоугольности увеличивается с ростом числа резонаторов n , входящих в фильтр, так как при этом увеличивается крутизна спада ЧХЗ у границы полосы пропускания. Коэффициенты прямоугольности, рассчитанные для различных значений, приведены в табл. 3.1.

Ряды стандартизированных параметров ПЭФ приводятся в нормативно-технической документации.

На рис. 3.5 изображена ЧХЗ полосового фильтра, где f_{c1} и f_{c2} — нижняя и верхняя частоты среза по уровню 6 дБ; f_{c3} и f_{c4} — нижняя и верхняя частоты среза по уровню 60 дБ; Δf и Δf_1 — полосы пропускания по уровню 6 дБ и 60 дБ соответственно.

По мере расширения возможностей РЭА пьезоэлектрические фильтры находят в ней все более широкое применение. Они применяются в приемниках фиксированных частот, в качестве входных контуров, в схемах частотных детекторов, в стабильных по частоте генераторах гармонических колебаний, в усилителях промежуточной частоты (УПЧ), в избирательных усилителях, в качестве фильтра-пробки на входе приемника и т. п.

Т а б л и ц а 3.1

Коэффициенты прямоугольности частотных характеристик ПЭФ

$\Delta f_1 / \Delta f$	Число резонаторов								
	1	2	3	4	6	8	10	12	16
30/3	31,6	5,6	3,16	2,36	1,78	1,54	—	1,13	1,24
60/6	575	24	8,3	4,9	2,87	2,2	—	1,69	1,49
60/3	1000	3,16	70	5,6	3,16	2,36	—	1,78	1,54

Применение ПЭФ во входных цепях и УПЧ приемников обеспечивает малое затухание сигнала, большую прямоугольность и небольшую неравномерность характеристики затухания в полосе пропускания, малый уровень шума и т. п. В качестве примера на рис. 3.6 приведена схема включения ПЭФ в УПЧ приемника.

При однополосной передаче информации применяются фильтры, имеющие несимметричную ЧХЗ, соответствующую спектру боковой полосы сигнала.

Основным условием правильного применения фильтра в РЭА является соблюдение требований технических условий по согласованию его входных и выходных сопротивлений с сопротивлениями нагрузок, уровней входных и выходных сигналов.

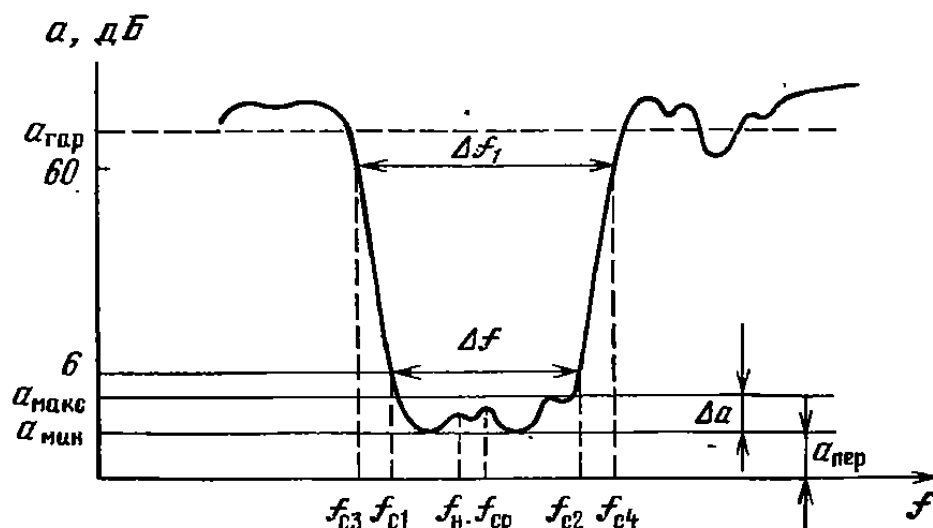
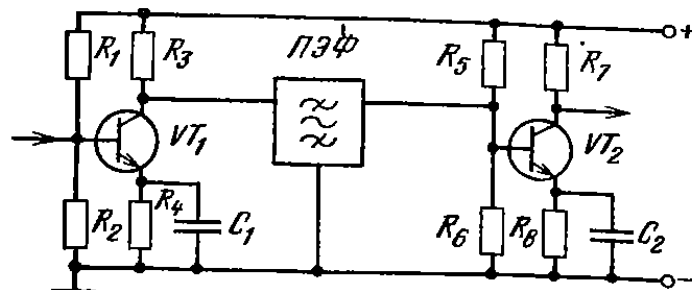


Рис. 3.5. Частотная характеристика затухания полосового фильтра

Рис. 3.6. Схема включения фильтра в усилителе промежуточной частоты



Основные параметры полосовых фильтров приведены в табл. 3.2, 3.3.

Фильтры на ПАВ

Фильтры на ПАВ составляют особую группу приборов. Их работа основана на явлении избирательного приема и передачи акустических волн, бегущих вдоль поверхности пьезоэлектрической подложки.

Существенное влияние на форму АЧХ фильтра оказывает вид закона перекрытия штырей (аподизация) входного и выходного ВШП. Амплитудно-частотная характеристика ВШП с одинаковой глубиной вложения штырей изменяется по закону $\sin x/x$ (рис. 3.7). Эта характеристика имеет главный и боковые лепестки. С помощью аподизации можно уменьшить уровни боковых лепестков. При этом каждая пара штырей возбуждает ПАВ различной интенсивности. Закон перекрытия штырей должен соответствовать требуемой импульсной характеристике фильтра.

Как известно, импульсная характеристика фильтра связана с его АЧХ преобразованием Фурье: при перекрытии штырей по закону e^{-x^2} АЧХ фильтра будет иметь колоколообразную форму; если штыри перекрываются по закону $\sin x/x$, то АЧХ фильтра будет прямоугольной. Таким образом, изменяя закон перекрытия штырей ВШП, можно управлять импульсной и амплитудно-частотной характеристиками фильтра. Конструкции ВШП, обеспечивающие различные АЧХ, изображены на рис. 3.8.

Частотная характеристика фильтра определяется произведением частотных характеристик входного и выходного ВШП. При идентичности обоих ВШП АЧХ каждого из них соответствует квадратному корню из АЧХ фильтра.

Полосовые фильтры на ПАВ реализуют на основе аподизированных и неаподизированных ВШП, многополосковых ответвителей (рис. 3.9). Топологию ВШП рассчитывают с использованием рядов Фурье, а затем переходят от временного сигнала к пространственному.

Дисперсионные фильтры реализуются на основе ВШП или отражательных структур с неэквидистантной расстановкой электродов (рис. 3.10, а, б), рассчитываемых по формуле

$$2\pi \left[f_0 \frac{X_n}{V} \pm \frac{\Delta f}{2t_n} \left(\frac{X_n}{V} \right)^2 \right] = \pi n + D_0,$$

где f_0 — центральная частота; Δf — полоса пропускания; t_n — длительность импульсного отклика; X_n — координата n -го электрода; D_0 — постоянная.

Лучшие характеристики реализуются в дисперсионных фильтрах на отражательных решетках (рис. 3.10, в). Здесь дисперсионные свойства задаются геометрией наклонных отражательных решеток. Промежуток между элементами отражателей возрастает или убывает в зависимости от расстояния до ВШП. При равенстве этого промежутка длине ПАВ последняя отражается под углом 90° . Вторая решетка зеркально симметрична первой и обеспечивает движение ПАВ к выходному ВШП.

Для снижения влияния температуры на характеристики фильтра используют конструкцию (рис. 3.10, г), в которой ПАВ, распространяясь между входным и выходным ВШП, проходит равный путь в двух противоположных направлениях, в результате чего компенсируются температурные изменения угла отражения.

Параметры пьезоэлектрических

Тип фильтра	f_n , МГц	δf	Δf , кГц
1	2	3	4
Дискриминаторные фильтры			
ФП2Д-9-00...07	10,7...11	± 350 Гц	± 20
ФП2Д-90-08...15	10,7...10,8	± 350 Гц	± 15
ФП2Д4-016	5,0475	$\pm 75 \cdot 10^{-6}$	2
Полосовые фильтры			
ФП2П-02	4...50 кГц	$\pm (30...50) \cdot 10^{-6}$	$(0,015...0,1)f_n$
ФП2П-03	50...400 кГц	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	$(0,015...0,1)f_n$
ФП2П-05	20...35	$\pm 1,5$ кГц	20 ± 5
ФП2П-06	33...75	± 3 кГц	45 ± 8
ФП2П-364	18,5	—	20
ФП201-287	2,5	—	1,5
ФП2П1-288	2,5	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	1,5
ФП2П4-10	80...120	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	43; 60
ФП2П4-12	90...150	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	$(140...220) \cdot 10^{-6}f_n$
ФП2П4-282	20...28,1	$\pm 75 \cdot 10^{-6}$	15...45
ФП2П4-414	7...27	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	12; 20
ФП2П4-432	7...27	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	12; 45
ФП2П4-426	5,008...5,013	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	$(1700 \pm 50) \cdot 10^{-6}f_n$
ФП2П4-427	5	—	$(1200 \pm 100) \cdot 10^{-6}f_n$
ФП2П4-436	10,7	—	15
ФП2П4-442	9,5	—	—
ФП2П4-442-01	10,7	—	—
ФП2П4-442-02	12,5	—	—
ФП2П4-467	52,5	—	—
ФП2П5-456	56,39; 55; 60	$\pm 75 \cdot 10^{-6}$	100
ФП2П6-42	3,3...25	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	10
ФП2П6-418	2,048	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	—
ФП2П6-419	34	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	—
ФП2П8-281	20...52	$\pm (130...75) \cdot 10^{-6}$	49...115
ФП2П8-437	23...27	$\pm 100 \cdot 10^{-6}$	$3600 \cdot 10^{-6}f_n$
ФП2П8-438	60...80	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	$425 \cdot 10^{-6}f_n$
ФП2ПГ4-49	4,9...5	—	3...4
ФП2ПГ4-50	5...5,1	—	5...6
ФП3П4-430	12	± 10	170 ± 10
ФП3П4-430-01	12	± 15	350 ± 20
ФП3П4-430-02	12	± 20	400 ± 30
ФП3П4-430-03	12	± 6	84 ± 6
ФП3П4-430-04	12,055	± 10	170 ± 10
ФП3П4-430-05	12,1	± 10	190 ± 10
ФП3П4-430-10	15	± 6	175 ± 10
ФП3П4-430-11	15	± 8	335 ± 15
ФП3П4-430-12	15	± 13	630 ± 20
Режекторные фильтры			
ФП2Р4-018	10	—	± 300
ФП2Р4-018-01	15	—	± 300
ФП2Р4-018-02	20	—	± 300

кварцевых фильтров

$\delta\Delta f$, не более	$a_{\text{пер}}$, дБ, не более	Δa , дБ, не более	$a_{\text{гар}}$, дБ, не менее
5	6	7	8
—	—	—	—
—	40	—	—
± 75	—	—	—
± 60	—	2	50
± 60	—	2	60
± 60	14	2	70 ($f_H \pm 2$ МГц)
—	18	2	60 ($f_H \pm 2$ МГц)
—	6	3	70
—	14	1	80; $f_H \pm (6,6 \dots 15)$ кГц
± 50	10	1	50; $f_H \pm (3,6 \dots 15)$ кГц
± 75	—	2	50 ($f_H \pm 1$ МГц)
± 20	10	1	40 ($f_H \pm 2$ МГц)
± 100	10	2	70 ($f_H \pm 0,1 \dots 2$ МГц)
± 3	—	2,5	80
± 3	—	2,5	80
—	14	—	80
—	10	—	—
—	—	2	—
—	10	2	90
—	—	—	90
—	—	—	90
—	—	—	60 (от $f_H \pm 60$ кГц до $f_{\text{ном}} \pm 2,06$ МГц)
± 75	14	1,5	60 ($f_H \pm 2$ МГц)
—	8	0,5	40 ($f_H \pm 175$ кГц)
—	—	2	30
—	—	1	30
—	10	1	—
± 200	10	2	50 ($f_H \pm 5$ МГц)
± 60	14	2	60 ($f_H \pm 2$ МГц)
—	12	2,5	80
—	12	2,5	80
—	—	2	40
—	—	2	40
—	—	2	40
—	—	2	40
—	—	2	40
—	—	2	40
—	—	2	50
—	—	2	50
—	—	2,5	50
—	—	1,5	50
—	—	1,5	50
—	—	1,5	50

Тип фильтра	$K_{\text{пер}}$ по уровням, дБ (верхний/нижний)	$R_{\text{вх}}$, кОм
1	9	10
Дискриминаторные фильтры		
ФП2Д-9-00...07	—	—
ФП2Д-90-08...15	—	—
ФП2Д4-016	—	3,3 кОм $\pm 10\%$
Полосовые фильтры		
ФП2П-02	6(50/3)	0,8...10 кОм $\pm 10\%$
ФП2П-03	6(50/3)	0,8...10 кОм $\pm 10\%$
ФП2П-05	3(60/3)	1 кОм $\pm 10\%$
ФП2П-06	4(60/3)	1 кОм $\pm 10\%$
ФП2П-364	—	3,5 кОм $\pm 10\%$
ФП201-287	—	1 кОм $\pm 5\%$
ФП2П1-288	5(50/3)	1,6 кОм $\pm 5\%$
ФП2П4-10	5(50/3)	200 Ом $\pm 10\%$
ФП2П4-12	—	1 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-282	5(60/3)	1,2 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-414	2(60/6)	1...8 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-432	2(60/6)	—
ФП2П4-426	3(80/3)	1,2 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-427	2,2(80/3)	10 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-436	—	3,9 кОм $\pm 10\%$
ФП2П4-442	2,3(90/6)	4 кОм
ФП2П4-442-01	2,3(90/6)	2,8 кОм
ФП2П4-442-02	2,3(90/6)	2,2 кОм
ФП2П4-467	—	—
ФП2П5-456	3(40/3)	200 Ом $\pm 10\%$
ФП2П6-42	—	—
ФП2П6-418	7(30/5)	3,5 кОм $\pm 5\%$
ФП2П6-419	7(30/5)	750 Ом $\pm 10\%$
ФП2П8-281	6(30/3)	—
ФП2П8-437	3(50/3)	6,8 кОм $\pm 10\%$
ФП2П8-438	3(50/3)	3,3 кОм $\pm 10\%$
ФП2ПГ4-49	2,5(80/3)	2,4 кОм $\pm 10\%$
ФП2ПГ4-50	2,5(80/3)	2,4 кОм $\pm 10\%$
ФП3П4-430	3,5(10/3)	900 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-01	3(40/3)	2000 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-02	—	2000 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-03	3,8(40/3)	330 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-04	3,5(40/3)	900 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-05	3,2(40/3)	1,1 кОм $\pm 10\%$
ФП3П4-430-10	3,6(40/3)	390 Ом $\pm 10\%$
ФП3П4-430-11	3,2(40/3)	1,1 кОм $\pm 10\%$
ФП3П4-430-12	3(40/3)	1,1 кОм $\pm 10\%$
Режекторные фильтры		
ФП2Р4-018	—	1,2 кОм
ФП2Р4-018-01	—	820 Ом
ФП2Р4-018-02	—	560 Ом

ФП2П4-410
46

$C_{вх}, пФ$	$R_{вых}, кОм$	$C_{вых}, пФ$	Габаритный чертеж корпуса
11	12	13	14
—	—	—	1
—	—	—	1
15 пФ $\pm 10\%$	6,8 кОм	—	17
20 ± 10 пФ	0,8...10 кОм $\pm 10\%$	20 ± 10 пФ	2
20 ± 10 пФ	0,8...10 кОм $\pm 10\%$	20 ± 10 пФ	14
10 пФ $\pm 5\%$	1 кОм $\pm 10\%$	10 пФ $\pm 5\%$	9
10 пФ $\pm 5\%$	1 кОм $\pm 10\%$	10 пФ $\pm 5\%$	10
—	3,5 кОм $\pm 10\%$	—	8
27 пФ $\pm 10\%$	1 кОм $\pm 5\%$	27 пФ $\pm 5\%$	14
27 пФ $\pm 10\%$	1,6 кОм $\pm 5\%$	27 пФ $\pm 10\%$	14
10 $\pm 0,5$ пФ	200 Ом $\pm 10\%$	10 $\pm 0,5$ пФ	4
1,5 $\pm 0,5$ пФ	0,3 кОм $\pm 10\%$	5 $\pm 0,8$ пФ	18
2,5 ± 1 пФ	1,2 кОм $\pm 10\%$	2,5 ± 1 пФ	13
До 4,5 $\pm 10\%$	1...8 кОм $\pm 10\%$	До 4,5 $\pm 10\%$	12
—	—	—	12
20 пФ $\pm 10\%$	1,2 кОм $\pm 10\%$	20 пФ $\pm 10\%$	12
—	10 кОм $\pm 10\%$	—	12
—	3,9 кОм $\pm 10\%$	—	16
—	4 кОм	—	3
—	2,8 кОм	—	3
—	2,2 кОм	—	3
—	—	—	11
10 ± 1 пФ	200 Ом $\pm 10\%$	10 ± 1 пФ	4
—	—	—	8
7 пФ $\pm 5\%$	3,6 кОм $\pm 5\%$	7 пФ $\pm 5\%$	6
10,7 пФ $\pm 3\%$	750 Ом $\pm 10\%$	10,7 пФ $\pm 3\%$	8
—	—	—	5
1,1 $\pm 0,25$ пФ	6,8 кОм $\pm 10\%$	1,1 $\pm 0,25$ пФ	5
—	3,3 кОм $\pm 10\%$	—	7
10 пФ $\pm 10\%$	2,4 кОм $\pm 10\%$	10 пФ $\pm 10\%$	12
10 пФ $\pm 10\%$	2,4 кОм $\pm 10\%$	10 пФ $\pm 10\%$	12
11,2 пФ $\pm 10\%$	900 Ом $\pm 10\%$	$\pm 10\%$	8
3,2 пФ $\pm 5\%$	200 Ом $\pm 10\%$	3,2 пФ $\pm 5\%$	8
3,2 пФ $\pm 5\%$	200 Ом $\pm 10\%$	3,2 пФ $\pm 5\%$	8
21 пФ $\pm 10\%$	330 Ом $\pm 10\%$	21 пФ $\pm 10\%$	8
11,2 пФ $\pm 10\%$	900 Ом $\pm 10\%$	11,2 пФ $\pm 10\%$	8
6,9 пФ $\pm 10\%$	1,1 кОм $\pm 10\%$	6,9 пФ $\pm 10\%$	8
15,7 пФ $\pm 10\%$	390 Ом $\pm 10\%$	15,7 пФ $\pm 10\%$	8
6,9 пФ $\pm 10\%$	1,1 кОм $\pm 10\%$	6,9 пФ $\pm 10\%$	8
6,9 пФ $\pm 10\%$	1,1 кОм $\pm 10\%$	6,9 пФ $\pm 10\%$	8
1,5 пФ	1,2 кОм	1,5 пФ	15
3 пФ	820 Ом	3 пФ	15
3,9 пФ	560 Ом	3,9 пФ	15

Параметры пьезоэлектрических

Тип фильтра	$f_{\text{ном}}$	f_{c1} , МГц (уровень)	f_{c2} , МГц (уровень)	Δf , кГц (уровень)
ФП1Г1-1	412...612 кГц	—	—	—
ФП1Г1-2	1116...2356 кГц	—	—	—
ФП1Г1-4	816 кГц	—	—	—
ФП1Г4-1	10 560...22 372 кГц	—	—	$5,6 \pm 1,2$ (6 дБ)
ФП1П1-10	465 ± 2 кГц	—	—	—
ФП1П1-60,01	—	—	—	4...6 (6 дБ)
ФП1П1-60,02	—	—	—	8...11 (6 дБ)
ФП1П1-60,03	—	—	—	12...14 (6 дБ)
ФП1П1-60,04	465 ± 3 кГц	—	—	8...11,5 (6 дБ)
ФП1П1-61,01	—	—	—	7...10,5 (6 дБ)
ФП1П1-61,02	—	—	—	8...11,5 (6 дБ)
ФП1П6-1,1	$10,7 \pm 0,1$ МГц	—	—	150...210 (6 дБ); 480 (20 дБ)
ФП1П6-1,2	$10,7 \pm 0,1$ МГц	—	—	150...210 (6 дБ); 530 (20 дБ)
ФП1П6-1,3	$10,64 \pm 0,04$ МГц	—	—	—
ФП1П6-1,4	$10,67 \pm 0,03$ МГц	—	—	—
ФП1П6-1,5	$10,70 \pm 0,03$ МГц	—	—	150...210 (6 дБ); 530 (20 дБ)
ФП1П8-3	$(10,64...10,76) \pm 0,04$ МГц	—	—	240 ± 40 (6 дБ)
ФП1П8-6-1	4,406 МГц	—	—	120 (3 дБ); 480 (20 дБ)
ФП1П8-6-2	4,406 МГц	—	—	120 (3 дБ); 6000 (20 дБ)
ФП1П8-62,01	5,5 МГц	5,425 (3 дБ)	5,575 (3 дБ)	550 (20 дБ)
ФП1П8-62,02	6,5 МГц	5,575 (3 дБ)	6,580 (3 дБ)	600 (20 дБ)
ФП1П8-63,01	5,5 МГц	4,7	5,5	—
ФП1П8-63,02	6,5 МГц	5,7	6,5	—
ФП1П8-63,03	5,5 МГц	4,7	5,5	—
ФП1П8-63,04	6,5 МГц	5,7	6,5	—
ФП1ПГ-019	248...384 кГц	—	—	—
ФП1ПГ-020	412...583 кГц	—	—	—
ФП1ПГ-022А	290...380 кГц	—	—	—
ФП1ПГ-022-Б	270...400 кГц	—	—	—

керамических фильтров

$a_{\text{пер}}, \text{дБ},$ не более	$\Delta a, \text{дБ},$ не более	$a_{\text{гар}}, \text{дБ},$ не менее	$U_{\text{вх. макс}},$ В	$R_{\text{вх}} = R_{\text{вых}}$	Габарит- ный чер- теж кор- пуса
—	—	60	20	2,7 Ом	12
—	—	60	5	330 Ом	4
20	—	60	5	510 Ом	11
—	2,0	50	—	330 Ом	4
—	—	—	—	—	7
—	—	40(160...450; 480...770 кГц)	—	—	8
—	—	40(160...450; 480...770 кГц)	—	—	8
—	—	30(160...450; 480...770 кГц)	—	—	8
—	2	36(160...450; 480...770 кГц)	—	—	8
—	—	36(160...450; 480...770 кГц)	—	—	9
—	—	26(160...450; 480...770 кГц)	—	—	9
—	—	—	—	—	3
—	—	—	—	—	3
—	—	—	—	—	3
—	—	—	—	—	3
—	—	—	—	330 Ом $\pm 10\%$	—
—	1	—	50	330 Ом $\pm 10\%$	10
14	—	—	—	1 кОм $\pm 5\%$	2
12	—	—	—	1 кОм $\pm 5\%$	2
—	1	25	50	—	3
—	1	25	50	—	3
—	—	—	50	—	3
—	—	—	50	—	3
—	—	—	50	—	3
—	—	—	50	—	3
—	3 (— 0,6 % f_H)	40 ($f_H \pm 12$ кГц), 50; $f_H \pm (20...96$ кГц)	100	1,5 кОм $\pm 10\%$	1
—	3 (— 0,6 % f_H)	40 ($f_H \pm 12$ кГц), 50; $f_H \pm (20...96$ кГц)	100	3 кОм $\pm 10\%$	1
—	2,5 (— 0,6 % $f_H + 0,2\%$)	80 ($f_H \pm 10$ кГц)	30	2 кОм $\pm 10\%$	5
—	"	76 ($f_H \pm 10$ кГц)	30	2 кОм $\pm 10\%$	5

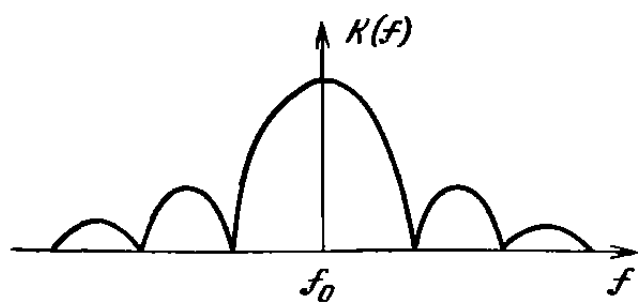


Рис. 3.7. Амплитудно-частотная характеристика ВШП

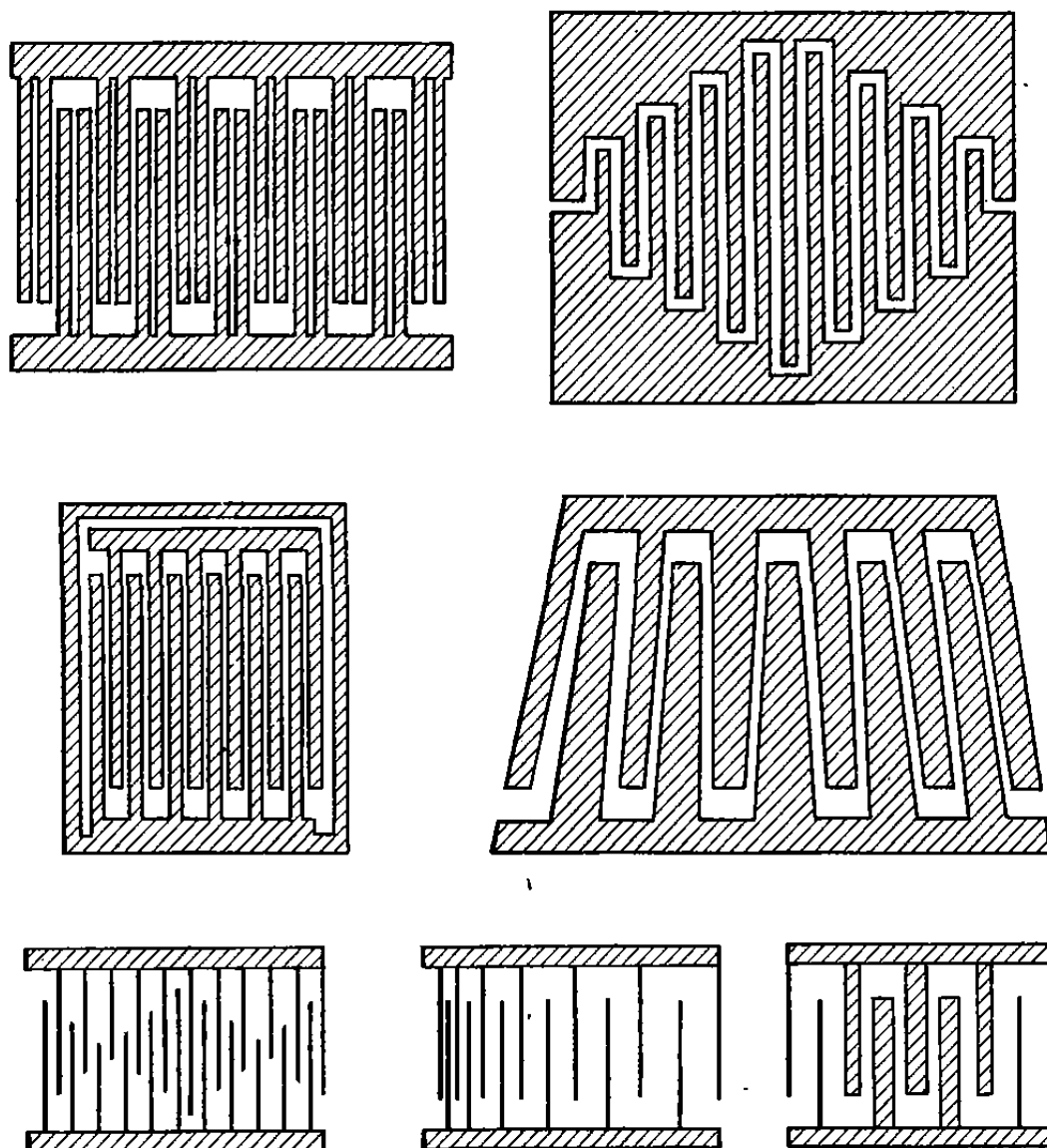


Рис. 3.8. Конструкции ВШП

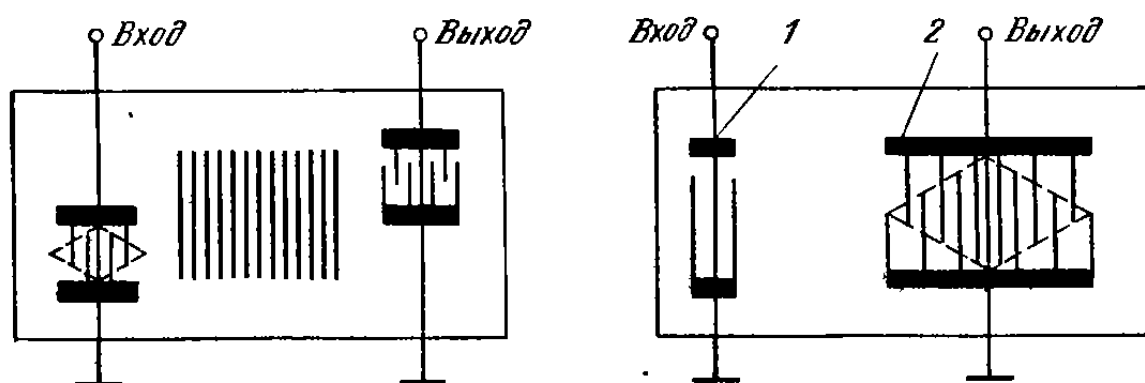


Рис. 3.9. Структуры полосовых фильтров на ПАВ

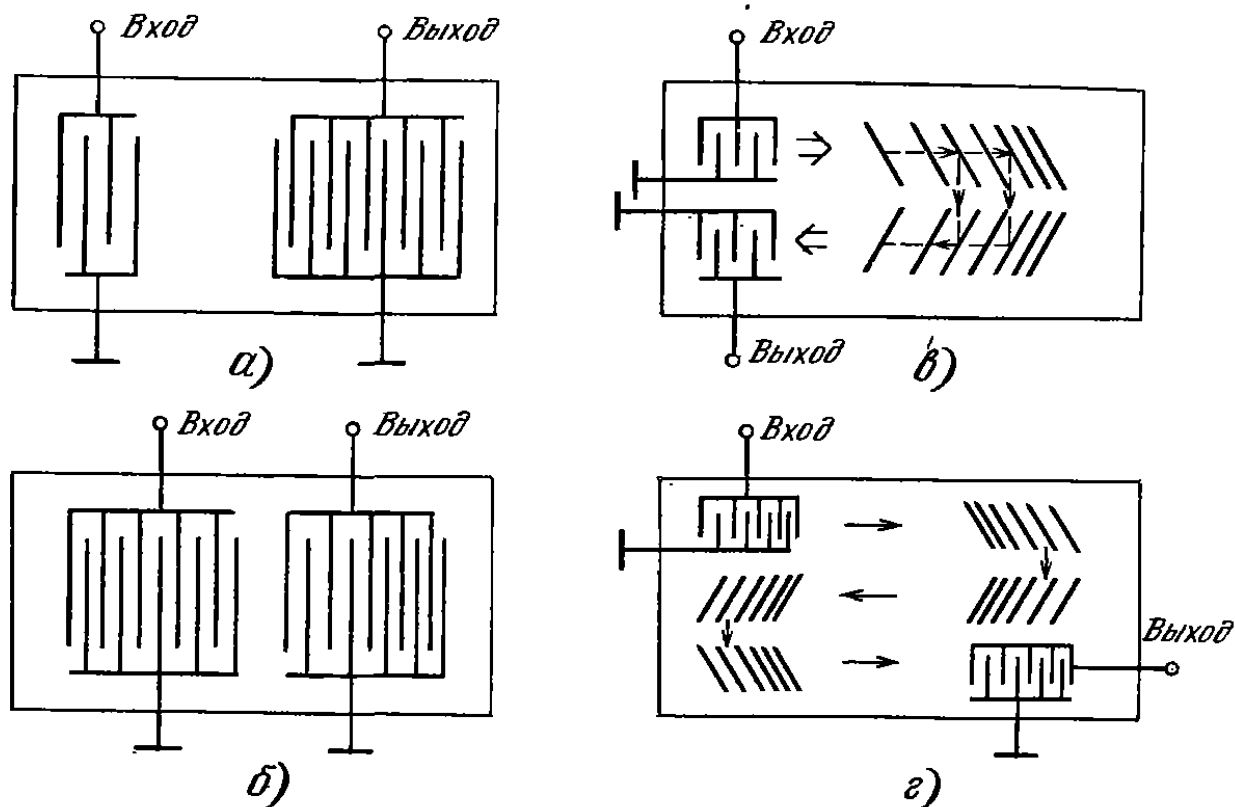


Рис. 3.10. Структуры дисперсионных фильтров на ПАВ

На практике существуют различные эффекты, искажающие форму частотной характеристики затухания: отражение волны от штырей электродов, от торцов пластины, возбуждение паразитной объемной волны. Подавляют эти эффекты применением ряда конструктивных мер. Так, расщепление электродов позволяет уменьшить отражение от штырей (за счет уменьшения вдвое периода акустической неоднородности отражение происходит на частоте выше резонансной в 2 раза и выходит за рабочий диапазон). Использование специальной топологии электродов с применением многополосковых ответвителей устраняет влияние отраженной от торцов пластины объемной волны на выходной преобразователь.

Фильтры на ПАВ по сравнению с LC -фильтрами имеют более плоскую вершину АЧХ, большие крутизну скатов АЧХ на границе полосы пропускания, стабильность и точность, повторяемость при изготовлении.

Основные параметры фильтров на ПАВ:

частотный диапазон от 10 МГц до 2 ГГц;

добротность $Q > 10^4$;

относительная ширина полосы пропускания 0,01...100%;

коэффициент прямоугольности $K = 2...3$;

затухание в полосе задерживания до 100 дБ;

вносимые потери в полосе пропускания до 2 дБ.

Фильтры на ПАВ находят широкое применение в системах спутниковой связи и телевидения, радиолокации. Они изготавливаются на подложках из высокостабильных монокристаллов кварца или ниобита лития и размещаются в плоских керамических и металлоглазанных герметичных корпусах для микросхем. Обладают высокой стабильностью, избирательностью. Могут быть широкополосными, среднеполосными и узкополосными.

Широкополосные и среднеполосные фильтры используются для канальной или групповой селекции сигналов и частотно-избирательных элементов, перестраиваемых по частоте и полосе. Узкополосные фильтры используются для очищения спектра в селекторах гармоник синтезаторов, блоках формирования опорных частот и т. п.

Электрические параметры фильтров на ПАВ приведены в табл. 3.4 и 3.5.

Тип фильтра	f_H , МГц	Δf , Гц	Δa , дБ
ФП2П9-454	20...400	$(1...3) f_H \%$	2
ФП2П9-455	38,5...143,5	$(8...20) f_H \%$	2
ФП3П7-464-1:С			
выход I	38	—	1,2 (3...34,7 МГц); 2 (34,7...37 МГц)
выход II	С $38,0 \pm 0,2$; $31,5 \pm 0,2$	5,5 —	—
ФП3П7-464-2:Е			
выход I	38,9	0,85...1,1 (3 дБ)	2 (35...38 МГц)
выход II	Е $38,9 \pm 0,2$; $33,4 \pm 0,2$	5,5 0,75...0,95 (3 дБ)	—
ФП3П7-464-3:А			
выход I	45,75	—	2 (42,75...44,75 МГц)
выход II	45,75 $\pm 0,2$; 41,25 $\pm 0,2$	4,5 —	—
ФП3П9-451,5	С $38,0...45,75$	3,5...5,5	1,2...2,5
ФП3П9-451,5	Е $38,9$		
ФП3П9-451,6	А $45,75$		
ФП3П9-454	20...300	$(8...20) f_H \%$	2

на ПАВ (при $U_{вх} \leq 10$ В)

$a_{гар}$, дБ. не менее	$R_{вх}=R_{вых},$ Ом	$C_{вх}=C_{вых},$ пФ	Габарит- ный чер- теж кор- пуса
—	$50 \pm 20 \%$	—	3
—	$50 \pm 20 \%$	—	2
34 (28...30; 39,5...41,51 кГц)	50 ± 10	—	1
30 (28...30 МГц); 26 (39,5...41,5 МГц); 17 (33...36,5 МГц)	50 ± 10	—	1
30 (28...30 МГц); 34 (40,4...41,91 МГц)	50 ± 10	—	1
25 (28...31,9; 40,4...41,9 МГц); 17 (34,9...37,4 МГц)	50 ± 10	—	1
30 (35...39,75; 47,25...50 МГц)	50 ± 10	—	1
25 (35...39,75; 47,25...51,4 МГц); 17 (42,5...44,5 МГц)	300	40	
10...40	50 ± 10	40	1
—	$50 \pm 20 \%$	—	3

Параметры фильтров на ПАВ в системах

Тип фильтра	Средняя несущая частота, МГц	Полоса пропускания, МГц Уровень, дБ	Пульсация АЧХ в полосе пропускания, дБ	Коэффициент прямоугольности	Гарантированное затухание в полосе заграждения, дБ	Вносимые потери, дБ
Ф-180	479,5	$\frac{27; 18}{1},$ $\frac{58}{40}$	$\pm 0,25$	—	— 45	— 24
Ф-189	479,5	$\frac{5}{1}$	—	—	— 40	— 18
Ф-202	31,5	$\frac{7}{1},$ $\frac{7,6}{20}$	$\pm 0,3$	—	— 40	— 25
Ф-203	37,75	$\frac{0,304}{3},$ $\frac{1,1}{40}$	$\pm 0,2$	—	— 50	— 12
Ф-206	60	$\frac{7,3}{2},$ $\frac{8,1}{30}$	$\pm 0,3$	—	— 40	— 20
Ф-209	69,4	$\frac{9}{6}$	$\pm 0,5$	2	— 45	— 4,5
Ф-210	153,5	$\frac{5}{3}$	$\pm 0,3$	2,5	— 50	— 5,2
Ф-211	142,8	$\frac{3}{3}$	$\pm 0,3$	2,5	— 50	— 5,1
Ф-213: широкополосные фильтры	30...500	5...40 %	0,5...1,5	1,2...1,8	— (35...55)	— (12...25)
среднеполосные фильтры	20...450	1...6 %	0,5...1	1,4	— (35...55)	— (12...25)
узкополосные фильтры	40...400	0,3...1 %	—	—	—	— (12...20)
	100...500	0,05...0,1 %	—	—	—	— (5...10)

спутниковой связи и телевидения

Сопротивление нагрузки, Ом	ТКС, $\times 10^6$ 1/°С	Интервал рабочих температур, °С	Габаритные размеры, мм	Назначение
75	80	+5...+55	19,5 × 14,5 × 4,5	Для использования в тракте промежуточной частоты СТВ-тюнера
75	80	+5...+55	19,5 × 14,5 × 4,5	Для преобразования изменения частоты входного сигнала в двуполярное изменение амплитуды выходного сигнала в тракте промежуточной частоты (частотный дискриминатор СТВ-тюнера)
50	74	+5...+50	29,5 × 19,5 × 4,5	Для раздельного выделения сигналов изображения на промежуточной частоте СТВ-конвертора
50	5	+5...+55	29,5 × 19,5 × 4,5	Для выделения сигналов на несущей частоте звука с раздельными каналами звука и изображения
50	80	+5...+50	29,5 × 19,5 × 4,5	Для повышения избирательности тракта промежуточной частоты в конверторе с совмещенными каналами звука и изображения
50	84	—50...+55	19,5 × 14,5 × 4,5	Для входных цепей бытовых УКВ радиоприемников и радиопередатчиков. Имеют высокую избирательность, малые вносимые потери
50	72	—50...+55	19,5 × 14,5 × 4,5	То же
50	72	—50...+55	19,5 × 14,5 × 4,5	» »
75	84	—50...+55	20 × 9 × 3; 25 × 12 × 3,5	Для разделения каналов в системах кабельного телевидения с совмещенной передачей сигналов изображения и звука. Для бытовых радиоприемников и передатчиков
75	5	—50...+50	20 × 5 × 3; 25 × 12 × 3,5	
75	5	—50...+50	20 × 9 × 3; 25 × 12 × 3,5	
—	5	—50...+50		

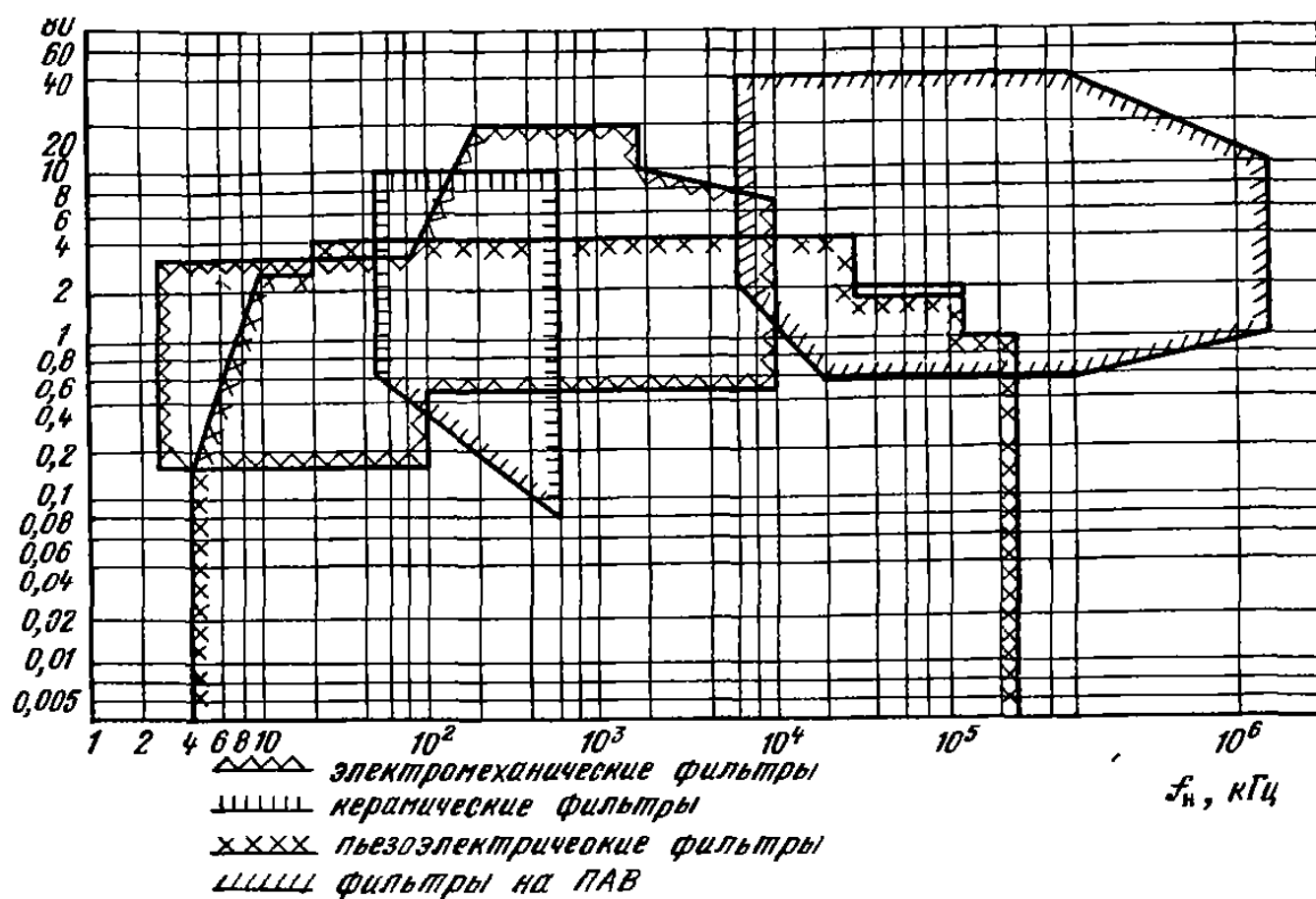


Рис. 3.11. Области применения частотных фильтров

Пьезокристаллические фильтры на ПАВ ФПЗП7-464 и ФПЗП9-451 являются полосовыми фильтрами промежуточной частоты. Они используются в телевизионных приемниках с квазипараллельным трактом звука.

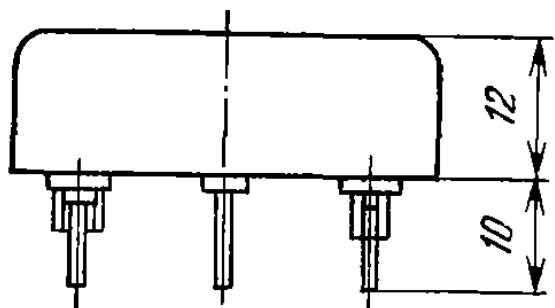
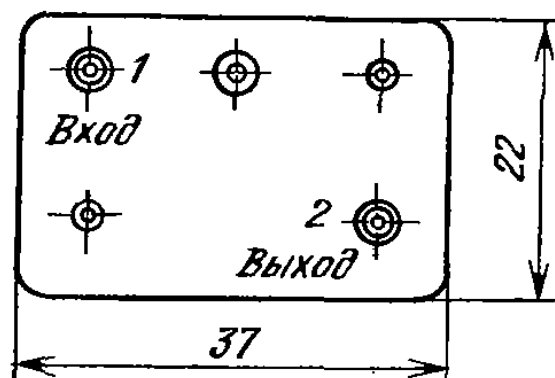
Области применения частотных фильтров различных типов по частотному диапазону и относительной ширине полосы пропускания показаны на рис. 3.11.

Справочные данные

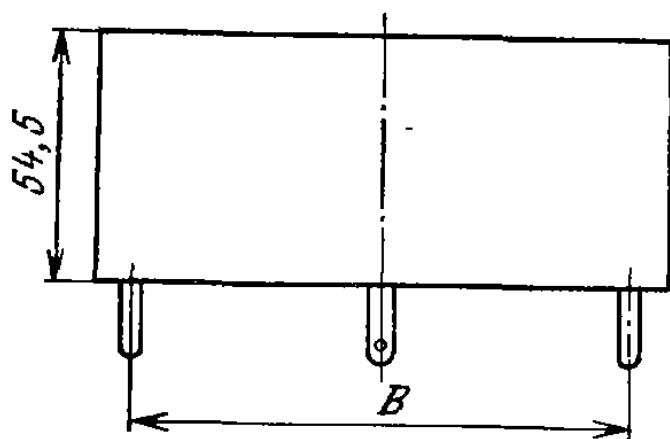
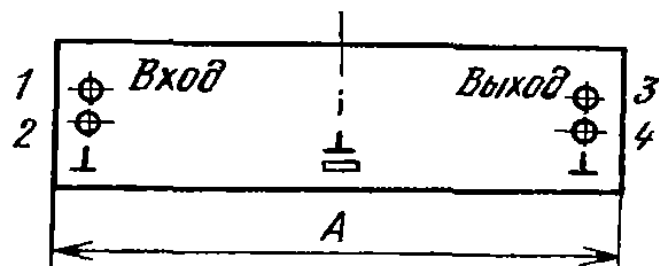
Ниже приведены таблицы параметров основных типов кварцевых (табл. 3.2), керамических (табл. 3.3) фильтров и фильтров на ПАВ (табл. 3.4 и 3.5) отечественного производства, а также габаритные чертежи их корпусов.

Габаритные чертежи корпусов кварцевых фильтров

ФП2Д-9 1

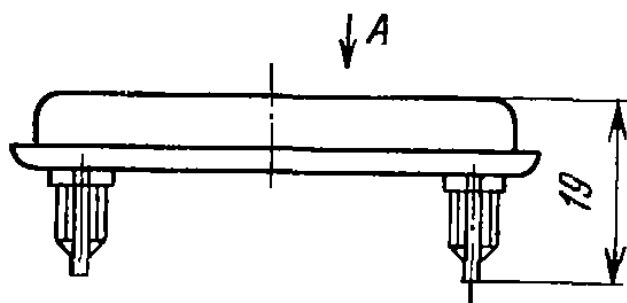


ФП2П-02 2

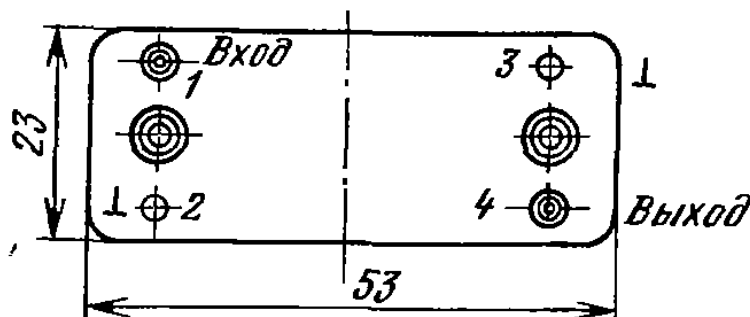


Диапазон частот, кГц	Размеры, мм	
	A	B
4... 15	94	85
15... 50	69	60

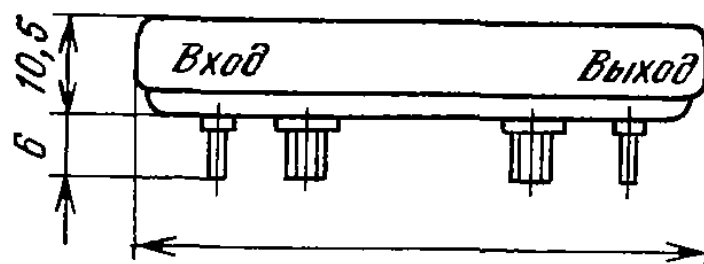
ФП2П4-442 3



Вид А

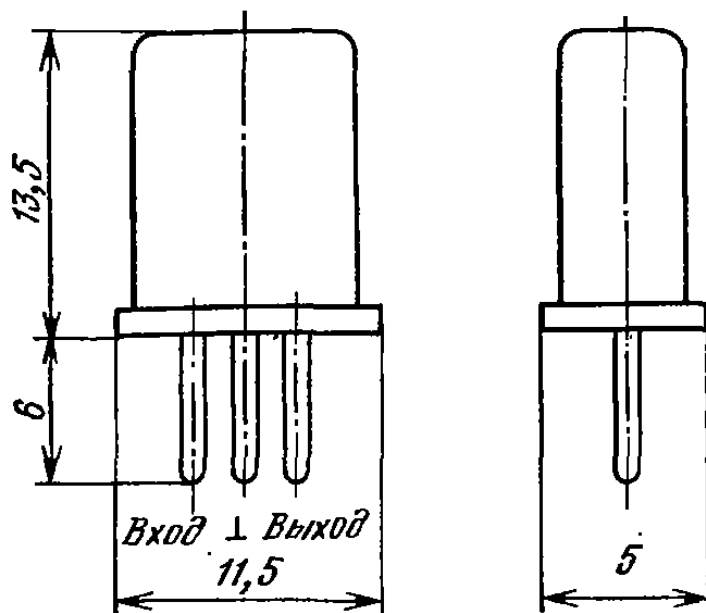


ФП2П4-10, 4
ФП2П5-456



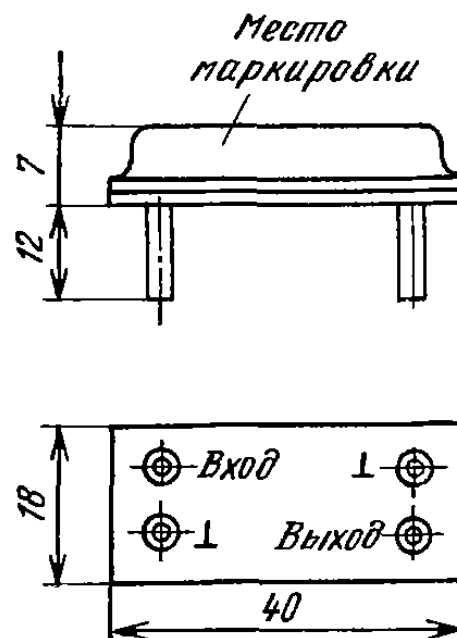
ФП2П8-281, ФП2П8-437

5



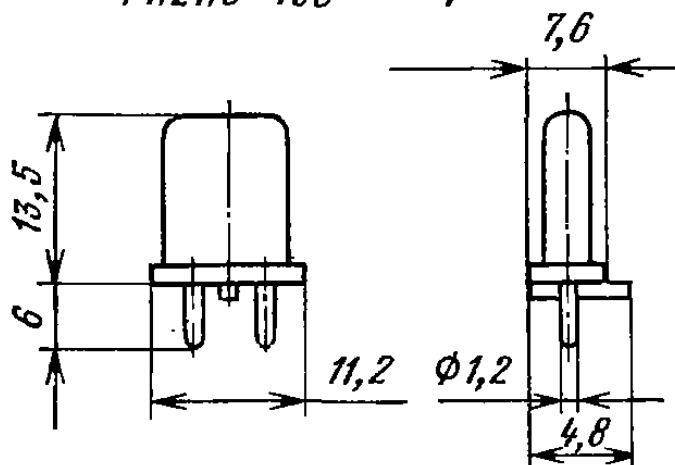
ФП2П6-418

6



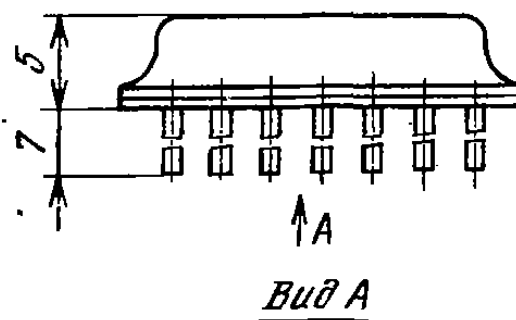
ФП2П8-438

7



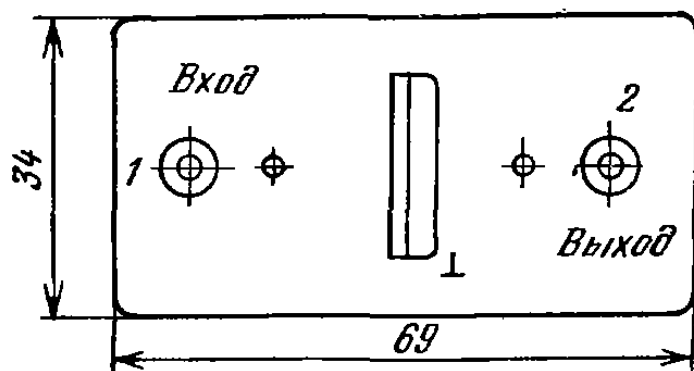
8

ФП2П6-42, ФП2П6-419,
ФП3П4-430, ФП2П-364

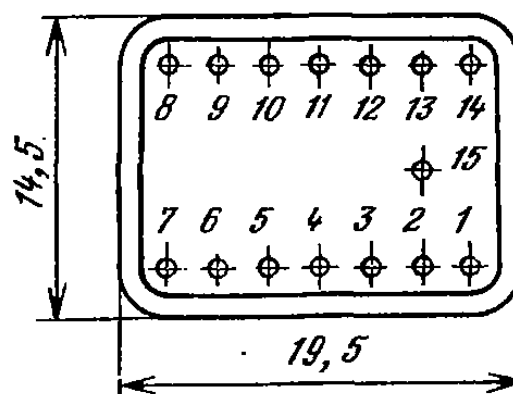


ФП2П-05

9



Вид А



1- вход

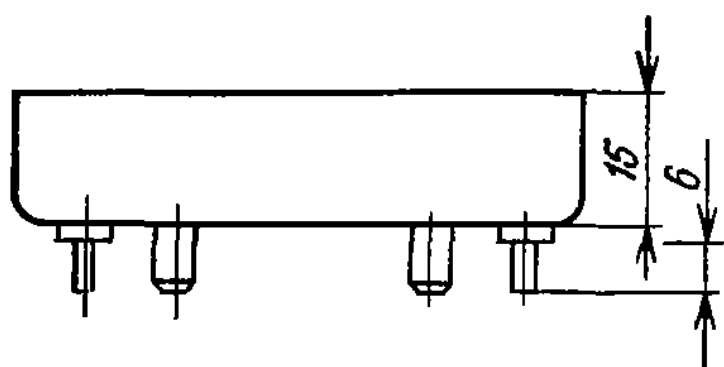
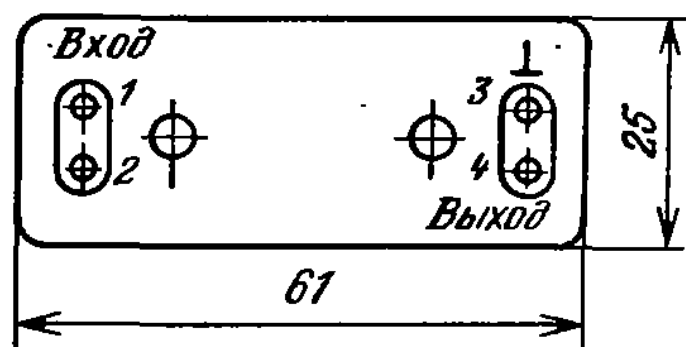
8- выход

15- корпус

Остальные выводы-свободные

ФП2П-06

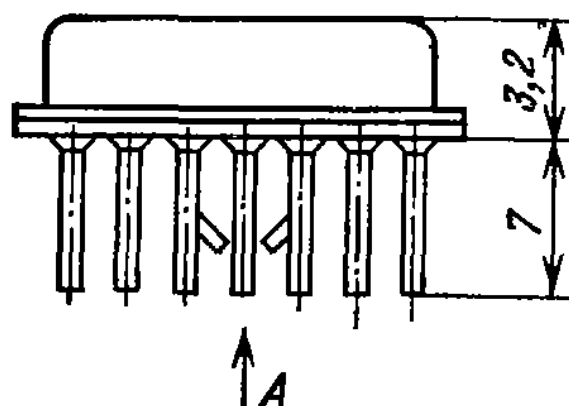
10



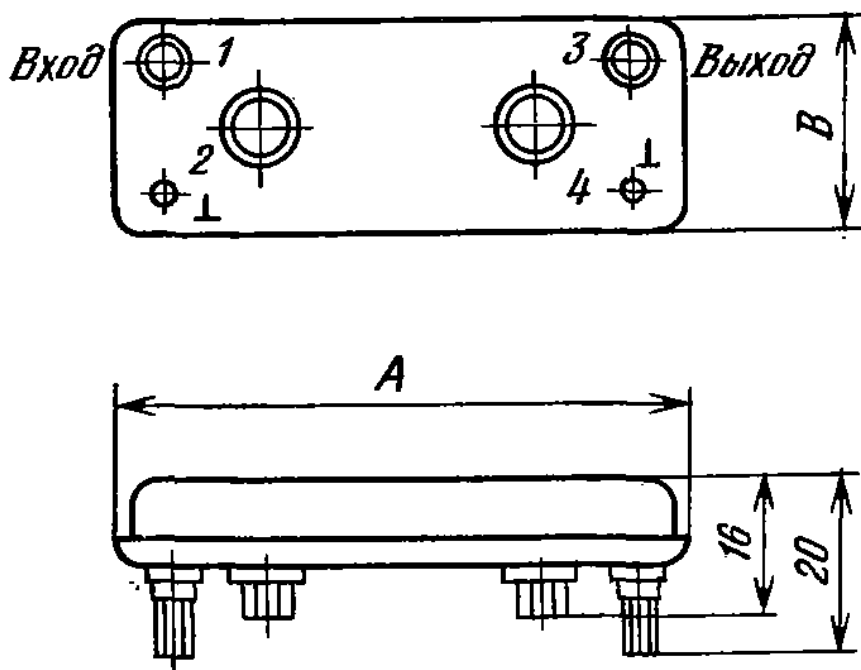
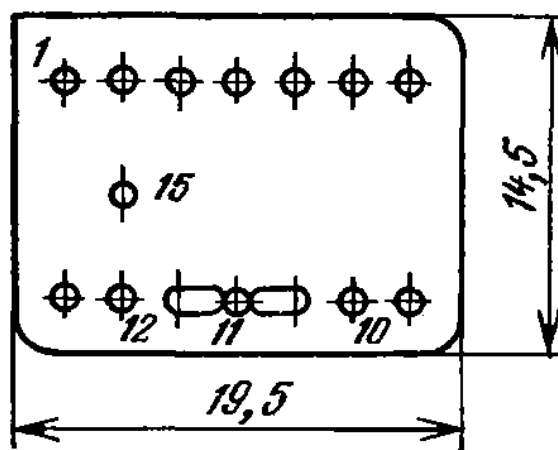
12

ФП2П4-414, ФП2П4-426,
ФП2П4-427, ФП2П4-432,
ФП2ПГ4-49, ФП2ПГ4-50

ФП2П4-467



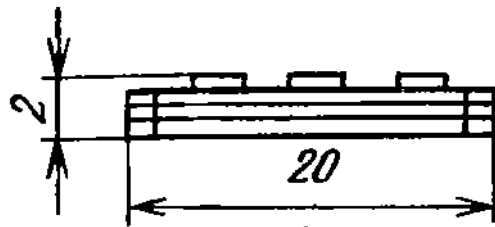
Вид А



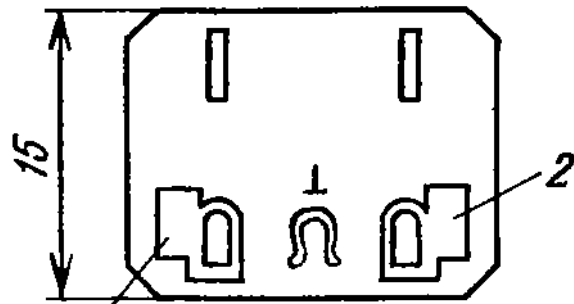
Тип	Размеры, мм	
	A	B
ФП2П4-414 ФП2П4-426 ФП2ПГ4-49 ФП2ПГ4-50	61,5	23,3
ФП2П4-427	70	23
ФП2П4-432	41,5	17,5

13

ФП2П4-282



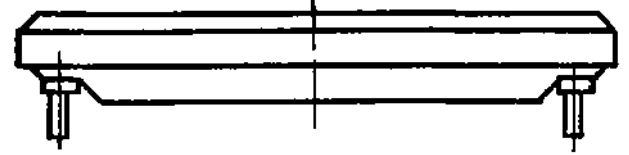
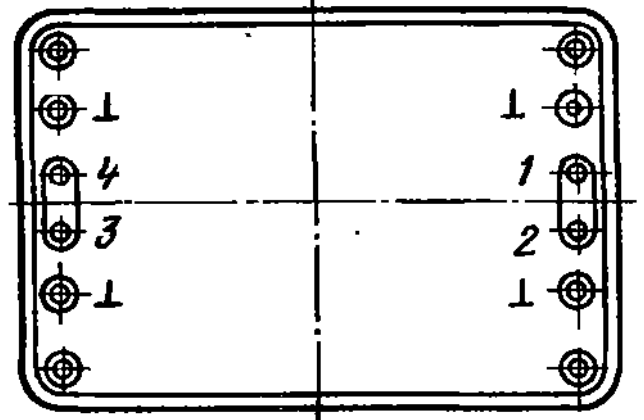
↑ A
Вид А



1-вход, 2-выход,
1-корпус
Остальные выводы-
свободные

ФП2П-03,
ФП201-287,
ФП2П1-288

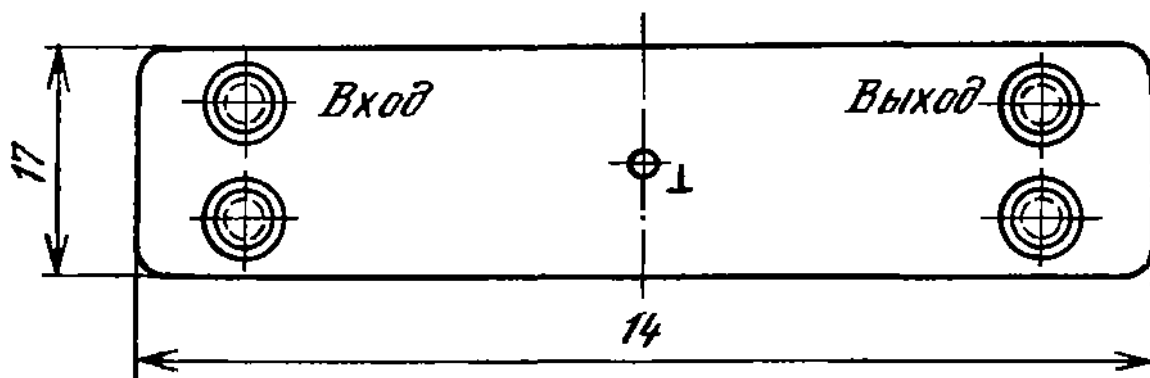
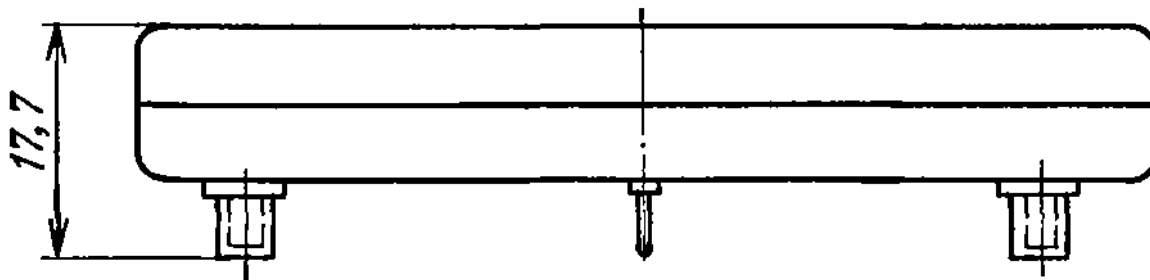
14



1, 2 - вход
3, 4 - выход

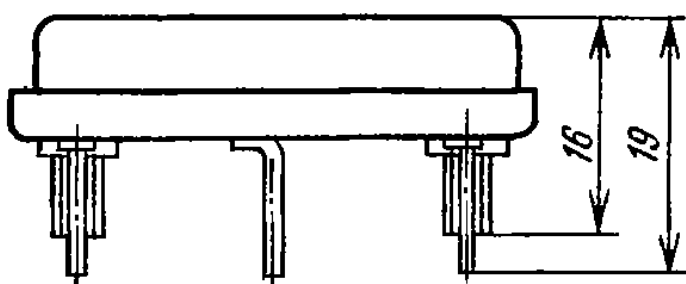
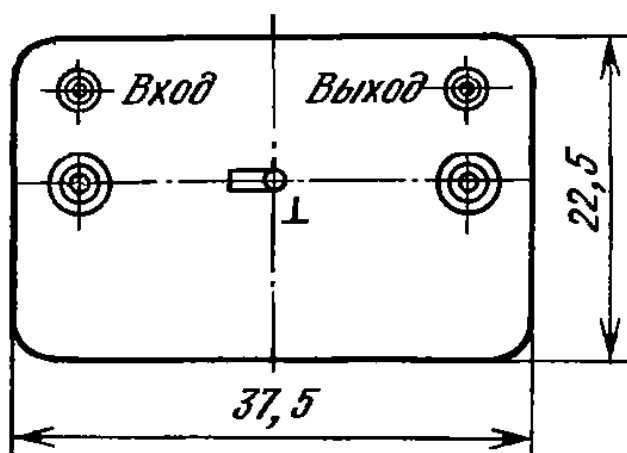
ФП2Р4-018

15

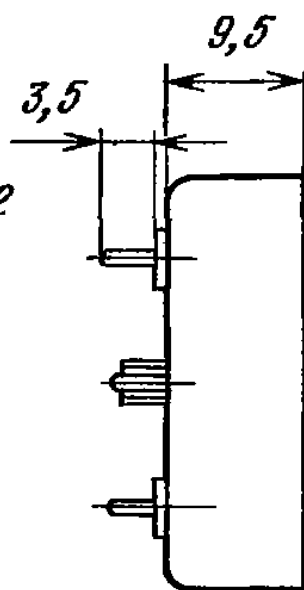


ФП2П4-436

16

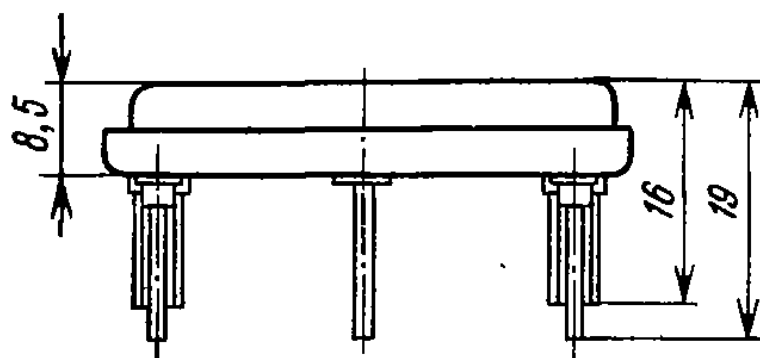
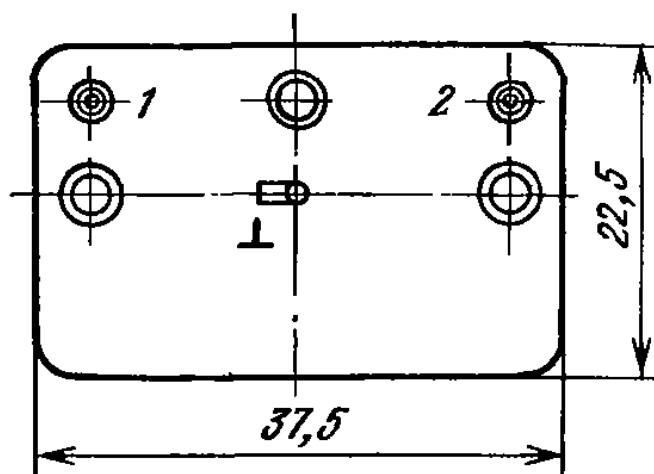


ФП2П4-12

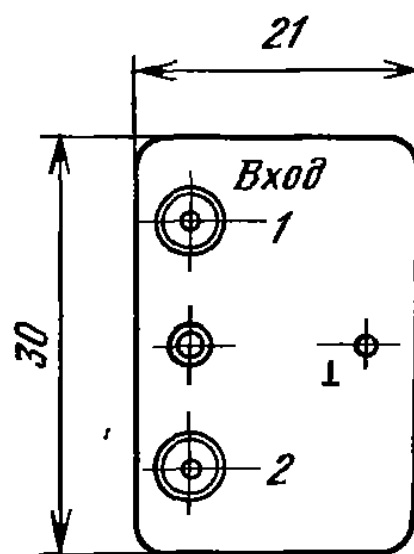


ФП2Д4-016

17

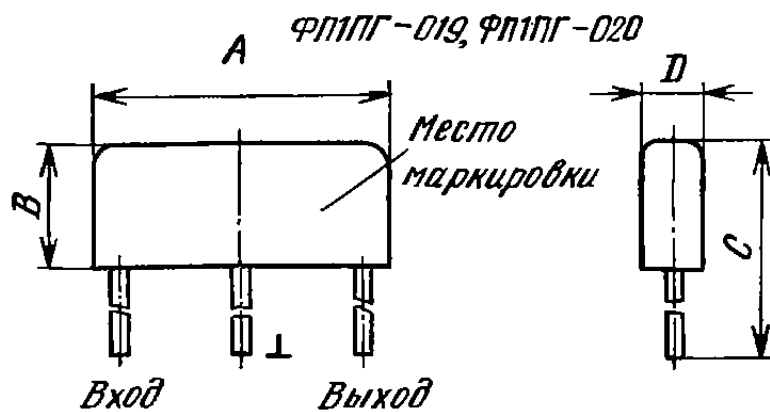


18

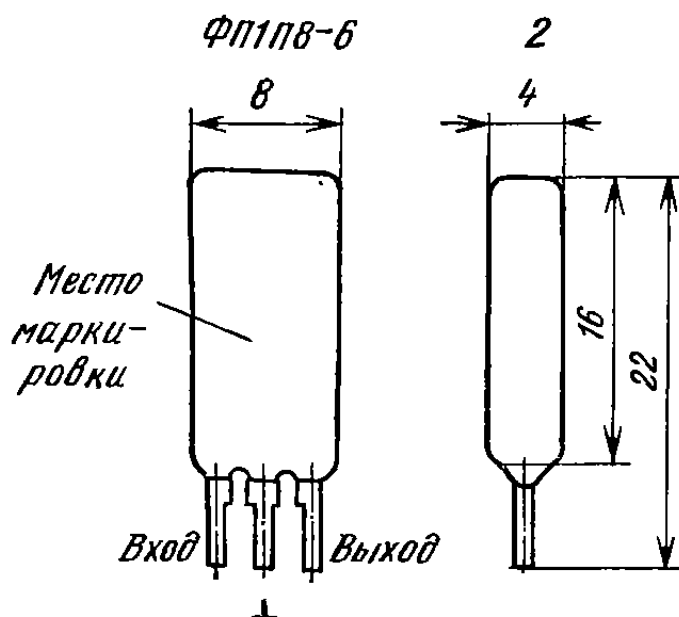


Габаритные чертежи корпусов керамических фильтров

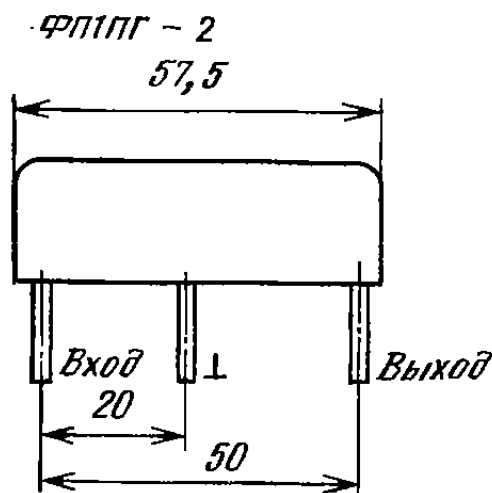
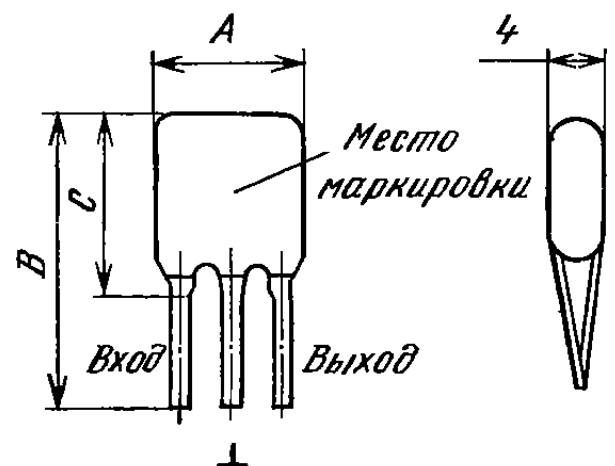
1



Тип	Размеры, мм			
	A	B	C	D
ФП1ПГ-019	57	25	41,5	10
ФП1ПГ-020	34	22	37	9

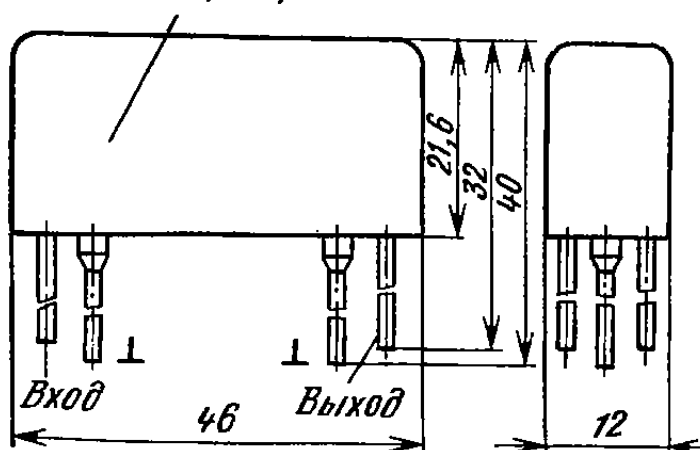


ФП1П6-1, ФП1П8-62,
ФП1П8-63, ФП1П8-63

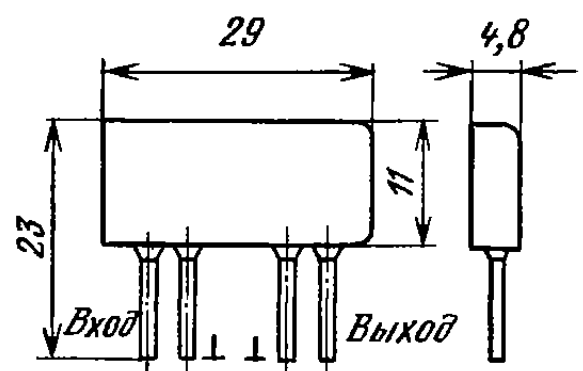


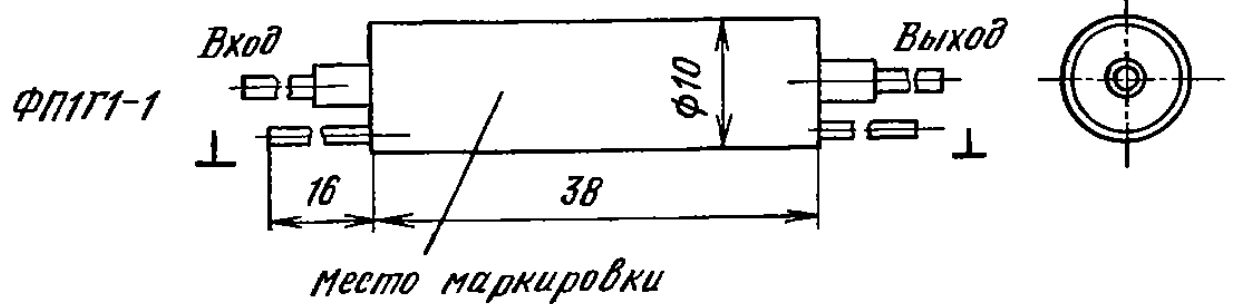
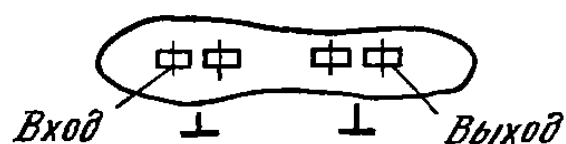
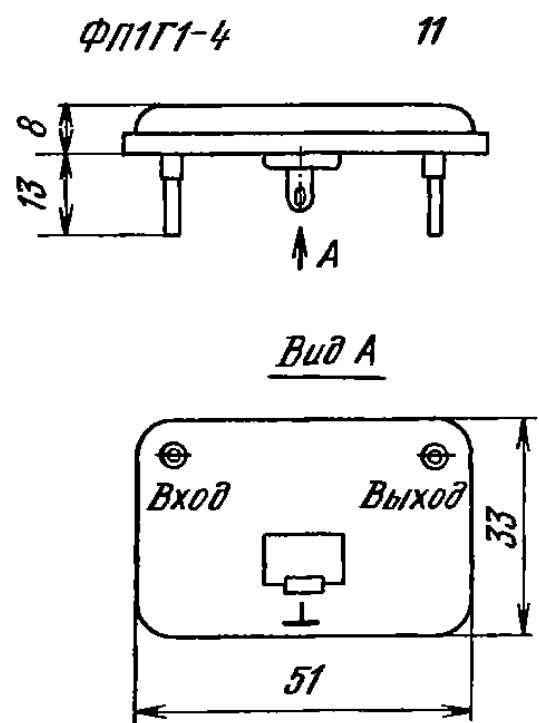
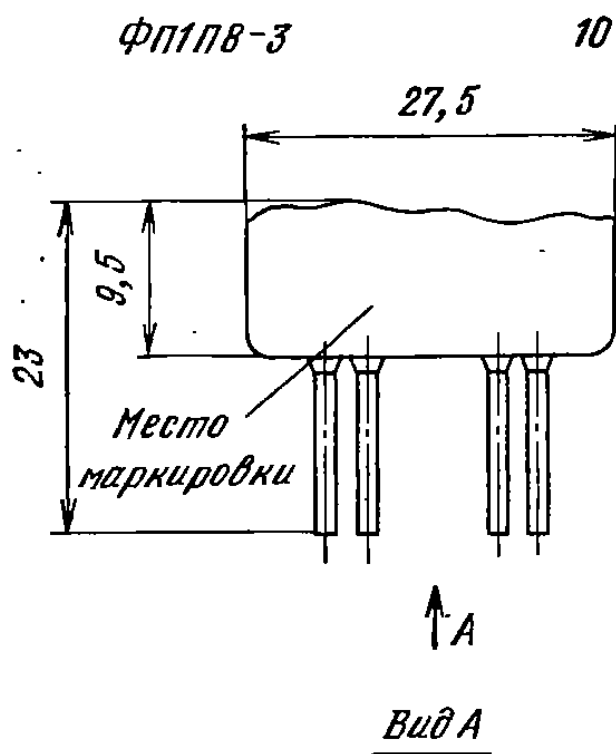
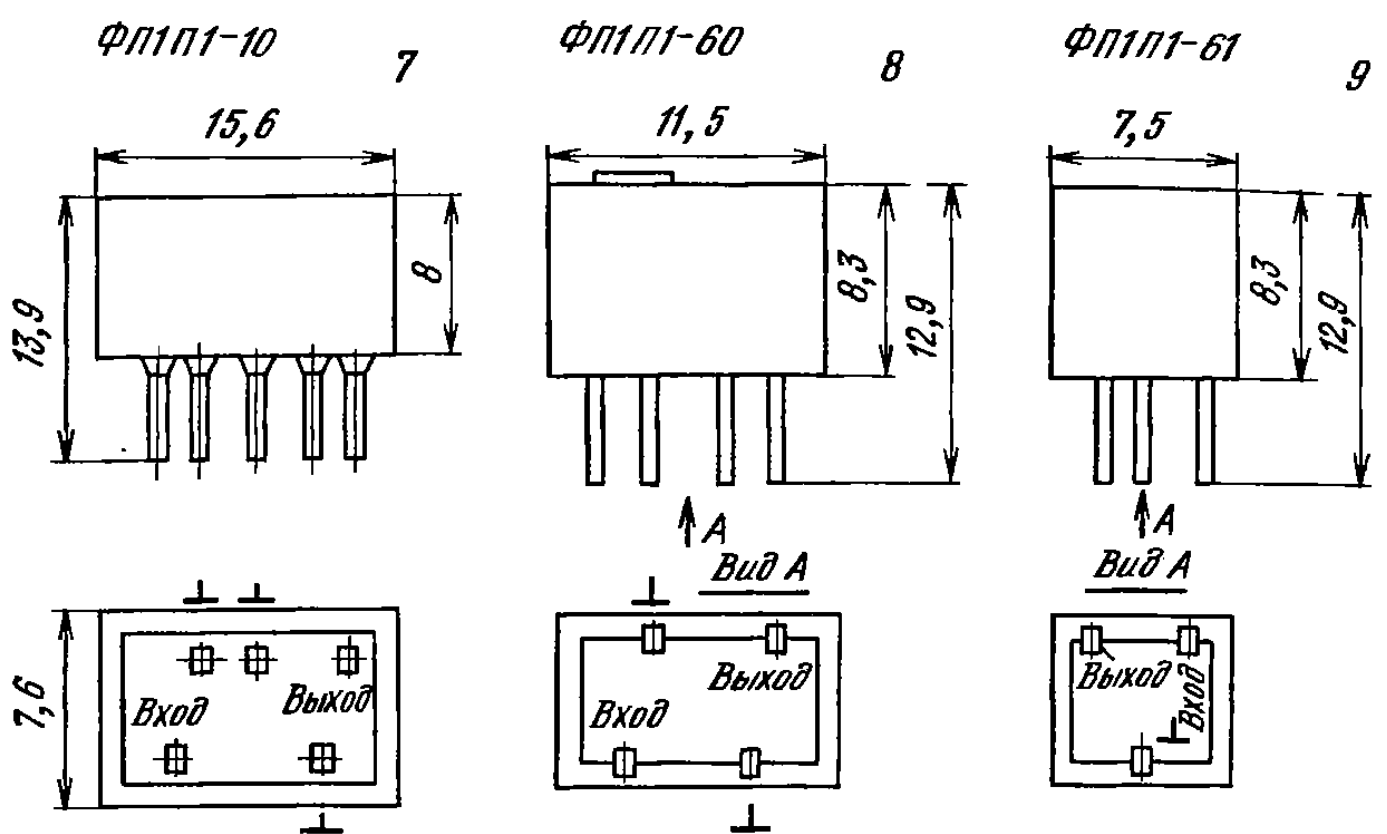
Тип	Размеры, мм		
	A	B	C
ФП1П6-1	7	14,5	9,6
ФП1П8-62,01	11	16	10
ФП1П8-62,02			
ФП1П8-63,01			
ФП1П8-63,02	7,5	12,5	6,5
ФП1П8-63,03			
ФП1П8-63,04			

ФП1ПГ-022



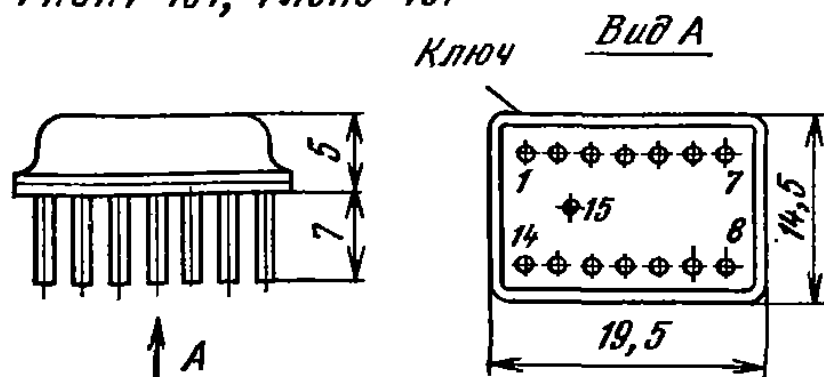
ФП1Г4-1





Габаритные чертежи фильтра на ПАВ

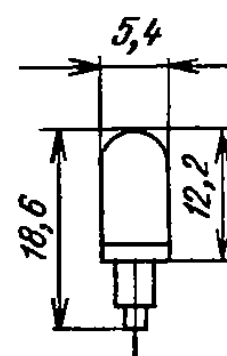
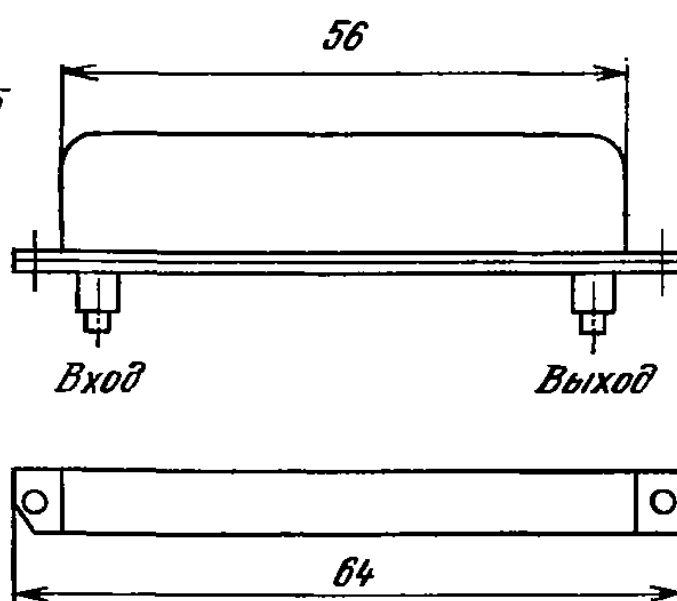
ФПЗП7-464, ФПЗП9-451



1

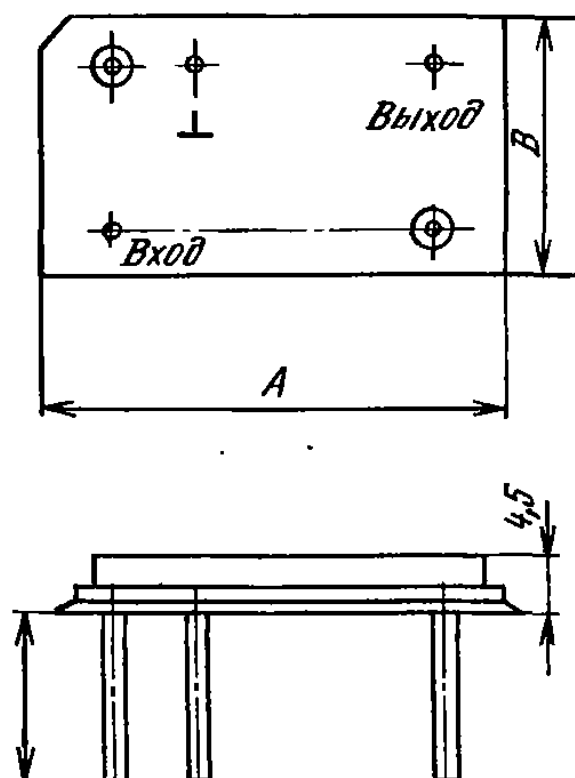
2, 13 - входы
5, 6 - выход 1 *ВЧ*
9, 10 - выход 2 *аудио*
Остальные выводы
соединены с корпусом
2, 1 2 1

2
ФП2П9-455



3

ФП2П9-454, ФПЗП9-454



Тип	Размеры, мм	
	A	B
ФП2П9-454-1 ФП2П9-454-2	33	19
ФП2П9-454-3 ФП2П9-454-4	53	26
ФПЗП9-454-1 ФПЗП9-454-2	33	19
ФПЗП9-454-3 ФПЗП9-454-4 ФПЗП9-454-5	45	31

4. Приборы обработки сложных сигналов на ПАВ

Классификация приборов на ПАВ приведена на рис. 4.1. Эти приборы осуществляют аналоговую обработку сигналов на основе взаимодействия акустических волн с электромагнитными полями и электронами проводимости. Они позволяют преобразовывать сигналы во времени (задержка, изменение длительности), по частоте и фазе (сдвиг фаз, преобразование частоты и спектра), по амплитуде (усиление), а также выполнять более сложные функциональные преобразования (интегрирование, кодирование и декодирование, модуляцию и демодуляцию, получение функции свертки, корреляционной функции и т. п.) в различных радиоэлектронных и вычислительных устройствах. Использование таких приборов по сравнению с традиционными обеспечивает меньшие габариты, массу, а иногда и стоимость.

Резонаторы, генераторы и фильтры на ПАВ рассмотрены ранее. Здесь остановимся на приборах, осуществляющих фильтрацию, задержку и обработку сложных сигналов.

Широкое применение в РЭА получили линии задержки на ПАВ. В частности, они применяются в современных экономичных радиолокационных станциях с разрешающей способностью по дальности 3...5 кГц, в сверхширокополосных анализаторах спектра с разрешающей способностью по частоте от 1 МГц до 25 кГц, в фурье-про-

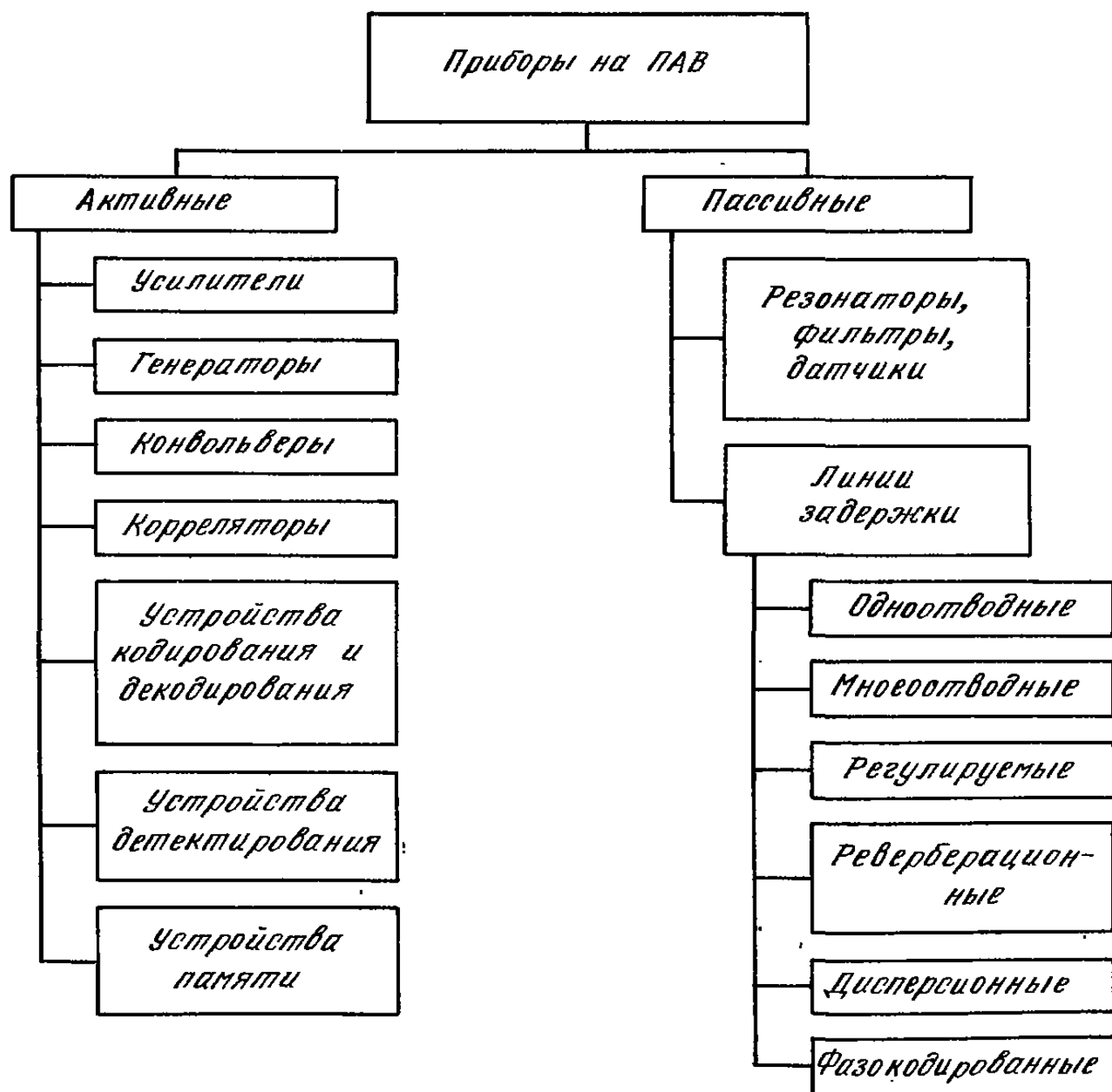


Рис. 4.1. Классификация приборов на ПАВ

цессорах с быстродействием 10^{12} двоичных операций в секунду, в системах связи с шумоподобными сигналами, в программируемых и многоканальных согласованных фильтрах с фиксированными кодами (ПСФ, СФ), в накопителях радиосигналов. Они обеспечивают задержку сигналов от долей микросекунд до единиц миллисекунд в большом диапазоне частот, широкие полосы пропускания (десятки — сотни мегагерц) и низкое затухание (менее 30 дБ).

Простейшая линия задержки содержит входной и выходной ВШП, находящиеся в общем акустическом потоке (рис. 4.2, а). Задержка сигнала определяется отношением расстояния между ВШП к скорости ПАВ. Для ее увеличения используются многозаходная структура с разделяющими усилителями (рис. 4.2, б), многократное переизлучение ПАВ на многополосковом ответвителе, распространяющееся по мандровому пути (рис. 4.2, в), либо цилиндрические или дисковые звукопроводы, в которых ПАВ распространяется по сложной траектории. Применяются дисперсионные (ДЛЗ), многоотводные (МЛЗ) и реверберационные (РЛЗ) линии задержки.

Дисперсионная акустоэлектронная линия задержки обеспечивает время задержки составляющих спектра входного сигнала, зависящее от их частот. Требуемый закон изменения задержки от частоты достигается соответствующим размещением электродов дисперсионного ВШП.

Многоотводные акустоэлектронные линии задержки осуществляют задержку электрического сигнала на заданные интервалы времени. В них энергия по пути распространения отводится с помощью дополнительных ВШП (рис. 4.2, г). Этим достигается дискретная задержка. Такие МЛЗ применяются в устройствах обработки фазоманипулированных сигналов с помощью согласованных фильтров.

Реверберационная акустоэлектронная линия задержки при подаче на ее вход одиночного сигнала обеспечивает на выходе последовательность сигналов с некоррелированными начальными фазами, временем задержки и амплитудами.

Основные параметры ДЛЗ приведены в табл. 4.1, а МЛЗ — в табл. 4.2.

Согласованные фильтры на ПАВ используются для формирования и приема сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и кодофазоманипулированных (КФМ). ЛЧМ-сигнал характерен тем, что за время действия информационного импульса $u(t)$ мгновенная частота несущего колебания изменяется линейно (рис. 4.3).

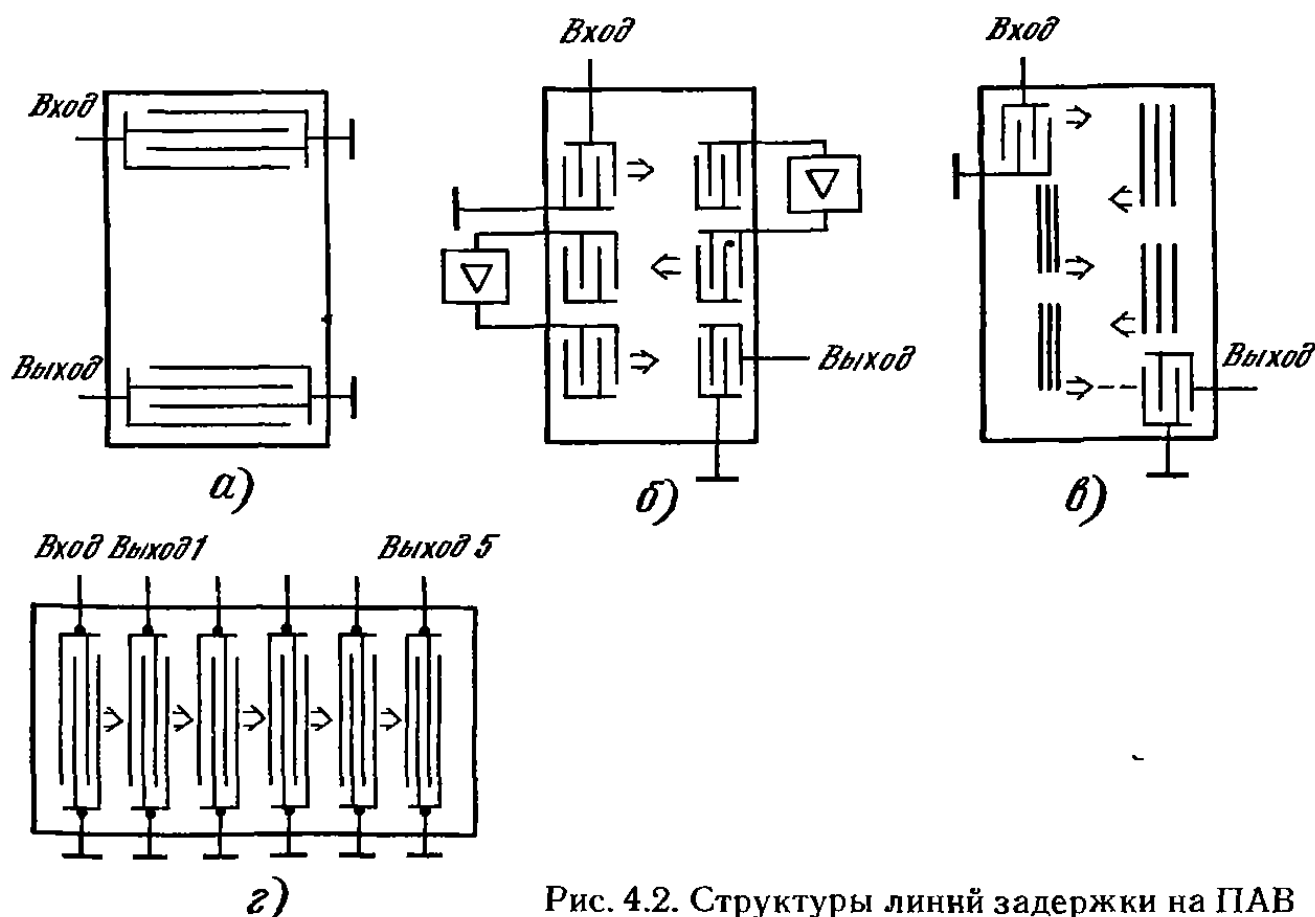


Рис. 4.2. Структуры линий задержки на ПАВ

Параметры дисперсионных линий задержки

Тип ДЛЗ	Центральная частота, МГц	Полоса пропускания, МГц	Длительность отклика, мкс	Уровень боковых лепестков, дБ
ФАЧ-01	120...200	100...200	1...6	—22
ФАЧ-02	20...40	8...20	3...10	—23
ФАЧ-06	20...40	10...20	30...65	—24
ФАЧ-07	120...200	100...200	1...5	—22
ФАЧ-08	20...40	10...20	30...65	—24
ФАЧ-09	120...200	10...200	1...6	—22

Т а б л и ц а 4.2

Параметры многоотводных линий задержки

Тип МЛЗ	Центральная частота, МГц	Полоса пропускания, МГц	Длительность обработки сигнала, мкс	Число каналов	Выполняемые функции
ФАФ-03	12	0,5	64	4	СФ
ФАФ-04	12	0,5	64	8	СФ, ЛЗ
ФАФ-05	70	15	2,2	1	СФ
ПСФ-01	12	0,5	64	1	ПСФ
ПСФ-02	70	0,5	64	1	ПСФ

Согласованные фильтры состоят из входного ВШП, линии задержки и выходного ВШП.

Для получения ЛЧМ-сигнала информационный импульс подается на вход согласованного фильтра (СФ) с широкополосным входным малоэлементным ВШП. При этом вдоль структуры согласованного фильтра распространяется волновой пакет. На начальном участке выходного ВШП он возбуждает гармоники высоких частот сразу, а гармоники низкочастотной части спектра появляются только через время $t=l/V_a$, l — длина структуры; V_a — скорость распространения волнового

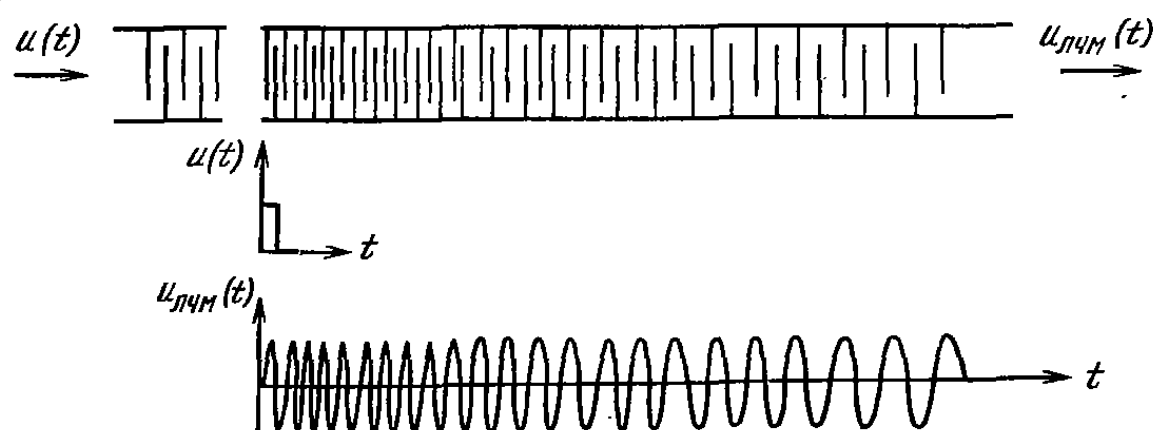


Рис. 4.3. Формирование ЛЧМ-сигнала

пакета. ЛЧМ-сигнал снимается с выходного ВШП. При этом закон распределения штырей должен быть линейным. При изменении длины штырей выходного ВШП от l_1 до l_2 частота выходного сигнала изменяется от $f_1 = V_a/l_1$ до $f_2 = V_a/l_2$. Длительность выходного сигнала будет равна разности времен задержек ПАВ, соответствующих шагам штырей l_1 и l_2 .

При приеме ЛЧМ-сигнала в случае совпадения пространственных структур сигнала и выходного ВШП (минимумы и максимумы сигнала окажутся под своими электродами) на выходных зажимах возникает мощный короткий информационный радиоимпульс.

Структура другого типа согласованного фильтра (рис. 4.4) включает в себя две отражательные решетки с изменяющимися шагами штырей, расположенные так, что отражение ПАВ происходит под углом 90° . Если структуры ЛЧМ-сигнала и решеток совпадают, то колебания различных частот, проходя разные пути, поступают на выход одновременно, что приводит к формированию информационного радиоимпульса.

КФМ-сигнал представляет собой последовательность коротких импульсов, начальная фаза каждого из которых принимает значение 0 или 180° . Для его получения на входной ВШП подают видеоимпульс, который возбуждает гармоническую ПАВ. Волна распространяется вдоль структуры, образуя на выходе импульс, фаза которого соответствует коду, заложенному во взаимное расположение электродов.

Если на входной ВШП подать КФМ-сигнал, согласованный со структурой выходного ВШП, то на выходном ВШП возникнет импульс, несущий информацию об информационном сигнале.

Для приема сложных сигналов с изменяющейся структурой используются программируемые согласованные фильтры с большим числом отводов. Схема управления подключает к выходу только те отводы, которые соответствуют сигналу, принимаемому в данный момент времени.

Широкое применение получили фурье-процессоры на ПАВ. По принципу действия они разделяются на резонансные (фильтровые), дисперсионные, интерференционные и корреляционные.

Фильтровые фурье-процессоры (ФП) на ПАВ применяются в системах радиосвязи и радиолокации для решения задач обнаружения и идентификации сигналов, а также измерения их спектра мощности. Они представляют собой специализированные вычислительные устройства, осуществляющие дискретное F_k или аналоговое $F(\omega)$ преобразование Фурье реализации сигнала $f(t)$ в реальном масштабе времени:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad k=0, 1, \dots, N-1;$$

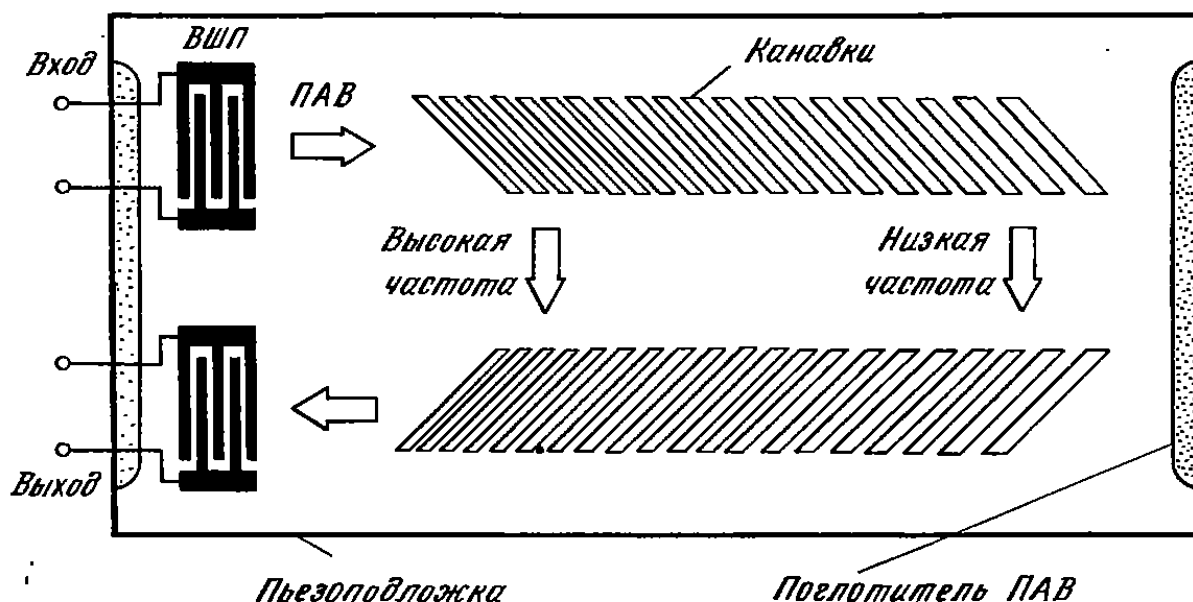


Рис. 4.4. Структуры согласованного фильтра ЛЧМ-сигнала

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt,$$

где N — число элементов разложения (точек преобразования Фурье).

Основными параметрами ФП являются:

диапазон частот 10...1500 МГц;

полоса частот $\Delta f \leq 500$ МГц;

минимальная относительная полоса пропускания: для резонаторных фильтров 0,01%, для ВШП и МПО структур 0,2%;

максимальное число фильтров на общей подложке 10...16;

динамический диапазон 40...60 дБ;

число элементов разложения N ;

разрешающая способность по частоте $\Delta f / N$;

время обработки (длительность обрабатываемого сигнала).

Дисперсионные ФП базируются на применении дисперсионных линий задержки (ДЛЗ). Они имеют полосу обзора 1...250 МГц и позволяют заменить сложные многоканальные устройства, содержащие сотни фильтров.

Интерференционные ФП позволяют измерять комплексные спектры сигналов с узкой полосой анализа (единицы — десятки килогерц). Это дает возможность использовать их для измерения тонкой структуры спектров при решении задач идентификации сигналов.

Основу корреляционных ФП составляют нелинейные устройства — конвольверы. Они осуществляют корреляционную обработку сигналов, при которой необходимая полезная информация получается с помощью функции взаимной корреляции сигналов $x(t)$ и $y(t)$:

$$B = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \dots y(t - \tau) d\tau,$$

т. е. конвольвер формирует свертку сигналов $x(t)$ и $y(t)$.

Относительная задержка входных сигналов осуществляется за счет встречного распространения ПАВ, перемножение достигается за счет нелинейных эффектов, а интегрирование выполняется в области взаимодействия акустических сигналов с системой электродов. Для реализации этих функций конвольвер содержит (рис. 4.5) входные ВШП (входы 1 и 2) и сплошные металлические электроды ИЭ (для интегрирования), расположенные на пьезоэлектрике (звукопроводе).

Для осуществления в реальном масштабе времени аналоговой корреляционной обработки сложного сигнала на один вход конвольвера подается принимаемый сигнал $u_c(t)$, на другой — опорное напряжение $u_{оп}(t)$. Пусть

$$u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t - kx) \\ \text{и } u_{оп}(t) = U_{оп} \cos(\omega_{оп} t + kx).$$

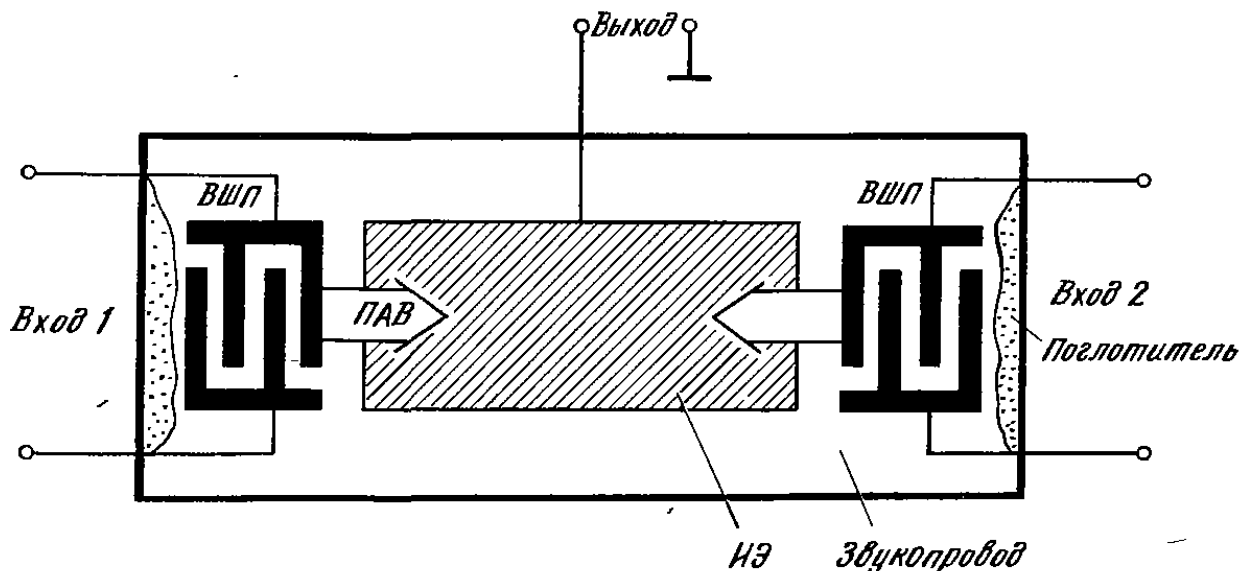


Рис. 4.5. Конструкция конвольвера

Конвольвер с этими напряжениями проводит следующие операции:

$$[u_c(t) + u_{оп}(t)]^2 = u_c^2(t) + 2u_c(t)u_{оп}(t) + u_{оп}^2(t)$$

Напряжения $u_c^2(t)$ и $u_{оп}^2(t)$ не используются. Произведение $2u_c(t)u_{оп}(t)$ содержит несколько составляющих:

$$2u_c(t)u_{оп}(t) = 2U_c U_{оп} \{ [\cos(\omega_c + \omega_{оп})t + (k_2 - k_1)x] + \cos [(\omega_c - \omega_{оп})t - (k_1 + k_2)x] \}.$$

При $\omega_c = \omega_{оп} = \omega$ и $k_1 = k_2$

$$2u_c(t)u_{оп}(t) = 2U_c U_{оп} \cos 2\omega t.$$

Таким образом, напряжение, считываемое с интегрирующего электрода, изменяется с частотой 2ω и имеет амплитуду, пропорциональную произведению амплитуд сигнала и опорного напряжения. В общем случае напряжения $u_c(t)$ и $u_{оп}(t)$ не являются одночастотными, поэтому выходное напряжение будет пропорционально интегралу

$$u(t) = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} u_c(t - \frac{x}{V}) u_{оп}(t + \frac{x}{V}) dx$$

или, введя переменную $\tau = t - x/V$ и считая, что время интегрирования превышает длительность сигналов, получим

$$u(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_c(\tau) u_{оп}(2t - \tau) d\tau.$$

Это выражение совпадает с выходным напряжением согласованного фильтра-свертки входного сигнала с импульсной характеристикой. Коэффициент 2 в аргументе функции $u_{оп}(2t - \tau)$ учитывает сжатие во времени, которое получается за счет того, что опорный сигнал движется навстречу принимаемому (время их взаимного перекрытия сокращается вдвое). Поэтому и частота выходных колебаний в 2 раза превышает частоту напряжений $u_c(t)$ и $u_{оп}(t)$. В связи с этим конвольвер можно рассматривать как согласованный фильтр с переменной структурой, зависящей от опорного сигнала. Такие устройства могут выполнять функции линейного полосового фильтра, ЛЧМ- и ФЧМ-фильтров, запоминающих устройств, позволяющих осуществлять запись сигнала, его хранение, считывание, вычислять функцию корреляции сигналов. Параметры конвольвера могут изменяться оперативно с изменением опорного напряжения.

Конвольверы характеризуются следующими параметрами:

рабочие частоты 10 МГц...1,5 ГГц;

ширина спектра обрабатываемых сигналов 20...250 МГц;

информационная емкость $\Delta f T_{ин}$ (несколько тысяч), где Δf — полоса пропускания, $T_{ин}$ — время интегрирования;

коэффициент преобразования (он определяет внутренние потери конвольвера)

$C_{пр} = 10 \lg \frac{P_3}{P_1} \cdot P_2$, где P_1, P_2 — электрические мощности на входных ВШП, P_3 — мощность сигнала свертки;

динамический диапазон свертки (до 40 дБ). Определяется уровнем ложных сигналов на выходе и нелинейным насыщением выходного сигнала.

5. Пьезоэлектрические датчики и преобразователи

С помощью пьезоэлектрических датчиков (ПЭД) измеряют усилие, давление, температуру, деформацию, массу, скорость, ускорение, глубину вакуума, расход, состав, влажность и концентрацию газа, напряжение, ток, мощность и т. п. Их используют в робототехнике, медицине, авиационной и космической технике и др.

Виды пьезоэлектрических датчиков

Вид датчика	Измеряемые параметры	Управляемый элемент колебательной системы	Управляемое свойство	Модулируемый параметр	Выходной параметр	Тип механических колебаний	Материал пьезоэлемента
Тензочувствительный	Сила, масса, деформация, ускорение, давление	Пьезоэлемент	Податливость	Частота	Частота	Сдвиг по толщине, изгиб АТ-срез	Кварц
Термочувствительный	Температура, вакуум, скорость потока, электрический ток, напряжение, мощность, состав газа	То же	То же	То же	То же	Сдвиг по толщине	То же
Геометрически чувствительный	Усилие, давление, ускорение	П о д в и ж н ы й электрод	”	Межэлектродная емкость	”	То же	Кварц, ниобат, танталат лития
Массочувствительный	Влажность, химический состав микромассы, толщина пленок, давление	Пленочное покрытие пьезоэлемента	Изменение массы	Частота	”	”	Кварц
Акусточувствительный	Влажность, давление, сила, масса, микроперемещение	Пленочное покрытие, элементы крепления, окружающая среда	Потери	Импеданс резонатора	Амплитуда	Продольные, поперечные	Кварц, пьезо-керамика, ниобат лития
Гирочувствительный	Угловая скорость	Пьезоэлемент	Деформация пьезоэлемента	Коэффициент связи многопольного преобразователя	То же	Комбинация продольных и поперечных колебаний	Пьезокерамика, кварц

Для получения датчика из пьезорезонатора измеряемые воздействия направляются на пьезоэлемент, поверхностную пленку, элемент крепления, окружающую среду. Чаще всего измеряемые воздействия преобразуются в частоту или амплитуду.

В частотных датчиках воздействия направляются на пьезоэлемент или пленку на его поверхности.

В амплитудных датчиках воздействия направляются на узел крепления пьезоэлемента или окружающую среду. При этом изменяются условия излучения ультразвука с поверхности пьезоэлемента и, следовательно, осуществляется управление потерями.

Для ПЭД выбирают пьезокристаллы со срезами, обеспечивающими максимальную чувствительность к температуре и механическому давлению.

В практических схемах датчиков используется дифференциальное включение резонаторов, обеспечивающее высокую точность и температурную стабильность. Резонаторы входят в схемы генераторов, по разнице частот которых судят об измеряемом параметре.

Основные виды пьезоэлектрических датчиков приведены в табл. 5.1.

5.1. Термочувствительные датчики

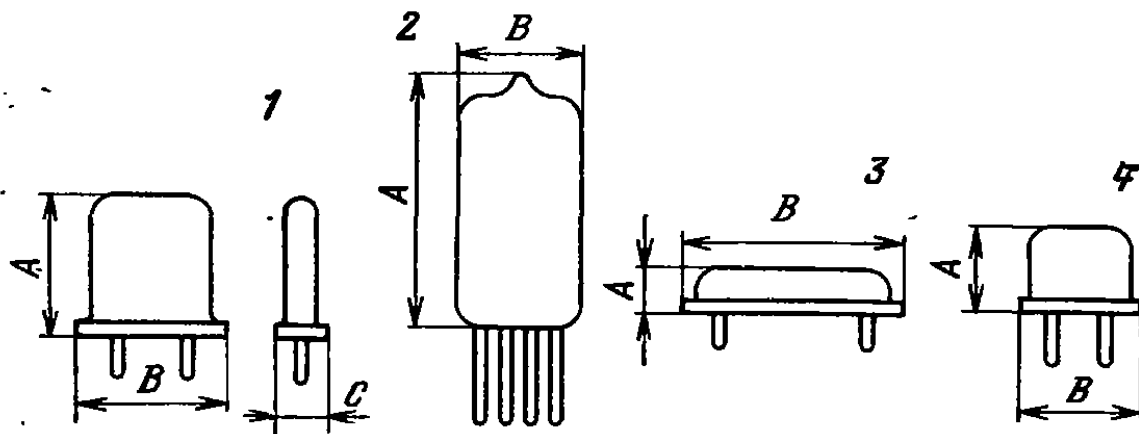
Чаще всего применяются датчики температуры. Они выпускаются в герметизированном корпусе типа М и вакуумированном стеклянном баллоне типа С. Параметры основных типов термочувствительных датчиков приведены в табл. 5.2.

Т а б л и ц а 5.2

Параметры термочувствительных датчиков

Тип датчика (фирма, страна)	Номинальная частота, кГц	Коэффициент преобразования, Гц/°С	Диапазон рабочих температур, °С	Размеры, мм			Добротность	Габаритный чертеж корпуса
				A	B	C		
РТ-01*	14310	500	—60...+120	13,5	11	4,7	$5 \cdot 10^4$	1
РТ-02*	26500	1000	—60...+125	13,5	11	4,7	$5 \cdot 10^4$	1
РЦ2.821.004*	5000	170	—60...+120	42	19	—	10^6	2
РТ-04*	5000	180	—60...+125	13,5	11	4,7	$5 \cdot 10^4$	1
РТ-05*	4980,6	400	+45...+85	7	24	—	10^6	3
РК-317ТВА*	7040	680	—60...+125	10	10	—	$3 \cdot 10^4$	4
РК-317ТВБ*	7040	260	—60...+125	10	10	—	$3 \cdot 10^4$	4
(Хьюлетт — Паккард, США)	28000	1000	—80...+125	10	10	—	—	4
Токио Денпа (Япония)	28000	1000	—50...+100	14	12	5,5	—	1
	10600	1000	—50...+100	8	8	3,2	—	1
	10600	1000	—50...+100	10	3	—	—	1

* Порог чувствительности датчиков 10^{-6} °С, ТКЧ $-(34...37) \cdot 10^{-6}$.



5.2. Тензочувствительные датчики

Тензочувствительные датчики измеряют усилия, давления, ускорения и другие физические величины. Конструкция датчика для измерения усилия приведена на рис. 5.1, а. При усилии F резонаторы имеют разную деформацию: $ПЭ_1$ — сжимается, $ПЭ_2$ — растягивается. В итоге о величине усилия судят по разности частот генераторов с резонаторами $ПЭ_1$ и $ПЭ_2$.

Эффективность резонаторов определяется коэффициентом силовой чувствительности

$$S_F = \frac{\partial f}{\partial F} = \frac{k f^2}{D n}, \quad (5.1)$$

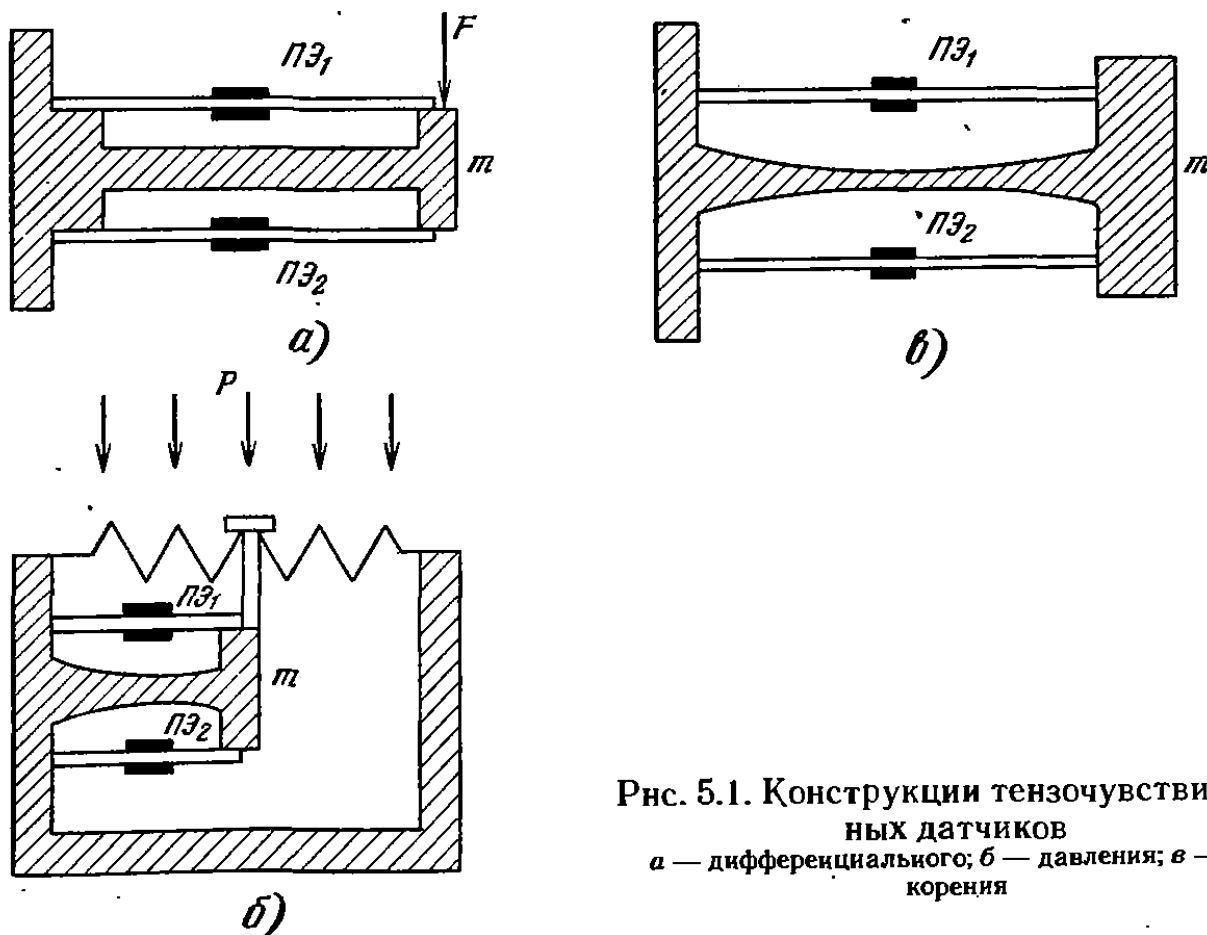


Рис. 5.1. Конструкции тензочувствительных датчиков
а — дифференциального; б — давления; в — ускорения

где k — коэффициент, зависящий от ориентации пьезоэлемента и направления приложения силы; D — диаметр круглого пьезоэлемента или ширина прямоугольной пластины; n — порядок колебаний.

Из выражения (5.1) видно, что чувствительность по силе возрастает пропорционально квадрату частоты и уменьшается при увеличении размера пьезоэлемента или повышении порядка колебаний.

Конструкция датчика для измерения давления изображена на рис. 5.1, б. Он имеет мембрану (сильфон), присоединенную к пьезоэлементу.

Параметры наиболее распространенных типов датчиков приведены в табл. 5.3.

Работа пьезорезонансных измерителей ускорения основана на зависимости частоты силовых чувствительных резонаторов от инерционного усилия $F = ma$, пропорционального значениям ускорения a и инерционной массы m (рис. 5.1, в). Такие датчики имеют частотный выход, который упрощает операции интегрирования ускорения, необходимые при решении навигационных задач в системах управления летательных аппаратов и транспортных средств, для определения скорости (однократное интегрирование) и пройденного расстояния (двойное интегрирование).

Для измерения отклонения заданного направления от горизонтального или вертикального используются пьезорезонансные наклонометры. Цифровой измеритель наклона компании "Токио Денпа" имеет следующие параметры:

Диапазон измерений	$\pm 10\%$
Точность	$\pm 0,1\%$
Разрешающая способность	$\pm 0,01\%$
Диапазон рабочих температур .	$-10...+50^\circ \text{C}$
Чувствительность	10^{-4}

Т а б л и ц а 5.3

Параметры тензочувствительных датчиков

Параметры	Тип датчика			
	РС-01	ЭПК-А	ЭПК-В	ЭПК-Г
Номинальная частота f_n , МГц	10	10	10	5
Добротность $Q, \times 10^3$	50	80	80	10^3
Коэффициент силовой чувствительности S_F , Гц/г	1,2	1,7	2,5	0,05
Максимальная нагрузка, Н	70	50	30	2000
Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	$-40...+85$	$0...+50$	$-60...+125$	$-40...+50$

5.3. Массочувствительные датчики

Массочувствительные датчики применяются для измерения различных физических параметров.

Изменение частоты Δf связано с изменением массы Δm соотношением

$$\Delta f = -C_m \Delta m, \quad (5.2)$$

где $C_m = f^2 / NqS$ — чувствительность по массе; f — частота резонатора; N — постоянная, определяемая срезом резонатора; q — плотность пьезоэлемента; S — площадь пластины.

Основными параметрами измерителей частоты являются:

Чувствительность	2,5 МГц/мг
Разрешающая способность	10^{-11} г

Изменение частоты связано с изменением толщины пленочных покрытий Δh соотношением

$$\Delta f = -C_h \Delta h, \quad (5.3)$$

где $C_h = f^2 / Nq_p h$ — чувствительность по толщине; q_p — плотность покрытия; h — толщина покрытия.

Параметры толщиномеров обычно находятся в пределах:

Диапазон измерения	$10^{-6} \dots 10^{-11}$ мм
Рабочая частота пьезоэлемента	1...10 МГц
Погрешность измерения толщины	$\pm 2\%$

Из выражений (5.2) и (5.3) видно, что чувствительность по толщине и массе повышается по мере повышения частоты. Поэтому целесообразно применять высокочастотные массочувствительные резонаторы.

Измерители толщины широко применяются для измерения толщины полупроводниковых, проводящих и диэлектрических пленок при их нанесении в процессе производства интегральных микросхем. Они устанавливаются в напылительной

Т а б л и ц а 5.4

Параметры газоанализаторов

Тип измерителя	Анализируемая среда	Диапазон измерений	Относительная влажность, %	Измеряемая величина	Основная абсолютная погрешность, %	Температура анализируемой среды, °С
Волна-1М	Воздух, инертные газы	0...100%	0...100	—	1,5	0...60
Волна-2М	То же	0...100%	0...100	—	2,0	0...60
Волна-5	"	0...100%	0...100	—	2,5	0...60
Дельта-1	"	0...100%	0...100	—	2,0	5...60
Исток-1	Пропилен, азот, воздух	$1 \dots 1000 \text{ млн}^{-1}$	—	Объемная доля влаги	—	20...50
Исток-2	Этилен, пропилен, винилхлорид, азот, воздух	$1 \dots 1000 \text{ млн}^{-1}$	—	То же	—	5...50
Прибой	Бензол, толуол	$0 \dots 500 \text{ млн}^{-1}$	—	Массовая доля влаги	—	20...50

П р и м е ч а н и е. Для всех указанных типов измерителей температура окружающей среды 5...50 °С, срок службы 6 лет.

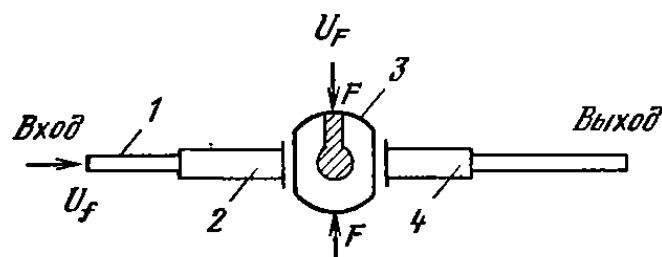


Рис. 5.2. Конструкция датчика для волоконно-оптической линии связи

установке возле подложки, на которую наносятся пленки. Контроль за толщиной пленки осуществляется по изменению частоты генератора.

Пьезоэлектрические массочувствительные датчики могут использоваться в качестве измерителей влажности. Для этого на пьезоэлементы датчиков наносятся сорбирующее влагодчувствительное покрытие. При изменении влажности изменяется масса воды, сорбированной покрытием, что приводит к изменению частоты генератора датчика.

Аналогично работают и газоанализаторы, которые в качестве сорбирующей пленки имеют составы, реагирующие на различные газы. Параметры измерителей на пьезорезонаторах приведены в табл. 5.4.

Для ввода информации в волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) используются датчики, работа которых основана на эффекте модуляции параметров оптического излучения при прохождении через колеблющийся пьезокристаллический вибратор. Поляризованный световой поток, проходя через оптически прозрачный вибрирующий пьезоэлемент и выходной анализатор, модулируется по яркости с частотой колебаний пьезоэлемента.

Конструкция пьезорезонансного датчика для ВОЛС изображена на рис. 5.2. Входной световой поток U_f из оптической линии 1 проходит через входную линзу и анализатор 2 к пьезорезонатору 3, а затем — на выход через выходной анализатор и линзу 4. В торцах резонатора выполнены окна, обеспечивающие сквозное прохождение света. При отсутствии колебаний резонатора яркость выходного светового потока близка к нулю. При возбуждении резонатора яркость выходного потока становится модулированной.

5.4. Акусто- и гирочувствительные датчики

Различные физические величины (давление газа, параметры жидкости, усилия, микроперемещения и пр.) могут быть измерены с помощью акусто- и гирочувствительных резонаторов. В акусточувствительных резонаторах используются объемные акустические волны. Гирочувствительные резонаторы работают на эффекте модуляции параметров резонатора при изменении условий его акустического излучения в контактирующую с ним среду. На основе гирочувствительных пьезопреобразователей созданы пьезоэлектрические виброгироскопы. Они применяются для измерения угловых скоростей в навигационных системах летательных аппаратов. Их работа основана на действии сил Кориолиса, возникающих в колеблющемся пьезовибраторе при его вращении. Виброгироскоп имеет следующие характеристики:

Рабочий диапазон измерения	0,01...100 рад/с
Чувствительность	5 с/рад
Нелинейность, не более	5%
Полоса пропускания	0...100 Гц
Питание	28 В; 1,5 Вт
Время готовности, не менее	5 с

5.5. Датчики на ПАВ

Основу датчиков на ПАВ составляют пьезопреобразователи на поверхностно-акустических волнах. В датчиках на ПАВ получили распространение два основных типа преобразователей: линии задержки и резонаторы.

Датчики на ПАВ применяются для измерения температуры, давления, перемещения, ускорения и пр. В основе работы этих датчиков лежат изменения геометрических размеров, плотности и других свойств материалов звукопровода. При этом изменяется скорость ПАВ, которая связана с величиной измеряемого воздействия. Датчики на ПАВ строятся в основном по схемам с частотным и фазовым выходами. Простейшая схема датчика с фазовым выходом изображена на рис. 5.3, а. Она содержит линию задержки 1 и генератор опорной частоты 2. Фазометр 3 измеряет изменение фазы $\Delta\varphi$ между входом и выходом. Однако точность измерения в такой схеме зависит от температуры. Этот недостаток устраняется в дифференциальных схемах (рис. 5.3, б).

Одна из конструкций термодатчика приведена на рис. 5.4, а, а его ТЧХ — на рис. 5.4, б. Датчик имеет кварцевую подложку 1 с ВШП 2, помещенную в корпус 3 с гермовводом 4, керамикой 5, посеребренной крышкой 6, герметизирующим уплотнением 7.

Основными параметрами термодатчиков являются:

Диапазон измерения температур	До 100...125 °С
ТКЧ	$30 \cdot 10^{-6}$
Разрешающая способность	$(10...30) \cdot 10^{-6} \text{С}$
Дрейф за 1 год	0,03...0,3 °С

Конструкции датчиков для измерения усилий изображены на рис. 5.5.

В датчиках давления на ПАВ (рис. 5.6) преобразование давления P в деформацию осуществляется в два этапа: сначала с помощью дискретного упругого элемента

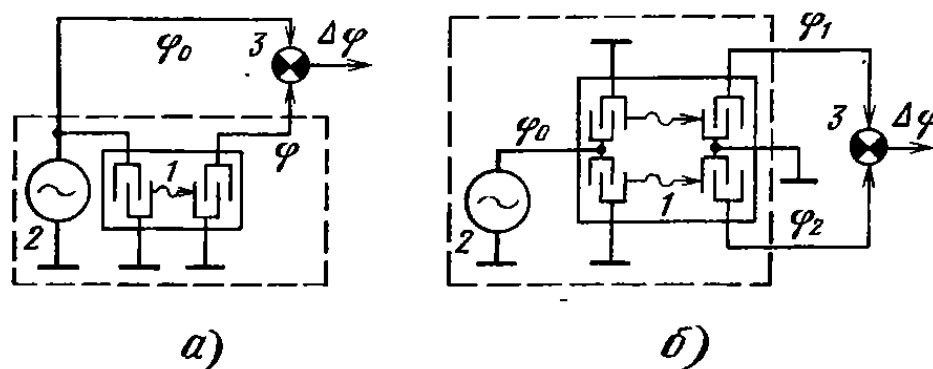


Рис. 5.3. Схемы датчиков на ПАВ с фазовым выходом:
а — простейшая; б — дифференциальная

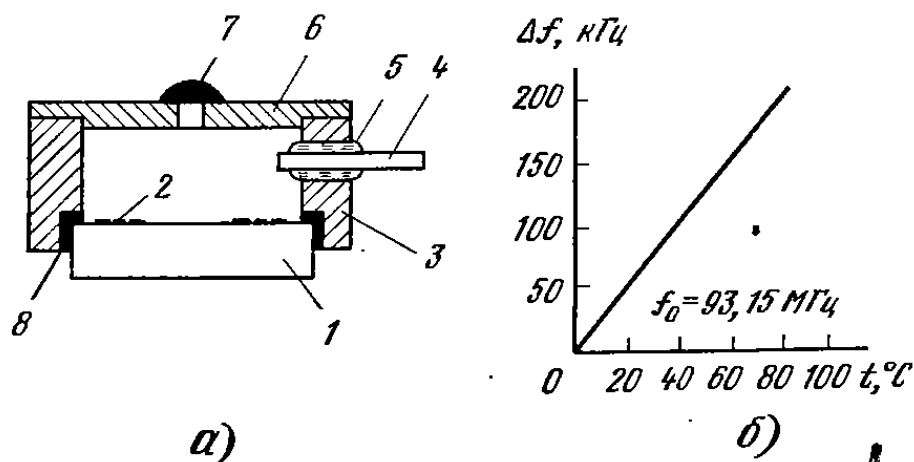


Рис. 5.4. Термодатчик на ПАВ:
а — конструкция; б — ТЧХ

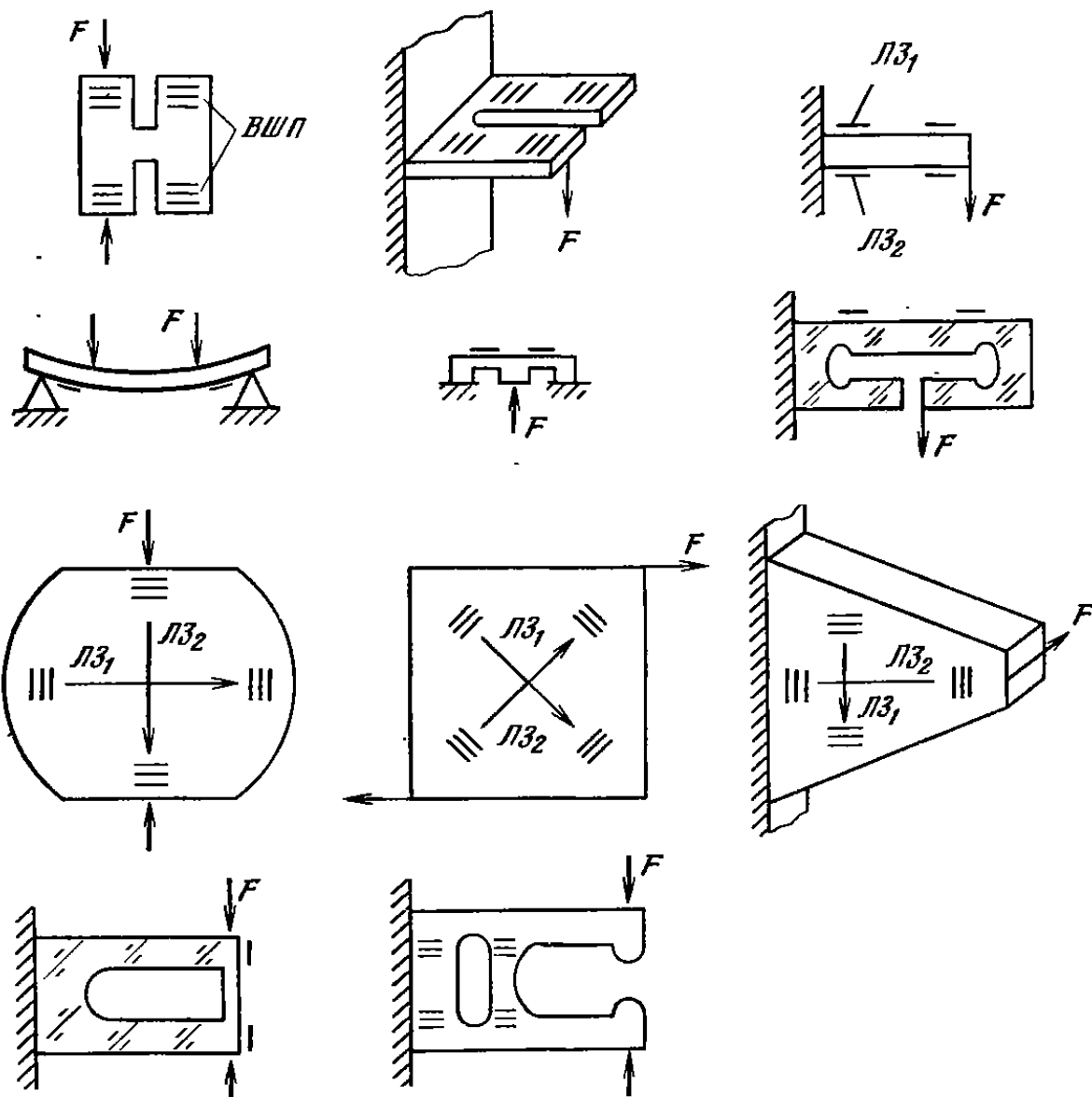


Рис. 5.5. Конструкция датчиков усилий на ПАВ

(мембраны 1 или силфона 2) давление преобразуется в перемещение или усилие, а затем это воздействие через упругий шарнир 3 и рычаг 4 прикладывается к чувствительному элементу на ПАВ 6. Все элементы датчика располагаются в корпусе 5.

Основными параметрами датчиков давления на ПАВ являются:

Рабочее давление	До 0,35 МПа
Коэффициент преобразования	350 кГц/МПа
Нелинейность	0,18%
Гистерезис	0,06%
Диапазон рабочих температур	—50...+100 °С

Принцип действия датчиков ускорения на ПАВ основан на том, что выходной частотный сигнал вырабатывается в результате деформации подложки, на которой сформирован преобразователь на ПАВ, под действием усилия, создаваемого при ускорении инерционной массы. Конструкции датчиков ускорения на ПАВ приведены на рис. 5.7. Основным элементом конструкции датчиков является инерционная масса 1. Усилие $F=ma$, возникающее при изменении ускорения a , изменяет условие распространения ПАВ в линии задержки 2, что обеспечивает измерение ускорения. Отличия в конструкциях датчиков определяют их различные параметры.

Принцип работы датчиков микроперемещений на ПАВ основан на образовании в резонансной области звукопровода (пьезоподложки) стоячей волны. Эта волна характеризуется чередованием узлов и пучностей механических деформаций, распределение которых зависит от частоты приложенного напряжения. При этом вбли-

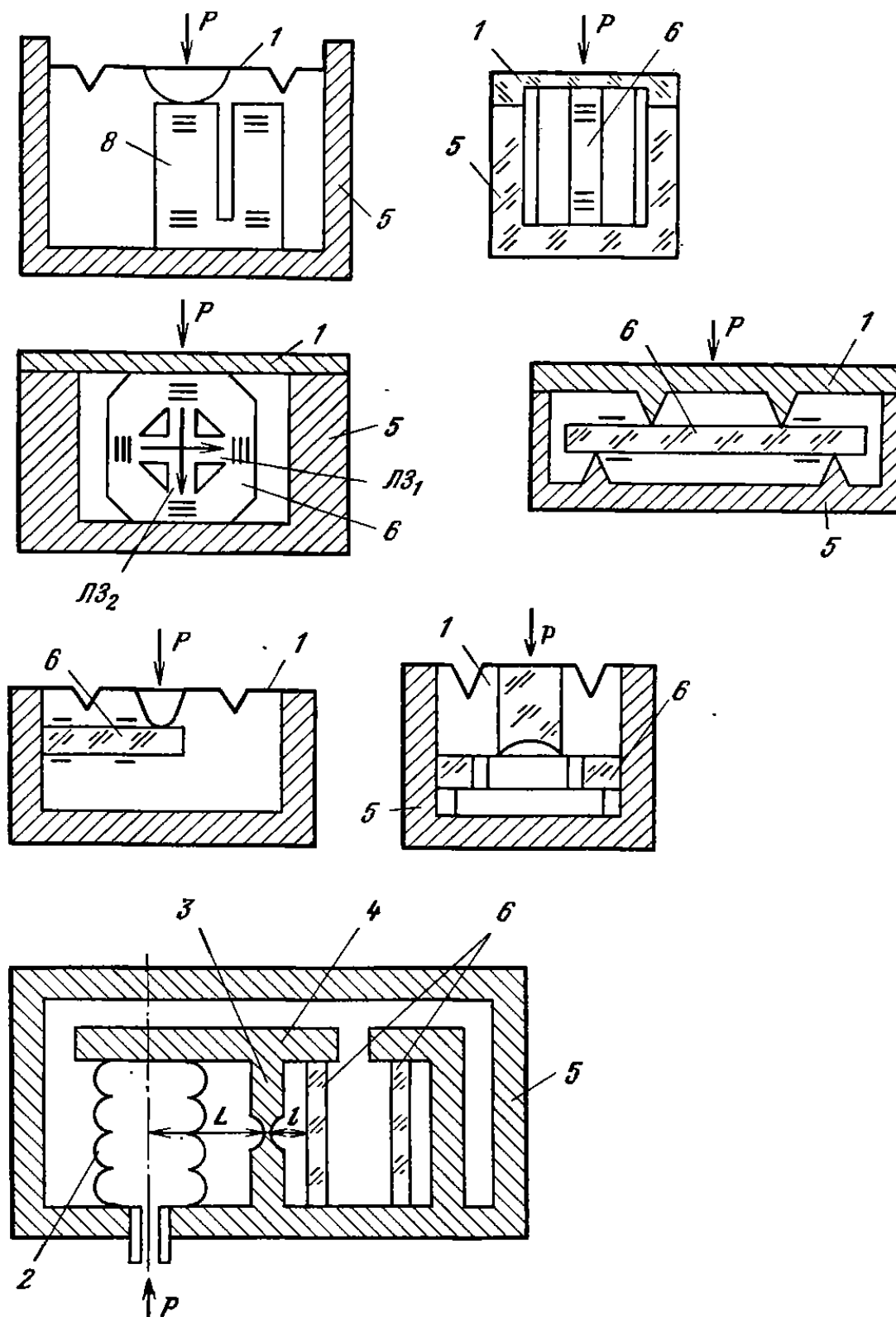


Рис. 5.6. Конструкции датчиков давления на ПАВ

на поверхности звукопровода создается электрическое поле, имеющее те же пространственный период и частоту.

Простейшая схема датчиков микроперемещений на ПАВ показана на рис. 5.8. Вблизи звукопровода помещается зонд 1, чувствительный к электрическому полю. Его перемещения в горизонтальном направлении вызывают периодические изменения амплитуды выходного электрического сигнала. Подсчитав число узлов или пучностей сигнала и зная расстояние между ними, можно определить перемещение зонда относительно звукопровода, а следовательно, измерить перемещение объекта. В качестве зонда для снятия сигнала вблизи звукопровода может устанавливаться второй звукопровод. Тогда вместо стоячих волн используются бегущие волны. Звукопроводы образуют линию задержки, в которой время задержки изменяется с

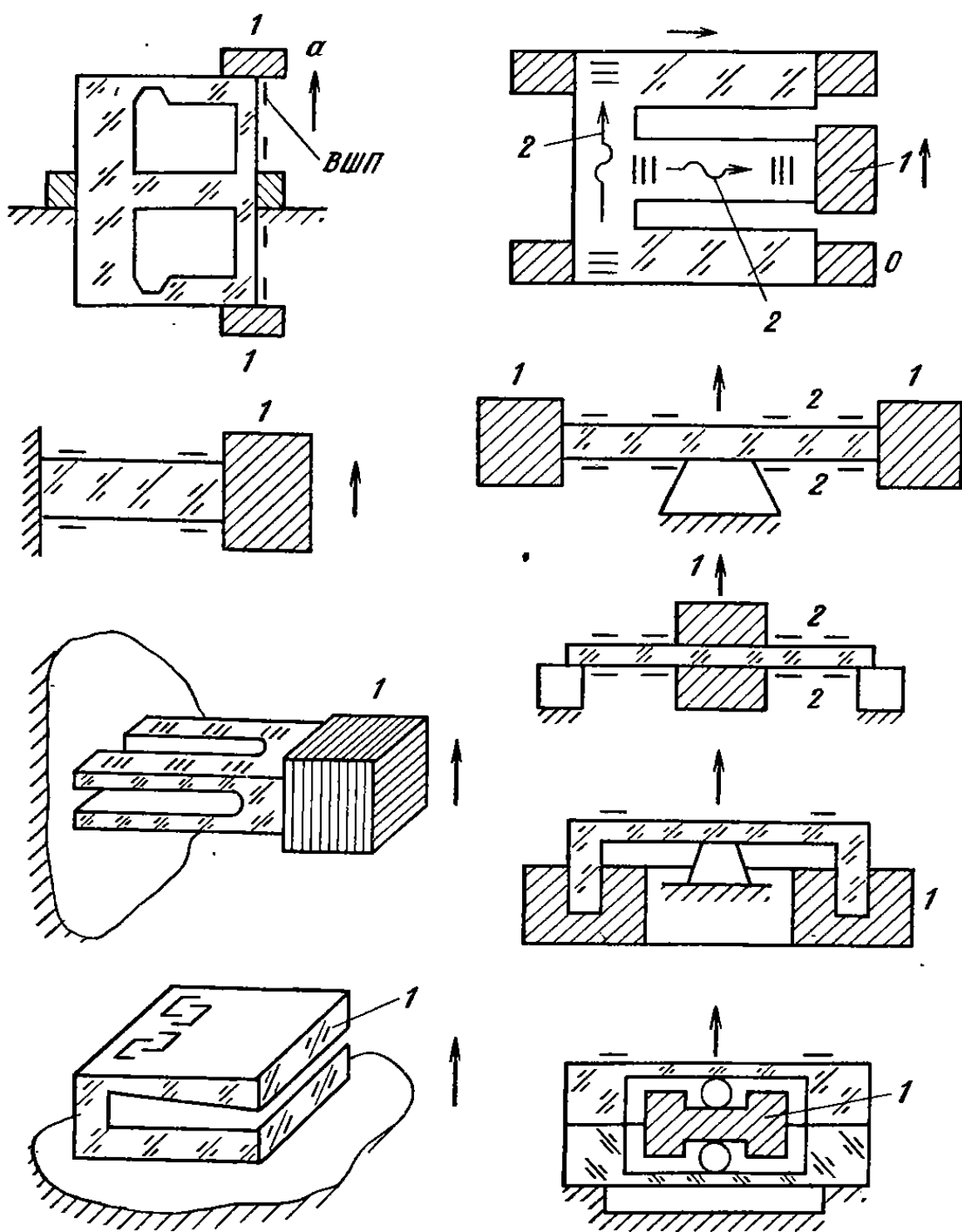


Рис. 5.7. Конструкция датчиков ускорения на ПАВ

изменением положения второго звукопровода (зонда) относительно первого. Микроперемещения преобразуются в фазу колебаний (рис. 5.8, б) или в его частоту (рис. 5.8, в). В схеме на рис. 5.8, б на верхней поверхности подложки 1 от внешнего генератора 2 с помощью преобразователя 3 возбуждается бегущая ПАВ, которая переходит в подложку 4. Выходной электрический сигнал с преобразователя 5 на второй подложке поступает на один вход фазометра 6, на другой вход которого поступает с генератора 2 сигнал опорной фазы. Величина микроперемещения определяется по изменению фазы, которая зависит от перемещения подложки 4 относительно подложки 1.

В схеме на рис. 5.8, в для возбуждения колебаний сигнал с выхода 5 подается на вход усилителя 6. Выход усилителя связан с входным преобразователем. Изменение времени задержки $\Delta\tau/\tau$ приводит к изменению частоты

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta\tau}{\tau} = -\frac{\Delta L}{L},$$

где $\tau = L / V_{\text{ПАВ}}$.

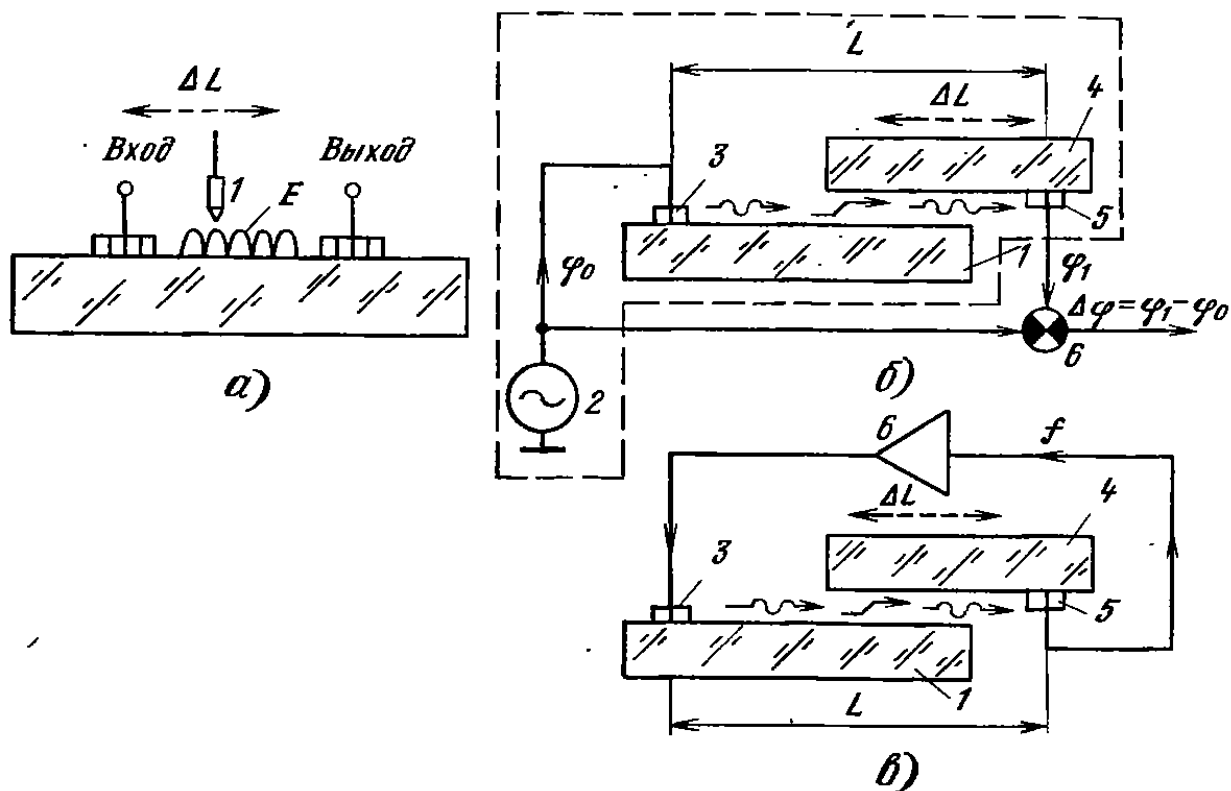


Рис. 5.8. Схемы датчиков микроперемещений на ПАВ:
 а — простейшая; б — с фазовым выходом; в — с частотным выходом

Основными параметрами датчиков перемещений являются:

Диапазон перемещений	До 1 мм
Точность измерений	0,01 мкм
Рабочая частота	50...80 МГц

Для измерения некоторых физических величин применяются также **подогревные пьезоэлектрические датчики**. Конструктивно они объединяют пьезоэлектрический резонатор и электронагреватель (или холодильник), предназначенный для перестройки частоты пьезорезонатора посредством изменения его температуры. Температура резонатора и соответственно его частота зависят от значения подводимой в нагреватель электрической мощности, а также условий отвода теплоты от резонатора. В соответствии с этим возможны два режима работы датчиков. В первом режиме измеряемый параметр преобразуется в пропорциональное изменение мощности, рассеиваемой в нагревателе при постоянных условиях теплоотдачи. Во втором режиме измеряемый параметр преобразуется в изменение условий теплоотдачи при постоянной мощности рассеяния.

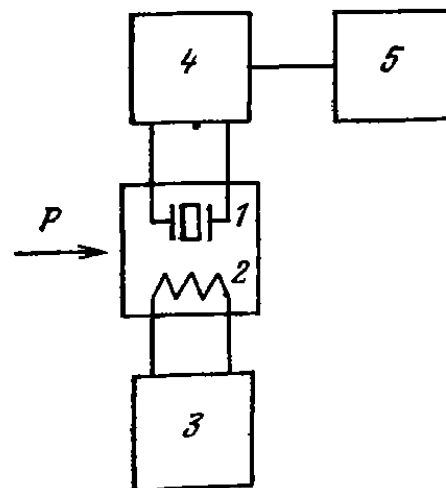


Рис. 5.9. Структурная схема подогревного пьезоэлектрического датчика

Такие резонаторы позволяют измерять, например, давление газов. Структурная схема измерителя приведена на рис. 5.9. При изменении давления P изменяются условия теплоотдачи датчика температуры 1 и изменяется температура (частота) его при подаче на нагреватель 2 постоянной мощности от источника 3. По измеренной частоте генератора 4 с помощью измерителя частот 5 судят о давлении газов. Чувствительность измерителя достигает 10^{-5} мм рт.ст.

С помощью подогревных пьезоэлектрических датчиков измеряют и электрические величины. Под действием тока происходит нагревание датчиков и, следовательно, изменение температуры и частоты, по которым судят об измеряемых величинах. Точность измерения при этом лежит в пределах 0,02...0,05%.

Ниже приведены параметры различных пьезоэлектрических датчиков и их габаритные чертежи, а в табл. 5.5 показано основное их назначение.

Т а б л и ц а 5.5

Назначение пьезоэлектрических датчиков

Вид датчика	Назначение	Габаритный чертеж корпуса
Пьезопреобразователи:		
П-1 — П-5	Перемещение оптических элементов квантовых генераторов	1
ПП-4, ПП-5	Автоматическая подстройка и поддержание постоянства параметра квантовых генераторов	1
Датчик токов Короткова ДТК-1	Схема пульсовой волны при измерении артериального давления	10
Пьезоэлектрические сигнализаторы:		
В-2	В устройствах сигнализации	7
М-1Д	Для выдачи сигнала тревоги в момент разрушения стекла	9
Акустический пьезопреобразователь ПАП-1	Для излучения и приема ультразвуковых колебаний в системах телеуправления сельскохозяйственными устройствами опыления	3
Пьезокерамические звонки ЗП1 — ЗП9	Преобразование электрических колебаний в звуковые	13 — 19
Пьезокерамические резонаторы РПМ-1	Преобразование электрических колебаний в звуковые в электронных часах	20
Телефон ТПК-583	Преобразование электрических колебаний в звуковые и обратно	2
Пьезокерамические элементы:		
ЭП4Т-2, ЭП4Т-6	Преобразование механических колебаний в электрические сигналы в звукоусилителях электропроигрывающих устройств	11
ЭП4П-7	Преобразование в ультразвуковых линиях задержки	6

Вид датчика	Назначение	Габаритный чертеж корпуса
ЭП4П-12, ЭП4К-17, ЭП4К-18, ЭП4Д-21	Преобразование механических колебаний в электрические	—
ЭП8П-2, ЭП16П-007	Преобразование колебаний в ультразвуковых линиях задержки телевизионных приемников и видеоманитрофонов цветного изображения	—
Пьезокерамические преобразователи ППК-3, ППК-4	В пьезодвигателях магнитофонов, электропроигрывателей и др.	12
Пьезоприемники давления сейсмические ПДС-22	Регистрация сейсмических волн	8

Параметры пьезопреобразователей

Номинальная частота:

П-1 — П-5 $10 \dots 10^3$ Гц

ПП-4, ПП-5 $50 \dots 10^3$ Гц

Емкость, не более:

П-1 0,068 мкФ

П-3, П-5 0,037 мкФ

П-4 0,025 мкФ

ПП-4 $0,08 \pm 0,02$ мкФ

ПП-5 $0,02 \pm 0,005$ мкФ

Максимальное напряжение:

П-1 — П-5 600 В

ПП-4, ПП-5 300...500 В

Чувствительность:

П-1, не более $2 \cdot 10^{-3}$ мкВ/м

П-3, не более $3 \cdot 10^{-3}$ мкВ/м

П-4, П-5, не более $4,5 \cdot 10^{-3}$ мкВ/м

ПП-4, ПП-5, не менее $4 \cdot 10^{-3}$ мкВ/м

Тангенс угла потерь для ПП-4, ПП-5, не более 0,035

Гистерезис для ПП-4, ПП-5, не более 30

Диапазон перемещений для ПП-4, ПП-5, не менее $\pm 1,2$ мкм

Параметры датчика токов Короткова ДТК-1

Номинальная частота 20...200 Гц

Коэффициент преобразования 3...15 мВ/Па

Неравномерность АЧХ, не более 10

Параметры пьезоэлектрических сигнализаторов

	В-2	М-1Д
Напряжение питания	—	10...30 В
Падение напряжения в режиме насыщения, не более	—	1 В

Чувствительность, не менее	10^{-3} В·см ² /м —
Ток в закрытом состоянии, не более	— 2,5 мкА
Сопротивление между выводами, не более	1 Ом —

Параметры акустического пьезопреобразователя ПАП-1

Номинальная частота	21...31 кГц
Ширина полосы частот излучения, не менее	350 Гц
Акустическое давление на 0,5 м и 1 В	5 Па
Чувствительность	4 В/Па
Напряжение на выходе приемника, не менее	0,5 В
Емкость	3500 ± 1000 пФ
Выходное сопротивление, не более	3,9 кОм
Ширина диаграммы направленности	$7,5 \pm 2,5$ град

Параметры звонков пьезокерамических ЗП-1-ЗП-9

Номинальная частота:		
ЗП-1, ЗП-2	1...3 кГц	
ЗП-3, ЗП-4, ЗП-6	4100 ± 50 кГц	Гу ?
ЗП-7М	5000 ± 500 кГц	— ?
ЗП-8	4500 ± 500 кГц	— ?
ЗП-9	8000 ± 500 кГц	— ?
Уровень звукового давления, не менее	75 дБ	
Входное напряжение (кроме ЗП-5)	$5 \pm 0,2$ В	
ЗП-5	$3 \pm 0,2$ В	
Потребляемая мощность (кроме ЗП-5), не более	$5 \cdot 10^{-2}$ Вт	
ЗП-5, не более	$20 \cdot 10^{-3}$ Вт	
Емкость ЗП-5	0,036...0,084 мкФ	

Параметры пьезокерамического резонатора РПМ-1

Номинальная частота	$7,8 \pm 1,7$ кГц
Емкость, не менее	12 пФ
Сопротивление, не менее	400 Ом

Параметры телефона ТПК-583

Номинальная частота	300...3000 Гц
Чувствительность	1,4 Н/(м·В)
Неравномерность частотной характеристики	23 дБ
Коэффициент нелинейных искажений, не более	4%
Сопротивление на частоте 1000 Гц	$6,5 \text{ кОм} \pm 20\%$

Параметры пьезокерамических элементов

Номинальная частота для ЭП4П-7	$(6...12) \pm 0,5$ МГц
Резонансная частота для ЭП8П-2	$4,4 \pm 0,25$ МГц
Коэффициент электромеханической связи, не менее:	
ЭП4П-7	0,6
ЭП16П-007	0,61
Чувствительность, не менее:	
ЭП4Т-2	54 мВ
ЭП4Т-6	36 мВ
Емкость, не менее:	
ЭП4Т-2	515 пФ
ЭП4Т-6	440 пФ
Тангенс угла потерь, не более:	
ЭП4П-7	0,07
ЭП4П-12 — ЭП4К-17, ЭП4К-18, ЭП4Д-21	$(1,2...3,5) \cdot 10^{-2}$
ЭП16П-007	0,02

Диэлектрическая постоянная:

ЭП4П-12, ЭП4К-17, ЭП4К-18, ЭП4Д-21		1400...2800
ЭП16П-007		850...1400
ЭП4П-12, ЭП4К-17, ЭП4Д-21, не менее		$10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Параметры пьезокерамических преобразователей

Напряжение при резонансе:

ППК-3, ППК-4		40 В
ППК-3-1, ППК-3-2		200 В

Коэффициент электромеханической связи, не менее

0,27

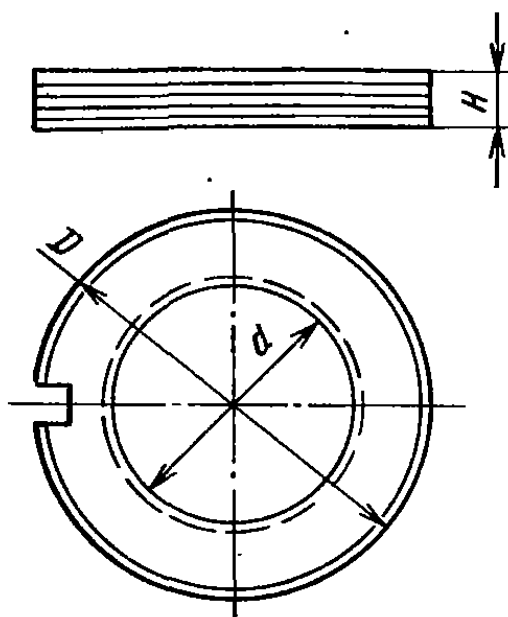
Тангенс угла потерь, не менее

1%

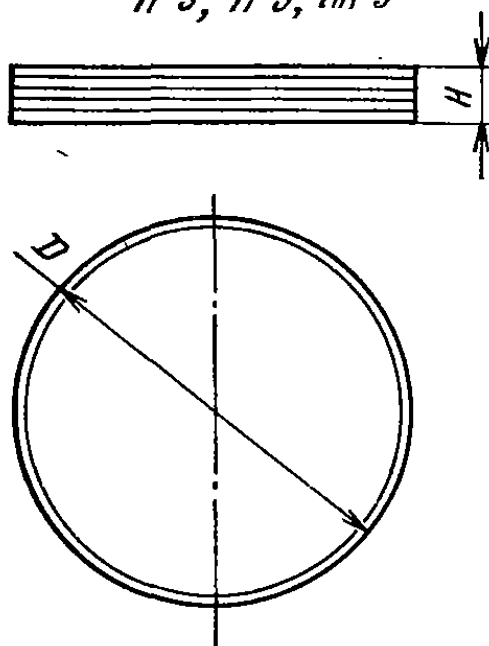
Параметры пьезоприемника давления сейсмического ПДС-22

Номинальная частота		5...1000 Гц
Чувствительность	...	50...400 мкВ/Па
Емкость		$20 \cdot 10^3 \pm 5 \cdot 10^3 \text{ пФ}$

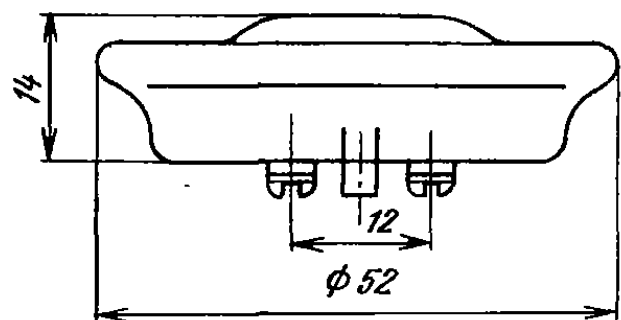
П-1, П-4, ПП-4 1



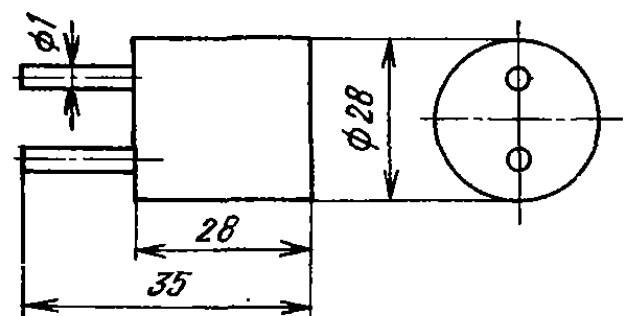
П-3, П-5, ПП-5 4



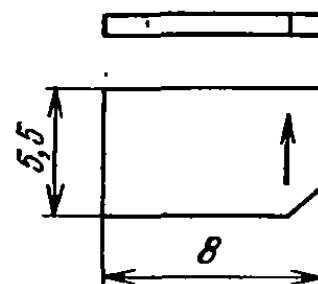
ТПК-583 2



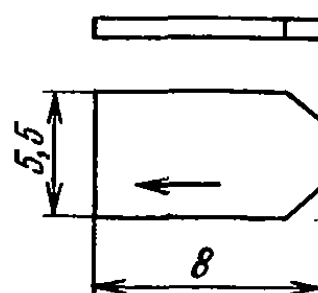
ПАП-1 3



ЭП4П-7-1-ЭП4П-7-9
ЭП4П-7-19-ЭП4П-7-22 5



ЭП4П-7-10-ЭП4П-7-18
ЭП4П-7-23-ЭП4П-7-26 6



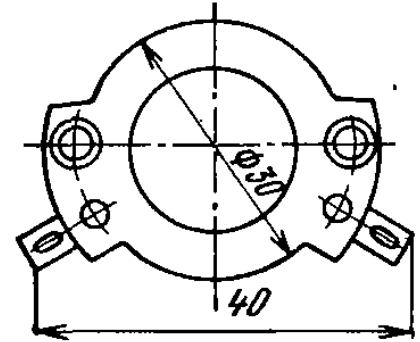
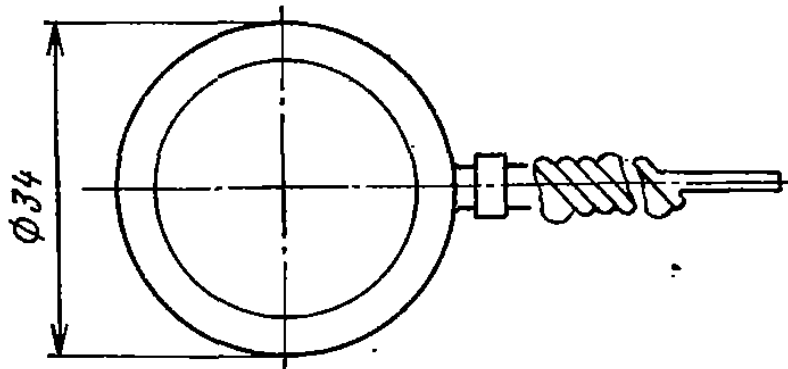
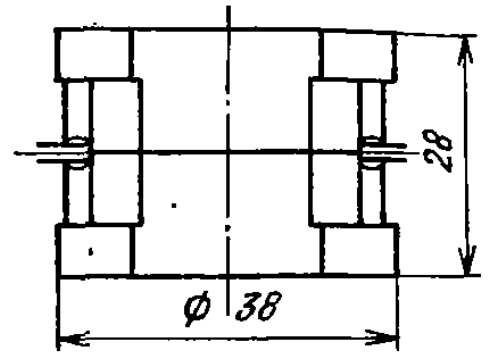
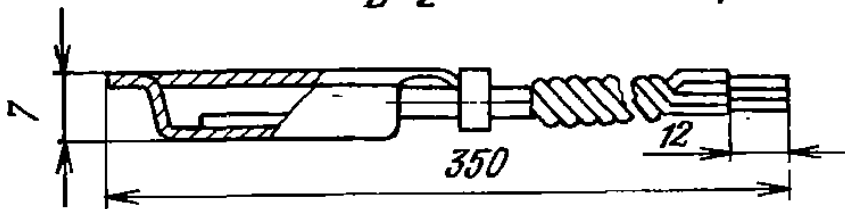
Тип	D	d	H
П-1	30	18	3
П-3	15	-	4,2
П-4	23	15	1,8
П-5	23	-	1,8

B-2

7

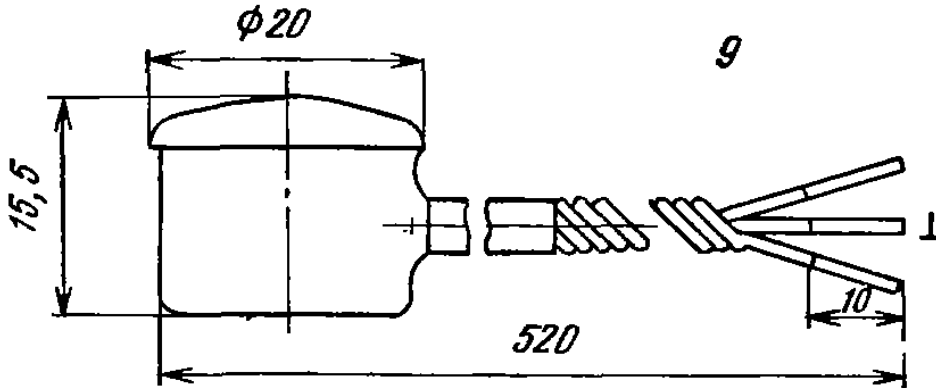
ПДС-22

8



М-1Д

9

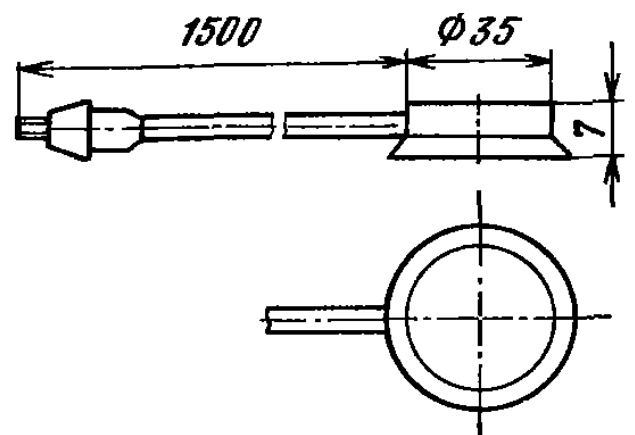
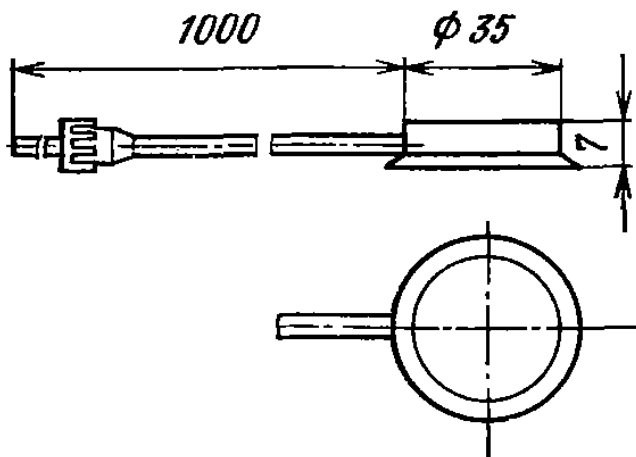


10

Вариант I

ДТК-1

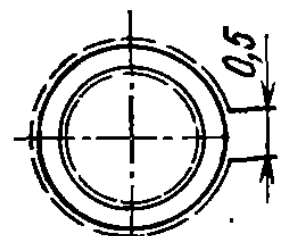
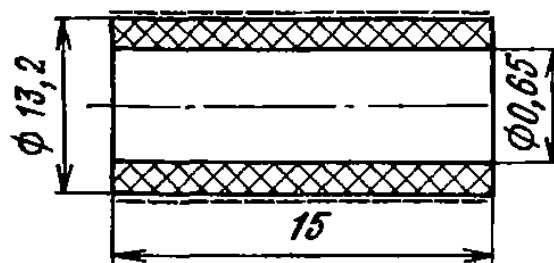
Вариант II



11

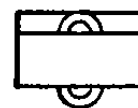
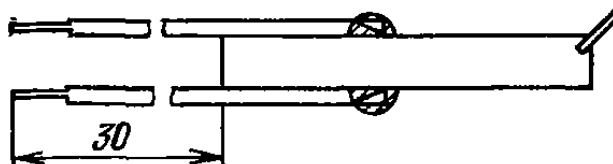
ЭП4Т-2

ЭП4Т-6



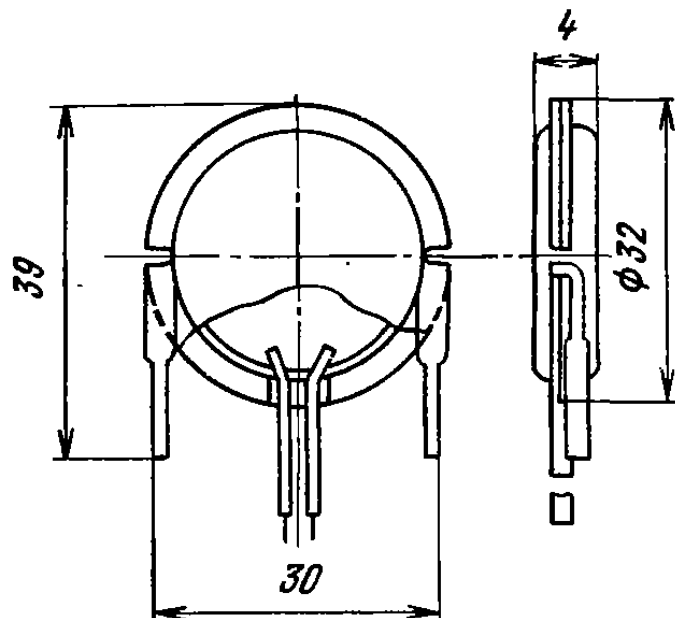
12

ППК-3, ППК-3-1, ППК-3-2,
ППК-4



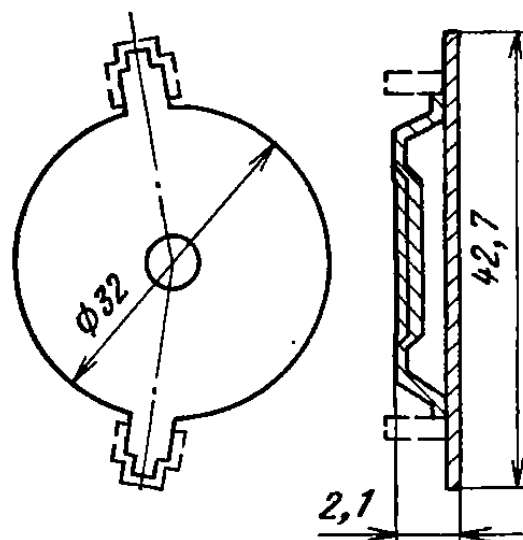
13

3П-1



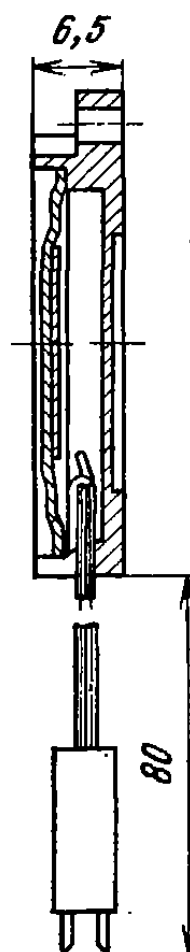
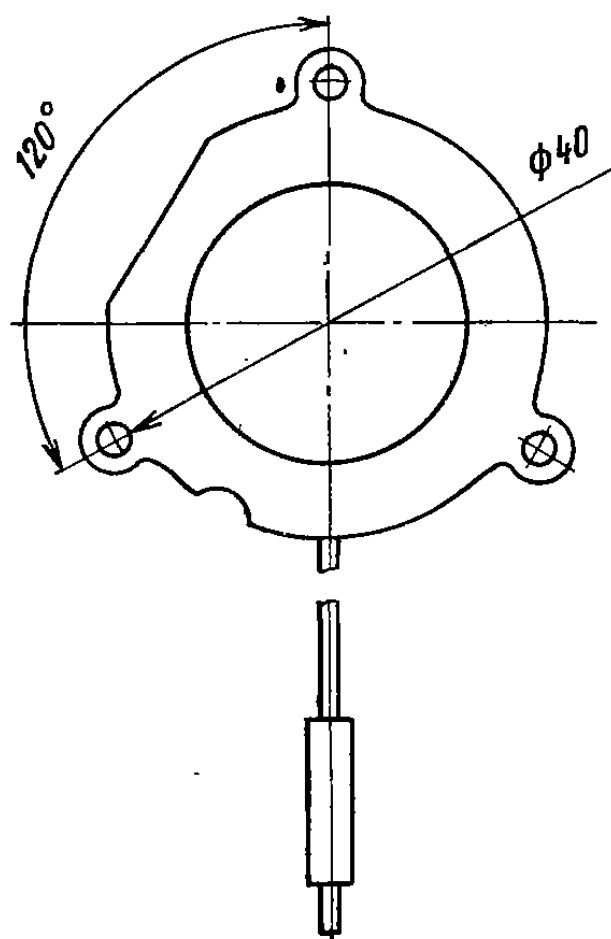
14

3П-3



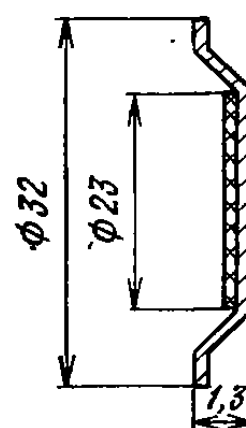
15

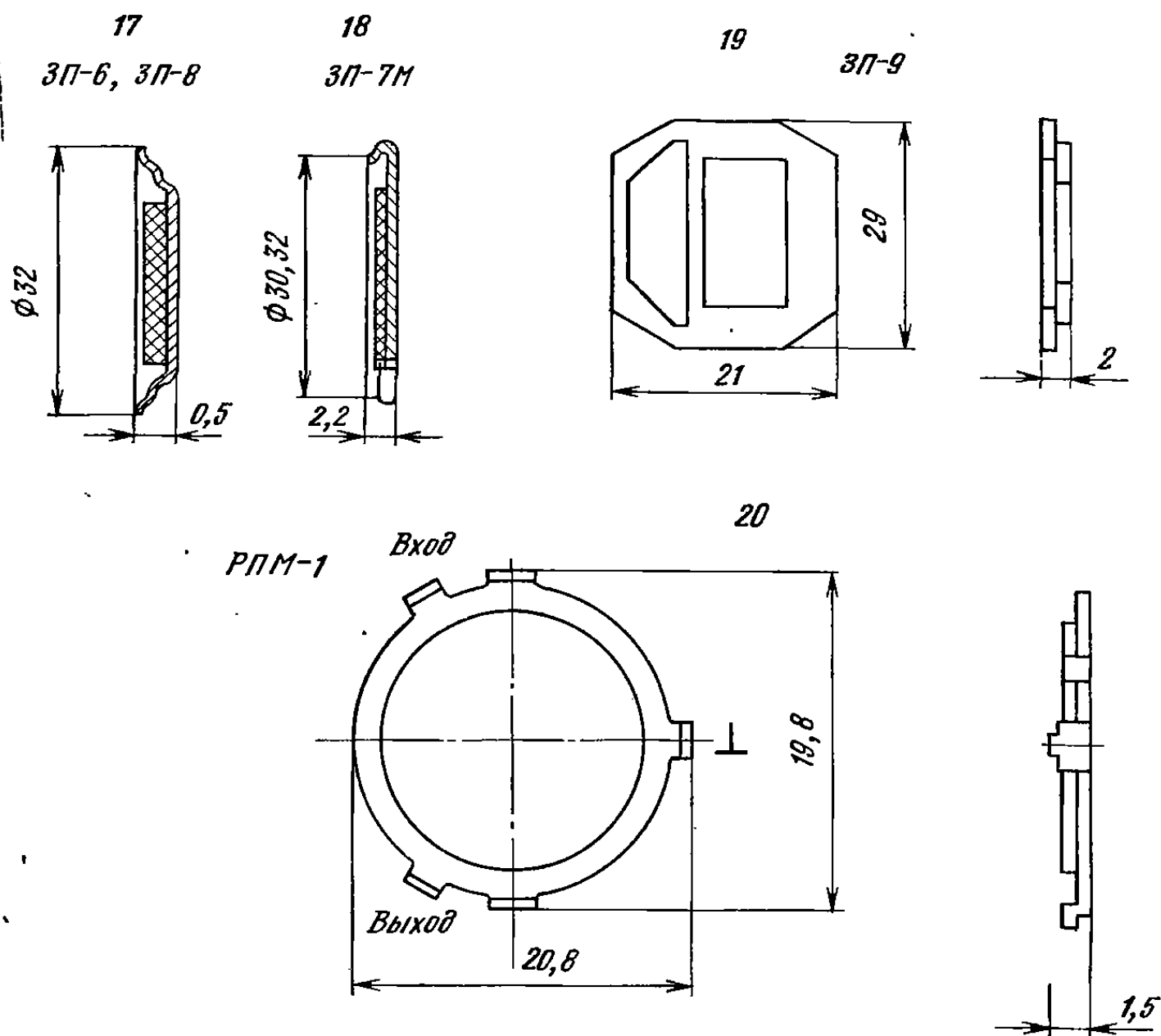
3П-5



16

3П-4





6. Перспективы развития пьезоэлектрических приборов

Развитие традиционных изделий пьезоэлектроники — пьезоэлектрических резонаторов общего применения и пьезоэлектрических фильтров навесного монтажа — непрерывно продолжается с целью повышения технического уровня эксплуатационных характеристик, качества, миниатюризации корпусов, совершенствования технологии.

В области пьезоэлектрических резонаторов практически реализованы физические возможности кварца и технологии, определяющие основные параметры резонаторов общего применения. Лучшие их образцы имеют электрические параметры, близкие к теоретическим и предельно реализуемым.

Основными направлениями развития пьезоэлектрических резонаторов являются создание:

- низкочастотных резонаторов в миниатюрном исполнении;
- унифицированных миниатюрных резонаторов с повышенной температурной и временной стабильностью;
- резонаторов для схем с термокомпенсацией и перестраиваемых резонаторов с диапазоном частот по основному колебанию до 300 МГц, достижение предельных возможностей по температурной $\pm(20...25) \cdot 10^{-6}$ и временной стабильности $\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$ в интервале температур $-60...+85^\circ\text{C}$;

прецизионных малогабаритных резонаторов в широком диапазоне частот (до 180 МГц) с суточной нестабильностью $1,0 \cdot 10^{-12}$ за счет использования резонаторов, возбуждаемых в зазоре (без традиционного напыления электродов на пьезоэлемент); резонаторов на основе использования технологии ионного травления (до 300...500 МГц на основной частоте); резонаторов на новых пьезоэлектрических материалах, особенно для перестраиваемых генераторов и широкополосных фильтров; резонаторов на ПАВ расширенного диапазона.

В области пьезоэлектрических генераторов основными направлениями развития являются создание:

термокомпенсированных генераторов с простой компенсацией со стабильностью до $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ и сложной (в том числе с цифровой) компенсацией со стабильностью до $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ в широком интервале температур в диапазоне частот до 600 МГц;

управляемых (перестраиваемых) генераторов с перестройкой до 2%;

термостатированных высокостабильных генераторов с малым временем выхода на режим и низкой потребляемой мощностью;

генераторов на поверхностных акустических волнах с повышенным частотным диапазоном, температурной нестабильностью $\pm (30...100) \cdot 10^{-6}$ и временной нестабильностью $1,0 \cdot 10^{-6}$, минимальной наработкой до $100 \cdot 10^3$ ч.

В области устройств селекции частоты основным направлением является создание интегральных монокристаллических фильтров и фильтров на ПАВ с улучшенными характеристиками и параметрами.

Дальнейшее повышение функциональных возможностей приборов пьезотехники связано с применением новых пьезоэлементов (танталата лития, берлинита и др.), использованием технологии ионного травления, для приборов на ПАВ с применением окиси алюминия на сапфире, субмикронной технологии, ионного травления.

Дальнейшее расширение функциональных возможностей акустоэлектронных приборов связано с развитием исследований распространения приповерхностных акустических волн (ППАВ). Это позволит поднять рабочую частоту до 4...6 ГГц, повысить надежность и снизить уровень паразитных сигналов.

Ведутся работы по созданию монокристаллических устройств, сочетающих в себе пьезоэлектрические материалы для преобразования ПАВ и ППАВ и полупроводниковые материалы для усиления сигналов, что приведет к созданию нового поколения интегральных акустических устройств.

7. Электромеханические фильтры

7.1. Принцип работы. Классификация

Электромеханические фильтры (ЭМФ) позволяют производить частотную селекцию колебаний в диапазоне частот 0,1 кГц...1 МГц при относительной полосе пропускания 0,1...12 %. Сравнительный анализ применения ЭМФ по частоте и полосе пропускания приведен на рис. 3.11.

В ЭМФ в качестве колебательных систем используются механические резонаторы (тубчатые сердечники, стержни, пластины, диски), изготовленные из специальных сплавов. Это позволяет получать колебательные системы с высокой добротностью ($Q=10^4...10^5$), высоким коэффициентом полезного действия и малыми массой и габаритами.

Функциональная схема полосового электромеханического фильтра в общем виде показана на рис. 7.1. Символами $П_1$, $МР$ и $П_2$ обозначены соответственно преобразователь электрических колебаний в механические, механический резонатор и преобразователь механических колебаний в электрические. Для преобразования энергии электрических колебаний в энергию механических колебаний и наоборот применяются устройства, работа которых основана на использовании электростати-

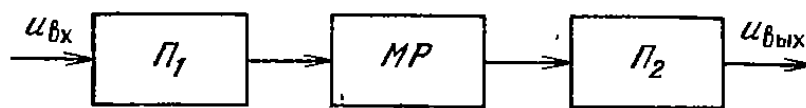


Рис. 7.1. Структурная схема полосового электромеханического фильтра

ческих, электромагнитных, магнитоэлектрических, пьезоэлектрических и магнито-стрикционных эффектов.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили магнито-стрикционные и пьезоэлектрические преобразователи. Как известно, эффект магнито-стрикции заключается в том, что при намагничивании металлического тела происходит изменение его геометрической формы и размеров. Этот эффект обусловлен деформацией решетки монокристалла, которая происходит вследствие изменения магнитных или электрических обменных сил. В процессе намагничивания ферро-магнетиков вплоть до режима насыщения магнитострикция обусловлена в основном магнитными силами решетки. Магнитострикция за счет электрических обменных сил проявляется лишь в области, находящейся выше технического насыщения, т. е. когда уже все магнитные моменты оказываются полностью ориентированными в направлении внешнего магнитного поля.

В процессе деформации резонатора, которая происходит под действием механических колебаний, возбуждаемых преобразователем Π_1 , в его кристаллической решетке возникают внутренние силы. Таким образом, энергия, затрачиваемая преобразователем Π_1 на сжатие или растяжение, накапливается внутри тела в виде потенциальной энергии. По мере уменьшения деформирующих внешних сил тело возвращается в первоначальное состояние за счет накопления потенциальной энергии. При этом величина относительного удлинения или укорочения тела ϵ под действием напряжения σ , нормального к одной из его граней, по закону Гука будет равна

$$\epsilon = \sigma / E,$$

где E — модуль упругости при растяжении или сжатии.

Наряду с удлинением и укорочением существует деформация в виде сдвига и кручения. Деформация сдвига γ возникает при действии касательного к грани напряжения τ :

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

где G — модуль упругости при сдвиге.

После снятия такой деформации в теле возникнут собственные колебания сдвига.

В основе исследования характера собственных колебаний и определения резонансной частоты для тел различной геометрической формы лежит решение системы дифференциальных уравнений с учетом заданных граничных условий (под граничными условиями здесь понимается тип закрепления той или иной грани тела):

$$\begin{aligned} G \nabla^2 U + B \frac{\partial \Delta}{\partial x} &= -\rho \omega^2 U; \\ G \nabla^2 V + B \frac{\partial \Delta}{\partial y} &= -\rho \omega^2 V; \\ G \nabla^2 W + B \frac{\partial \Delta}{\partial z} &= -\rho \omega^2 W, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где

$$B = E / 2(1 + \nu)(1 - 2\nu);$$

$$\Delta = i_x \frac{\partial U}{\partial x} + i_y \frac{\partial V}{\partial y} + i_z \frac{\partial W}{\partial z};$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2};$$

ρ — плотность вещества; ν — коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации); U, V, W — амплитудные значения смещения в направлениях координатных осей x, y, z соответственно.

Решение этой системы применительно к конкретной геометрии резонатора и конкретному виду граничных условий позволяет определить характер продольных и поперечных колебаний, колебаний типа сдвига, кручения и т. п., а также рассчитать их резонансные частоты. Анализ таких решений показывает, что при сосредоточенном возбуждении механического резонатора колебания в нем в общем случае можно представить в виде суперпозиции продольных, поперечных и других типов колебаний.

Если бы среда (механический резонатор) была безграничной, то от центра возмущения волны расходились бы по всем направлениям. Волны, расходящиеся от центра возмущения вдоль направления распространения, называются *волнами расширения*. Волны, расходящиеся в поперечном сечении МР, называются *поперечными волнами (волны искажения)*. Соотношение между амплитудами волн расширения и искажения зависит от вида возбуждения и типа МР.

В резонаторах электромеханических фильтров, имеющих незначительные размеры по сравнению с длиной волны, появление поперечных волн может привести к искажению передаваемой информации. Поэтому для достижения необходимого типа колебаний и подавления нежелательных волн нужен специальный подбор геометрической формы и размеров фильтрующих элементов.

Анализ решения дифференциальных уравнений показывает, что кроме волн расширения и искажения при определенных условиях в механическом резонаторе могут возбуждаться еще и *поверхностные волны*. Как известно, особенность поверхностных волн состоит в том, что их амплитуда убывает вдоль нормали к поверхности раздела сред с разными параметрами по экспоненциальному закону, а скорость распространения этих волн вдоль границы раздела сред меньше скорости расходящихся волн. Степень уменьшения скорости поверхностных волн и их амплитуды существенно зависит от коэффициента Пуассона и геометрической толщины резонатора. Расчеты и эксперимент показывают, что в случае применения в механических резонаторах колебаний, основанных на использовании поверхностных волн, толщина пластин должна быть примерно 0,1 длины волны.

Рассмотрим свободные колебания в элементах электромеханических резонаторов с различной геометрической конфигурацией.

Так, в случае возбуждения продольных колебаний в МР в виде параллелепипеда (см. рис. 7.2, а) вдоль оси x система дифференциальных уравнений (7.1) при условии пренебрежения поперечными колебаниями принимает вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\rho \omega^2 U.$$

Решение этого уравнения для случая незакрепленного стержня, т. е. при граничных условиях, когда напряжение на концах стержня равно нулю, показывает, что в нем возникает бесчисленное множество продольных колебаний различных типов с собственными частотами

$$\omega_m = \frac{m\pi}{L} \sqrt{E / \rho},$$

где $m=1, 2, 3, \dots$; L — длина стержня.

Свободные продольные колебания в прямоугольной пластине (рис. 7.2, б) описываются следующим дифференциальным уравнением:

$$G \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = -\rho \omega^2 U.$$

Тогда резонансная частота собственных продольных колебаний в такой пластине определяется из соотношения

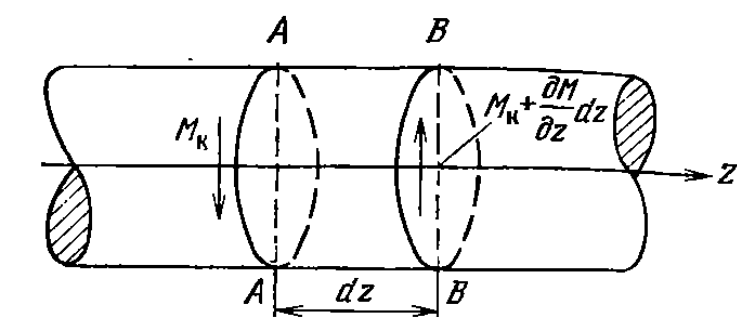
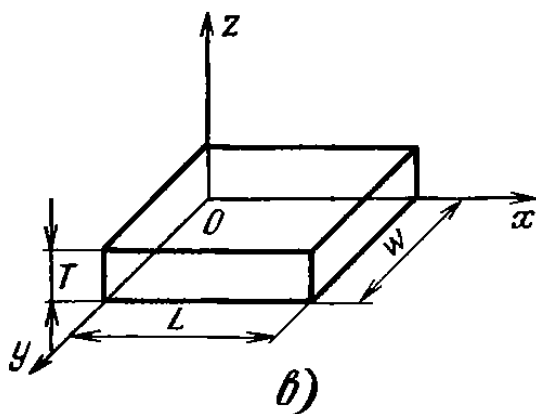
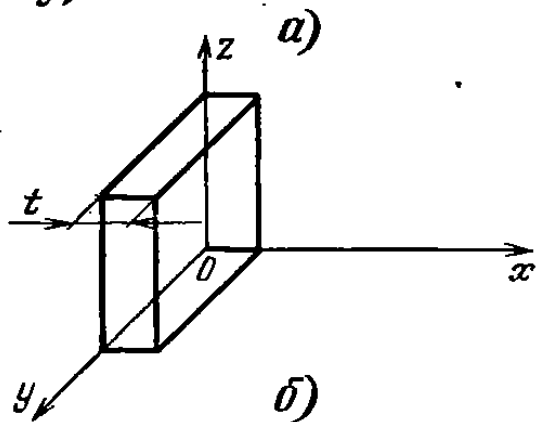
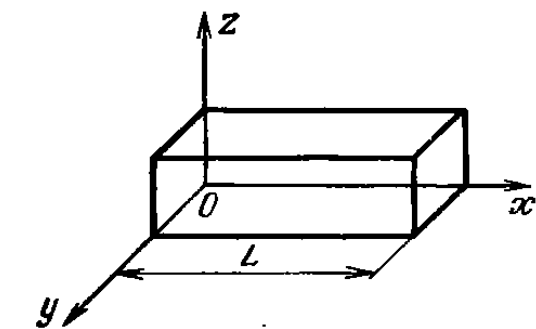


Рис. 7.3. Стержень с крутящим моментом

Рис. 7.2. Конструкция механических резонаторов фильтров:
а—параллелепипед; б—прямоугольная вертикальная пластина; в—прямоугольная горизонтальная пластина

$$\omega_m = \frac{m\pi}{t} \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}},$$

где

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 + 2\nu)}.$$

Наряду с продольными колебаниями в подобной пластине могут возбуждаться колебания типа сдвига. Собственная частота таких колебаний вычисляется по формуле

$$\omega_{mnp} = \pi \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{C_{11}n^2}{L^2} + \frac{C_{22}m^2}{T^2} + \frac{C_{33}p^2}{W^2} \right)};$$

$n=1, 2, \dots; m=1, 2, \dots; p=0, 1, 2, \dots$, где C_{11}, C_{22}, C_{33} — постоянные коэффициенты, зависящие от величины коэффициента Пуассона; L, T, W — размеры пластины (рис. 7.2, в).

В настоящее время широкое применение в радиотехнических устройствах находят такие электромеханические фильтры, в которых возбуждаются крутильные колебания. Особенность крутильных колебаний состоит в том, что они значительно меньше затухают в полосе пропускания, чем продольные. Следовательно, в данном случае резонатор будет иметь более высокую добротность.

Собственная частота крутильных колебаний в стержне с крутящим моментом M , который определяется парой сил (см. рис. 7.3), описывается соотношением

$$\omega_m = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{G}{\rho}} (2m + 1).$$

Любой упругий механический резонатор можно характеризовать податливостью растяжению, сжатию сдвига или кручению $C_{p,c,k}$, массой m , моментом инерции M , а также сопротивлением трения, определяющим потери энергии на любые смещения в кристаллической решетке. При этом силы и моменты энергии будут равны:

$$F = \frac{Su(t)dt}{C_{p,c}}, M_k = \frac{\varphi}{C_k};$$

$$F = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, M_\varphi = I \frac{d^2 \varphi}{dt^2};$$

$$r_m = F(u), r_b = M \frac{\partial \varphi}{\partial t},$$

где F — сила, приложенная к элементу; u — величина перемещения при сжатии или растяжении; φ — угловое перемещение в процессе кручения; $C_{p,c,k}$ — податливость элемента при растяжении, сжатии или скручивании; m — масса элемента; I — момент энергии.

Эти параметры аналогичны параметрам электрического колебательного контура соответственно: индуктивности L , емкости C и сопротивления потерь r , которые связаны с напряжением u и током i :

$$u = \frac{1}{C} \int i dt, u = L \frac{di}{dt}, u = ri.$$

Они позволяют провести аналогию между элементами колебательного контура и механического резонатора (рис. 7.4), а также между интегродифференциальными уравнениями, описывающими процессы в электрическом колебательном контуре и механической колебательной системе. Следовательно, с электрическим колебательным контуром можно сопоставить механический резонатор (рис. 7.5).

В преобразователях электромеханических фильтров применяются сердечники трубчатые из феррита, параметры которых приведены в табл. 7.1.

Электромеханические фильтры классифицируются по различным признакам (рис. 7.6).

Полное условное обозначение ЭМФ состоит из следующих элементов: первый элемент — буквы ФЭМ (фильтр электромеханический); второй элемент — цифра, обозначающая конструктивно-технологическое исполнение фильтра; третий элемент — число, обозначающее регистрационный номер фильтра; четвертый элемент — число, обозначающее номинальную частоту фильтра в килогерцах; пятый элемент — число, обозначающее ширину полосы в килогерцах; шестой элемент — буква, обозначающая функциональное назначение фильтра; седьмой элемент — цифра, обозначающая вид преобразователя; восьмой элемент — буква В, обозначающая всеклиматическое исполнение фильтра.

Т а б л и ц а 7.1

Параметры сердечников для ЭМФ

Тип сердечника	КЭМС, %	Q_m , не менее	V_k , м/с
M607C-7	9...11	2500	$(3,3...3,6) \cdot 10^3$
M607C-3	5,8...8	1600...6000	$(3,3...3,6) \cdot 10^3$
M607C-6	4,5...6,4	1500...2000	$(3,3...3,6) \cdot 10^3$
M607C-8	6,0...9,0	2000...4000	—

П р и м е ч а н и я: КЭМС — коэффициент магнитомеханической связи; Q_m — механическая добротность; V_k — скорость распространения крутильных колебаний.

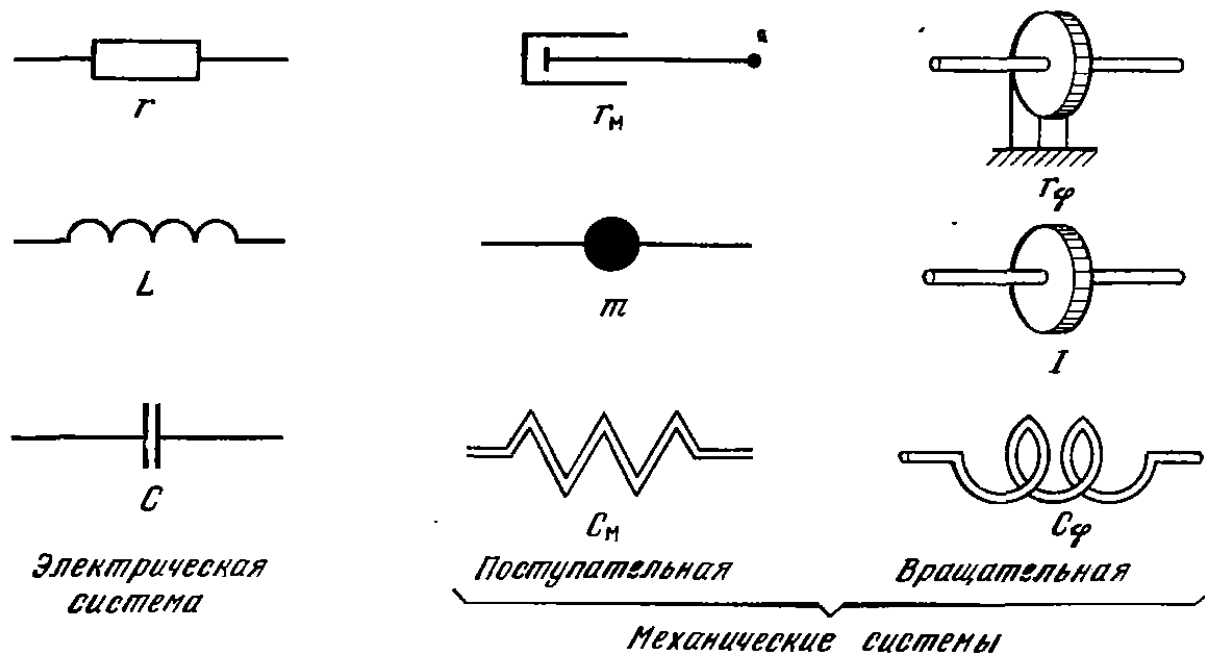


Рис. 7.4. Механические элементы фильтра

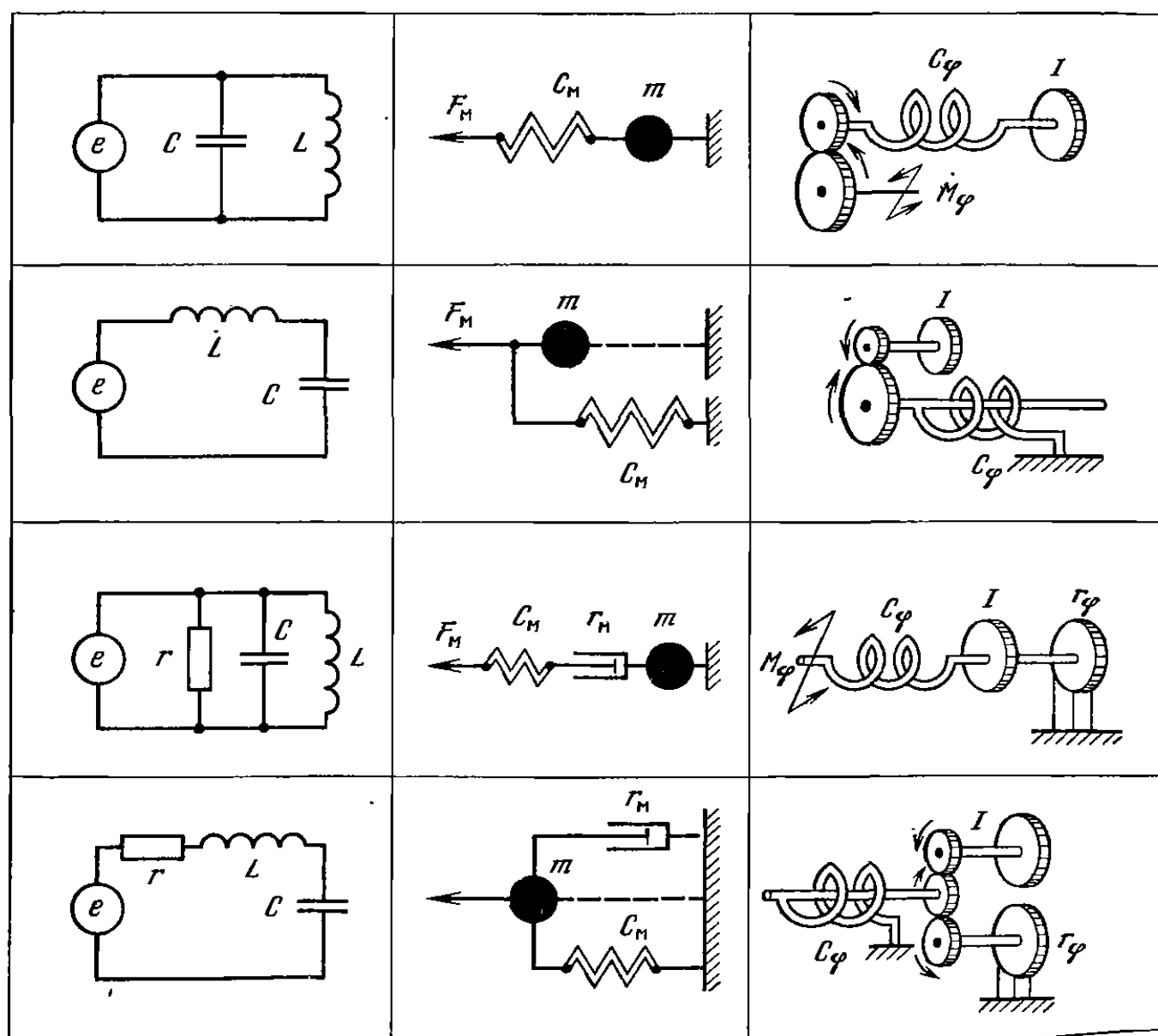


Рис. 7.5. Аналоги механических резонаторов фильтров

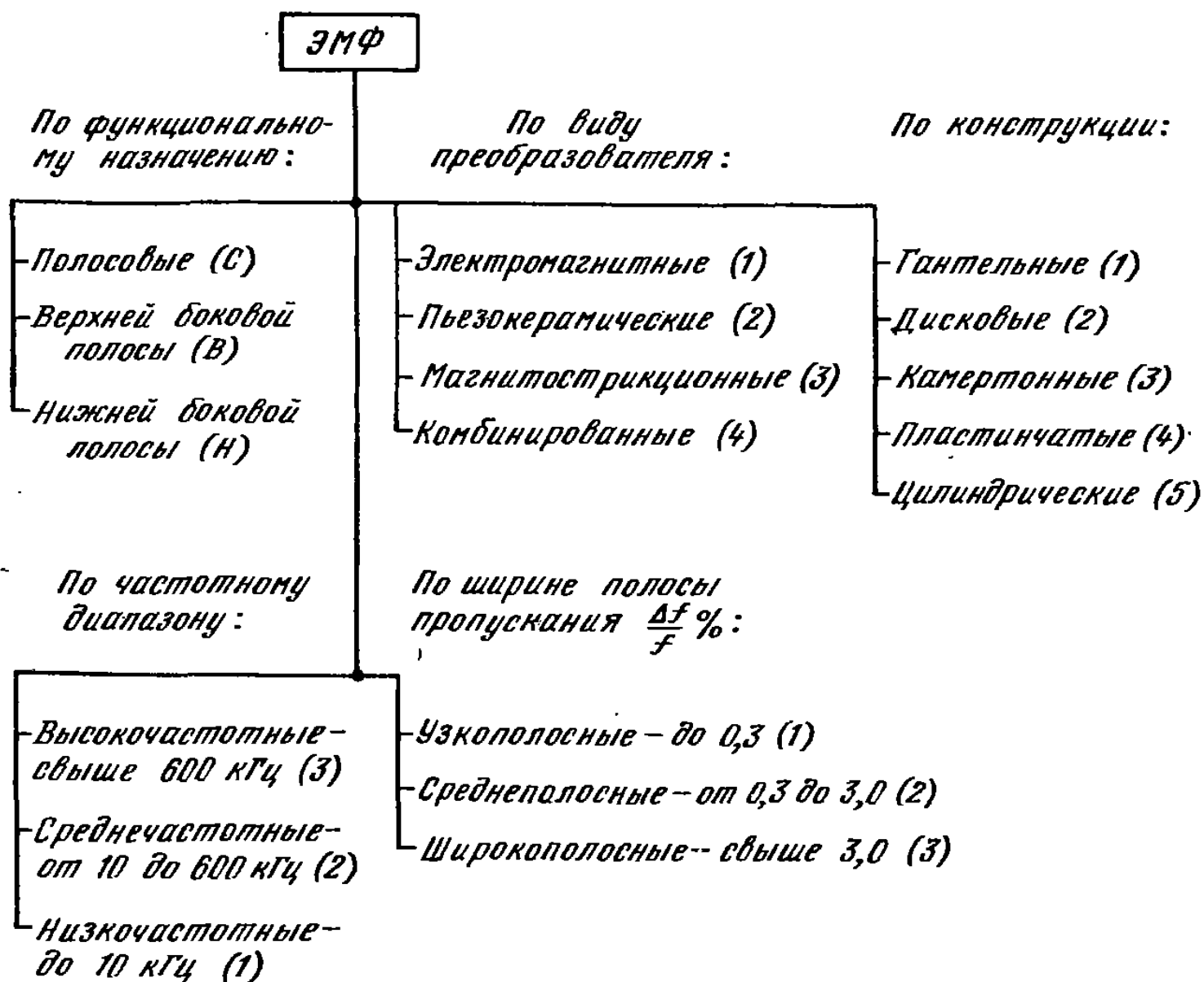


Рис. 7.6. Классификация электромеханических фильтров

Между вторым и третьим, третьим и четвертым, четвертым и пятым, а также шестым и седьмым элементами ставится дефис.

Пример обозначения фильтра: ФЭМ1-12-320-2С-3В — фильтр электромеханический, с гантельными резонаторами, регистрационный номер 12, номинальная частота 320 кГц, полоса пропускания 2 кГц, с симметричным расположением частотной характеристики затухания, с магнитострикционным преобразователем, всеклиматического исполнения.

Сокращенное обозначение фильтра включает элементы 1, 2 и 3 полного обозначения.

7.2. Справочные данные

Параметры ЭМФ аналогичны параметрам ПЭФ. Численные значения основных параметров ЭМФ различных конструкций приведены в табл. 7.2. Параметры ЭМФ различных типов приведены в табл. 7.3.

Основные параметры ЭМФ

Конструкции фильтров	Диапазон частот, кГц	$\Delta f, \%$	$\delta f, \%$, не более	$a_{пр}, дБ$	$a_{гир}, дБ$	Объем, см ³
<i>Камертонные</i> 	0,1...10	0,1...1	0,05...0,1	3,0...5,0	40	0,6...15
<i>Цилиндрические</i> 	10...100	0,1...3	0,01...0,05	2,0...4,0	50...60	50...120
<i>Гантельные</i> 	80...240	0,1...12	0,005...0,05	1,2...3,0	60...80	2,5...8
<i>Цилиндрические</i> 	240...500	0,1...12	0,005...0,05	1,2...3,0	60...80	5...10
<i>Дисконные</i> 	100...600	0,1...8	0,005...0,05	1,5...3,5	60...80	8...12

Окончание таблицы 7.2

Конструкции фильтров	Диапазон частот, кГц	$\Delta f, \%$	$\delta f_{\Phi}, \%$, не более	$a_{\text{пр}}, \text{дБ}$	$a_{\text{гар}}, \text{дБ}$	Объем, см ³
<i>Пластинчатые</i> 	240...500	0,1...1,5	0,01...0,03	1,5...3,5	60...70	0,6...2
<i>Монолитные</i> 	150...1500	0,1...3	0,005...0,03	1,2...3,5	60...70	0,4...15

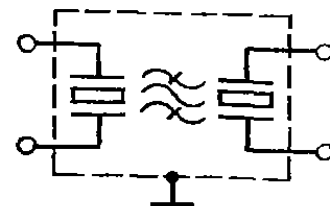
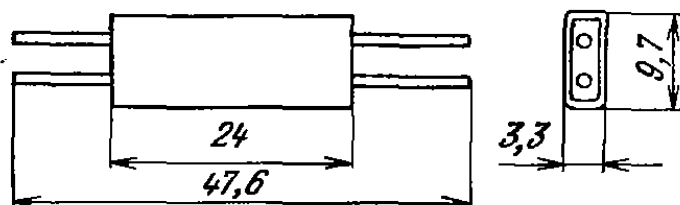
Параметры основных типов ЭМФ

Тип фильтра	f_H , кГц	δf_{cp}	Δf , кГц	$\delta \Delta f$	Δa , дБ, не бо- лее	$a_{гар}$, дБ, не ме- нее
ФЭМ-009	80	$\pm 0,075$ кГц	2,8...3,2	$\pm 0,2$ кГц	2,5	60
ФЭМ-012	494; 500	—	—	—	4	60
ФЭМ-015	300...310	—	—	—	2,8	60
ФЭМ-016	80...240	$\pm 0,05\%$	$(0,1...3)\% f_H$	$\pm 15\%$	2,5	60
ФЭМ-021	280...350	$\pm 0,04\%$	0,28...5,25	$\pm 15\%$	3	60
ФЭМ-022	240...450	$\pm 0,04\%$	0,24...4,5	$\pm 15\%$	3	60
ФЭМ-030	500	—	0,3...8,3	—	—	—
ФЭМ-035	495...500	$\pm 0,2$ кГц	0,3...8	—	3	—
ФЭМ-037	494...500	—	—	—	2	—
ФЭМ1-038	122; 128; 134	—	—	—	3	60
ФЭМ1-040	500	—	—	—	3	60
ФЭМ4-008	297...311	$\pm 0,06$ кГц	0,8...1,5	$\pm 0,12$ кГц	3	55
ФЭМ4-6	240...250	$\pm 0,07\%$	1,44...1,76	—	3	60
ФЭМ4-14	490...510	0,015%	—	$\pm 15\%$	3	60
ФЭМ4-031	500	$\pm 0,1\%$	0,5...3,1	$\pm 0,05$ кГц	0,3	60
ФЭМ4-39	310...340	—	0,3...4,0	$\pm 0,025$ кГц	4	60
ФЭМ4-44	168...240	$\pm 0,03\%$	3,5	$\pm 0,22$ кГц	3	60

Тип фильт- ра	$K_{пр}$	$K_{пер}$	ТКЧ, 1/°C	$U_{вх}$, В, не более	$R_{н.вх}=R_{н.вых}$, кОм	$C_{н.вх}=C_{н.вых}$, пФ	Габарит- ный чер- теж кор- пуса
ФЭМ-009	3	0,18	—	—	$R_{н.вх}=10\pm 10\%$ $R_{н.вх}=2\pm 10\%$	2000...15000	3
ФЭМ-012	—	0,2	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	8
ФЭМ-015	—	0,45	—	3	—	—	7
ФЭМ-016	4	0,3	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$	1,5	1...10	220...6800	3
ФЭМ-021	4	0,12	—	0,8	—	—	3
ФЭМ-022	4	0,12	—	0,8	—	—	3
ФЭМ-030	—	0,18	—	—	—	—	2
ФЭМ-035	3,6	0,18	—	—	$75\pm 10\%$	50...120	8
ФЭМ-037	4,5	0,18	—	—	$150\pm 10\%$	50...120	5
ФЭМ1-038	—	—	—	—	$7,5\pm 10\%$	—	3
ФЭМ1-040	—	0,35	—	1	—	—	6
ФЭМ4-008	3	0,35	—	1	$5,1\pm 10\%$	<50	1
ФЭМ4-6	2,3	0,4	—	1	$3,3\pm 10\%$	<50	1
ФЭМ4-14	2,8	0,4	—	1	$3,3\pm 10\%$	$56\pm 5\%$	1
ФЭМ4-031	3,5	—	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	1
ФЭМ4-039	6	0,25	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	1	$3,0\pm 10\%$	<50	1
ФЭМ4-44	2,8	0,55	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	1	$3,3\pm 10\%$	$50\pm 20\%$	4

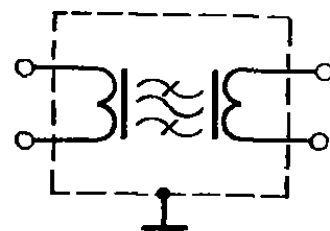
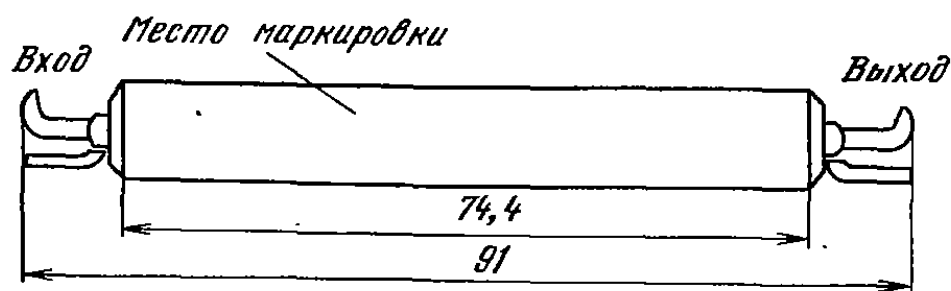
ФЭМ4-008, ФЭМ4-6, ФЭМ4-14,
ФЭМ4-31, ФЭМ4-39

1



ФЭМ-030

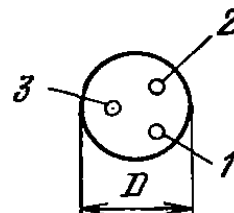
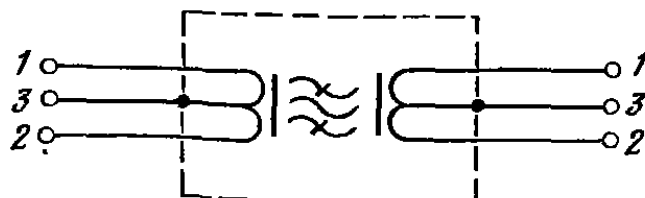
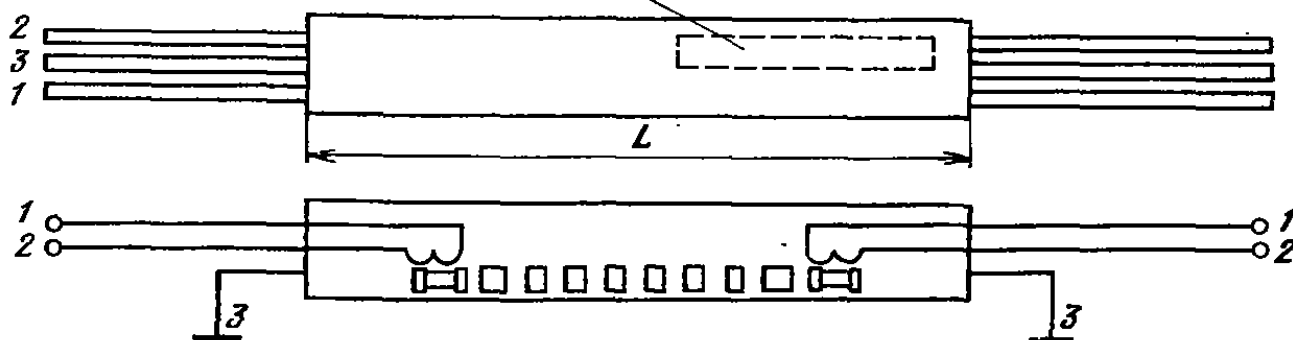
2



3

ФЭМ-009, ФЭМ-016, ФЭМ-021, ФЭМ-022, ФЭМ1-038

Место маркировки

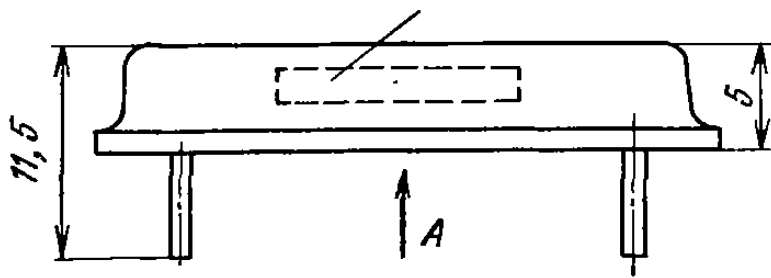


Тип		ФЭМ-009	ФЭМ-016	ФЭМ-02	ФЭМ-022	ФЭМ-038
Размеры, мм	L	74	100	74	74	77... 85
	D	10,5	8,5	10,5	10,5	8,5

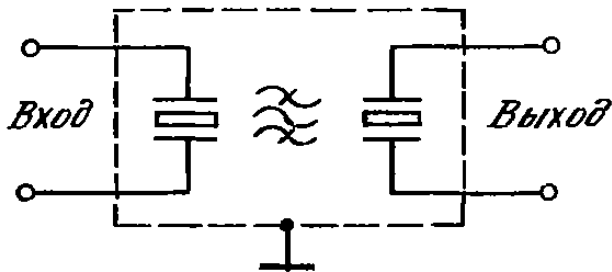
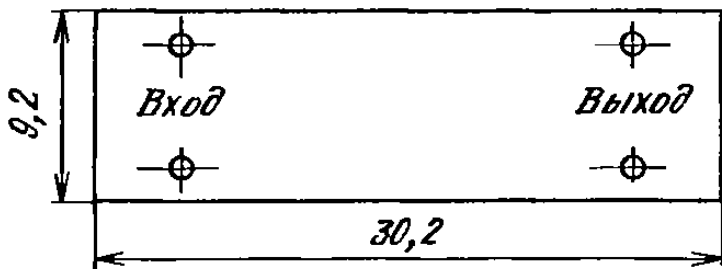
ФЭМ4-44

4

Место маркировки

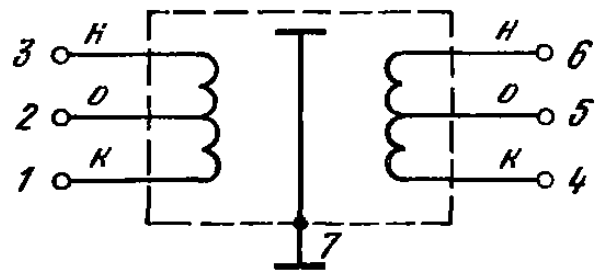
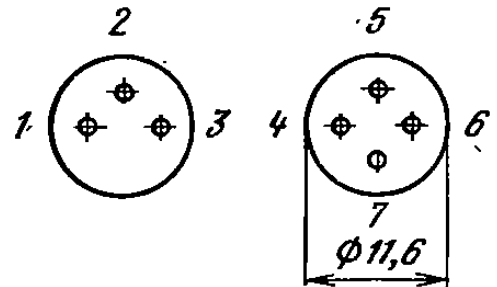
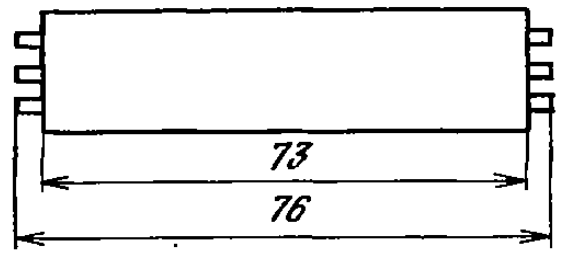


Вид А



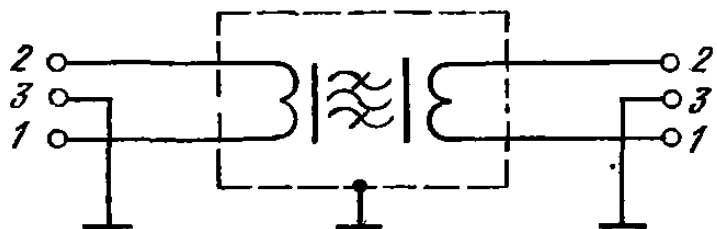
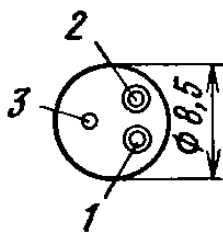
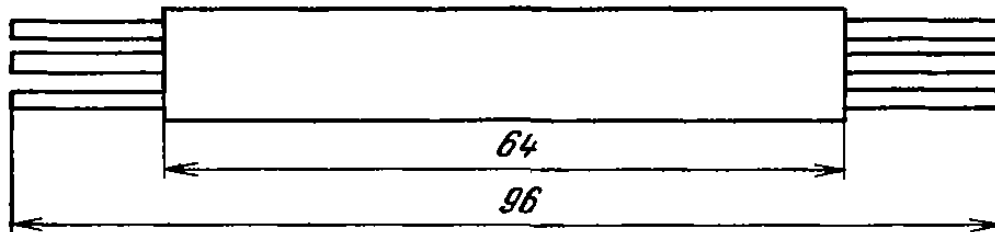
ФЭМ-037

5



ФЭМ1-040

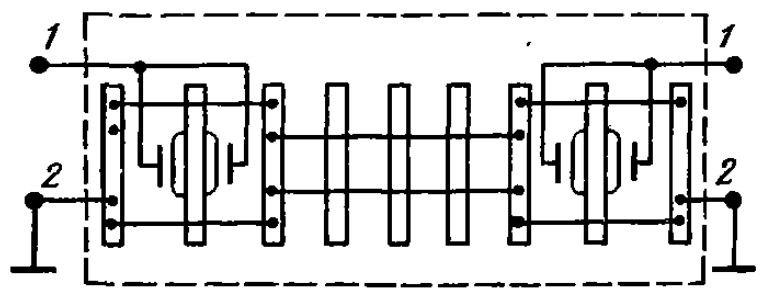
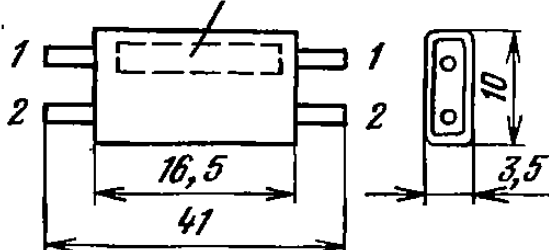
6



ФЭМ-015

7

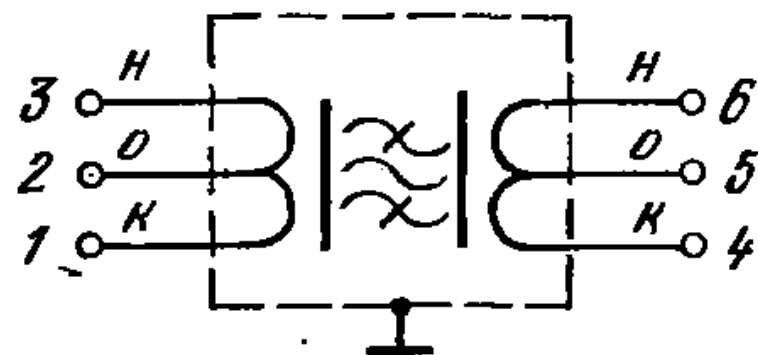
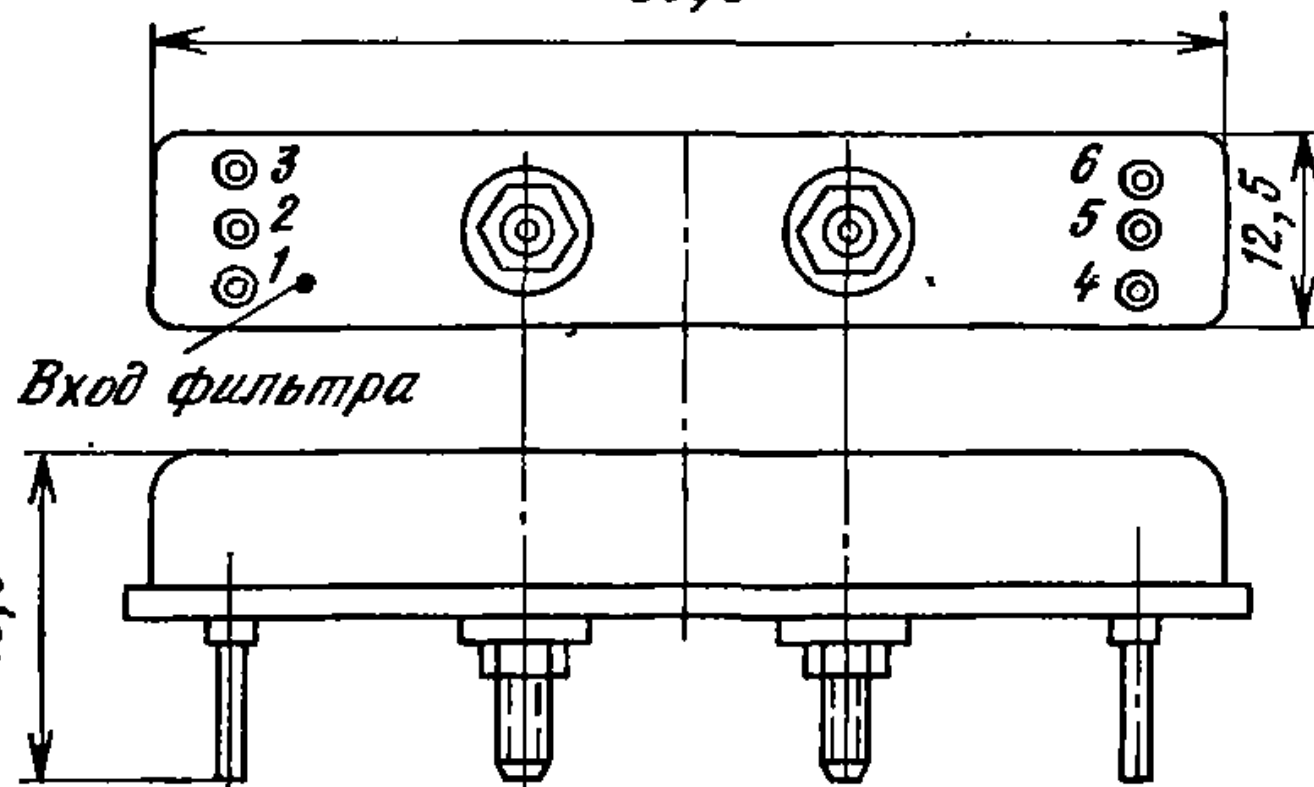
Место маркировки



ФЭМ-012, ФЭМ-035

8

66,5



Список литературы

1. **Пьезоэлектрические резонаторы**/Под ред. П. Е. Кандыбы и П. Г. Позднякова. — М.: Радио и связь, 1992. — 392 с.
2. **Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г.** Кварцевые генераторы. — М.: Радио и связь, 1984. — 156 с.
3. **Мартынов В. А., Райков Л. И.** Кварцевые генераторы. — М.: Сов. радио, 1976. — 64 с.
4. **Петров А. Н., Шматченко В. Д.** Полосовые электромеханические фильтры радиочастот. — М.: ГЭИ, 1961. — 300 с.
5. **Малов В. В.** Пьезорезонансные датчики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
6. **Глюкман Л. И.** Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с.
7. **Семиглазов А. М.** Кварцевые генераторы. — М.: Радио и связь, 1982. — 88 с.
8. **Речицкий В. И.** Акустоэлектронные радиокомпоненты: элементы и устройства на поверхностных акустических волнах. — М.: Сов. радио, 1980. — 264 с.
9. **Хорунжий В. А.** Процессоры на ПАВ. — Киев: Техника, 1990. — 136 с.
10. **Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А.** Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. — М.: Радио и связь, 1981. — 184 с.
11. **ОСТ 11 338 810-81.** Размеры, форма пластин, типы корпусов ПЭР.
12. **ОСТ 11 338 819-81.** Классификация и обозначения ПЭР.
13. **ОСТ 11 ОДО 338 009-78.** Генераторы кварцевые. Система условных обозначений.
14. **ОСТ 11 338 814-83.** Генераторы кварцевые. Основные параметры.
15. **ОСТ 11 ПО 206 006-84.** Система обозначения ПЭФ.
16. **ОСТ 11 ОДО 206 001-85.** Электромеханические фильтры. Параметры.
17. **ОСТ ПО 206 002-86.** Фильтры пьезоэлектрические. Основные параметры.
18. **ОСТ 11 206 801-87.** Электромеханические фильтры. Классификация и условные обозначения.
19. **ОСТ 11 206 806-81.** Классификация и система обозначений линий задержки.
20. **ОСТ 11 206 808-86.** Линии задержки акустические.
21. **ОСТ 11 ОДО 338 016-85.** Руководство по применению кварцевых резонаторов.
22. **ГОСТ 20362-84.** Резонаторы кварцевые.
23. **ГОСТ 20937-75.** Пьезоэлектрические фильтры. Классификация и система обозначения.
24. **ГОСТ 20297-82.** Кварцевые резонаторы.
25. **ГОСТ 22866-81.** Генераторы кварцевые. Термины и определения.
26. **ГОСТ 18869-81.** Резонаторы кварцевые. Термины и определения.
27. **ГОСТ 18670-84.** Фильтры пьезоэлектрические и электромеханические.
28. **ГОСТ 28170-89.** Изделия акустоэлектронные. Термины и определения.
29. **ГОСТ 18669-83.** Резонаторы кварцевые. Термины и определения.
30. **ГОСТ 21281.** Пьезоэлектрические фильтры. Основные определения.
31. **ГОСТ 27075.** Пьезоэлектрические фильтры. Основные параметры.
32. **ГОСТ 27124-86.** Резонаторы пьезоэлектрические. Основные параметры.
33. **ГОСТ 25960-83.** Генераторы кварцевые. Основные параметры.
34. **Кайно Г.** Акустические волны. — М.: Мир, 1990. — 652 с.
35. **Орлов В. С., Бондаренко В. С.** Фильтры на поверхностных акустических волнах. — М.: Радио и связь, 1984. — 416 с.
36. **Электроника: Энциклопедический словарь.** — М.: Сов. энциклопедия, 1991. — 688 с.
37. **Диэлектрические резонаторы**/М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов и др.; Под ред. М. Е. Ильченко. — М.: Радио и связь, 1989. — 328 с.
38. **Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах**/Ю. М. Безбородов, Т. Н. Нарытник, В. Б. Федоров. — Киев: Техника, 1989. — 184 с.