

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Н.И. Кузбных, Л.Ю.Солдатова

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Учебное пособие по дисциплине
«Радиоматериалы и радиокомпоненты»
для студентов радиотехнических специальностей

2012

Кузбных Н.И., Солдатова Л.Ю.

Радиоматериалы и радиокомпоненты: Учебное пособие для студентов радиотехнических специальностей. – Томск: ТУСУР, 2012. – 176 с.

В учебном пособии представлено подробное содержание курса лекций по радиоматериалам и радиокомпонентам, читаемого студентам радиотехнических специальностей дневного и вечернего образования.

В пособии достаточно подробно рассмотрены физические свойства, параметры и характеристики и области применения проводниковых, диэлектрических и магнитных материалов, нашедших широкое применение в радиоэлектронной промышленности. В частности, приведены подробные сведения о материалах: с высокой проводимостью и с высоким удельным сопротивлением; пассивные и активные диэлектрики; магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

Из радиокомпонентов в полном объеме приведены сведения о резисторах, конденсаторах и высокочастотных катушках индуктивности. Достаточно подробно рассмотрены следующие вопросы: классификация, параметры и характеристики, кодировка и условные обозначения электрорадиоэлементов в конструкторской документации, конструктивные особенности, основные свойства и области применения резисторов, конденсаторов и высокочастотных катушек индуктивности. К сожалению, из-за ограниченности курса в данном учебном пособии не рассматриваются функциональные устройства радиоэлектронных средств и устройства функциональной электроники, которые также относятся к элементной базе электронных средств. Но желающие могут с ними ознакомиться в других источниках информации, которые приведены в списке рекомендуемой литературы.

Каждый раздел пособия заканчивается подробным перечнем контрольных вопросов, предназначенных для самопроверки знаний данного раздела.

Учебное пособие предназначено для студентов радиотехнических специальностей всех форм обучения, но может быть использовано также студентами других специальностей радиотехнического профиля.

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	7
1.1 Предмет и задачи изучения дисциплины.....	7
1.2 Общие сведения о материалах	7
1.3 Общие сведения о радиокомпонентах	9
2 ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	10
2.1 Зонная энергетическая структура материалов	10
2.2 Основные электрические параметры металлов	12
2.3 Удельное сопротивление чистых металлов и сплавов	12
2.4 Влияние частоты тока на сопротивление проводников. Поверхностный эффект и эффект близости	13
2.5 Сопротивление тонких металлических пленок. Размерные эффекты..	14
2.6 Свойства проводниковых материалов и их классификация по функциональному назначению.....	15
2.6.1 Материалы высокой проводимости.....	15
2.6.2 Материалы с высоким удельным сопротивлением.....	16
2.6.3 Сверхпроводники	18
2.6.4 Припой и флюсы.....	19
<i>Контрольные вопросы.....</i>	20
3 ДИЭЛЕКТРИКИ	21
3.1 Общие сведения.....	21
3.2 Поляризация диэлектриков, неполярные и полярные диэлектрики...	21
3.3 Диэлектрическая восприимчивость, диэлектрическая проницаемость	22
3.4 Электропроводность диэлектриков.....	24
3.4.1 Электропроводность газов.....	24
3.4.2 Электропроводность твердых диэлектриков.....	25
3.5. Потери в диэлектриках.....	27
3.6 Пассивные диэлектрики.....	29
3.6.1 Полимеры.....	29
3.6.2 Пластические массы.....	31
3.6.3 Волокнистые материалы.....	32
3.6.4 Неорганические стекла.....	33
3.6.5 Ситаллы.....	34
3.6.6 Керамика.....	35
3.6.7 Слюда и материалы на ее основе.....	37
3.6.8 Неорганические диэлектрические пленки.....	39
3.7 Активные диэлектрики.....	39
3.7.1 Сегнетоэлектрики	39
3.7.2 Пьезоэлектрики	42
3.7.3 Электреты.....	45
<i>Контрольные вопросы.....</i>	47
4 МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	49
4.1 Классификация магнитных материалов.....	49

4.2	Параметры и характеристики магнитных материалов.....	51
4.2.1	Петля гистерезиса и основная кривая намагничивания.....	51
4.2.2	Магнитная проницаемость.....	52
4.2.3	Магнитные потери энергии.....	54
4.2.4	Диапазон рабочих частот.....	56
4.3	Классификация и основные свойства магнитомягких материалов	56
4.4	Основные свойства и области применения магнитомягких ферромагнитных материалов.....	57
4.4.1	Основные свойства магнитомягких материалов.....	57
4.4.2	Магнитомягкие материалы на основе чистого железа.....	58
4.4.3	Электротехнические стали.....	59
4.4.4	Пермаллой.....	62
4.4.5	Другие магнитомягкие сплавы.....	66
4.4.6	Аморфные магнитомягкие материалы.....	67
4.4.7	Магнитодиэлектрики	68
4.5	Ферриты.....	71
4.5.1	Общие сведения.....	71
4.5.2	Магнитные свойства ферритов.....	71
4.5.3	Электрические свойства ферритов.....	73
4.5.4	Маркировка магнитомягких НЧ- и ВЧ-ферритов.....	74
4.5.5	Применение ферритов.....	74
4.6	Магнитотвердые материалы.....	77
4.6.1	Общие сведения.....	77
4.6.2	Классификация, основные свойства и области применения.....	77
	Контрольные вопросы.....	80
5	РЕЗИСТОРЫ.....	82
5.1	Общие сведения и классификация.....	82
5.2	Основные параметры и характеристики резисторов.....	83
5.2.1	Номинальное сопротивление и допуск.....	83
5.2.2	Номинальная мощность рассеивания.....	84
5.2.3	Электрическая прочность резистора.....	85
5.2.4	Стабильность.....	86
5.2.5	Собственные шумы.....	87
5.2.6	Частотные свойства резисторов.....	88
5.2.7	Надежность резисторов.....	89
5.2.8	Специфические параметры и характеристики резисторов переменного сопротивления.....	89
5.3	Условные и кодированные обозначения резисторов. Их запись в конструкторских документах.....	91
5.4	Физические процессы в резистивном материале и конструктивные элементы резисторов.....	94
5.5	Непроволочные резисторы постоянного сопротивления.....	95
5.5.1	Конструктивные особенности непроволочных резисторов.....	95
5.5.2	Углеродистые и бороуглеродистые резисторы.....	96

5.5.3	Металлопленочные и металлоокисные резисторы.....	97
5.5.4	Композиционные резисторы.....	97
5.6	Проволочные резисторы постоянного сопротивления.....	98
5.7	Резисторы переменного сопротивления.....	98
5.7.1	Непроволочные резисторы переменного сопротивления.....	98
5.7.2	Проволочные резисторы переменного сопротивления.....	100
5.8	Характерные особенности и конструкции резисторов для поверхностного монтажа.....	100
5.8.1	Резисторы постоянного сопротивления.....	100
5.8.2	Резисторы переменного сопротивления.....	103
5.9	Специальные резисторы.....	104
5.9.1	Тензомеры и тензорезисторы.....	104
5.9.2	Магниторезисторы.....	105
5.9.3	Фоторезисторы.....	106
5.9.4	Варисторы.....	109
5.9.5	Терморезисторы.....	111
	Контрольные вопросы.....	115
6	КОНДЕНСАТОРЫ.....	116
6.1	Общие сведения.....	116
6.2	Классификация конденсаторов.....	116
6.3	Условные обозначения и маркировка конденсаторов.....	118
6.4	Основные параметры и характеристики конденсаторов постоянной емкости.....	121
6.4.1	Свойства постоянных конденсаторов.....	121
6.4.2	Номинальная емкость и допуск.....	121
6.4.3	Электрическая прочность.....	121
6.4.4	Сопротивление изоляции.....	122
6.4.5	Потери энергии.....	122
6.4.6	Реактивная мощность.....	123
6.4.7	Полное сопротивление и зависимость емкости от частоты.....	124
6.4.8	Стабильность параметров конденсатора.....	124
6.4.9	Надежность.....	127
6.4.10	Удельные показатели.....	127
6.5	Конструктивные особенности, основные свойства и области применения конденсаторов постоянной емкости.....	128
6.5.1	Керамические конденсаторы.....	128
6.5.2	Стеклянные конденсаторы.....	131
6.5.3	Слюдяные конденсаторы.....	131
6.5.4	Бумажные и металлобумажные конденсаторы.....	132
6.5.5	Пленочные конденсаторы.....	134
6.5.6	Конденсаторы с оксидным диэлектриком.....	135
6.5.7	Интегральные конденсаторы.....	139
6.6	Конденсаторы переменной емкости.....	140

6.6.1 Общие сведения.....	140
6.6.2 Параметры и характеристики конденсаторов переменной емкости.....	142
6.7 Подстроечные конденсаторы.....	144
6.8 Конденсаторы с электрически управляемой емкостью.....	145
6.8.1 Полупроводниковые конденсаторы – варикапы.....	145
6.8.2 Сегнетоэлектрические конденсаторы – вариконды.....	148
Контрольные вопросы.....	151
7 ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ.....	153
7.1 Общие сведения.....	153
7.1.1 Определения.....	153
7.1.2 Классификация и области применения.....	153
7.1.3 Условные обозначения высокочастотных катушек индуктивности.....	154
7.2 Основные параметры катушек индуктивности. Схемы замещения....	154
7.2.1 Индуктивность и допустимые отклонения	154
7.2.2 Паразитные эффекты и схемы замещения ВКИ	155
7.2.3 Добротность катушки.....	155
7.2.4 Собственная емкость.....	156
7.2.5 Стабильность параметров.....	157
7.2.6 Надежность катушек.....	158
7.3 Типы намоток катушек индуктивности.....	158
7.4 Геометрические параметры катушек.....	160
7.6 Экранирование катушек индуктивности.....	161
7.7 Катушки индуктивности с магнитными сердечниками.....	164
7.7.1 Основные свойства высокочастотных магнитных материалов....	164
7.7.2 Типы и свойства магнитных сердечников.....	166
7.7.3 Особенности проектирования катушек индуктивности с магнитными сердечниками.....	168
7.8 Индуктивные элементы для поверхностного монтажа.....	169
7.9 Вариометры.....	170
7.10 Дроссели высокой частоты.....	172
Контрольные вопросы.....	175
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	176

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Предмет и задачи изучения дисциплины

Данный курс относится к общепрофессиональным дисциплинам.

Предметом изучения дисциплины являются:

- проводниковые, диэлектрические и магнитные материалы, используемые в радиоэлектронике;
- радиокомпоненты: резисторы, конденсаторы и высокочастотные катушки индуктивности.

В **задачи изучения** дисциплины ставится получение необходимых **знаний**:

- по физико-техническим свойствам радиотехнических материалов;
- по физическим основам функционирования, основным свойствам, конструктивным особенностям и областям применения современной элементной базы РЭС;
- по методам расчета основных параметров и характеристик радиотехнических материалов и электрорадиоэлементов.

В результате изучения дисциплины **студенты должны**:

- **знать** физико-технические свойства радиоматериалов и радиокомпонентов;
- **уметь** рационально выбирать радиоматериалы и радиокомпоненты при разработке РЭА с учетом технических требований к ним и заданных условий эксплуатации.

1.2 Общие сведения о материалах

К радиотехническим относятся материалы, свойства которых находятся в явной зависимости от воздействия на них электрических и магнитных полей.

В зависимости от электрических и магнитных свойств радиоматериалы **разделяют на классы.**

По **электрическим** свойствам:

- 1) сверхпроводники – имеют удельное сопротивление $\rho \sim 0 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 2) проводники – $\rho \sim 10^{-8}..10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 3) полупроводники – $\rho \sim 10^{-6}..10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 4) диэлектрики – $\rho \sim 10^7..10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

По **магнитным** свойствам:

- 1) диамагнетики – относительная магнитная проницаемость $\mu < 1$ ($\mu \approx 1$);
- 2) парамагнетики – $\mu > 1$ ($\mu \approx 1$);
- 3) антиферромагнетики – $\mu > 1$ ($\mu \approx 1$);
- 4) ферримагнетики – $\mu \gg 1$ ($\mu \sim 10^1..10^4$);
- 5) ферромагнетики – $\mu \gg 1$ ($\mu \sim 10^2..10^6$);
- 6) сверхпроводники – $\mu = 0$;

Свойства радиоматериалов и радиокомпонентов определяются параметрами и характеристиками.

Под параметрами понимается количественное выражение физических свойств радиоматериалов или радиокомпонентов.

Характеристика – функциональная зависимость какого-либо физического свойства от какого-либо внешнего воздействия (фактора) или реакция радиоматериала (радиокомпонента) на внешнее воздействие. Например: зависимость магнитной проницаемости феррита от напряженности магнитного поля $\mu(H)$ или зависимость сопротивления переменного резистора от угла поворота оси регулятора $R(\varphi)$.

Все параметры и характеристики являются вероятностными величинами и зависимостями. В свою очередь, сами параметры не являются постоянными величинами, а зависят от многих факторов, например, от температуры, влажности, атмосферного давления, от времени и т.д.

Те или иные электрофизические свойства материалов обусловлены *типом молекулярно-атомной структуры* и *химическими связями* между структурными элементами. По виду эти связи делятся на *межатомные* (сильные) и *межмолекулярные* (слабые).

Принято различать ионную, ковалентную, донорно-акцепторную и металлическую атомные связи. Среди молекулярных связей выделяют: *дипольно-ориентированные* – наиболее сильные связи между двумя полярными молекулами; *индукционные* – менее интенсивные взаимодействия между полярной и неполярной молекулами; *депрессивные* (слабые) взаимодействия наблюдается в основном между двумя неполярными молекулами.

По агрегатному состоянию материалы делятся на газообразные, жидкие и твердые. Здесь рассматриваются преимущественно твердые вещества.

В твердом состоянии большинство веществ имеют **кристаллическую структуру**. И лишь немногие – аморфную. Обычно каждое вещество в нормальных условиях образует кристаллы совершенно определенной формы. Это продиктовано стремлением свести к минимуму энергии взаимосвязей между элементарными частицами, что имеет место при наиболее плотной упаковке кристаллической решетки.

В зависимости от структуры кристаллов твердые вещества разделяют на **изотропные** – свойства одинаковы во всех направлениях и **анизотропные** – различные свойства по различным направлениям. Например: механическая анизотропия слюды – расслаивается на пластинки, которые механически прочные в ортогональном направлении; магнитная анизотропия холоднокатаных текстурованных электротехнических сталей – магнитная индукция и магнитная проницаемость существенно выше вдоль проката, чем поперек.

К сожалению, в природе материалов с идеально правильной геометрией кристаллической решетки не существует. Они имели бы превосходные свойства. Практически во всех веществах наблюдаются дефекты кристаллической структуры. Различают точечные и линейные дефекты. Последние наиболее сильно влияют на свойства материалов.

1.3 Общие сведения о радиокомпонентах

В общем случае под радиокомпонентами понимаются электроэлементы радиоэлектронной аппаратуры: электрорадиоэлементы, функциональные устройства, устройства функциональной электроники, электронные и полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и др. элементы. Полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы и др. активные радиокомпоненты изучаются в других дисциплинах. В данной дисциплине из-за ограниченности объема рассматриваются только электрорадиоэлементы (ЭРЭ).

Под электрорадиоэлементами понимаются простейшие пассивные электроэлементы электронной аппаратуры, блока, функционального узла или устройства, имеющие законченную конструктивную форму и предназначенные для их построения и выполнения в них простейших электрических функций. Принцип функционирования ЭРЭ основан на использовании физических свойств основных материалов во взаимодействии с окружающей средой. К ЭРЭ относятся резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности.

Свойства ЭРЭ, как и других радиокомпонентов (РК), оцениваются основными (положительными) и паразитными (отрицательными) параметрами. Очевидно, что величина параметров РК зависит от геометрических параметров элементов конструкции, электрофизических свойств основных материалов, условий эксплуатации и др. факторов. Так как параметры конструкций, свойства материалов и внешние воздействия носят случайный характер, то и электромагнитные параметры РК являются случайными величинами.

В общем случае свойства радиокомпонентов оцениваются следующими параметрами и характеристиками:

- номинальным значением основного параметра;
- допустимым отклонением основного параметра от номинального значения – допуском;
- электрической прочностью;
- параметрами, характеризующими активные потери;
- параметрами, характеризующими стабильность и надёжность;
- технико-экономическими показателями (ТЭП) – массой, габаритным объемом, стоимостью и т.д.
- эксплуатационными параметрами и характеристиками.

2 ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1 Зонная энергетическая структура материалов

Зонная теория – учение об энергетическом спектре носителей заряда (электронов, дырок), носителей упругих колебаний кристалла (фононов) и т.д. Наиболее важными для электрических свойств твердых тел являются представления о зонной структуре энергетического спектра носителей заряда.

Чтобы понять, почему металлы обладают значительно большей электропроводностью, чем полупроводники и диэлектрики, рассмотрим, какова структура их энергетических зон (рисунок 2.1).

В изолированном атоме имеется ряд расщепленных уровней энергии, которые могут быть «заселены» электронами (рисунок 2.1, а). Если атомы удалены друг от друга на достаточно большое расстояние, то структура энергетических зон сохраняется, а электроны оказываются привязанными к своим атомам (ядрам).

При сближении атомов на расстояние порядка размеров атомов, что имеет место в кристаллических материалах, происходит перекрытие электронных оболочек, благодаря чему электроны могут без изменения энергии посредством обмена переходить от одного атома к другому, то есть перемещаться по кристаллу. Вследствие обменного взаимодействия дискретные энергетические уровни изолированного атома расщепляются в энергетические зоны (рисунок 2.1, б).

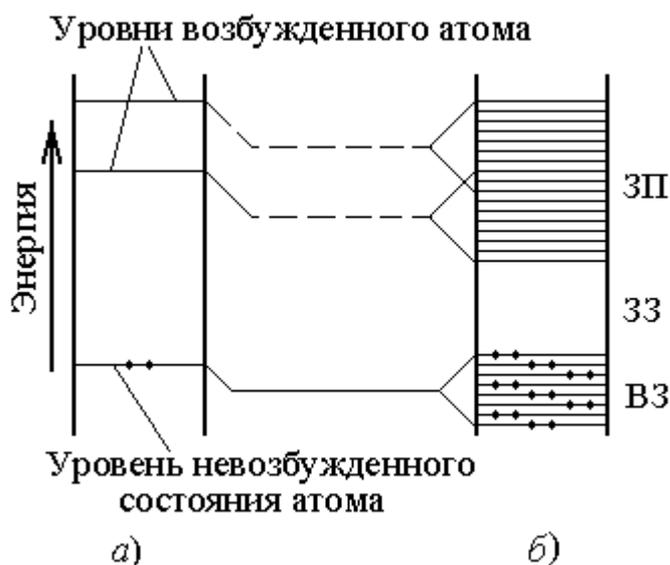


Рисунок 2.1 – Энергетические уровни:
а – уединенного атома; б – твердого тела

Разрешенные зоны разделены запрещенными зонами. Уровни энергии внутренних оболочек, локализованных вблизи ядра и не подверженных сильному возмущению – валентные зоны, расщепляются меньше, чем уровни внешних электронов – зоны проводимости.

Стремление системы атомов к минимуму энергии приводит к тому, что энергетические уровни зон заселяются электронами «снизу вверх». В итоге нижние (внутренние) зоны заселяются полностью вплоть до **валентной зоны (ВЗ)**, которая является последней заполняемой зоной. Следующая за валентной зоной, свободная незаполненная электронами зона, называется **зоной проводимости**

(ЗП). Взаимное расположение этих зон и степень заполнения валентной зоны определяют большинство процессов, происходящих в твердых телах. Рассмотрим несколько характерных случаев.

а) Если между ВЗ и ЗП имеется большая зона запрещенных энергий – **запрещенная зона (ЗЗ) существенная** $\Delta E \geq 0,1 \text{ эВ}^*$, то такое состояние соответствует либо **полупроводнику** ($\Delta E < \sim 3 \text{ эВ}$), либо **диэлектрику** ($\Delta E > \sim 3 \text{ эВ}$) (рисунок 2.2, а, б). При этом электроны находятся в **валентной зоне**, которая **заселена полностью**, и не могут самостоятельно переходить в зону проводимости. Такой переход возможен только под воздействием внешних возбуждающих факторов, когда электроны получают дополнительную энергию, большую запрещенной зоны.

б) Если **ЗЗ незначительная** ($\Delta E < 0,1 \text{ эВ}$) **или отсутствует** (рисунок 2.2, в), то такой материал обладает высокой электропроводностью и относится к **металлам**.

в) Если **валентная зона заселена электронами частично**, то материал обладает **металлическими свойствами** вне зависимости от взаимного расположения ВЗ и ЗП и относится к **металлам**.

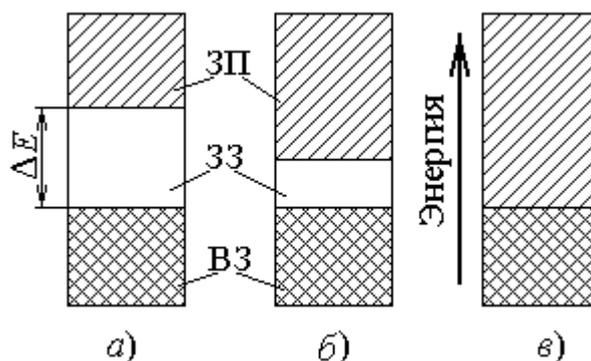


Рисунок 2.2 – Структура энергетических зон:
а – диэлектриков, б – полупроводников, в – металлов

В свете зонной теории становится понятной разница между металлами и диэлектриками и полупроводниками. Это различие связано, прежде всего, с поведением их во внешнем электрическом поле. У металлов количество «свободных электронов» практически не зависит от уровня электрического поля. Приложение внешнего электрического поля ускоряет электроны в определенном направлении и вызывает их упорядоченное движение – электрический ток. При этом ускорение электронов связано с переходом их с одного энергетического уровня на другой. У полупроводников же наблюдается очень сильная зависимость количества носителей заряда (электронов и дырок) от уровня электрического поля, а у диэлектриков электропроводность практически отсутствует в широком диапазоне напряженности электрического поля.

* Электрон-вольт – энергия, которую приобретает электрон при перемещении в электрическом поле в вакууме между двумя точками с разницей потенциалов в 1 В. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

2.2 Основные электрические параметры металлов

Известно, что плотность тока j в любом материале определяется величиной заряда q , концентрацией зарядов N и дрейфовой скоростью носителей заряда $V_{др}$

$$j = q \cdot N \cdot V_{др}. \quad (2.1)$$

Дрейфовая скорость $V_{др}$ – это средняя векторная сумма скоростей электронов. Не нужно ее путать с тепловой скоростью V_T , которая равна среднему модулю скоростей отдельных элементов V_i .



$$\quad (2.2)$$

В электрическом поле дрейфовая скорость пропорциональна вектору напряженности его \bar{E}

$$V_{др} = \mu \cdot \bar{E}, \quad (2.3)$$

где μ – коэффициент подвижности электронов, $m^2/(B \cdot c)$.

С учетом (2.3) плотность тока в проводнике будет равна

$$j = q \cdot N \cdot \mu \cdot \bar{E} = \gamma \cdot \bar{E} = \bar{E} / \rho, \quad (2.4)$$

где $\gamma = q \cdot N \cdot \mu = j / \bar{E}$ – удельная проводимость материала, коэффициент пропорциональности между плотностью тока и напряженностью электрического поля; $\rho = 1/\gamma$ – удельное сопротивление материала.

2.3 Удельное сопротивление чистых металлов и сплавов

Если бы металлы были без дефектов кристаллических решеток, то при температуре $t = 0 \text{ K}$ удельное сопротивление их было бы равно нулю ($\rho = 0$), так как электроны не испытывали бы сопротивления при движении и не было бы потерь энергии. Но, к сожалению, реальных металлов без дефектов кристаллической решетки в природе не существует. Поэтому удельное сопротивление металлов подчиняется правилу Маттиссена:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \quad (2.5)$$

где ρ_T – тепловое сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки; $\rho_{ост}$ – остаточное или добавочное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на дефектах структуры.

Основные потери в чистых металлах обусловлены тепловыми колебаниями решетки (ионов). Поэтому в металлах наблюдается прямая зависимость ρ от t . Но в области низких температур ($t < 0 \text{ }^\circ\text{C}$) наблюдается сильная нелинейная зависимость, а при более высоких температурах (при $t > 0 \text{ }^\circ\text{C}$) она практически линейна. В этой области влияние температуры на удельное сопротивление учитывается **температурным коэффициентом изменения удельного сопротивления α_ρ** .

$$\alpha_\rho = \frac{d\rho}{\rho \cdot dt}. \quad (2.6)$$

На практике для определения α_ρ часто пользуются следующей формулой:

$$\alpha_{\rho} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(t_2 - t_1)}, \quad (2.7)$$

где ρ_2 и ρ_1 – удельные сопротивления металлов при температуре t_2 и t_1 , соответственно.

Для чистых металлов $\alpha_{\rho} \sim 10^{-3} K^{-1}$, но может быть снижен на 1-2 порядка путем введения определенных примесей. Типовые значения удельного сопротивления чистых металлов (при $20^{\circ}C$) составляют порядка $\rho \sim 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Зная α_{ρ} и удельное сопротивление при одной температуре, можно вычислить удельное сопротивление при любой температуре по формуле:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha_{\rho} \cdot (t_2 - t_1)]. \quad (2.8)$$

С целью улучшения каких-либо свойств, чаще всего механических, в чистые металлы вводят другие материалы. В результате полученные *сплавы имеют удельные сопротивления всегда большие, чем ρ отдельных компонентов*. Как и в случае чистых металлов, удельное сопротивление сплава можно представить суммой двух слагаемых $\rho_{СПЛ} = \rho_T + \rho_{ОСТ}$. Но у сплавов $\rho_{ОСТ}$ во много раз больше, чем ρ_T . Для многих сплавов состоящих из двух компонентов зависимость $\rho_{ОСТ}$ от состава подчиняется закону Нордгейма:

$$\rho_{ОСТ} = C \cdot x_A \cdot x_B = C \cdot x_B \cdot (1 - x_B), \quad (2.9)$$

где C – константа, характеризующая данный сплав; x_A и x_B – атомные доли компонентов A и B в сплаве ($x_A + x_B = 1$).

Опыт показывает, что при малом содержании примеси удельное сопротивление металлов пропорционально количеству примесей, а также возрастает при закалке и механических деформациях.

Температурный коэффициент электрического сопротивления провода рассчитывается по формуле:

$$\alpha_R = \alpha_{\rho} - \alpha_l, \quad (2.10)$$

где α_l – температурный коэффициент линейного расширения.

Для чистых металлов обычно $\alpha_l \ll \alpha_{\rho}$, т.е. для них можно считать приближенно $\alpha_R \approx \alpha_{\rho}$. Однако для сплавов, имеющих малый α_{ρ} формула (2.10) имеет существенное практическое значение.

2.4 Влияние частоты тока на сопротивление проводников. Поверхностный эффект и эффект близости

Поверхностный эффект (скин-эффект) проявляется в том, что под влиянием тока высокой частоты в проводнике возникает электрическое поле, которое вытесняет ток к поверхности. В результате этого плотность тока в проводниках растет в радиальном направлении и достигает максимума на поверхности проводника. Эффект проявляется тем сильнее, чем выше частота тока и в области СВЧ ток проходит практически только по поверхности проводников. Поэтому в СВЧ-устройствах, чтобы снизить потери, поверхности проводников очень тщательно обрабатываются и покрываются благородными металлами (серебро, золото). При этом существенно сокращается путь прохождения тока (уменьшается шерохова-

тость поверхности), уменьшается удельное сопротивление и защищается поверхность от влияния агрессивной среды.

Глубина, на которую электрический поле и ток проникают в проводник, зависит как от частоты тока, так и от электрических и магнитных характеристик материала и определяется по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \gamma \cdot \omega}}, \quad (2.11)$$

где Δ – глубина проникновения поля в проводник; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость проводника; $\gamma = 1/\rho$ – удельная проводимость материала; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока.

Так как в случае сильно выраженного поверхностного эффекта ток протекает только в тонком приповерхностном слое и центральная часть сечения проводника практически не используется, то сопротивление проводника при прохождении по нему переменного тока высокой частоты больше сопротивления этого же провода постоянному току в k_R раз.

$$k_R = \frac{R_f}{R_0} = \frac{S_0}{S_f} = \frac{\pi \cdot d^2 / 4}{\pi \cdot d \cdot \Delta} = \frac{d}{4\Delta}, \quad (2.12)$$

где R_f и R_0 – сопротивления провода переменному току высокой частоты и постоянному току, соответственно; S_f и S_0 – эффективные сечения провода при протекании тока высокой частоты и постоянного тока; d – диаметр провода.

Эффект близости проявляется в проводниках, проходящих вблизи друг от друга. Наиболее сильно он проявляется в высокочастотных катушках индуктивности. Эффект близости обусловлен взаимным влиянием электромагнитных полей, создаваемых соседними витками, и проявляется в вытеснении высокочастотного тока на внутреннюю поверхность проводников. В результате наибольшая плотность тока будет иметь место на внутренней стороне витков (проводников). При этом эффект близости будет проявляться тем больше, чем больше диаметр провода и диаметр катушки. Для сравнения, поверхностный эффект проявляется тем больше, чем меньше диаметр провода и не зависит от диаметра катушки.

2.5 Сопротивление тонких металлических пленок.

Размерные эффекты

Тонкие металлические пленки широко используются в микроэлектронике в качестве токопроводов для соединения элементов, электродов, контактных площадок, резистивных элементов и т.д. Для этой цели используются металлические пленки из алюминия, серебра, золота, никеля и др. металлов. Они наносятся на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, как правило, методом термического испарения в вакууме.

Толщина таких пленок от долей до единиц микрометров. Удельное сопротивление тонких пленок существенно больше, чем у объемного проводника из-за большой концентрации дефектов поликристаллической структуры пленки. Наибольшая концентрация дефектов наблюдается на внутренних слоях, прилегающих к подложке, из-за большой разницы в структурах металла и материала под-

ложки. Лишь при достаточно большой толщине пленки регулярность структуры материала проводника восстанавливается и удельное сопротивление уменьшается. К увеличению удельного сопротивления тонких пленок приводит и появление размерных эффектов, т.е. уменьшение средней длины пробега электронов при отражении их от поверхности пленки. Эти эффекты проявляются, когда толщина пленки становится соизмерима со средней длиной свободного пробега электронов.

Для оценки качества тонких пленок используется специальный параметр – *удельное поверхностное сопротивление*

$$\rho_{\square} = R \cdot b/l, \text{ Ом}/\square, \quad (2.13)$$

где R – полное сопротивление пленки; b и l – ширина и длина пленочного проводника.

Физический смысл ρ_{\square} – это сопротивление пленки, имеющей форму квадрата. Величина ρ_{\square} является важнейшей технологической характеристикой. Изменяя его в модельных экспериментах, можно рассчитать сопротивление пленочного проводника произвольной конфигурации

$$R = \rho_{\square} \cdot l / b. \quad (2.14)$$

Понятием удельного поверхностного сопротивления пользуются также при анализе поверхностного эффекта проводимости проводников и поверхностной проводимости диэлектриков.

2.6 Свойства проводниковых материалов и их классификация по функциональному назначению

2.6.1 Материалы высокой проводимости

Проводниковые материалы – вещества, обладающие высокой электропроводностью или низким удельным сопротивлением – $\rho \leq 10^{-7}$ Ом·м. К проводникам относятся: *металлы*, носителями тока в которых являются квазисвободные электроны проводимости; *электролиты* – носители – положительные и отрицательные ионы; *плазма* – носители – свободные электроны, положительные и отрицательные ионы.

Практически все металлы и их сплавы относятся к проводникам. Но среди них выделяют материалы с низким и высоким удельным сопротивлением.

Наиболее низким удельным сопротивлением обладают: **Ag** – $\rho = 1,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; **Cu** – $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; **Au** – $\rho = 2,25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и **Al** – $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Наиболее широкое применение в электротехнической и радиоэлектронной промышленности получили медь, алюминий и их сплавы.

а) Медь и ее сплавы. Основные преимущества меди:

- малое удельное сопротивление (уступает только серебру);
- достаточно высокая механическая прочность и коррозионная стойкость;
- технологичность в механической обработке и в электромонтаже (легко поддается холодной механической обработке и вытяжке, пайке и сварке);
- относительно невысокая стоимость по сравнению с благородными металлами.

Преимущественное применение меди: обмоточные и монтажные провода, кабели, шины электромонтажные и т.д.

Сплавы из меди – *бронзы* и *латуни* имеют значительно лучшие механические свойства, чем чистая медь, но удельное сопротивление существенно больше меди. Они широко применяются в качестве контактных проводов и токосъемных контактов, коллекторных пластин и контактных колец, контактных пружин (в реле) и т.д.

б) Алюминий и его сплавы. Основные преимущества алюминия:

- почти в 3,5 раза легче меди;
- высокая коррозионная стойкость;
- высокая технологичность – горячее литье, холодная штамповка и вытяжка, холодная прокатка в тонкие ленты и фольгу, нанесение тонких пленок в микроэлектронике и в производстве конденсаторов (металлопленочные, металлобумажные, слюдяные, электролитические конденсаторы);
- менее дефицитный и менее дорогой, чем медь.

К основным недостаткам алюминия следует отнести низкую механическую прочность и нетехнологичность в электромонтаже. Он практически не поддается пайке, а при механическом соединении образуется оксидная пленка с довольно высоким сопротивлением, например, при скрутке алюминиевых и медных проводов. Поэтому электромонтаж ведется, как правило, с помощью сварки.

Алюминий и его сплавы очень широко применяются в электротехнике и приборостроении: провода ЛЭП, обмоточные провода и шины, короткозамкнутые роторы электродвигателей, в конденсаторостроении, в микроэлектронике (нанесение тонкопленочных токопроводящих структур в ИС, в функциональных устройствах на ПЗС, ПАВ и т.д.).

в) Благородные металлы и их сплавы (серебро, золото, платина) очень широко применяются: в микроэлектронике (электромотажные микропровода, электроды, контактные площадки и т.д.); для изготовления резистивных паст (используются в гибридных МС); в производстве коммутационных устройств, конденсаторов, кварцевых резонаторов, СВЧ-устройств и т.д.

Все они обладают высокой стойкостью к окислению, легко наносятся в виде тонких пленок как на другие металлы, так и на диэлектрики и полупроводники, образуя прочную связь с материалами основы.

2.6.2 Материалы с высоким удельным сопротивлением

Для изготовления резисторов, измерительных мостов сопротивлений, шунтов, нагревательных элементов различного назначения и для других целей используются материалы, обладающие высоким удельным сопротивлением. Эти материалы разделяют на проволочные и непроволочные.

Непроволочные материалы нашли преимущественное применение для изготовления резисторов. К ним относятся: пиролитический углерод, бороуглерод, окислы металлов, металлодиэлектрики, композиционные материалы на основе углерода, резистивные пасты на основе благородных металлов и другие материалы.

Из проволочных материалов с высоким удельным сопротивлением преобладают различные сплавы металлов с легирующими добавками. Наиболее широкое применение получили сплавы на основе никеля и железа: нихром ($Ni - Cr$), ферронихром ($Fe - Ni - Cr$), фехраль ($Fe - Al$), хромаль ($Fe - Cr - Al$).

Нихромы – жаростойкие сплавы никеля (65..80 %) и хрома (15..30 %), легированные кремнием (до 1,5 %), алюминием (до 3,5 %) и микродобавками из редкоземельных металлов. Обладают высокой жаростойкостью (до 1250 °С) и высоким удельным сопротивлением ($\rho = (1,05..1,35) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Применяются для изготовления проволочных резисторов, реостатов и нагревательных элементов различного назначения. Основной недостаток – относительно большая стоимость из-за дороговизны никеля и хрома. Пример: Нихром Х20Н80 ($Ni-80 \%$, $Cr-20 \%$) имеет $\rho = (1,0..1,1) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $t_{max} = 1100 \text{ °С}$, $\alpha_{\rho} = +(100..200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Ферронихромы – жаростойкие сплавы из никеля и хрома с добавлением железа (более 20 %). Более дешевые, но несколько уступают по жаростойкости (около 1000 °С). Пример: Нихром (ферронихром) : Х15Н60 ($Ni-60 \%$, $Cr-15 \%$ и $Fe-25 \%$) имеет $\rho = (1,0..1,2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $t_{max} = 1000 \text{ °С}$, $\alpha_{\rho} = +(100..200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Фехраль содержит 17..30 % Cr и 3,5..5,5 % Al , остальное Fe . Сочетает высокое удельное сопротивление ($\rho = (1,15..1,35) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и высокую жаропрочность (до 900 °С). Фехраль уступает по жаропрочности хромалю, но дешевле его и обладает более высокой технологической пластичностью при горячей и холодной деформации. Пример: Фехраль Х25Ю5 ($Cr-25 \%$, $Al-5 \%$ и $Fe-70 \%$) имеет $\rho = (1,3..1,5) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $t_{max} = 1200 \text{ °С}$ и $\alpha_{\rho} = +65 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Хромаль содержит 8..15 % Cr и 4,5..6 % Al , остальное Fe . Обладает редким сочетанием высокого удельного сопротивления ($\rho = (1,3..1,5) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и высокой жаропрочности (до 1400 °С). Более дешевый, чем нихром, но дороже фехраля и менее пластичный. Пример: Хромаль Х13Ю4 ($Cr-13 \%$, $Al-4 \%$, и $Fe-87 \%$) имеет $\rho = (1,2..1,35) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $t_{max} = 850 \text{ °С}$ и $\alpha_{\rho} = +(100..120) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Среди высокоомных материалов широкое применение нашли сплавы на основе меди – *манганин* и *константан*.

Манганин (от слова *tanganit* – марганец) – сплав на основе меди с добавкой марганца (11,5..13,5 %) и никеля (2,5..3,5 %) имеет $\rho = (0,42..0,48) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Он характеризуется чрезвычайно малым значением ТКР. При комнатных температурах в интервале 15..35 °С $\alpha_{\rho} = +2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, а $\rho_{20} = 0,47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В более широком интервале температур манганин имеет $\alpha_{\rho} = \pm(5..30) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Максимально допустимая рабочая температура – $t_{max} = 100..200 \text{ °С}$.

Существенное преимущество манганина перед константаном – очень малая величина термоэдс в паре с медью (не более 1 мкВ/К). Благодаря своим высоким электрическим свойствам преимущественное применение он нашел в приборостроении. В приборах высокого класса точности применяется только манганин. Из него изготавливают эталонные сопротивления и элементы измерительных приборов.

К недостаткам следует отнести неустойчивость манганина к коррозии в атмосфере, содержащей пары кислот и аммиака, а также чувствительность к значительному изменению влажности воздуха.

Константан (постоянный) – медно-никелевый сплав ($Ni-39.41\%$, $Mn-1.2\%$, остальное медь) отличается слабой зависимостью сопротивления от температуры ($\alpha_p = \pm(5..25) \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Удельное сопротивление константана – $\rho = (0,48..0,52) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, максимальная рабочая температура $t_{max} = 450..500\text{ }^\circ\text{C}$.

Применяется константан преимущественно для изготовления реостатов, прецизионных проволочных резисторов, элементов измерительных приборов и т.д. Он более стойкий к агрессивной среде, чем манганин. Одним из существенных недостатков манганина считается большая термоэдс в контакте с медью ($E \approx -40 \text{ мкВ/К}$). Однако этот недостаток превращается в достоинство при изготовлении термопар (в паре с медью или железом), которые широко используются для косвенного измерения температур до $500\text{ }^\circ\text{C}$.

Для формирования резисторов гибридных интегральных микросхем (ГИС) используются специальные **резистивные пасты**. Изготавливаются они на основе порошков из благородных металлов (Ag , Au , Pt , Pd), окислов индия, рутения, кадмия и др. металлов. В качестве связующего материала в состав резистивной пасты вводят порошки стекла (обычно висмутоборосиликатного), что обеспечивает хорошее сцепление резистивного слоя с подложкой. Для придания пасте необходимой вязкости и поверхностного натяжения в пасту вводят органические вещества и растворители, что существенно облегчает процесс нанесения резистивного слоя на подложку через трафарет. В процессе сушки и последующего вжигания при температуре $500..1000\text{ }^\circ\text{C}$ происходит выгорание связующих материалов, сплавление частиц основного материала с образованием проводящих мостиков и спекание их со стеклом. При этом паста прочно вжигается в подложку. Резистивные пасты нормируются по величине удельного поверхностного сопротивления. Например, паста марки ПР-20к рассчитана на получение резисторов с $\rho_{\square} = 20 \text{ кОм}/\square$ при толщине пленки порядка $10..20 \text{ мкм}$.

2.6.3 Сверхпроводники

В области температур, близких к абсолютному нулю ($-273\text{ }^\circ\text{C}$), некоторые металлы (Al , Nb , Sn , Zn , Hg и др.) и сплавы переходят в сверхпроводящее состояние, при котором удельное сопротивление их резко снижается практически до нуля. Это физическое явление получило название **сверхпроводимость**, а сами металлы называются **сверхпроводниками**. Критическая температура, при которой происходит переход материала в сверхпроводящее состояние, называется **температурой сверхпроводникового перехода** $T_{св}$.

Материалы, находящиеся в сверхпроводящем состоянии, обладают нулевой магнитной проницаемостью, то есть являются идеальными диамагнетиками. Это означает, что внешнее магнитное поле не проникает в сверхпроводящее тело. И, если тело переходит в сверхпроводящее состояние в магнитном поле, то оно выталкивается из магнитного поля, или поле из сверхпроводника.

Сверхпроводники используются для создания мощных электромагнитов, малогабаритных, но мощных, электродвигателей, генераторов и трансформаторов питания с высоким КПД, кабельных линий большой мощности, волноводов с очень малым затуханием и для других целей.

Основным недостатком сверхпроводящих металлов и сплавов является необходимость охлаждения их до сверхнизких температур (до $4,2\text{ K}$ – жидкий гелий), что сложно и дорого. Однако в последнее время открыты сверхпроводящие материалы среди *неметаллов*, имеющих значительно большую T_{CB} . Так в 1986-1987 годах была открыта группа оксидных керамик, обладающих сверхпроводимостью при T_{CB} , превышающей температуру жидкого азота (77 K). В перспективе предполагается широкое использование новых сверхпроводников в микроэлектронике.

2.6.4 Припой и флюсы

Припой – специальные низкотемпературные сплавы, применяемые для соединения металлических элементов конструкций с помощью пайки. Пайка используется либо для получения механически прочного шва, либо для соединения токопроводящих элементов с целью получения надежного электрического контакта с малым переходным сопротивлением.

Припои делятся на **мягкие** (температура плавления $T_{пл} \leq 400\text{ }^\circ\text{C}$) и **твердые** ($T_{пл} > 500\text{ }^\circ\text{C}$). Марка припоя выбирается в зависимости от свойств материалов соединяемых элементов и требований, предъявляемых к качеству пайки: механической прочности, коррозионной стойкости, допустимого переходного электрического сопротивления и т.д.

К мягким относятся *оловянно-свинцовые припои* с содержанием олова от 18 % (ПОС-18) до 90 % (ПОС-90). Удельная проводимость их составляет 9..13 % от проводимости чистых металлов сплава. Существуют также мягкие припои, легированные алюминием, серебром и др. металлами. Более мягкими являются припои с добавлением висмута и кадмия. К наиболее легкоплавким относится сплав Вуда – $T_{пл} = 60,5\text{ }^\circ\text{C}$. Однако, чем мягче припой, тем ниже механическая прочность пайки.

Наиболее распространенные твердые припои – *медно-цинковые* (ПМЦ) и *серебряные* (ПСр).

Для получения более качественной пайки используются **флюсы**. Они помогают растворять и удалять окислы и загрязнения, защищать во время пайки поверхности соединяемых деталей и припоя от окисления, улучшать растекаемость и смачиваемость соединяемых поверхностей. При пайке швов допускаются кислотные флюсы, а при электромонтаже радиоаппаратуры должны использоваться только *бескислотные флюсы* – на основе канифоли, с добавлением неактивных растворителей (спирта, глицерина). Кислотные флюсы приводят к образованию в местах пайки пленок с высоким электрическим сопротивлением, а со временем к полной потере электрического контакта между соединяемыми элементами.

Контрольные вопросы

- 1 Зонная энергетическая структура проводниковых материалов. Физическая сущность электропроводности проводниковых материалов.
- 2 Что понимается под удельной проводимостью и удельным сопротивлением материала? Их связь с плотностью тока в проводнике.
- 3 Каков уровень удельного сопротивления чистых металлов и сплавов? Как зависит удельное сопротивление металлов от примесей и от температуры?
- 4 Как зависит сопротивление проводников от частоты тока? Физическая сущность поверхностного эффекта и эффекта близости.
- 5 Что понимается под удельным поверхностным сопротивлением проводниковых материалов? Как оно зависит от толщины тонких металлических пленок?
- 6 Какие материалы относятся к проводниковым? Какие проводниковые материалы нашли преимущественное применение в радиоэлектронных устройствах?
- 7 Основные свойства и области применения в радиоэлектронных устройствах меди и ее сплавов.
- 8 Основные свойства и области применения в радиоэлектронных устройствах алюминия и его сплавов.
- 9 Основные свойства и области применения в радиоэлектронных устройствах благородных металлов и их сплавов.
- 10 Основные свойства и области применения в радиоэлектронных устройствах проводниковых материалов с высоким удельным сопротивлением: нихромов, ферронихромов, фехралей, хромалей, константана и манганина.
- 11 Основные свойства и области применения в радиоэлектронных устройствах проводниковых материалов с высоким удельным сопротивлением
- 12 На какой основе изготавливаются резистивные пасты для ГИС? Какими свойствами они должны обладать?
- 13 Что такое сверхпроводимость? Какие материалы относятся к сверхпроводникам? Где они могут быть использованы в радиоэлектронике?
- 14 Назначение припоев и флюсов. Какие требования к ним предъявляются? Какие припои и флюсы используются при электромонтаже РЭА?

3 ДИЭЛЕКТРИКИ

3.1 Общие сведения

Диэлектрики – вещества, плохо проводящие электрический ток. Удельное сопротивление типичных диэлектриков составляет порядка $10^8 \dots 10^{17}$ Ом·м, что обусловлено очень малым содержанием в них *свободных зарядов* – электронов, дырок, слабо закрепленных ионов.

Свободные заряды – заряды, способные двигаться под действием электрического поля на расстояния, намного превышающие межатомные расстояния.

Диэлектрик состоит преимущественно из *связанных зарядов* – пары положительных и отрицательных зарядов (электроны оболочек атомов и атомные ядра, ионы, диполи). Они не могут свободно перемещаться под действием электрического поля на большие расстояния, а могут лишь немного смещаться друг относительно друга на очень малые расстояния, соизмеримые с межатомными.

Диэлектрики получили чрезвычайно широкое применение в радиоэлектронике. По функциональному признаку их разделяют на *пассивные* и *активные*. *Пассивные диэлектрики* используются во всех электрических устройствах в качестве электроизоляционных материалов, в конденсаторах – в качестве поляризационного материала, в микросхемах и функциональных устройствах электроники (МДП-структуры, полевые транзисторы, оптроны и т.д.) – в качестве поляризационного и электроизоляционного материала, в композиционных материалах – в качестве связующего компонента или наполнителя. В последнее время все более широкое применение в радиоэлектронной технике получают *активные диэлектрики*: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, жидкие кристаллы, материалы твердотельных лазеров и т.д.

3.2 Поляризация диэлектриков, неполярные и полярные диэлектрики

В любом диэлектрике имеют место как связанные, так и свободные электрические заряды. Но в нем всегда преобладают связанные заряды. Поэтому в силу малости свободных зарядов, при рассмотрении явления поляризации, для упрощения их влиянием пренебрегают. Каждая пара связанных точечных зарядов, называемых *диполем*, обладает электрическим моментом.

Электрическим моментом диполя p_i называется вектор, направление которого совпадает с направлением от отрицательного компонента диполя к положительному, а величина его равна произведению заряда диполя на его плечо (расстояние между зарядами).

Электрические моменты диполя могут быть *собственные* и *индуцированные* – наведенные внешним электрическим полем. *Молекулы, обладающие собственным электрическим моментом, называются полярными молекулами, а диэлектрики, состоящие в основном из полярных молекул, называются полярными.* Диэлектрики, в составе которых преобладают неполярные молекулы, относятся к *неполярным*.

Основным свойством диэлектриков является способность поляризоваться.

Поляризация – направленное перемещение в материале большого количества связанных зарядов на ничтожно малые расстояния, соизмеримые с межатомными расстояниями.

Поляризация в диэлектриках может быть вызвана внешним воздействием электрического поля (в пассивных диэлектриках), механических деформаций (в пьезоэлектриках) или самопроизвольная (спонтанная) в сегнетоэлектриках.

В пассивных диэлектриках под действием внешнего электрического поля связанные заряды смещаются из своих равновесных состояний. В результате этого каждый элементарный объем диэлектрика dV приобретает **индуцированный** (наведенный) электрическим полем **момент** dp .

Образование индуцированного электрического момента в диэлектрике и представляет собой явление поляризации. Интенсивность поляризации диэлектрика определяется **поляризованностью** P .

Поляризованностью называется векторная величина, характеризующая степень поляризации диэлектрика и равна сумме всех элементарных моментов, приходящихся на единицу объема

$$\bar{P} = \sum_{i, \Delta V} \bar{p}_i / \Delta V. \quad (3.1)$$

Поляризации разделяют на *упругие* и *неупругие*. В свою очередь **упругие поляризации** делятся на *электронно-упругие*, *ионно-упругие* и *дипольно-упругие*. Они характеризуются очень малым временем установления ($\tau < 10^{-12}$ с) и отсутствием потерь энергии на радиочастотах. Смещения связанных зарядов происходят в пределах упругих сил на расстояния, значительно меньшие межатомных.

Неупругие поляризации разделяют на *релаксационные* (ионно-релаксационные, дипольно-релаксационные и электронно-релаксационные), *миграционные* и *спонтанные*. Для них характерно относительно большое время установления ($\tau > 10^{-6}$ с), а смещение связанных зарядов происходит на расстояния порядка атомных промежутков с преодолением упругих сил. При этом в диапазоне радиочастот в диэлектриках с неупругой поляризацией имеют место существенные потери энергии.

На основании вышеизложенного пассивные диэлектрики можно подразделить на две группы:

- **полярные** – диэлектрики, у которых молекулы имеют собственный электрический момент (диполи). У таких диэлектриков обязательно имеют место релаксационные поляризации;
- **неполярные** – диэлектрики, не содержащие диполи. В них имеются только упругие процессы поляризации.

3.3 Диэлектрическая восприимчивость, диэлектрическая проницаемость

Главной характеристикой, отражающей свойства диэлектрика, является зависимость поляризованности P (как реакции на внешнее воздействие) от напряженности электрического поля E (как внешнего воздействия). Коэффици-

ент пропорциональности между ними называется *абсолютной диэлектрической восприимчивостью* χ_a

$$\chi_A = P/E. \quad (3.2)$$

Но чаще для оценки чувствительности диэлектрика к воздействию электрического поля используется безразмерная величина – *относительная диэлектрическая восприимчивость* χ , равная

$$\chi = \chi_A/\varepsilon_0, \quad (3.3)$$

где $\varepsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – диэлектрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума).

В инженерной практике способность материалов к поляризации количественно оценивается безразмерным параметром – *относительной диэлектрической проницаемостью* ε – безразмерная величина, равная относительной диэлектрической восприимчивости, увеличенной на единицу

$$\varepsilon = 1 + \chi. \quad (3.4)$$

Для любого диэлектрика $\varepsilon > 1$. Лишь для сухого воздуха $\varepsilon \approx 1$.

Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет относительная диэлектрическая проницаемость ε . Но в таких диэлектриках будут больше диэлектрические потери и повышенная нестабильность ε при изменении частоты f приложенного электрического поля и температуры окружающей среды t_c .

На практике часто используют сложные неоднородные диэлектрические материалы. Диэлектрическая проницаемость таких материалов может быть рассчитана с помощью уравнения Лихтенеккера:

$$\varepsilon^x = Q_1 \varepsilon_1^x + Q_2 \varepsilon_2^x, \quad (3.5)$$

где ε , ε_1 , ε_2 – соответственно относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов; Q_1 и Q_2 – объемные доли компонентов смеси ($Q_1 + Q_2 = 1$); x – величина, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от плюс 1 до минус 1.

Диэлектрическая проницаемость таких материалов зависит не только от свойств и объемной концентрации компонентов, но также от их взаимного пространственного расположения в электрическом поле.

При параллельном включении компонентов $x = +1$ и выражение (3.5) имеет вид:

$$\varepsilon = Q_1 \varepsilon_1 + Q_2 \varepsilon_2. \quad (3.6)$$

При последовательном включении компонентов, когда $x = -1$:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{Q_1}{\varepsilon_1} + \frac{Q_2}{\varepsilon_2}. \quad (3.7)$$

Если оба компонента распределены хаотически (например, пористые материалы или керамика), то после преобразования ($y = a^x$; $y' = a^{x \cdot \ln a}$) уравнения Лихтенеккера и подстановки $x = 0$, получим:

$$\ln \varepsilon = Q_1 \cdot \ln \varepsilon_1 + Q_2 \cdot \ln \varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяют дифференцированием соответствующего уравнения по температуре. В результате получим следующие уравнения:
при параллельном включении

$$\alpha_{\varepsilon} = \alpha_{\varepsilon 1} \cdot Q_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} + \alpha_{\varepsilon 2} \cdot Q_2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon}; \quad (3.9)$$

при последовательном включении

$$\frac{1}{\alpha_{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon \cdot Q_1}{\alpha_{\varepsilon 1} \cdot \varepsilon_1} + \frac{\varepsilon \cdot Q_2}{\alpha_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon_2}; \quad (3.10)$$

при хаотическом распределении

$$\alpha_{\varepsilon} = \alpha_{\varepsilon 1} \cdot Q_1 + \alpha_{\varepsilon 2} \cdot Q_2. \quad (3.11)$$

3.4 Электропроводность диэлектриков

3.4.1 Электропроводность газов

Свободные заряды в газах появляются в результате воздействия ионизирующих излучений, ударной ионизации электронами в сильных электрических полях, соударений молекул при высоких температурах. Рассмотрим токи в воздушном конденсаторе с плоскопараллельными электродами. Обозначим через N мощность внешнего ионизатора (число актов ионизации в 1 м^3 за 1 с). В сильном электрическом поле свободные заряды уносятся полем на электроды и там нейтрализуются. В слабых полях этот эффект пренебрежительно мало влияет на концентрацию свободных зарядов. С достаточной точностью можно считать, что в слабых полях равновесная концентрация не зависит от напряженности поля. Сила тока увеличивается пропорционально приложенному напряжению, а плотность тока – напряженности поля будет равна

$$j = q \cdot n \cdot (\mu_+ + \mu_-) \cdot E, \quad (3.12)$$

где j – плотность тока; q – заряд иона; μ_+ и μ_- – подвижность положительных и отрицательных ионов; E – напряженность поля.

На рисунке 3.1 этому соответствует область $0 < E < E_H$ – область справедливости закона Ома.

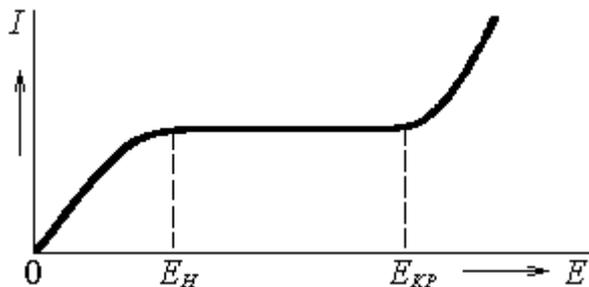


Рисунок 3.1 – Зависимость силы тока от напряжения для газа

При напряженности $E > E_H$ закон Ома нарушается. Все появляющиеся под действием излучения заряды уносятся полем на электроды. Плотность тока зависит от мощности ионизатора и не зависит от напряженности поля (соответственно, сила тока I не зависит от напряжения). Плотность тока насыщения равна

$$j_H = q \cdot N \cdot h, \quad (3.13)$$

где N – мощность внешнего ионизатора; h – расстояние между электродами.

Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях и расстоянии между электродами $h = 1$ см наблюдается при напряженностях поля $E \approx 0,6$ В/см. При этом плотность тока насыщения воздуха будет порядка $j_H \sim 10^{-15}$ А/см². В газах плотность тока насыщения будет порядка $j_H \sim 10^{-16} \dots 10^{-14}$ А/см². При дальнейшем повышении напряженности до значений, близких к E_{KP} , возникает ударная ионизация электронами и ток резко возрастает. При этом плотность тока будет равняться

$$j = q \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot h), \quad (3.14)$$

где n_0 – концентрация свободных электронов около катода; α – коэффициент ударной ионизации.

Ударная ионизация в воздухе в нормальных условиях возникает при $E \approx (10^5 - 10^6)$ В/см, т.е. в полях, близких к пробивным. В предпробивных полях создаются условия для возникновения «лавины» носителей зарядов и ток очень резко возрастает пока при $E = E_{ПП}$ не наступает пробой газа.

3.4.2 Электропроводность твердых диэлектриков

Электропроводность твердых диэлектриков зависит от химического состава, структуры диэлектрика и условий работы. В большинстве диэлектриков в слабых полях проводимость ионная. Участие электронов в проводимости этих диэлектриков наблюдается только в сильных электрических полях. В области низких температур в электропроводности участвуют слабо закрепленные ионы (примесные ионы, вакансии и др.), а при высоких температурах – основные ионы кристаллической решетки. Зависимость удельной проводимости от температуры описывается уравнением

$$\gamma = q_C \cdot n_C \cdot \mu_C \cdot \exp\left(\frac{-W_C}{k \cdot T}\right) + q_{II} \cdot n_{II} \cdot \mu_{II} \cdot \exp\left(\frac{-W_{II}}{k \cdot T}\right), \quad (3.15)$$

где q_C и q_{II} – заряд собственного и примесного ионов; n_C и n_{II} – концентрации собственных и примесных ионов; μ_C и μ_{II} – подвижности собственных и примесных ионов; W_C и W_{II} – энергии активации собственных и примесных ионов; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

На рисунке 3.2 представлен график зависимости электрической проводимости диэлектрика от температуры в полулогарифмических координатах. В области относительно низких температур ($T < T_A$ или $1/T > 1/T_A$) преобладает примесная проводимость (пологий участок характеристики 1). В области высоких температур ($T > T_A$ или $1/T < 1/T_A$) преобладает уже собственная проводимость (крутой участок характеристики 2). По углу наклона отрезков прямых на этом рисунке можно рассчитать энергии активации собственных и примесных ионов.

Для ограниченного интервала температур можно с достаточной точностью пользоваться формулами:

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \cdot \exp[\alpha(T - T_0)] \quad \text{и} \quad \rho(T) = \rho(T_0) \cdot \exp[\alpha(T - T_0)], \quad (3.16)$$

где $\gamma(T)$ и $\gamma(T_0)$, $\rho(T)$ и $\rho(T_0)$ – удельная проводимость и удельное сопротивление при температурах T и T_0 , соответственно; α – температурный коэффициент.

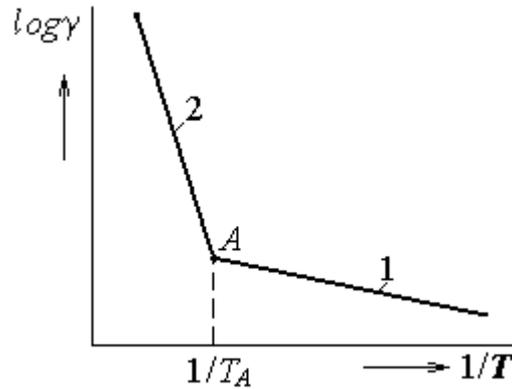


Рисунок 3.2 - Зависимость удельной электрической проводимости диэлектрика от температуры

Так как проводимость γ и удельное сопротивление ρ диэлектриков с ростом температуры изменяются по экспоненциальному закону, то температурный коэффициент удельного сопротивления рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\rho} = \frac{\ln \rho(T) - \ln \rho(T_0)}{T - T_0}. \quad (3.17)$$

Аналогично можно найти и температурный коэффициент удельной проводимости.

При изучении электропроводности диэлектриков необходимо помнить, что из-за очень большого удельного сопротивления диэлектрика ($\rho > 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) ток через объем участка изоляции – объемный сквозной ток I_V очень мал и с ним сравнивается ток по поверхности – поверхностный сквозной ток I_S . Поэтому необходимо учитывать обе составляющих тока, полагая общий ток участка изоляции равным

$$I = I_V + I_S. \quad (3.18)$$

Соответственно, проводимость диэлектрика ($\gamma = I/U$) будет тоже складываться из объемной ($\gamma_V = I_V/U$) и поверхностной ($\gamma_S = I_S/U$) проводимостей

$$\gamma = \gamma_V + \gamma_S. \quad (3.19)$$

Величины, обратные указанным проводимостям, называют сопротивлениями участка изоляции – объемным R_V и поверхностным R_S . Общее сопротивление изоляции определяют как результирующее двух параллельно включенных сопротивлений

$$R = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_V \cdot R_S}{R_V + R_S}. \quad (3.20)$$

Под удельным сопротивлением диэлектрика ρ обычно понимают удельное объемное сопротивление. Для характеристики R_S вводят понятие *удельного поверхностного сопротивления* ρ_S . Формально определение ρ_S вытекает из следующих соображений: поверхностное сопротивление участка поверхности твердого диэлектрика между параллельными друг другу кромками электродов длиной b , отстоящими друг от друга на расстоянии a , прямо пропорционально a и обратно

пропорционально b : $R_S = \rho_S \cdot a/b$, где ρ_S – коэффициент пропорциональности и есть удельное поверхностное сопротивление:

$$\rho_S = R_S \cdot b/a. \quad (3.21)$$

Таким образом, ρ_S – есть сопротивление квадрата (любой величины) на поверхности диэлектрика, ток через который идет от одной стороны к противоположной. При $a = b$ согласно (3.21) $R_S = \rho_S$.

3.5 Потери в диэлектриках

Диэлектрические потери – это активная электрическая мощность, которая рассеивается в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, и превращается в тепло. Но в инженерной практике удобнее пользоваться **удельными диэлектрическими потерями** – это диэлектрические потери, отнесенные к единице объема диэлектрика. Для оценки же качества диэлектрика чаще всего используется **тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$** – это есть отношение удельных диэлектрических потерь в диэлектрике p_A к удельной реактивной мощности p_P

$$tg\delta = p_A/p_P. \quad (3.22)$$

В диэлектриках различают потери сквозной проводимости и релаксационные потери энергии.

Потери сквозной проводимости обусловлены наличием объемной и поверхностной электропроводности и имеют место во всех диэлектриках. Очевидно, что эти потери будут преобладать в области низких частот, а тангенс угла потерь на этом участке будет определяться выражением

$$tg\delta = \frac{\gamma}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon}, \quad (3.23)$$

где γ – удельная электропроводность диэлектрика.

Релаксационные потери энергии обусловлены релаксационной поляризацией и присущи полярным диэлектрикам. Эта энергия расходуется на поворот полярных молекул или ограниченное перемещение ионов в переменном электрическом поле и существенно зависит от частоты и температуры.

Характерные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ от частоты f и температуры t для неполярных и полярных диэлектриков представлены на рисунке 3.3. Здесь же для наглядности на рисунке 3.3, в приведена зависимость удельных потерь w_A от частоты в полярном диэлектрике.

Так как упругие процессы поляризации характеризуются малыми смещениями связанных зарядов и очень малым временем установления, то для **неполярных диэлектриков** диэлектрическая проницаемость ϵ незначительна по величине и не зависит от частоты вплоть до СВЧ-диапазона (рисунок 3.3, а). Следует также отнести к достоинствам неполярных диэлектриков высокую стабильность ϵ от температуры (рисунок 3.3, б).

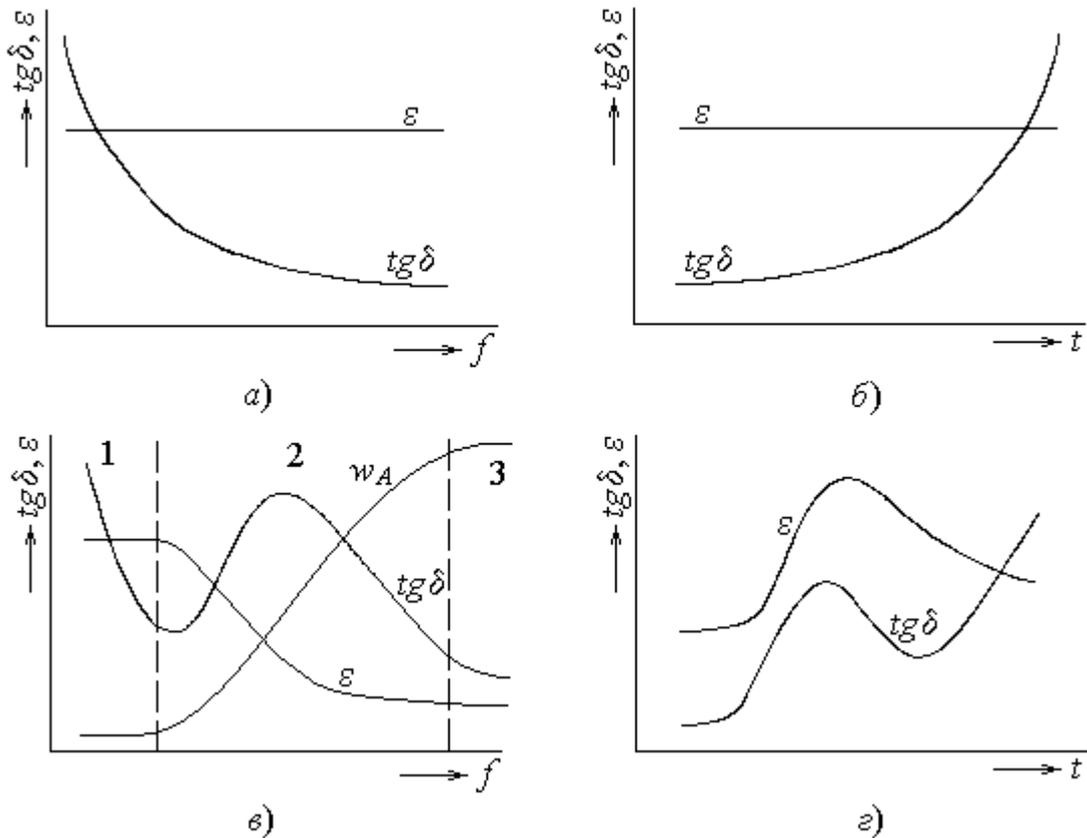


Рисунок 3.3 – Зависимости ε и $\operatorname{tg}\delta$ от частоты f и температуры t для неполярных диэлектриков (а, б) и для полярных диэлектриков (в, г)

В полярных диэлектриках неупругие процессы поляризации возникают так же под действием внешнего электрического поля, но обусловлены они появлением некоторой упорядоченности в хаотическом тепловом движении заряженных или обладающих постоянным электрическим моментом частиц, а не упругим смещением зарядов. Их установление во времени часто происходит по *релаксационному закону*. Поэтому время установления этих видов поляризации принято называть *временами релаксации*. Релаксационные процессы развиваются сравнительно медленно. В большинстве случаев время релаксации превышает 10^{-6} с.

В области низких частот полярные диэлектрики по своим свойствам близки к неполярным (область 1 на рисунке 3.3, в). Диэлектрическая проницаемость ε максимальна и практически не зависит от частоты, так как поляризация диэлектрика развивается синхронно с изменением приложенного напряжения и все диполи в каждый момент времени успевают поляризоваться в полной мере. При этом $\operatorname{tg}\delta$ с увеличением частоты уменьшается по гиперболическому закону (см. формулу (3.23)), релаксационные потери энергии в диэлектрике отсутствуют и существуют только потери сквозной проводимости.

В области средних частот (область 2 на рисунке 3.3, в) в полярном диэлектрике наблюдается некоторая инерционность в установлении поляризации, следствием чего является отставание поляризованности от напряженности поля по фазе. К потерям сквозной проводимости начинают добавляться релаксационные потери энергии. Они резко увеличиваются с ростом частоты, а $\operatorname{tg}\delta$ проходит через максимум.

В области высоких частот (область 3 на рисунке 3.3, в) в полярном диэлектрике амплитуда релаксационной поляризованности стремится к нулю, а сдвиг ее по фазе относительно напряженности электрического поля стремится к 90° . Это является следствием сильной инерционности поляризации по отношению к рассматриваемым частотам. Диэлектрические потери w_d на этом участке перестают возрастать, дойдя до максимального уровня, а тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается до минимума.

3.6 Пассивные диэлектрики

По основному *назначению* пассивные диэлектрики условно можно разделить на *электроизоляционные* и *конденсаторные*. Соответственно, к электроизоляционным материалам предъявляются наиболее жесткие требования к электрической прочности, а для конденсаторных материалов наиболее важными являются: высокая диэлектрическая проницаемость ϵ , низкие диэлектрические потери $tg\delta$ и высокая стабильность ϵ (температурная, частотная и временная). Некоторые диэлектрики применяются как для той, так и для другой цели, например: керамика, стекло, слюда, полимерные пленки и др.

По *структурным особенностям* и физическим свойствам среди пассивных диэлектриков можно выделить следующие группы материалов: *полимеры*; *эластомеры* (каучуки); *композиционные порошковые пластмассы*; *пропиточные и обволакивающие* электроизоляционные компаунды, эмали и лаки; *волокнистые материалы*; *лакоткани* и *слоистые пластики*; *монокристаллические материалы*; *стекла* и *керамику*.

3.6.1 Полимеры

Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа структурно повторяющихся звеньев – мономеров.

Полимеры разделяют на *линейные* и *пространственные*. В *линейных* полимерах макромолекулы представляют собой последовательности повторяющихся звеньев и имеют *продольно ориентированную структуру*. Это придает им эластичность, а при умеренных температурах они легко размягчаются и расплавляются. В *пространственных* полимерах макромолекулы связаны между собою дополнительными связями в общую сетку, что придает материалу большую жесткость. Расплавление их происходит при высокой температуре, причем многие из них разрушаются.

Соответственно, физические и электрические свойства линейных и пространственных полимеров существенно различаются. В зависимости от свойств в области высоких температур они делятся на две группы: *термопластичные* и *терморезистивные*.

Термопластичные материалы (*термопласты*) при низких температурах тверды, а при нагреве становятся мягкими (пластичными), легко деформируются и поддаются обработке методом горячего литья под давлением. При охлаждении

они приобретают прежние физические свойства. К термопластам относятся *линейные полимеры*, которые сохраняют линейное строение молекул и при нагреве. Типичными представителями термопластов являются: полиэтилен, полистирол, полипропилен, поливинилхлорид и др.

Линейные полимеры в большинстве своем гибкие и эластичные и при умеренном повышении температуры легко размягчаются и расплавляются. Одним из основных недостатков линейных полимеров является низкая нагревостойкость. Большинство материалов сохраняют свои свойства при температуре не выше 100 °С. При более высоких температурах они быстро стареют. Однако среди них есть и высокотемпературные, такие как фторопласт-4 и политетрафторэтилен (ПТФЭ), которые имеют нагревостойкость около 300 °С.

По электрическим свойствам их разделяют на неполярные и полярные. Неполярные диэлектрики имеют низкую диэлектрическую проницаемость, высокое удельное сопротивление и обладают низкими диэлектрическими потерями и высокой электрической прочностью. Полярные полимеры обладают большей диэлектрической проницаемостью, но имеют значительно большие диэлектрические потери и более низкую электрическую прочность.

В радиоэлектронике преимущественное применение нашли линейные полимеры. Они широко используются в качестве электроизоляционных, конденсаторных и конструкционных материалов. Из них изготавливают электроизоляционные пленки, которые используются для изготовления пленочных конденсаторов. Объемные изделия из термопластов изготавливаются преимущественно методом горячего литья. Технологичность термопластов позволяет изготавливать из них корпуса и детали сложной конфигурации, лицевые панели и др. установочные элементы электронной аппаратуры. Неполярные полимеры широко применяются в качестве изоляционного материала в СВЧ-устройствах.

Основные электрические свойства некоторых линейных полимеров приведены в таблице 3.1. У неполярных диэлектриков вторая цифра электрической прочности E относится к тонким пленкам.

Терморезистивные материалы (реактопласты) при нагреве претерпевают необратимые изменения свойств. Они запекаются, приобретая механическую прочность и твердость, но при этом теряют свойства растворимости и плавкости. Изделия из них изготавливают преимущественно методом горячего прессования при достаточно высоких температурах и давлениях. К реактопластам относятся полимеры, которые после нагрева приобретают пространственное строение молекул. Типичными представителями этих полимеров являются фенолоформальдегидные и эпоксидные смолы, эбонит, эскапон и др. Реактопласты в радиоэлектронике нашли преимущественное применение при изготовлении электроизоляционных и установочных изделий, работающих при повышенных температурах и требующих повышенную механическую прочность, например: каркасы трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности, панели различного назначения, корпуса и другие элементы несущих конструкций изделий РЭС и т.д.

Таблица 3.1 – Основные электрические свойства полимеров

Название материала	Удельное сопротивление, ρ , Ом·м	ϵ	$tg\delta$ при $f=1$ МГц	Эл. прочность, E , МВ/м	Нагревостойкость, t , °С
Неполярные диэлектрики					
Полиэтилен	$10^{14}..10^{15}$	2,3..2,4	$(2..5)\cdot 10^{-4}$	40 – 150	70..85
Полистирол	$10^{16}..10^{17}$	2,4..2,6	$(2..4)\cdot 10^{-4}$	20 – 110	70..85
Полипропилен	$10^{16}..10^{17}$	2,2..2,4	$(3..5)\cdot 10^{-4}$	30	90
Фторопласт-4	$10^{16}..10^{18}$	1,9..2,2	$(2..3)\cdot 10^{-4}$	40 – 150	250
Полярные диэлектрики					
Фенолоформальдегид	$10^{12}..10^{13}$	3,0..4,5	$(1..3)\cdot 10^{-2}$	20 – 30	120..140
Фторопласт-3	$10^{14}..10^{15}$	2,4..3	$(1..4)\cdot 10^{-2}$	23 – 25	-195..130
Лавсан	10^{16}	3..4	$(4..8)\cdot 10^{-2}$	15 – 20	125

3.6.2 Пластические массы

Пластические массы (пластмассы, пластики) – это композиционные материалы, из которых методом горячего прессования или горячего литья под давлением можно изготавливать изделия различной формы и назначения. В большинстве случаев пластмассы состоят из двух компонентов: наполнителя и связующего вещества.

В качестве связующего обычно используются органические полимеры, обладающие способностью деформироваться при нагреве и давлении.

Наполнитель может быть порошкообразным (каменная и древесная мука, мелкие опилки), волокнистым (хлопчатобумажное, асбестовое или стеклянное волокно) или листовым (слюда, бумага, ткань). Наполнитель при прессовании прочно сцепляется со связующим материалом и, как правило, увеличивает механическую прочность, уменьшает хрупкость и существенно снижает стоимость пластмассы.

В некоторые пластмассы вводят *пластификаторы* и *красители*, чтобы придать им большую гибкость и определенный цвет.

Из пластмассы на основе терморезистивных полимеров изделия сложной формы изготавливаются методом горячего прессования. Исходными материалами при этом являются пресспорошки. Процесс изготовления довольно нетехнологичный, но изделия получаются, как правило, механически прочные и теплостойкие.

Для получения изделий из термопластов используется преимущественно горячее литье под давлением. Этот процесс весьма технологичный, легко поддается автоматизации, что весьма важно при серийном и массовом производстве.

Но так как в качестве связующего материала, обычно, используются низко-температурные термопластичные полимеры, то изделия не отличаются механической прочностью и теплостойкостью. При умеренных температурах материал размягчается и теряет жесткость.

В качестве конструкционных и электроизоляционных материалов в РЭС широко используются слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, в которых наполнителем являются волокнистые или листовые материалы.

Гетинакс получают путем горячего прессования бумаги, пропитанной бакелитом. Электрическая прочность его перпендикулярно слоям составляет 20...40 МВ/м, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 5...6$. Но в гетинаксе, как и во всех слоистых материалах, проявляется анизотропия. Поэтому электрические свойства гетинакса вдоль слоев существенно хуже, чем поперек.

Текстолит – пластик, аналогичный гетинаксу, только изготовленный из пропитанной ткани. Он намного дороже гетинакса и применяется преимущественно в изделиях, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание.

Стеклотекстолит – пластик, в котором наполнителем является стеклоткань. Он обладает хорошими электроизоляционными свойствами, высокой механической прочностью, влагостойкостью и нагревостойкостью.

В радиоэлектронных изделиях широкое применение нашли фольгированные гетинакс и стеклотекстолит, которые используются для изготовления печатных плат.

3.6.3 Волокнистые материалы

Волокнистые материалы состоят либо целиком, либо в основном из частиц удлиненной формы – волокон. К ним относятся как органические вещества (дерево, хлопок, бумага, шелк, шерсть), так и неорганические природные и синтетические волокна (стекловолокно, асбест, полиамидные, полиэтиленовые, поливинилхлоридные, лавсановые и др. волокна). Преимуществами многих волокнистых материалов являются: довольно большая механическая прочность, гибкость, малая стоимость. К их недостаткам относятся: невысокая электрическая прочность, малый коэффициент теплопроводности и гигроскопичность, обусловленные в основном наличием пор, заполненных воздухом. Но эти недостатки существенно ослабляются с помощью пропитки электроизоляционными лаками и компаундами.

Бумаги – листовые и рулонные материалы коротковолокнистого строения, состоящие в основном из целлюлозы. Для изготовления электроизоляционных бумаг используется высокопрочная и нагревостойкая сульфатная или натронная целлюлоза. В электротехнике и радиотехнике используется довольно широкий ассортимент бумаг:

- *кабельные бумаги* – очень плотные, механически прочные рулонные бумаги толщиной 80, 120 и 180 мкм. Применяются для изоляции жил силовых электрических кабелей, а также в качестве электроизоляции обмоток при изготовлении трансформаторов, дросселей и др. моточных изделий;

- *телефонная* – плотная, тонкая бумага (толщиной 40 и 50 мкм) применяется для изоляции телефонных кабелей, обмоточных проводов (марок ПБ и ПББО), обмоток трансформаторов и дросселей и для других целей;
- *пропиточная* – неплотная бумага (толщиной 90, 110 и 130 мкм) применяется преимущественно для изготовления гетинакса, а также в намоточных изделиях;
- *намоточная* – более плотная и более тонкая (50 и 70 мкм) бумага, по сравнению с пропиточной, применяется в намоточных изделиях;
- *конденсаторные бумаги* – высококачественные, очень тонкие бумаги (от 4 до 40 мкм) используются преимущественно для изготовления бумажных и электролитических конденсаторов;
- *электрокартон* – более толстые, чем бумаги, (от 0,2 до 3 мм) листовые материалы из бумаги. Изготавливаются двух типов: *воздушные* – плотные и механически прочные материалы, используются в качестве электроизоляционных прокладок в электрических машинах, трансформаторах и др. изделиях; *масляные* – более рыхлые и более мягкие материалы, используются в электротехнических изделиях, заполняемых трансформаторным маслом.

Текстильные материалы получают путем сплетения нитей из волокнистых материалов. Они отличаются более высокой гибкостью и механической прочностью по сравнению с бумагами, но более дорогие и имеют меньшую электрическую прочность. Текстильные нити применяются для изоляции обмоточных и монтажных проводов и защитных покрытий кабелей. Тканые материалы используются для защиты изоляции электрических машин и аппаратов, а также для изготовления лакотканей и текстолитов.

Лакоткани – это гибкие электроизоляционные материалы, изготовленные из текстильных, шелковых или синтетических тканей путем пропитки электроизоляционными лаками. Применяются для изоляции токоведущих частей электрических машин, аппаратов, кабельных и др. изделий. В последнее время лакоткани активно вытесняются гибкими полимерными пленками.

Асбест – неорганический материал, состоящий в основном из минерала *хризотила*. Для улучшения механических свойств к асбестовому волокну добавляют небольшое количество хлопчатобумажного. Основным преимуществом асбеста является высокая нагревостойкость, разрушается лишь при температуре 450...700 °С. Удельное сопротивление асбеста – $\rho = 10^6..10^{10}$ Ом·м.

3.6.4 Неорганические стекла

Стекла – неорганические квазиаморфные твердые вещества, в которых при наличии ближнего порядка отсутствует дальний порядок в расположении частиц. По химическому составу неорганические стекла подразделяются на элементарные, халькогенидные и оксидные. Диэлектрические свойства проявляются лишь у оксидных стекол. К числу стеклообразующих относятся окислы SiO_2 , V_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 .

Благодаря высокой химической устойчивости, дешевизне и доступности исходных компонентов, наибольшее распространение получили *силикатные стекла на основе SiO_2* . Для придания определенных физических свойств, а также из технологических соображений в состав силикатных стекол вводят окислы щелочных (Na_2O , K_2O), щелочноземельных (CaO , BaO), также PbO , Al_2O_3 и др. веществ. В соответствие этим примесям силикатные стекла разделяются на: *бесщелочные, щелочные с низким содержанием тяжелых окислов* или без них и *щелочные с высоким содержанием тяжелых окислов*.

Бесщелочные стекла – чистое кварцевое стекло (плавленый кварц). Они обладают высокой нагревостойкостью, низким коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и высокими электрическими свойствами, но из них технологически трудно изготавливать изделия сложной конфигурации. Благодаря высокой прозрачности в широком диапазоне излучений (от ультрафиолетового до инфракрасного, вплоть до 4 мкм), кварцевые стекла нашли широкое применение в оптике (линзы, призмы, оптические окна) и оптоэлектронике (оптическая среда, световоды).

Щелочные стекла с низким содержанием тяжелых окислов или без них. В эту группу входят большинство натриевых и калиево-натриевых стекол (с добавлением Na_2O , K_2O). Они легко обрабатываются при нагреве, но имеют пониженные электрические свойства и нагревостойкость.

Щелочные стекла с высоким содержанием тяжелых окислов - силикатно-свинцовые, бариевые и др. Эти стекла имеют повышенные электрические свойства, близкие к бесщелочным при нормальной температуре, и обладают удовлетворительной обрабатываемостью.

Неорганические стекла нашли широкое *применение* в радиоэлектронной технике:

- в производстве электровакуумных приборов и кварцевых резонаторов используются специальные *электровакуумные стекла*;
- в производстве конденсаторов, полупроводниковых приборов и др. радиокомпонентов в качестве герметичных выводов используются *изоляторные стекла*;
- в производстве стеклянных конденсаторов в качестве диэлектрика;
- в качестве рабочих тел твердотельных лазеров используются *лазерные стекла*: диэлектрические кристаллы иттрий-алюминиевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), алюмината иттрия ($YAlO_3$), легированные неодимом Nd^{3+} , рубин ($Al_2O_3 - Cr^{3+}$) и др. материалы;
- из щелочных алюмосиликатных, бесщелочных и малощелочных алюмоборосиликатных стекол изготавливается *стекловолокно*, которое является основой для создания световодов, световых кабелей и др. компонентов оптоэлектроники.

3.6.5 Ситаллы

Ситаллы – это материалы, полученные методом стимулированной кристаллизации стекол (сокращение от слов «силикат» и «кристалл»). Они занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой. Если в со-

став расплавленного стекла добавить вещества, дающие зародыши кристаллизации, то процесс кристаллизации ускоряется и получается однородная кристаллическая структура материала.

Ситаллы отличаются повышенной механической прочностью, высокой теплопроводностью и довольно хорошими электрическими свойствами. Они обладают более высокими электроизоляционными свойствами и меньшим $tg\delta$, чем у исходных стекол, а по сравнению с керамикой аналогичного состава ситаллы имеют более высокую электрическую прочность.

Ситаллы применяют вместо стекол в технике СВЧ, ввиду более низкого $tg\delta$; вместо керамики в конденсаторах из-за более высокой электрической прочности и меньшей стоимости; в качестве подложек в микросхемах, так как имеют высокую теплопроводность и т.д.

3.6.6 Керамика

Под керамикой понимают неорганические материалы, полученные методом высокотемпературного обжига.

В современной радиоэлектронике важное место занимают изделия на основе керамических диэлектриков, которым присущи многие положительные свойства: высокая нагревостойкость, отсутствие у большинства материалов гигроскопичности, хорошие электрические свойства, стабильность характеристик, достаточно высокая механическая прочность, надежность, стойкость к воздействию излучения. К достоинствам керамики следует также отнести возможность получения заранее заданных характеристик путем соответствующего подбора компонентов и выбора технологии изготовления.

Исходные материалы керамики недефицитны и недороги, а производство керамических изделий технологично и легко поддается автоматизации. В качестве основных компонентов в производстве керамики используются природные минералы: кварц, глинозем, тальк, а также окислы и карбонаты различных металлов.

В зависимости от свойств и назначения керамические материалы подразделяют на установочные и конденсаторные.

Установочную керамику применяют как конструкционный изоляционный материал для изготовления опорных, проходных, подвесных и антенных изоляторов, для подложек интегральных микросхем, каркасов резисторов и катушек индуктивности и т.д.

Конденсаторная керамика используется как диэлектрик в производстве конденсаторов. Керамические конденсаторы, благодаря своим преимуществам, в настоящее время составляют более 50 % от общего количества выпускаемых конденсаторов.

По электрическим свойствам установочную и конденсаторную керамику разделяют на *низкочастотную* и *высокочастотную*.

Среди *низкочастотной установочной керамики* наиболее широкое применение получил *изоляционный фарфор*, основными компонентами которого являются специальные сорта глины, кварцевый песок и щелочной полевой шпат.

При обжиге глина теряет кристаллическую воду и, взаимодействуя с кварцем, образует основную кристаллическую фазу – муллит, который отличается высокой плотностью и водонепроницаемостью. Однако из-за высокого содержания щелочных окислов материал имеет высокие диэлектрические потери ($tg\delta \sim 10^{-2}$), что затрудняет применение его на более высоких частотах.

Промежуточное положение между низкочастотной и высокочастотной установочной керамиками занимает **радиофарфор**, который получают путем добавления в состав исходной шихты окиси бария. Это позволяет снизить $tg\delta$ на два порядка, не ухудшая других физических свойств по сравнению с изоляторным фарфором.

В высокочастотных установках широкое применение нашел **ультрафарфор**, относящийся к группе материалов с высоким содержанием глинозема. Высокие электрические свойства ультрафарфора достигнуты благодаря внесению в шихту специальных добавок. В частности, добавка при обжиге борной кислоты позволяет существенно улучшить электрические свойства. Ультрафарфор является высокочастотным диэлектриком, в котором сочетаются низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью.

К наиболее нагревостойким из диэлектриков относится **алюминоксид** (до 1600 °С) – **корундовая керамика** с содержанием 95-99 % глинозема. Он отличается низкими диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот и даже при повышенных температурах, а также большой механической прочностью и высокой теплопроводностью (на порядок выше, чем у изоляторного фарфора). К его недостаткам следует отнести: большую абразивность, хрупкость и высокую температуру спекания (~ 1750 °С). Аллюминоксид используется в качестве вакуумплотных изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и подложек интегральных микросхем, а также для изготовления внутривольных изоляторов с пористой структурой.

Разновидностью аллюминоксида является **поликор** - *поликристаллический корунд, обладающий особо плотной структурой*. Основная область применения в электронной технике – подложки гибридных интегральных микросхем. Применяется также для изготовления колб некоторых специальных источников света (является прозрачным).

Существенным преимуществом керамических подложек по сравнению со стеклянными и ситалловыми является их высокая теплопроводность, которая позволяет значительно повысить величину удельной рассеиваемой мощности микросхем. Наиболее высокой теплопроводностью среди керамических материалов обладает **брокерит** ($\lambda = 200 \dots 250 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) – керамика на основе окиси бериллия (95-99 % BeO). Его теплопроводность превышает на 2 порядка теплопроводность стекол и стеклокристаллических материалов и даже большинство металлов, например: $\lambda_{Al} = 218 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, а $\lambda_{Fe} = 73 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. К тому же брокерит имеет высокие электрические свойства ($\rho \sim 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $tg\delta \sim 3 \cdot 10^{-4}$ при $f = 1 \text{ МГц}$). Он нашел применение в качестве подложек микросхем, в особо мощных приборах СВЧ и в др. вакуумных устройствах.

Конденсаторные керамики отличается большим диапазоном электрических параметров. Так диэлектрическая проницаемость может быть от повышенной ($\epsilon = 10 \dots 230$) до высокой ($\epsilon > 900$), диэлектрические потери от малых ($\text{tg}\delta < 10^{-3}$ при $f = 1 \text{ МГц}$) до высоких ($\text{tg}\delta > 10^{-2}$ при $f = 1 \text{ кГц}$). Естественно, одни из них относятся к высокочастотным, другие – к низкочастотным материалам.

Основой для высокочастотных конденсаторов являются специальные «титанатовые» керамические материалы – *тиконды*: керамики на основе *рутила* – двуокиси титана (TiO_2), *перовскита* – титаната кальция (CaTiO_3) и *титаната стронция* (SrTiO_3). Но тиконды характеризуются пониженной электрической прочностью ($E = 8 \dots 12 \text{ МВ/м}$), интенсивным электрохимическим старением при длительном воздействии постоянного электрического поля и высоким отрицательным ТК ϵ . Поэтому указанные выше материалы используются лишь для изготовления таких конденсаторов, к которым не предъявляется особых требований к температурной стабильности емкости.

Для повышения температурной стабильности в состав исходных материалов вводятся кристаллообразующие компоненты с положительным ТК ϵ . Однако, при этом снижается диэлектрическая проницаемость исходного материала. Такие тиконды получили название *термокомпенсированных*. К этой группе материалов относятся *титано-циркониевая*, *лантановая* и *станнатная* керамики, в которых кристаллической фазой служат твердые растворы станната кальция (CaSnO_3), титаната кальция (CaTiO_3) и цирконата кальция (CaZrO_3), соответственно. Изменяя состав твердых растворов, можно получить материалы с очень высокой стабильностью диэлектрической проницаемости. Керамика на основе указанных твердых растворов используется для изготовления высокочастотных термостабильных конденсаторов. Преимуществом станнатной керамики перед титанатовой является более высокая устойчивость к длительному воздействию постоянного напряжения.

Низкочастотные конденсаторы изготавливаются из *сегнетокерамики*, основу которой составляют *титанат бария* (BaTiO_3) и *твердые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами*. Сегнетокерамика обладает очень высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 900 \dots 8000$), но ее величина в сильной степени зависит от температуры, частоты и напряженности электрического поля.

3.6.7 Слюда и материалы на ее основе

Слюда – *природный диэлектрик*, обладает высокими электроизоляционными свойствами, высокой нагревостойкостью, механической прочностью и гибкостью. Она относится к кристаллическим материалам с явно выраженной *анизотропией*. Характерной особенностью слюды является *способность расщепляться* на тонкие пластинки по плоскостям спайности. По химическому составу слюда относится к *водным алюмосиликатам*.

К важнейшим видам слюды относятся *мусковит* и *флогопит*. *Мусковит*, по сравнению с флогопитом, обладает лучшими электроизоляционными и механическими свойствами, но многие сорта флогопита более нагревостойкие ($800 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$).

Синтетическая слюда в отличие от природной не содержит химически связанной воды и загрязняющих примесей. Поэтому она значительно превосходит природную слюду по электрическим свойствам и по нагревостойкости, но она более хрупкая (менее гибкая) и более дорогая. Наиболее распространенной синтетической слюдой является **фторфлогонит**.

Вследствие ярко выраженной *кристаллографической анизотропии* электрические свойства слюды очень сильно зависят от направления электрического поля. Наилучшие свойства проявляются в перпендикулярном направлении к плоскостям спайности. Для мусковита они приведены в таблице 3.2. Вдоль плоскости спайности ρ ниже, а $tg\delta$ выше более, чем на порядок.

Слюда нашла широкое применение, прежде всего, в радиоэлектронике. Всем известны слюдяные конденсаторы, в которых используется *конденсаторная слюда* – шаблоны из высококачественных сортов мусковита. В передающих телевизионных трубках в качестве основы фотокатодов и мишеней используются пластинки из *телевизионной слюды*. Слюдяные пластинки сложной конфигурации служат для крепления и электрической изоляции внутренней арматуры в электронных лампах и в других электронных приборах.

Мелкие фрагменты пластинок, не пригодные для применения в конденсаторах и других изделиях используются для изготовления термостойких электроизоляционных материалов: *миканита, микаленты, слюдовой бумаги, слюдопласта* и др.

Миканит представляет собой слоистый материал из пластинок слюды, склеенных лаком или эпоксидной смолой. **Микалента** – рулонный изоляционный материал, состоящий из тканевой или другой гибкой основы, на которую наклеены пластинки слюды. **Слюдяная бумага** изготавливается на бумагоделательных машинах на основе мелких частичек слюды. В зависимости от технологии изготовления получают либо *слюдинитовую*, либо *слюдопластовую бумагу*, на основе которых изготавливают **слюдинит** или **слюдопласт**. Это – композиционные материалы, в которых в качестве наполнителя используется *слюдинитовая* или *слюдопластовая бумага*, а в качестве связующего материала – *полиэфирноэпоксидный* или *кремнийорганический лак*.

Таблица 3.2 – Основные электрические свойства некоторых диэлектриков

Название материала	Удельное сопротивление, ρ , Ом·м	ϵ	$tg\delta$ при $f=1$ МГц	Эл. прочность, E , МВ/м	Нагревостойкость, t , °С
Бумага конденсаторная	$10^{11}..10^{12}$	5..7	$(4..8)\cdot 10^{-2}$	12 – 15	85..100
Слюда (мусковит)	$10^{12}..10^{14}$	6..8	$(1,5..3)\cdot 10^{-4}$	25 – 30	500..600
Керамика конденсаторная	–	> 12	$\geq 6\cdot 10^{-4}$	30 – 50	85..300
Стекло	$10^{15}..10^{16}$	~ 8	$\geq 20\cdot 10^{-4}$	25	125
Ситаллы	$10^{10}..10^{12}$	5..7	$(0,1..8)\cdot 10^{-4}$	20..80	>500

Для сравнительной оценки свойств в таблице 3.2 приведены электрофизические характеристики некоторых диэлектриков, получивших широкое применение в радиоэлектронике.

3.6.8 Неорганические диэлектрические пленки

В радиоэлектронике нашли применение тонкие *нагревостойкие диэлектрические пленки*, которые наносятся на поверхность металла, полупроводника или иные подложки. Эти пленки могут быть нанесены на поверхность различными способами: испарением в вакууме, химическим, электрохимическим и др. Среди них наиболее широкое распространение получило *оксидирование* – *электрохимический способ выращивания оксидных пленок на поверхности металлов*. В частности, он используется при изготовлении электролитических, оксидно-полупроводниковых и оксидно-металлических конденсаторов. Тонкая оксидная пленка (толщиной до нескольких микрометров) формируется на поверхности фольги из алюминия, тантала или ниобия, которая выполняет роль анода. Вторая обкладка (катод) контактирует с оксидной пленкой через электролит (в электролитических конденсаторах) или через полупроводниковую прослойку (в оксидно-полупроводниковых конденсаторах). В оксидно-металлических конденсаторах металлический катод напыляется непосредственно на оксидную пленку. Благодаря малой толщине и достаточно большой диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{Al} = 12$, $\epsilon_{Ta} = 27$, $\epsilon_{Nb} = 45$) оксидных пленок достигается очень большая удельная емкость этих конденсаторов. Одним из основных недостатков оксидных пленок являются вентильные свойства – односторонняя проводимость, как у полупроводников.

В микроэлектронике широкое распространение получили оксидные диэлектрические пленки SiO , SiO_2 , Ta_2O_5 и др. оксидов, которые наносятся на подложку методами вакуумной технологии. В частности, таким образом формируются приборы с зарядовой связью (ПЗС-устройства), МДП- и МНОП-структуры, широко используемые в интегральных микросхемах и функциональных устройствах электроники.

3.7 Активные диэлектрики

У некоторых диэлектриков поляризация может происходить не только под воздействием внешнего электрического поля, но и при изменении температуры – *пироэлектрики*, межатомных сил – *сегнетоэлектрики*, электромагнитного излучения – *фотоэлектрики*, механических напряжений – *пьезоэлектрики* и т.д. Такие диэлектрики принято называть активными.

3.7.1 Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектрики – кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном диапазоне низких температур (до точки Кюри T_K) *спонтанной* (самопроизвольной) *поляризацией*. То есть эти диэлектрики самопроизвольно поляризованы при отсутствии внешнего электрического поля. Свое название «Сегнетоэлек-

трики» получили от *сегнетовой соли*, в которой впервые были обнаружены эти необычные свойства. Но для практических целей сегнетова соль из-за низких физических свойств (низкая механическая прочность и высокая гигроскопичность) оказалась непригодна.

Широкое применение сегнетоэлектрики получили лишь с открытием спонтанной поляризации у *титаната бария* (BaTiO_3) и других *солей титановой кислоты*, которые обладают высокой механической прочностью и стойкостью не только к влаге, но к другим агрессивным средам. Впоследствии было обнаружено наличие спонтанной поляризации и в ряде других соединений типа ABO_3 , где A – элементы группы: Ba , Ca , Pb , Cd , Bi ; B – элементы группы: Ti , Zr , Hf , Ta , Nb . Наибольшее практическое применение в радиоэлектронике получили высокотемпературные сегнетоэлектрики: *титанат бария* ($T_K = 133^\circ\text{C}$), *титанат висмута* ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$), имеющий $T_K = 675^\circ\text{C}$ и *ниобат лития* (LiNbO_3), у которого $T_K = 1210^\circ\text{C}$. Для сравнения – у сегнетовой соли $T_K = -18$ и $+24^\circ\text{C}$.

Исследования показали, что для сегнетоэлектриков при температурах $T < T_K$ энергетически выгодным является состояние с сонаправленной упорядоченной ориентацией собственных электрических моментов элементарных ячеек, то есть сегнетоэлектрик в любой локальной области должен быть поляризован самопроизвольно. Но с другой стороны сегнетоэлектрик, имеющий макроразмеры, оказывается электрически нейтральным. Объясняется это тем, что все тело сегнетоэлектрика разделено на довольно протяженные области (до десятков $\mu\text{м}$), называемые *доменами*. Домены же принимают такую ориентацию поляризованности, при которой внутренняя энергия тела должна быть минимальна.

По электрическим свойствам сегнетоэлектрики подобны ферромагнетикам, из-за чего за рубежом их называют *ферроэлектриками*. Зависимость поляризованности P от напряженности электрического поля E в сегнетоэлектриках нелинейная и при циклическом изменении E имеет место петля гистерезиса (рисунок 3.4). Как и ферромагнетики, сегнетоэлектрики характеризуются остаточной поляризованностью P_S и коэрцитивной силой E_C , а площадь петли гистерезиса адекватна активным удельным потерям в сегнетоэлектрике. Это обусловлено замедленной реакцией доменов на действие электрического поля, в связи с чем для сегнетоэлектриков характерны большие потери в переменных полях.

Электрические свойства сегнетоэлектриков, как и линейных диэлектриков оцениваются диэлектрической проницаемостью ϵ . Только в данном случае ϵ зависит нелинейно от уровня напряженности электрического поля и от температуры. Особенно сильно нелинейные свойства сегнетоэлектриков проявляется в области *фазового перехода* (в области точки Кюри), при переходе из кристаллического состояния со спонтанной поляризацией (полярная фаза) в состояние, в которой спонтанная поляризация отсутствует (неполярная фаза). Различают *фазовый переход первого рода*, когда свойства сегнетоэлектрика изменяются скачком, и *второго рода* – свойства изменяются плавно. На рисунке 3.5 приведены зависимости диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля и температуры для титаната бария и для специальной конденсаторной сегнетокерамики типа ВК. У титаната бария наблюдается фазовый переход первого рода, а у ВК –

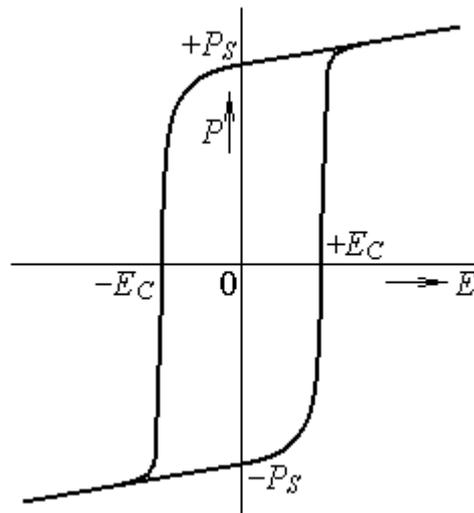


Рисунок 3.4 – Петля диэлектрического гистерезиса для идеального сегнетоэлектрика

второго рода. Резкий рост ϵ с приближением к точке Кюри связан с увеличением «податливости» кристаллов по отношению к изменению поляризации, то есть к тем смещениям ионов, которые приводят к изменению структуры при фазовом переходе. Для всех сегнетоэлектриков характерны большие значения ϵ , особенно в области фазового перехода.

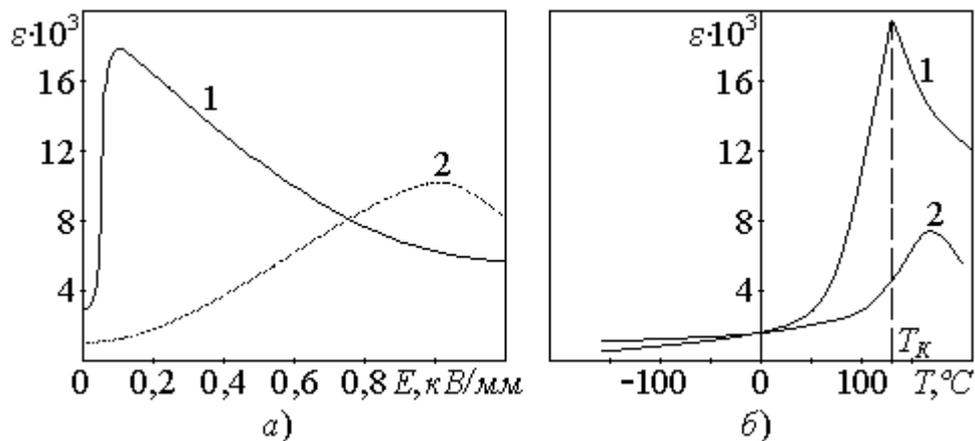


Рисунок 3.5 – Зависимости ϵ от напряженности E и температуры T для титаната бария (1) и сегнетокерамики типа ВК (2)

Все сегнетоэлектрики в полярной фазе являются **пьезоэлектриками**. При этом *пьезоэлектрические постоянные* у них по сравнению с другими пьезоэлектриками могут иметь большие значения, что связано с большими величинами ϵ . Большие значения имеют также *пиролитические постоянные* сегнетоэлектриков из-за сильной зависимости максимальной спонтанной поляризации от температуры.

Сегнетоэлектрические материалы (монокристаллы, керамика, пленки) нашли применение в различных областях техники, но особенно широко они используются в радиоэлектронике.

Благодаря высоким значениям ϵ они используются в качестве диэлектрика в производстве низкочастотных сегнетокерамических конденсаторов, обладающих высокой удельной емкостью.

Существенная зависимость ϵ сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля используется в варикондах – нелинейных конденсаторах, управляемых электрически путем изменения напряжения на выводах. Вариконды нашли применение в диэлектрических усилителях, в системах автоматики, контроля и управления.

Резкое изменение электрического сопротивления вблизи температуры фазового перехода (при $T < T_K$) в некоторых сегнетоэлектриках используется в позисторах – нелинейных резисторах с положительным ТКС, обладающих очень высокой чувствительностью и используемых в качестве датчиков в измерителях температуры.

Большие значения пьезоэлектрических констант обуславливают применение сегнетоэлектриков в качестве пьезоэлектрических материалов: в преобразователях звуковых сигналов в электрические и наоборот; в приемниках и излучателях ультразвука; при изготовлении пьезокерамических и пьезомеханических полосовых фильтров; в датчиках давления и др. функциональных устройствах.

Зависимость показателя преломления от напряженности электрического поля позволяет использовать сегнетоэлектрики в качестве электрооптических материалов в приборах и устройствах управления световыми пучками, включая визуализацию инфракрасного изображения.

3.7.2 Пьезоэлектрики

Пьезоэлектриками называются активные диэлектрики, обладающие четко выраженными пьезоэлектрическими свойствами. В пьезоэлектриках различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект (пьезоэффект).

Явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений называется **прямым пьезоэлектрическим эффектом**. Под воздействием внешних механических сил на поверхности пьезоэлектрика возникают связанные электрические заряды, которые создают электрическое поле как внутри пьезоэлектрика, так и в окружающем пространстве. Возникающая поляризованность P прямо пропорциональна приложенному механическому напряжению σ

$$P = d \cdot \sigma, \quad (3.24)$$

где d – коэффициент пропорциональности, называемый **пьезоэлектрическим коэффициентом** – **пьезомодулем**.

Механическая деформация диэлектрика под действием внешнего электрического поля, линейно зависящая от его величины, называется обратным пьезоэлектрическим эффектом. То есть, относительная деформация образца δ_{II} линейно зависит от напряженности поля. При этом коэффициентом пропорциональности является тот же пьезомодуль d

$$\delta_{II} = d \cdot E. \quad (3.25)$$

Это явление не нужно путать с *электрострикцией*, которая присуща всем диэлектрикам. При электрострикции относительная деформация пропорциональна квадрату напряженности и не зависит от направления поля

$$\delta_C = s \cdot E^2, \quad (3.26)$$

где s – коэффициент электрострикции.

Так как для пьезоэлектриков $\delta_{II} \gg \delta_C$, то при анализе пьезоэффектов электрострикция не учитывается.

Из сравнения выражений (3.24) и (3.25) очевидно, что прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты являются обратимыми – у них один и тот же коэффициент пропорциональности – пьезомодуль d .

Свойства пьезоэлектриков, как и всех диэлектриков, оцениваются диэлектрической проницаемостью ϵ , диэлектрическими потерями $tg\delta$, стабильностью, электрической прочностью, нагревостойкостью и др. параметрами. Кроме того, они характеризуются рядом *специфических параметров*, к которым относятся:

- *Пьезомодуль d .*
- *Коэффициент электромеханической связи k*

$$k = d \sqrt{4\pi \cdot E_M / \epsilon}, \quad (3.27)$$

где E_M – модуль упругости материала.

По определению *квадрат коэффициента электромеханической связи k^2 равен отношению электрической энергии $W_{\mathcal{E}}$, генерируемой пьезоэлементом, ко всей энергии W , затрачиваемой на деформацию пьезоэлемента*

$$k^2 = W_{\mathcal{E}} / W = W_{\mathcal{E}} / (W_M + W_{\mathcal{E}}) = d^2 (4\pi E_M / \epsilon), \quad (3.28)$$

где W_M – энергия, затраченная на механическую деформацию пьезоэлемента.

- *Механическая добротность Q_M .*
- *Отношение $k/tg\delta$, определяющее КПД пьезоэлектрического преобразователя.*
- *Отношение механической мощности пьезоэлемента W_M на резонансной частоте к квадрату напряженности электрического поля в нем E^2 , которое определяется величиной $(d \cdot E)^2$ и др.*

По структуре кристаллической решетки пьезоэлектрики разделяют на *монокристаллические* и *поликристаллические*. К *монокристаллическим* относятся природные минералы или искусственно выращенные кристаллы: *кварц, дигидрофосфаты калия и аммония, сегнетова соль, ниобат лития* и др.

К *поликристаллическим* пьезоэлектрикам относится *пьезокерамика*, которую получают из сегнетоэлектрических твердых растворов. Обычная сегнетокерамика как изотропная среда не обладает пьезоэффектом. Для придания пьезоэлектрических свойств ее *подвергают поляризации*: выдерживают в сильном постоянном электрическом поле ($E = 2 \dots 4$ кВ/м) при температуре $100 \dots 150$ °С в течение длительного времени (обычно около 1 ч), затем медленно охлаждают в том же поле. После такой обработки векторы спонтанной поляризованности доменов оказываются ориентированными в направлении, ближайшем к направлению электрического поля, и закрепленными в этом направлении свободными зарядами противоположных знаков. После снятия внешнего поля в керамике сохра-

няется устойчивая остаточная поляризация. Керамика из изотропного тела превращается в анизотропное, текстура которого ориентирована в направлении остаточной поляризованности, что приводит к появлению *пьезоэффекта* и *пироэффекта*.

Согласно ГОСТ 1327-72 *пьезокерамические материалы подразделяются на четыре класса*:

- К **классу I** относятся материалы, предназначенные для высокочувствительных пьезоэлементов, работающих в режиме *слабых полей*. К этому классу относятся *сегнетомягкие материалы*. Для них определяющим параметром является пьезомодуль d .

- Материалы **II класса** предназначены для использования в условиях воздействия *сильных электрических и механических напряжений*, например, в мощных источниках ультразвука, в системах зажигания и т.д. К ним относятся *сегнетотвердые материалы*.

- Материалы **III класса** применяют в пьезоэлементах *с повышенной стабильностью частотных характеристик*, например в фильтрах, в частотоподающих генераторах. К ним предъявляются требования высокой стабильности модуля упругости E_M , определяющего резонансную частоту, и высокой механической добротности Q_M .

- К **IV классу** относят материалы, применяемые *в особых условиях*, например, в условиях высоких температур, в узком диапазоне температур и т.д.

Марка пьезокерамики обозначается начальными буквами основных компонентов и порядковым номером разработки: Т – титан, Ц – цирконий, Н – ниобий, С – свинец или стронций, Б – барий, К – кальций, Л – лантан и т.д.

Из пьезокерамических материалов широкое применение в радиоэлектронике получили: *титанат бария* (ТБ-1), *титанат бария кальция* (ТБК-3), большая группа *цирконата-титаната свинца* (ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-300, ЦТБС-3, и др.), *ниобат бария-свинца* (НБС-1, НБС-3) и др. В таблице 3.3 приведены основные характеристики некоторых пьезокерамических материалов.

Таблица 3.3 – Основные характеристики пьезокерамических материалов

Марка материала	Класс	$T_K, ^\circ\text{C}$	ε	$tg\delta$	k_P	Q_M
ТБ-1	I	120	1400	$1 \cdot 10^{-2}$	0,2..0,36	100..300
ТБК-3	II	105	1200	$2 \cdot 10^{-2}$	0,25	≥ 300
ТБКС	III	160	450	$0,2 \cdot 10^{-2}$	0,25	≥ 350
ЦТС-19	I	290	1400	$3 \cdot 10^{-2}$	0,47	70
ЦТС-21	IV	410	550	$2 \cdot 10^{-2}$	0,20	100
ЦТС-22	III	330	800	$2 \cdot 10^{-2}$	0,20	≥ 400
ЦТС-23	II	280	1050	$0,7 \cdot 10^{-2}$	0,43	≥ 200
НБС-1	II	265	1600	$\leq 2 \cdot 10^{-2}$	0,28	150
НБС-3	III	270	1800	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,45	≥ 300

В таблице 3.3 k_p – *плоскостной коэффициент электромеханической связи*, характеризующий радиальные колебания тонкого диска (аналог коэффициенту k).

Наиболее широкое **применение** пьезоэлектрики нашли в радиоэлектронных средствах: в различных генераторах гармонических колебаний, в том числе в генераторах высоких напряжений; в пьезоэлектрических резонаторах; в пьезоэлектрических, пьезокерамических и пьезомеханических фильтрах; в излучателях и приемниках ультразвуковых колебаний; в пьезотрансформаторах, в акустоэлектронных радиокомпонентах и др. устройствах.

3.7.3 Электреты

Электретом называют твердый диэлектрик, длительно создающий в окружающем пространстве электрстатическое поле за счет предварительной электризации или поляризации.

Для создания электретов используются преимущественно материалы, молекулы которых обладают постоянными дипольными моментами, а также материалы, поляризация в которых может быть обусловлена ориентацией «квазидиполей» в кристаллах, миграцией носителей заряда к электродам или инъекцией носителей заряда из электродов в диэлектрик. Классификация электретов производится, прежде всего, по способу формирования зарядов.

- **Термоэлектреты** получают при воздействии на нагретый диэлектрик сильного постоянного электрического поля с последующим охлаждением в этом поле. Нагрев обычно производят до температуры плавления или размягчения для восков и смол или до температуры стеклования для полимеров, когда резко облегчается ориентация полярных молекул под действием поля и одновременно растет электропроводность материала. Все это способствует ускорению процесса электризации и накопления объемных зарядов (ток абсорбции). После охлаждения подвижность полярных молекул или свободных зарядов резко уменьшается и диэлектрик может длительное время сохранять сформированную остаточную поляризацию и заряды.

- **Фотоэлектреты** получают воздействием облучения диэлектрика световым потоком в сильном постоянном электрическом поле. Под действием света в диэлектрике возникает электропроводимость. Освобожденные светом носители зарядов смещаются под действием поля и некоторые из них «застревают» в ловушках. После выключения света носители разноименных зарядов оказываются «замороженными» у противоположных сторон диэлектрика и диэлектрик становится электретом.

- **Радиоэлектреты** получают воздействием на диэлектрик радиоактивного излучения. При облучении диэлектрика ускоренные заряженные частицы либо выбивают электроны из поверхностного слоя, либо, наоборот, внедряются в поверхностный слой диэлектрика, в результате чего диэлектрик оказывается поляризованным.

- **Электроэлектреты** получают путем воздействия на диэлектрик только сильного электрического поля без подогрева или облучения. Но физический процесс электризации диэлектрика остается прежним, как и у радиоэлектретов –

только диэлектрик бомбардируется ионами газового разряда, создаваемого между электродом и диэлектриком в сильном электрическом поле.

- **Трибоэлектреты** получают контактной электризацией – трением двух диэлектриков, в результате чего часть электронов одного из материалов, обладающего меньшей работой выхода, переходит в другой. Таким образом оба тела оказываются заряженными противоположными зарядами.

Подобным образом получают **механоэлектреты**, **магнитоэлектреты**, **криоэлектреты** и др.

Основным параметром электретов является **плотность поверхностного заряда σ** , которая составляет порядка $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$. С течением времени заряд электрета уменьшается. **Стабильность** электретного состояния характеризуется **временем жизни электрета** – время, в течение которого значение заряда уменьшается в e (2,72) раз. Время жизни электретов может быть от нескольких часов до сотен лет.

Электреты находят широкое применение в различных устройствах радиоэлектроники, автоматики, измерительной и вычислительной техники и т.д. Они применяются: как источники постоянного электрического поля (электретные микрофоны и телефоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов и т.п.); для создания электрического поля в электрометрах и электростатических вольтметрах; в качестве чувствительных элементов в устройствах дозиметрии (радиоэлектреты); в устройствах электрической памяти (пленки из фотоэлектретов); в качестве пьезодатчиков и т.д.

Фотоэлектреты применяются для световой записи информации на диэлектрическую пленку (подобно записи на магнитную пленку). Световое изображение проектируется на диэлектрик, помещенный в постоянное электрическое поле. При этом освещенные места электризуются, а затемненные остаются нейтральными. Напылением заряженного порошка скрытое электростатическое изображение можно сделать видимым. Этот принцип используется в ксерокопировании и электрофотографии.

В качестве электретных материалов могут быть использованы любые твердые диэлектрики как органические, так и неорганические, при соответствующем методе электретирования. Однако долгоживущие электреты получаются лишь из некоторых полимерных диэлектриков с высоким удельным сопротивлением, таких как политетрафторэтилен, полиэтилентерефталат, поликарбонат и др. Поверхностная плотность стабилизированного заряда для них может достигать порядка $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$.

В таблице 3.4 приведены основные физические свойства некоторых электретных материалов. В условиях повышенной влажности наиболее стабильны электреты из политетрафторэтилена, а при низких температурах – из поликарбоната.

Таблица 3.4 – Основные свойства электретных материалов

Материал	ϵ	ρ , Ом·м	σ , Кл/м ²
Полиметилметакрилат	4	10^{12}	$3 \dots 8 \cdot 10^{-5}$
Полиэтилентерефталат	3	10^{14}	$3 \cdot 10^{-5}$
Поликарбонат	3	10^{14}	$5 \cdot 10^{-5}$
Политетрафторэтилен	2	10^{16}	$8 \cdot 10^{-5}$
Керамика MgTiO ₃	15	10^{11}	$6 \cdot 10^{-5}$
Керамика CaTiO ₃	150	10^{11}	$0,8 \dots 2,5 \cdot 10^{-4}$

Здесь σ – плотность поверхностного заряда.

Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под диэлектриками? Чем они отличаются от проводниковых материалов?
- 2 Какие материалы относятся к пассивным, а какие к активным диэлектрикам? Какие свойства у них должны преобладать?
- 3 Что такое поляризация диэлектрика? Какие диэлектрики относятся к неполярным и к полярным диэлектрикам?
- 4 Что понимается под диэлектрической восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью?
- 5 Какие типы поляризаций вы знаете? В чем их физическая сущность и характерные особенности?
- 6 Чем обусловлены релаксационные потери в диэлектриках? Характерные зависимости ϵ и $tg\delta$ от частоты f для неполярных и полярных диэлектриков?
- 7 Чем обусловлены потери проводимости в диэлектриках и как они зависят от частоты? Каким диэлектрикам они присущи?
- 8 Какие диэлектрики относятся к пассивным? Где они применяются и какие требования к ним предъявляются?
- 9 Какие материалы относятся к полимерным диэлектрикам? На какие группы делятся полимеры, какими свойствами они обладают и где применяются?
- 10 Что собою представляют пластмассы? Основные свойства и области применения пластических диэлектриков в радиотехнике?
- 11 Какие электроизоляционные бумаги нашли применение в электротехнике? Основные свойства и области применения их в радиотехнике?
- 12 Неорганические волокнистые материалы. Марки, основные свойства и области применения их в радиотехнике?
- 13 Что собою представляют неорганические стекла? Основные свойства и области применения стекол в радиотехнике?
- 14 Основные свойства и области применения в радиотехнике ситаллов? В чем их преимущество перед элементарными неорганическими стеклами?

15 Что понимается под керамикой? Классификация керамических материалов, их основные свойства и области применения в радиотехнике?

16 Высокочастотная установочная керамика: ультрафарфор, корунд, поликор, брокерит. Основные свойства и области применения их в радиотехнике?

17 Основные свойства и области применения слюды и диэлектрических материалов на ее основе? В чем отличие природной и синтетической слюды?

18 Основные свойства и области применения оксидных диэлектрических пленок?

19 Какие материалы называются сегнетоэлектриками? Каковы особенности молекулярной структуры сегнетоэлектриков? Что такое точка Кюри?

20 Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков? Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля?

21 Стабильность сегнетоэлектриков? Как зависит диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков от температуры? Что понимается под фазовым переходом первого и второго рода?

22 Чем обусловлены активные потери в сегнетоэлектриках, находящихся в переменных электрических полях? Каков уровень потерь в сегнетоэлектриках по сравнению с пассивными диэлектриками?

23 Основные свойства и области применения сегнетоэлектриков в радиоэлектронных устройствах?

24 Какие материалы относятся к пьезоэлектрикам? Что такое прямой и обратный пьезоэффект?

25 Основные свойства пьезоэлектриков? Какими параметрами они характеризуются?

26 Физическая сущность коэффициента электромеханической связи пьезоэлектрика? Как он зависит от физических свойств пьезоэлектрика?

27 Основные свойства и области применения монокристаллических пьезоэлектриков в радиоэлектронных устройствах?

28 Основные свойства и области применения поликристаллических пьезоэлектриков в радиоэлектронных устройствах?

29 Какие материалы относятся к электретам? Как они создаются и какими свойствами должны обладать?

30 Какими параметрами характеризуются свойства электретов? Области применения электретов в радиоэлектронике?

4 МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1 Классификация магнитных материалов

В природе все вещества являются *магнетиками*, то есть они обладают определенными свойствами и взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства веществ, в общем, зависят от магнитных свойств элементарных частиц, структуры атомов и молекул и их групп. Но определяются они главным образом *магнитными свойствами электронов – орбитальным и спиновым магнитными моментами*.

По магнитным свойствам все вещества делятся на шесть групп: *диамагнетики, парамагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики, ферромагнетики и сверхпроводники*. В таблице 4.1 приведены основные свойства этих групп веществ.

4.1 – Классификация твердых тел по магнитным свойствам

Тип магнетика	Магнитные свойства	Магнитная восприимчивость	Примеры веществ
Диамагнетики	Магнитные моменты электронов в атомах скомпенсированы, существуют только магнитные моменты, наведенные внешним полем.	$\chi_m \sim -10^{-7} \dots -10^{-8}$ $\mu < 1$ ($\mu \approx 1$)	Zn, Bi, Cu, Au, Ag, Ge, Be, Ga
Парамагнетики	Атомы обладают собственными магнитными моментами, расположенными хаотично в пространстве.	$\chi_m \sim +10^{-6} \dots +10^{-4}$ $\mu > 1$ ($\mu \approx 1$)	Nb, Mg, Al, W, Na, Ca, Rb
Антиферромагнетики (скомпенсированные)	Магнитные моменты атомов упорядочены с чередованием направлений и скомпенсированы; собственная намагниченность равна нулю. Упорядочение исчезает при $T > T_H$ (Нееля).	$\chi_m \sim 10^{-2} \dots 10^{-5}$ $\mu > 1$ ($\mu \approx 1$)	Mn, MnO, MnO ₂ , FeO, NiF ₂ , CoO, MnS
Ферримагнетики (не скомпенсированные антиферромагнетики)	Магнитные моменты атомов упорядочены с чередованием направлений, но не скомпенсированы в пределах каждой ячейки кристалла; спонтанный магнитный момент не равен нулю. Упорядочение исчезает при $T > T_{KH}$ (Кюри-Нееля).	$\chi_m \sim 10 \dots 10^4$ ($\mu \sim 10^1 \dots 10^4$)	Феррошпинели, феррогранаты, ортоферриты, гексаферриты
Ферромагнетики	Магнитные моменты атомов упорядочены и сонаправлены, спонтанный магнитный момент отличен от нуля. Упорядочение исчезает при $T > T_K$ (Кюри).	$\chi_m \sim 10^2 \dots 10^6$ ($\mu \sim 10^2 \dots 10^6$)	Fe, Ni, Co, редкоземельные элементы и их сплавы
Сверхпроводники	Индукцированные сверхпроводящие токи собственным полем полностью компенсируют внешнее поле. Свойство исчезает при $T > T_{CB}$ – температуры перехода в сверхпроводимость.	$\chi_m = -1$ (при $T < T_{CB}$) ($\mu \rightarrow 0$)	Sn ($T_{CB} < 3,69K$) Al ($T_{CB} < 1,14K$) Zn ($T_{CB} < 0,97K$) Nb ($T_{CB} < 9,22K$)

Поясним кратко физическую сущность параметров *магнитная восприимчивость* и *магнитная проницаемость*, использованных в таблице 4.1 для оценки магнитных свойств веществ.

Магнитная восприимчивость χ_m , максимальные значения которой приведены в таблице, есть *физическая величина, характеризующая связь между магнитным моментом (намагниченностью) вещества J и напряженностью магнитного поля в этом веществе H* ,

$$\chi_m = J/H. \quad (4.1)$$

В инженерной практике в качестве параметра, характеризующего магнитные свойства материала, обычно используется *магнитная проницаемость* μ , которая связана с магнитной восприимчивостью выражением

$$\mu = 1 + \chi = B/\mu_0 H, \quad (4.2)$$

где B – магнитная индукция; μ_0 – магнитная постоянная.

Диа-, пара- и антиферромагнетики относятся к *слабомагнитным* веществам и практического применения в качестве магнитных материалов не получили. *К магнитным же материалам принято относить материалы, применяемые в технике с учетом их магнитных свойств.* К ним относятся *сильномагнитные* вещества – **сверхпроводники, ферри- и ферромагнетики**. В **сверхпроводниках** внешнее поле полностью компенсируется внутренним, собственным полем, то есть внутри сверхпроводниковых материалов магнитное поле отсутствует. В силу многих причин они пока не получили широкого применения. Наибольший интерес с точки зрения технического применения представляют ферри- и ферромагнетики, среди которых принято выделять две основные группы – *магнитомягкие* и *магнитотвердые* материалы. В третью группу включены *материалы специального назначения*.

Магнитомягкие материалы предназначены в основном для пропускания через себя переменных магнитных потоков. *Главное требование для них – низкая коэрцитивная сила H_C* (см. рисунок 4.1), то есть способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях, для обеспечения высокой проницаемости и низких потерь на гистерезис. Помимо этого чаще всего требуются высокие индукции насыщения B_S для обеспечения больших магнитных потоков и повышенное удельное сопротивление для снижения потерь на вихревые токи.

Магнитотвердые материалы, напротив, характеризуются *высокими значениями коэрцитивной силы H_C* . Эти материалы предназначены для длительного сохранения своего намагниченного состояния. Из них изготавливают постоянные магниты и рабочие слои носителей информации – магнитных лент, дисков и др. Вопрос о магнитных потерях энергии для этих материалов не имеет значения, поскольку они не работают в условиях постоянного перемагничивания и чаще всего намагничиваются единожды. Высокая коэрцитивная сила необходима для обеспечения больших значений энергии поля в рабочих зазорах или окружающем пространстве и для обеспечения стабильности сохранения намагниченного состояния.

В качестве критерия, разделяющего магнитомягкие и магнитотвердые материалы, выбрано разграничивающее значение коэрцитивной силы $H_C = 4 \text{ кА/м}$. Это разделение материалов весьма условное, в чем можно убедиться при сравнении порядков значений коэрцитивных сил этих материалов. Так для промышленных *магнитомягких материалов* наименьшая H_C составляет порядка $0,4 \dots 0,6 \text{ А/м}$, а для *магнитотвердых* наибольшая $H_C \sim 800 \text{ кА/м}$. То есть ширина петли гистерезиса (при сравнимой индукции насыщения) у этих материалов отличается более чем на 6 порядков!

Поскольку пологость кривой намагничивания и, соответственно, ширина петли гистерезиса, характеризуемая H_C , определяется наличием дефектов структуры материала, то обобщенно можно сказать, что *магнитомягкие материалы* – это в основном *однородные отожженные материалы с наиболее совершенной кристаллической структурой*, не создающей больших препятствий для смещения доменных границ. Напротив, *магнитотвердые материалы* являются, как правило, *неоднородными* (более одной фазы), с большим количеством примесных и собственных дефектов. Во многих из них процессы смещения границ затруднены настолько, что намагничивание происходит в основном за счет вращения вектора намагниченности.

Для *материалов специального назначения* важными являются свойства и характеристики, связывающие магнитные величины с другими величинами, например деформацией, температурой, временем перемагничивания и др. К ним относятся материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, СВЧ-ферриты, магнитострикционные, термомагнитные и некоторые другие материалы, имеющие сравнительно узкое применение. В самостоятельную группу могут быть выделены материалы для микроэлектроники.

Из-за ограниченности объема курса основное внимание уделим магнитомягким и магнитотвердым материалам.

4.2 Параметры и характеристики магнитных материалов

Основной характеристикой магнитных материалов является *кривая намагничивания* – зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$. Свойства магнитных материалов оцениваются рядом параметров: *магнитной проницаемостью μ , допустимой рабочей индукцией B_S , удельными активными потерями $p_{уд}$, диапазоном рабочих частот $f_{min} \dots f_{max}$, стабильностью начальной магнитной проницаемости α_μ* и т.д.

4.2.1 Петля гистерезиса и основная кривая намагничивания

Характеристики намагничивания сильномагнитных веществ – ферри- и ферромагнетиков являются существенно нелинейными. Характер зависимости $B(H)$ у них неоднозначен и зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего магнитного состояния. Для получения *кривых намагничивания* в координатах $B(H)$ в качестве исходного принимают размагниченное состояние образца при отсутствии внешнего поля ($H=0$). При циклическом перемагничивании характеристика образует *петлю гистерезиса*. На рисунке 4.1 приведено семейство

характеристик намагничивания ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле при различных уровнях напряженности.

Петлю $B(H)$, полученную при условии достижения насыщения, называют **предельной петлей гистерезиса**, которая характеризуется рядом параметров: индукцией насыщения B_s , остаточной индукцией B_r , коэрцитивной силой H_c и "площадью" петли гистерезиса, характеризующей удельную энергию потерь на гистерезис за один цикл перемагничивания. В справочных данных обычно приводят параметры именно предельных петель гистерезиса.

Кривая намагничивания, соединяющая вершины петель гистерезиса при различных уровнях напряженности поля, называется **основной кривой намагничивания (ОКН)**. На рисунке 4.1 она выделена жирной кривой.

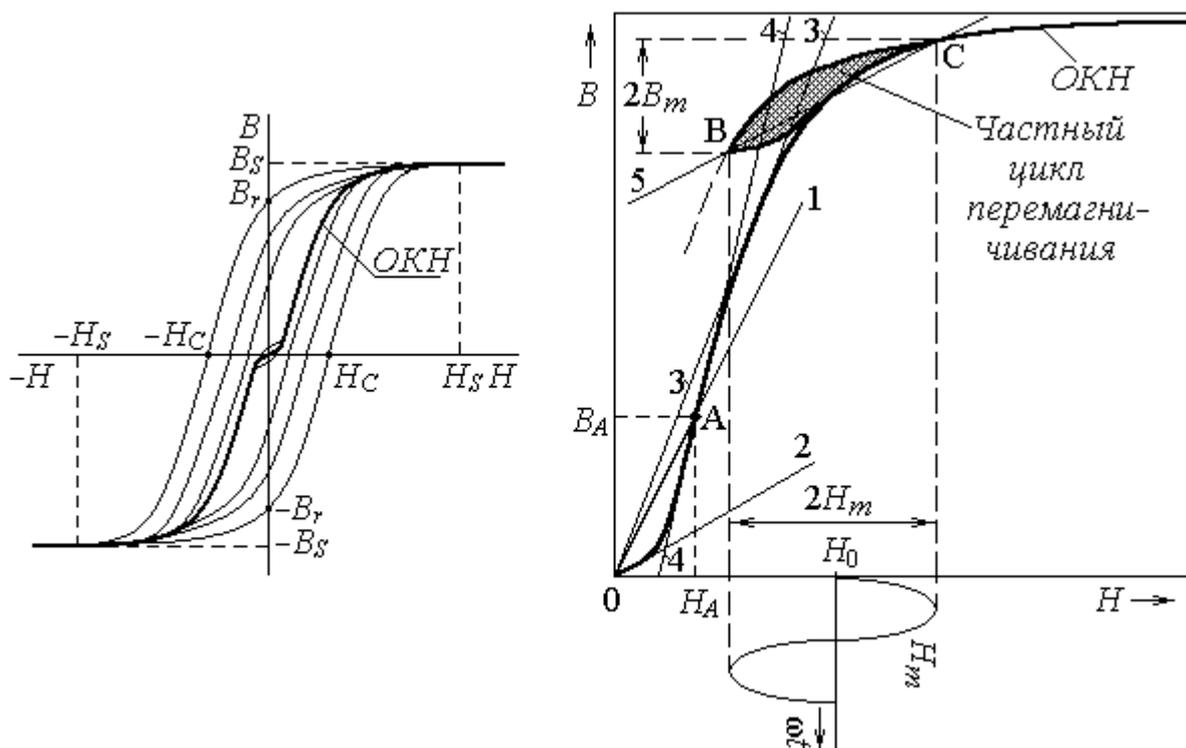


Рисунок 4.1 – Кривые намагничивания ферромагнетиков в переменных полях

Рисунок 4.2 – К пояснению понятий различных магнитных проницаемостей

Кроме множества симметричных петель, вершины которых совпадают по положению с основной кривой намагничивания, во многих случаях рассматривают так называемые частичные петли гистерезиса, вершины которых не лежат на основной кривой. Их можно получить при одновременном воздействии переменного и постоянного (подмагничивающего) полей. Один из таких частных случаев приведен на рисунке 4.2 – частный цикл перемагничивания (заштрихован) при воздействии синусоидального сигнала с амплитудой H_m и подмагничивания H_0 .

4.2.2 Магнитная проницаемость

Магнитная проницаемость по определению есть коэффициент пропорциональности между индукцией B и напряженностью магнитного поля H (см. форму-

ду (4.2)). Но для нелинейных ферромагнетиков это понятие теряет смысл. При формальном определении относительной магнитной проницаемости через выражение $\mu = B/\mu_0 H$, следует считать ее функцией напряженности. На практике наиболее часто используются понятия *начальной* μ_H , *максимальной* μ_M , *дифференциальной* μ_D , *средней* μ_C , *реверсивной* μ_R и *импульсной* μ_I *магнитной проницаемости*.

Располагая кривыми намагничивания, магнитную проницаемость можно интерпретировать геометрически. Так, для текущей рабочей точки A (рисунок 4.2) **нормальная (эффективная) магнитная проницаемость** пропорциональна тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в рабочую точку A (прямая 1) и определяется как

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (\text{при } H = H_A). \quad (4.3)$$

Начальная и максимальная проницаемости представляют собой частные случаи нормальной проницаемости. **Начальная проницаемость** пропорциональна тангенсу угла наклона касательной к ОКН, проведенной из начала координат (прямая 2)

$$\mu_H = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H} \quad (\text{при } H \rightarrow 0). \quad (4.4)$$

Максимальная проницаемость пропорциональна тангенсу угла наклона касательной, проведенной из начала координат через точку на ОКН, соответствующую максимальной величине отношения B/H (прямая 3)

$$\mu_M = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{B}{H} \right)_{max}. \quad (4.5)$$

Дифференциальная проницаемость μ_D определяется для текущей рабочей точки A на ОКН как производная от магнитной индукции по напряженности магнитного поля, деленную на μ_0 . Она характеризует угол наклона касательной к кривой намагничивания в рабочей точке (прямая 4):

$$\mu_D = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}. \quad (4.6)$$

Средняя (действующая) магнитная проницаемость μ_C используется в тех случаях, когда на магнитный материал воздействуют одновременно постоянное (подмагничивание) H_0 и переменное синусоидальное H_m магнитные поля. При этом $H_0 > H_m$, но постоянная и переменная составляющие одного порядка. μ_C пропорциональна тангенсу угла наклона секущей (прямая 5), проведенной через вершины частного цикла перемагничивания B и C , и пропорциональна отношению переменных составляющих B_m и H_m .

$$\mu_C = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m}{H_m} \quad (\text{при } H = H_0 > H_m). \quad (4.7)$$

Реверсивная проницаемость μ_R – частный случай средней проницаемости, когда переменная составляющая много меньше постоянной $H_m \ll H_0$. Она характеризует наклон частной петли гистерезиса в окрестности данной рабочей точки (B_0 и H_0) и определяется как и μ_C отношением B_m/H_m

$$\mu_P = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m}{H_m} \quad (\text{при } H = H_0 \gg H_m). \quad (4.8)$$

Следует отметить, что реверсивная проницаемость существенно меньше средней проницаемости ($\mu_P \ll \mu_C$), так как с уменьшением амплитуды переменной составляющей H_m наклон частного цикла перемагничивания уменьшается.

Импульсная проницаемость определяется выражением (4.9) при воздействии импульсного поля.

$$\mu_{II} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (4.9)$$

где ΔB – приращение индукции магнитного поля, обусловленное воздействием прямоугольных импульсов напряженности ΔH .

Для материалов, применяемых в постоянных магнитах, большое значение имеет *размагничивающий участок предельной петли гистерезиса* – ее часть (рисунк 4.1), расположенная во втором квадранте (между направлениями координатных осей $+B$ и $-H$).

4.2.3 Магнитные потери энергии

При воздействии переменного магнитного поля на элементы конструкций из магнитных материалов в них наблюдаются активные потери энергии, что проявляется в их нагреве. Общие потери энергии в магнитных материалах разделяют на: потери на гистерезис p_H ; на вихревые токи p_B ; на последствие p_{II} и потери в диэлектрике p_D .

Потери на гистерезис. Перемагничивание ферро- и ферритмагнетиков сопровождается перестройкой доменной структуры и поворотом вектора намагниченности относительно осей легкого намагничивания в области насыщения, что определяет петлеобразность характеристики намагничивания $B(H)$ (см. рисунок 4.1). При этом потери энергии, затраченной на один цикл перемагничивания, $p_{1,Г}$ будут равны площади петли гистерезиса $S_{II,Г}$

$$p_{1,Г} = \oint_{II,Г} HdB = S_{II,Г}, \quad [\text{Дж/м}^3]. \quad (4.10)$$

Удельные потери энергии в материале при перемагничивании с частотой f будут определяться выражением

$$p_{Г} = \frac{f}{D} \oint_{II,Г} HdB, \quad [\text{Вт/кг}], \quad (4.11)$$

где D – плотность магнитного материала.

Потери на вихревые токи. При перемагничивании магнитного материала переменным полем относительно высокой частоты в нем наводятся ЭДС и соответствующие им вихревые токи. Очевидно, что *потери на вихревые токи* будут зависеть не только от магнитных, но и от электрических свойств (удельного электрического сопротивления ρ) материала, а также от геометрических размеров (толщины) элементов конструкций.

Нетрудно показать, что при перемагничивании образца (сердечника) магнитным полем, изменяющимся по гармоническому закону ($B=B_m \cdot \cos(\omega t)$), потери на вихревые токи в нем будут пропорциональны квадрату частоты и индукции и обратно пропорциональны удельному сопротивлению

$$p_B \equiv f^2 \cdot B^2 / \rho. \quad (4.12)$$

Причем на высоких частотах потери на вихревые токи будут преобладать перед другими видами потерь.

Для снижения потерь на вихревые токи используются в основном два способа: повышение удельного сопротивления материала и разделение цельного сердечника на отдельные электрически изолированные фрагменты вдоль направления магнитного поля, например, на пластины или ленты. Оба способа направлены на повышение электрического сопротивления прохождению вихревым токам. На рисунке 4.3 в сплошном сердечнике вихревые токи замыкаются по пути наименьшего сопротивления, а в шихтованном сердечнике прохождению токов препятствует изоляционное покрытие тонких пластин и токи замыкаются в пределах каждой пластины.

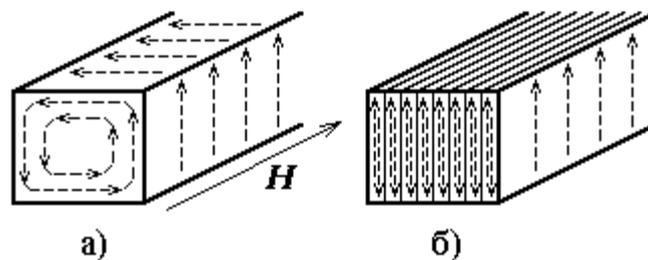


Рисунок 4.3 – Вихревые токи в сплошном (а) и шихтованном (б) магнитопроводах

Полное выражение для удельных потерь на вихревые токи в шихтованном сердечнике имеет вид:

$$p_B = \frac{(\pi \cdot \delta \cdot f \cdot B_m)^2}{6D \cdot \rho}, [Вт/кг], \quad (4.13)$$

где δ – толщина пластины, м.

Потери на магнитное последствие p_{Π} проявляют себя на граничных частотах в условиях слабых полей и обусловлены динамическим магнитным гистерезисом (отставанием магнитной индукции и намагниченности от напряженности магнитного поля) даже в области линейного участка кривой намагничивания. Физическая природа потерь на магнитное последствие во многом аналогична релаксационным потерям в диэлектриках, приводящим к динамическому диэлектрическому гистерезису. В качестве релаксаторов в магнитном материале выступают доменные границы, преодолевающие относительно небольшие энергетические барьеры. Для магнитомягких магнитных материалов уровень этих потерь на последствие существенно ниже потерь на гистерезис и на вихревые токи.

Потери в диэлектрике p_D . Потери в диэлектрике, который используется в магнитодиэлектриках и ферритах в качестве связывающего материала, заметно проявляется лишь в области высоких частот. Обычно $p_D \ll p_B$.

4.2.4 Диапазон рабочих частот

Диапазон рабочих частот – это диапазон частот переменных магнитных полей от f_{min} до f_{max} , в котором рекомендуется преимущественное применение сердечников (изделий), изготовленных из данного материала. Он определяется эффективностью применения данного материала, которая оценивается коэффициентом использования магнитных свойств материала и уровнем потерь в сердечниках. На частотах $f < f_{min}$ эффективнее использовать другие материалы, имеющие более высокую магнитную проницаемость, а при $f > f_{max}$ наблюдается резкое увеличение потерь в сердечнике и снижение магнитной проницаемости, что делает бессмысленным применение сердечника из данного материала.

4.3 Классификация и основные свойства магнитомягких материалов

На рисунке 4.4 приведена подробная классификация магнитомягких материалов. По частотному диапазону они разделяются на низкочастотные и высокочастотные. Все низкочастотные материалы либо изготавливаются из железа, либо содержат железо как один из компонентов сплава. Поэтому их часто называют **ферромагнитными**. В первую группу входят *чистое железо*, *электротехническая сталь* – сплав железа с углеродом и *сплавы* на основе железа, никеля и кобальта с легирующими добавками молибдена, хрома, меди и др. веществ. К высокочастотным материалам относятся магнитодиэлектрики и ферриты.

Более детальная классификация магнитомягких материалов проводится в зависимости от их химического состава, структуры и технологии производства, которые в значительной степени определяют основные свойства и области применения материалов. Так, чистое железо в зависимости от технологии изготовления и кристаллической структуры материала делится на кристаллическое, электролитическое, карбонильное и технически чистое железо. Магнитные свойства электротехнических сталей определяются в основном процентным содержанием углерода в железе и технологией прокатки их в тонкие листы или ленты. Свойства сплавов в сильной степени зависят от процентного содержания основных материалов и легирующих компонентов, а также от технологии изготовления. Еще в большей степени это относится к высокочастотным материалам.

Усредненные данные о свойствах некоторых магнитомягких ферро- и ферритных магнитных материалов приведены в таблице 4.2.



Рисунок 4.4 – Классификация магнитомягких материалов

4.4 Основные свойства и области применения магнитомягких ферромагнитных материалов

4.4.1 Основные свойства магнитомягких материалов

Характерными свойствами магнитомягких материалов являются их способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях и высокая магнитная проницаемость. По частотному диапазону магнитомягкие материалы делятся на три группы: низкочастотные, высокочастотные и для СВЧ-диапазона. Область рабочих частот определяется в основном величиной удельного электрического сопротивления материала ρ . Чем больше ρ , тем меньше удельные потери на вихревые токи, тем выше область рабочих частот. Поэтому изделия из чистого железа, обладающие небольшим ρ , нашли преимущественное применение

в постоянных магнитных цепях. В области низких частот (до десятков килогерц) применяются электротехнические стали, железоникелевые, железоникель-кобальтовые и железокобальтовые сплавы – пермаллои и пермендюры.

Таблица 4.2 – Усредненные параметры магнитомягких материалов

Материал	μ_H	μ_M	$H_C, A/m$	$B_S, Tл$ при $H_S, A/m$	$\rho, Ом \cdot м$
Технически чистое железо	250	$(3,5-4,5) \cdot 10^3$	40-100	2,18 Tл, $H=5 \cdot 10^4 A/m$	10^{-7}
Электротехнические стали	200-600	$(3-8) \cdot 10^3$	10-65	1,89 Tл, $H=3 \cdot 10^4 A/m$	$(2,5-6) \cdot 10^{-7}$
<u>Пермаллои:</u>					
изконикелевые ~40-50% Ni)	$(2-4) \cdot 10^3$	$(1,5-6) \cdot 10^4$	5-32	1,3-1,6 Tл	$(4,5-9) \cdot 10^{-7}$
высоконикиельные ~79% Ni)	$(1,5-10) \cdot 10^4$	$(7-30) \cdot 10^4$	0,65-4	0,7-0,75 Tл	$(1,6-8,5) \cdot 10^{-7}$
<u>Магнитодиэлектрики на основе:</u>					
карбонильного железа	9-15	—	—	—	—
альсифера	20-90	—	400-500	0,2-0,5 Tл $H=8 \cdot 10^3 A/m$	—
Мо-пермаллоя	60-250	—	100	0,52-0,75 Tл $H=8 \cdot 10^3 A/m$	—
<u>Ферриты:</u>					
никель-цинковые	10-2000	40-7000	< 1700	0,2-0,35 Tл	$10^{-7}-10$
марганец-цинковые	700-20000	$(1,8-35) \cdot 10^3$	< 280	0,15-0,46 Tл	$10^{-3}-20$

4.4.2 Магнитомягкие материалы на основе чистого железа

Чистое железо – это железо, содержащее минимальное количество примесей, прежде всего углерода (менее 0,05%), получаемое методами прямого восстановления чистых руд. Железо обладает высокими магнитными свойствами – высокой магнитной проницаемостью μ_{max} и высокой индукцией насыщения B_S (см. таблицу 4.2). Самыми вредными примесями, влияющими на магнитные свойства железа, являются углерод, кислород, сера, азот и водород. *Основной недостаток чистого железа состоит в малом значении удельного электрического сопротивления* ($\rho = 10^{-7} Ом \cdot м$), что ограничивает область его применения в переменных полях ввиду больших потерь на вихревые токи. Поэтому оно используется преимущественно при изготовлении изделий, предназначенных для работы в постоянных магнитных полях (например, магнитных экранов). Однако чистое железо имеет

большое значение как исходный материал для получения почти всех ферромагнитных сплавов и некоторых магнитодиэлектриков.

Из первой группы низкочастотных материалов (см. рисунок 4.4) **монокристаллическое железо** обладает предельными магнитными свойствами ($\mu_M/\mu_H = 20000/1430000$; $H_C = 0,8 \text{ А/м}$; $B_S = 2,18 \text{ Тл}$), однако оно не находит практического применения из-за своей дороговизны и сложности технологии.

Электролитическое железо изготавливают путем электролиза – электролитического рафинирования в расплавленных солях серноокислого или хлористого железа. Электролиз проводят в электрических печах, где электродами служат стальные пластины. Осажденное железо толщиной 4 – 6 мм снимается с катода и после тщательной промывки измельчается в порошок в шаровых мельницах. Ввиду большого насыщения водородом магнитные свойства такого железа весьма низки ($H_C = 160 – 640 \text{ А/м}$). Однако, после переплавки в вакууме и многократных отжигов электролитическое железо приобретает хорошие магнитные свойства: $\mu_M/\mu_H = 15000/500$; $H_C = 30 \text{ А/м}$.

Карбонильное железо получают посредством термического разложения пентакарбонила железа ($\text{Fe}(\text{CO})_5 \rightarrow \text{Fe} + 5\text{CO}\uparrow$) в виде порошка, губчатого или др. вида. Исходное порошкообразное карбонильное железо содержит в себе небольшое количество примесей углерода (до 1,2%), кислорода (до 1,2%) и азота (до 1%), но после термической обработки их содержание существенно снижается и значительно повышаются магнитные свойства: $\mu_M/\mu_H = 20000/2000$; $H_C = 6,4 \text{ А/м}$. В таком виде его выгодно использовать в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных материалов – магнитодиэлектриков (карбонильное железо), поскольку оно может быть получено изначально в виде тончайшего порошка и не требует дальнейшей операции размола.

При использовании карбонильного железа в качестве сырья для изготовления магнитомягких материалов его рафинируют в водородной среде. После переплавки из карбонильного железа получают тонкие листы и ленты.

Технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь) может содержать небольшое количество кремния (до 0,3%) и по магнитным параметрам значительно уступает вышперечисленным материалам: $\mu_M = 3000-5000$; $H_C = 30-100 \text{ А/м}$. Из него изготавливают тонкие листы и ленты. На последнем этапе обработки низкоуглеродистую сталь подвергают горячей или холодной прокатке и отжигу.

4.4.3 Электротехнические стали

Электротехнические стали представляют собой твердые растворы кремния (0,5-5%) в чистом железе. Поэтому их часто называют *кремнистыми сталями*. Преимущественное применение электротехнические стали получили для изготовления магнитопроводов самых разнообразных электромагнитных устройств: электрических машин, трансформаторов, дросселей, статических преобразователей, реле, измерительных приборов и других устройств.

На магнитные свойства *чистейшего железа* кремний влияет отрицательно. Однако магнитные свойства *технически чистого железа* при легировании его кремнием улучшаются: возрастают начальная и максимальная проницаемости, уменьшаются коэрцитивная сила и потери на гистерезис и вихревые токи, существенно улучшается стабильность свойств. Но при этом несколько снижается индукция насыщения.

Положительное действие кремния на магнитные свойства технического чистого железа объясняется рядом причин. Кремний, как примесь, существенно повышает удельное сопротивление стали, снижая потери на вихревые токи и повышая граничную частоту. Кремний действует и как антагонист вредным примесям, к которым относятся углерод, кислород, азот, марганец и др. Он переводит углерод из наиболее вредной для магнитных свойств формы цементита Fe_3C в графит. Действуя как раскислитель, он связывает часть растворенных в металле газов (прежде всего кислород). Кремний способствует росту зерен и уменьшению констант магнитной анизотропии и магнитострикции.

Наибольшее значение максимальной проницаемости наблюдается при содержании кремния 6,5-6,8 %. Но в технике применяют сплавы с содержанием кремния не выше 5,0 %. Это связано с тем, что кремний ухудшает механические свойства, повышая твердость и хрупкость. Уже при 4,0-5,0 % Si материал выдерживает не более 1-2 перегибов на 90° . Кроме того, кремний несколько снижает индукцию насыщения, что является нежелательным.

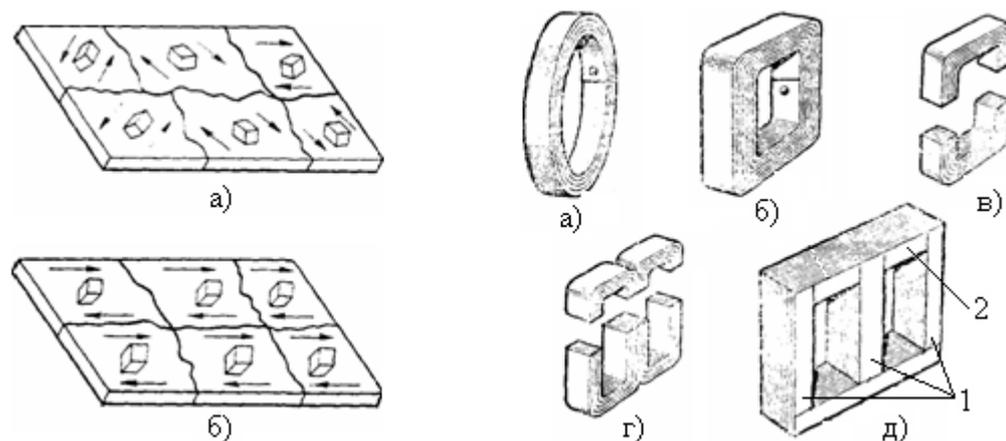
Свойства стали значительно улучшаются в результате образования *магнитной текстуры* при ее холодной прокатке и последующем отжиге. Элементарная ячейка железо-кремнистого сплава представляет собой объемноцентрированный куб, для которого *направлениями легкого намагничивания* являются его ребра, а направлению самого *трудного намагничивания* соответствуют пространственные диагонали.

При отсутствии текстуры имеет место хаотическое расположение кристаллов. Вследствие этого материал приобретает магнитно-изотропные свойства. При холодной прокатке зерна в кристаллографическом отношении получают преимущественную ориентацию, которую и называют текстурой прокатки. Ребра кубов кристаллитов оказываются расположенными почти параллельно направлению прокатки (рисунок 4.5). Таким образом, в отношении магнитной анизотропии текстурированная сталь близка к дорогостоящему монокристаллическому железу. При ориентации магнитного потока по направлению особенно легкой намагничиваемости у стали наблюдается наиболее крутая кривая намагничивания и, как следствие, наиболее узкая петля гистерезиса и уменьшение удельных потерь. Самые плохие магнитные свойства наблюдаются под углом 55° к направлению прокатки.

Технологический процесс производства текстурованной стали весьма сложен и включает: горячую и холодную прокатки, промежуточный отжиг, холодную прокатку и окончательный отжиг при высокой температуре (1100 – 1500 °C). В результате усложнения технологического процесса текстурованная сталь дороже горячекатаной того же состава при одинаковой толщине листа. Однако увеличение стоимости окупается уменьшением потерь (приблизительно в 2 раза) и увеличением рабочей индукции (на 20-25 %).

Использование сталей, обладающих магнитной анизотропией, требует изменения конструкции магнитопровода. Чтобы магнитный поток проходил только в направлении наилучших свойств, т.е. в направлении прокатки, применяются ленточные сердечники или комбинированные сердечники, у которых стержни изготовлены из текстурированных, а ярмо – из изотропных сталей. На рисунке 4.6 приведены тороидальная (а), стержневые (б, в) и броневые (г, д) конструкции магнитопроводов трансформаторов, выполненных из текстурированных сталей.

Марки стали обозначают четырьмя цифрами. Первая цифра означает класс по структурному состоянию и виду прокатки: 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой, 5 – холоднокатаная изотропная с плоской кубической текстурой. Вторая цифра – классы по *содержанию кремния*: "0" – содержание кремния до 0,4 %; 1 – 0,4...0,8 %; 2 – 0,8...1,8 %; 3 – 1,8...2,8 %; 4 – 2,8...3,8 %; 5 – 3,8...4,8%. Третья цифра – группа по основной нормируемой характеристике – удельным потерям $P_{B/f}$: 0 – удельные потери при магнитной индукции $B = 1,7 \text{ Тл}$ и частоте $f = 50 \text{ Гц}$ ($P_{1,7/50}$); 1 – $P_{1,5/50}$; 2 – $P_{1,0/400}$; 4 – $P_{0,5/3000}$; 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$), 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}). Четвертая цифра указывает на класс по нормируемой характеристике. Чем выше номер класса, тем лучше свойства, но тем выше стоимость стали.



а – не текстурированный,
б – текстурированный материал.

Рисунок 4.5 – Схема расположения кристаллов относительно направления прокатки

а, б – сплошные ленточные сердечники; в, г – разрезные ленточные сердечники; д – комбинированный сердечник: 1 – стержни из текстурированной стали, 2 – ярмо из изотропной стали.

Рисунок 4.6 – Сердечники трансформаторов из текстурированных материалов

По функциональному применению стали делятся на три класса.

1) **Стали, предназначенные для работы в средних и сильных магнитных полях при промышленной частоте.** Их часто называют трансформаторными сталями. Эта группа сталей является самой большой по количеству марок и объему применения. Ее используют главным образом для производства силового

оборудования – генераторов, двигателей, силовых трансформаторов. Основными электромагнитными характеристиками этой группы сталей являются кривая намагничивания в области средних и сильных полей, удельные потери при частоте 50 Гц при различных амплитудах магнитной индукции. Чем выше магнитные свойства стали, тем меньше доля потерь на гистерезис от общих потерь. Для горячекатаных слаболегированных сталей потери на гистерезис составляют 70-75 % от общих потерь (при $f = 50$ Гц), для анизотропных – 25-35 %. Зависимость удельных потерь от частоты определяется соотношением составляющих полных потерь.

2) **Стали, предназначенные для работы в средних полях при повышенной частоте (400 Гц–20 кГц).** С ростом частоты увеличивается влияние вихревых токов на процессы перемагничивания. Чтобы вихревые токи были меньше, применяют специальные высоколегированные электротехнические стали ($Si - 2,8-3,8\%$) преимущественно в виде тонких лент, обладающие большим удельным сопротивлением. Очевидно, что по мере увеличения содержания кремния в стали и уменьшения толщины ленты частотные свойства сталей будут улучшаться. Толщину проката выбирают в зависимости от значения рабочей частоты. Так для частоты 400 Гц рекомендуется применять ленты толщиной около 0,15 мм. При частотах 400-1000 Гц выбирают более тонкие ленты (0,08 мм), при 1000-3000 Гц применяют ленты толщиной 0,05 мм. Очень тонкие ленты 0,03; 0,02 и 0,01 мм целесообразно использовать при частотах свыше 3000 Гц.

3) **Стали, предназначенные для работы в слабых ($H=0,2-0,6$ А/м) или в средних ($H=3-1000$ А/м) полях.** Главными требованиями к этим материалам являются высокие значения магнитной проницаемости в слабых и средних полях. Удельные потери не имеют существенного значения и по этому показателю не нормируются. При малых амплитудах напряженности магнитного поля ширина петель гистерезиса относительно невелика и потери на перемагничивание незначительны.

Высокие магнитные свойства в средних и особенно в слабых полях обеспечиваются очисткой металла от вредных примесей и снятием внутренних напряжений, а у текстурованных сталей – дополнительно высокой степенью текстурирования. Для сталей этой группы свойственна большая степень анизотропии магнитной индукции. Для текстурованных сталей свойства вдоль и поперек направления прокатки могут отличаться в десятки раз. Для получения высоких значений проницаемости в слабых и средних полях изделия из электротехнических сталей на заключительном этапе необходимо отжигать.

4.4.4 Пермаллои

Пермаллои представляют собой сплавы железа с никелем или железа с никелем и кобальтом, легированные молибденом, хромом, медью, кремнием и другими элементами. В слабых полях они обладают более высокими магнитными свойствами, чем электротехнические стали.

Как показали исследования, зависимостей физических свойств железоникелевых сплавов от процентного содержания никеля весьма сложные [3] и носят резонансный характер (см. рисунок 4.7), что свидетельствует об образовании в них интерметаллических фаз. Так при содержании никеля 78,5% сплав, получивший название *классического пермаллоя*, обладает наибольшими значениями проницаемостей μ_H и μ_M . Второй, хотя и значительно меньший, максимум для начальной и максимальной проницаемостей наблюдается у сплавов с содержанием 40-50% Ni. Эти сплавы обычно называют *низконикелевыми* в отличие от *высоконикелевых* с содержанием 70—80% Ni.

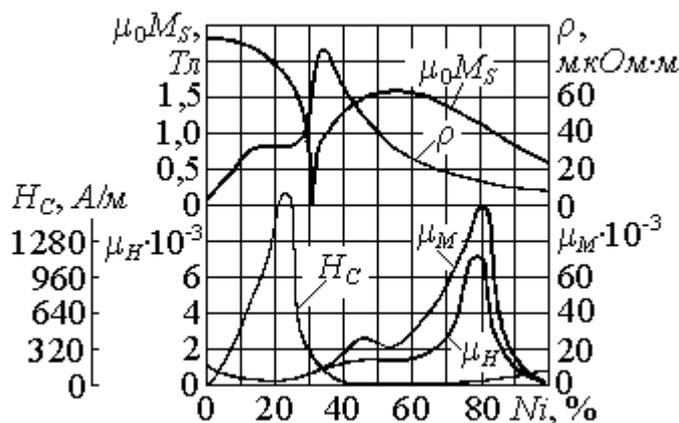


Рисунок 4.7 – Зависимость свойств железоникелевых сплавов от содержания никеля

На основании анализа свойств низконикелевого (50% Ni) и высоконикелевого (78,5% Ni) нелегированных пермаллоев, приведенных в таблице 4.3 и на рисунке 4.7, можно сделать следующие выводы.

Таблица 4.3 – Свойства нелегированных низконикелевого и высоконикелевого пермаллоев

Содержание Ni, %	μ_H	μ_M	$H_C, A/m$	$B_S, Tл$	$\rho, мкОм·м$
50	2000–3200	50 000–60 000	6	1,55	0,5
78,5	7000–14000	100000–200000	2	1,05	0,25

Магнитная проницаемость у высоконикелевых пермаллоев в несколько раз больше, чем у низконикелевых, и в несколько десятков раз больше, чем у электротехнических сталей. Индукция насыщения высоконикелевых пермаллоев приблизительно в 2 раза меньше, чем у электротехнических сталей, и в 1,5 раза меньше, чем у низконикелевых. Отсюда следует, что высоконикелевые пермаллои нецелесообразно применять в качестве материала для сердечников силовых трансформаторов и других устройств, для которых важно создание большого магнитного потока. Удельное электрическое сопротивление у высоконикелевых пермаллоев в 2 раза меньше, чем у низконикелевых. Следовательно, в переменных

магнитных полях, особенно при повышенных частотах, предпочтительнее использование низконикелевых пермаллоев. Большой диапазон изменения магнитных свойств, указанных в таблице 4.3, объясняется плохой воспроизводимостью характеристик пермаллоев.

Недостатком высоконикелевых пермаллоев перед низконикелевыми является их дороговизна из-за большого содержания никеля, а также и то, что механические напряжения, чистота и состав сплава значительно сильнее влияют на их магнитные свойства. Кроме того, магнитные свойства материалов очень чувствительны к внешним напряжениям, что в большинстве случаев нежелательно.

Для улучшения электромагнитных свойств обе группы пермаллоев обычно *легируют* различными элементами. *Легирование молибденом* способствует значительному увеличению удельного сопротивления и заметному повышению начальной и максимальной проницаемости, а также позволяет заменить двойную термообработку сравнительно простым отжигом. Кроме того, наличие молибдена уменьшает чувствительность параметров к деформации. *Действие хрома* в значительной степени аналогично действию молибдена. *Медь* улучшает стабильность проницаемости от изменений напряженности поля и температуры, а также повышает электрическое сопротивление. Сплавы с медью хорошо поддаются механической обработке. Для легирования пермаллоев применяют и некоторые другие элементы.

Наиболее детальная *классификация пермаллоев* проводится *по основным магнитным и электрическим свойствам*, по которым они подразделяются на четыре группы.

Первая группа включает сплавы с *наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях* ($\mu_H = (2...20) \cdot 10^4$; $\mu_M = (10...100) \cdot 10^4$). Сюда относятся *высокониелевые пермаллои* с содержанием Ni (70...85%), легированных молибденом (3,8...4,1%), хромом (2,6...3,0%), кремнием (1,1...1,5%), ванадием (3,8...4,2%), медью (4,8...5,2%). Все сплавы содержат в небольших количествах марганец (0,3...0,6 %). Эта группа рекомендуется для изготовления *сердечников малогабаритных трансформаторов* (в том числе *импульсных*), *реле, магнитных экранов, магнитных усилителей* и др. устройств.

Из этой группы выделяют *супермаллой*, который обладает рекордными значениями максимальной магнитной проницаемости ($\mu_M > 10^6$) и состоит из Ni – 79%, Mo – 5%, Fe – 15% и Mn – 0,5%. В процессе производства супермаллой тщательно очищают от примесей, плавку ведут в индукционной печи в вакууме, разливку производят в атмосфере азота или гелия. Термообработка состоит из отжига при 1300°C в атмосфере чистого водорода и медленного охлаждения с определенной скоростью, которая обеспечивает получение наивысших магнитных свойств. Супермаллой имеет следующие усредненные магнитные свойства: $\mu_H = 10^5$; $\mu_M = (6...15) \cdot 10^5$; $H_C = 0,3$ А/м; $B_S = 0,79$ Тл. Но при индукции более 0,8 Тл проницаемость его резко снижается.

Вторая группа пермаллоев включает сплавы с *высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электрическим сопротивлением* ($\mu_H = 1500...6000$; $\mu_M = (1,5...10) \cdot 10^4$; $B_S = 1,0...1,4$ Тл; $\rho = 0,9...1,0$ мкОм·м). Сюда от-

носятся **низконикелевые пермаллои** (Ni 38...51%), легированные хромом (3,8...4,2%) и кремнием (1,1...3,2%). Эта группа рекомендуется для изготовления *сердечников импульсных трансформаторов, трансформаторов звуковых и высоких частот*, устройств, работающих без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием, так как они обладают низкими удельными потерями.

Третья группа – низконикелевые пермаллои с содержанием Ni 35...50% включает сплавы *с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения* ($\mu_H = 2000...5000$, $\mu_M = (2...30) \cdot 10^4$, $B_S = 1,3...1,5$ Тл). Эти пермаллои применяются для изготовления ленточных, витых и штампованных магнитопроводов, используемых в малогабаритных трансформаторах питания, в трансформаторах звуковых частот, дросселях, реле и в магнитных цепях других устройств, *работающих в переменных полях в широком диапазоне частот без подмагничивания или при слабом подмагничивании постоянным полем*.

Четвертая группа пермаллоев включает сплавы *с прямоугольной петлей гистерезиса*. Они обладают кристаллографической или магнитной текстурой и имеют высокую максимальную проницаемость (на уровне сплавов первой группы) и повышенную индукцию насыщения. Применяются для изготовления магнитных усилителей, бесконтактных реле, дросселей, модуляторов, импульсных трансформаторов и магнитных элементов вычислительных устройств.

Пермаллои изготавливают в виде холоднокатаных лент и листов толщиной 0,005...2,5 мм, горячекатаных листов, горячекатаных и холоднокатаных прутков и проволоки. В поковках, прутках и лентах толщиной свыше 0,05 мм сплавы практически изотропны. В очень тонких лентах (тоньше 0,05 мм) наблюдается анизотропия свойств. Чем больше рабочая частота, тем целесообразнее применять низконикелевые пермаллои тонкого проката.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость, дефицитность отдельных компонентов (прежде всего никеля), необходимость проведения сложного отжига после механической обработки и большая зависимость магнитных свойств от механических воздействий, что требует специальных мер защиты. Листы, ленты и прутки из пермаллоя *поставляют в термически необработанном виде*. Для получения нормируемых магнитных свойств необходимо применять (после изготовления изделий!) окончательную термическую обработку. Она заключается в выдержке при температуре 1100...1200 °С в вакууме ($10^{-2}...10^{-4}$ мм.рт.ст.) и последующим снижением температуры со скоростью 100...200 °С/час. Стоит отметить, что существуют и другие, более простые способы отжига, например, в контейнерах с песком. Но при этом существенно снижаются магнитные свойства изделий из пермаллоя. Для защиты сердечников из пермаллоев от механических воздействий, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и транспортировки, их укладывают в защитные каркасы из пластмассы или алюминия, а пространство между сердечником и стенками каркаса заполняют эластичным компаундом.

Маркировка пермаллоев – буквенно-цифровая. Вначале указывается число, обозначающее содержание никеля в процентах и буква "Н" – никель, после чего могут следовать буквы, определяющие наличие легирующих добавок: "М" – мар-

ганец; "К" – кобальт; "Х" – хром; "Д" – медь; "С" – кремний; "Ф" – ванадий и др. Последующие буквы характеризуют качество материала: "У" – с улучшенными свойствами; "П" – с прямоугольной петлей гистерезиса; "А" – анизотропный, то есть, текстурированный материал). Например: 79НМ – железоникелевый сплав, содержащий 79% Ni, легированный молибденом; 50НХС – сплав, содержащий 50% Ni, легированный хромом и кремнием.

4.4.5 Другие магнитомягкие сплавы

Близким по магнитным свойствами к пермаллоям является сплав **альсифер** (Al–Si–Fe). Оптимальный состав его: Al – 5,4%; Si – 9,6%; остальное – железо. Альсифер характеризуется следующими предельными свойствами: $\mu_H = 35400$; $\mu_M = 117\ 000$; $H_C = 1,76\ А/м$. Однако, столь высокие магнитные свойства соответствуют очень точному соблюдению состава сплава, что возможно обеспечить только для лабораторных образцов. Промышленный альсифер имеет средние значения начальной проницаемости порядка 6000...7000 (после отжига), что значительно ниже оптимальных. Вследствие хрупкости альсифера толщина листа должна быть не менее 1-2 мм, а это, ввиду малого электрического сопротивления, полностью исключает возможность использования альсифера в цепях переменного тока даже при частоте 50 Гц. Однако благодаря высокой хрупкости альсифер обладает хорошей размольностью (получению мелкодисперсного порошка), что позволяет использовать его в качестве ферромагнитной фазы **магнитодиэлектриков**.

Также к алюмино-железистым сплавам относится, **альфенол** (Al – 16%, остальное – железо) или (Al – 16%, Мо – 3%, остальное – железо). По магнитным свойствам они не уступают низконикелевым пермаллоям, но высокое содержание алюминия обуславливает значительные технологические трудности из-за хрупкости сплавов. Альфенол удается изготавливать лишь в виде лент толщиной не менее 0,1 мм, что позволяет использовать его, например, в магнитных головках для звукозаписи, где важна высокая устойчивость материала к истиранию.

Пермендюр – это сплавы железа с кобальтом (обычно, Со – 30...51%, V – 1,5...2,0%, остальное – железо).

Отличительная особенность железо-кобальтовых сплавов – рекордные значения индукции насыщения, которая достигает 2,43 Тл, что позволяет получить экономию в массе и объеме магнитопроводов по сравнению с железом до 15–20%. Индукция насыщения сплавов с большим и малым содержанием кобальта приблизительно одинакова. Высококобальтовые сплавы в слабых и средних полях имеют большие значения магнитной проницаемости, чем низкокобальтовые, но последние дешевле.

Преимущество железокобальтовых сплавов перед техническим железом наиболее ощутимо в области индукций выше 1,0 Тл. Разница в магнитных проницаемостях достигает максимального значения при индукции около 1,8 Тл. Вблизи этой точки проницаемость кобальтовых сплавов больше проницаемости мягких сортов железа на несколько порядков.

Кроме большой индукции насыщения пермендюры обладают значительной реверсивной проницаемостью (см. пункт 4.2.2), что делает его особенно ценным в качестве материала, эксплуатируемого в условиях слабого переменного поля с сильным подмагничиванием, например, в сглаживающих дросселях. Пермендюр имеет также высокую магнитострикцию, что позволяет использовать его в качестве магнитострикционного материала – в магнитострикционных преобразователях электромеханических фильтров и линий задержки.

К недостаткам пермендюра относятся малое электрическое сопротивление, высокая стоимость и дефицитность кобальта и ванадия.

Маркировка аналогична маркировке пермаллоев, например, 49КФ – железо-кобальтовый сплав, содержащий 49% Со, легированный ванадием (17%V).

4.4.6 Аморфные магнитомягкие материалы

Аморфные магнитомягкие материалы – сравнительно новая группа магнитомягких материалов с сочетанием высоких магнитных и механических свойств, что обусловлено особенностями их структуры. Для аморфных магнитных материалов (АММ) характерно *метастабильное неравновесное термодинамическое состояние* при температурах меньше некоторой критической величины T_A . При нагревании аморфных сплавов выше T_A они переходят в равновесное двухфазное кристаллическое состояние.

Аморфное состояние формируется при высокой скорости охлаждения жидкости, так как при этом частицы не успевают выстроиться в правильную кристаллическую структуру. Скорость охлаждения, необходимая для получения аморфного состояния, составляет $10^4 \dots 10^6$ K/c. Существует несколько способов производства АММ, когда аморфная структура получается за счет быстрого охлаждения из жидкого, газообразного или ионизированного состояния. Наиболее широко применяют метод быстрой закалки расплава в нескольких модификациях, различающихся способом отвода тепла. Например, ленты шириной несколько миллиметров и толщиной меньше 100 мкм получают выдавливанием расплава через кварцевое сопло на охлаждающий барабан, вращающийся с большой угловой скоростью.

Крупные монолитные изделия из АММ получают с помощью ударной волны, формируемой газовой пушкой, выстреливающей поток пластиковых частиц в направлении аморфного порошка материала. Эта технология обеспечивает оптимальные условия охлаждения расплавленных зон, так как основная тепловая энергия выделяется на поверхности прессуемого порошка, практически не передаваясь внутрь частиц, которые остаются холодными.

Металлические магнитомягкие аморфные сплавы содержат 75...85% одного или нескольких переходных металлов (Fe, Со, Ni), сплавленных с 15...25% стеклообразователя, в качестве которого используют бор, углерод, кремний, фосфор. Введение стеклообразователей уменьшает индукцию насыщения, понижает точку Кюри, ухудшает температурные коэффициенты магнитных свойств, но при этом увеличивает удельное сопротивление ($\rho = 1,25 \dots 1,8$ мкОм·м), повышает твердость и прочность сплавов, их коррозионную стойкость. Для придания дополнительных свойств в сплавы вводят легирующие элементы, чаще всего хром, тантал,

ванадий, марганец и др. Легирование марганцем повышает электрическое сопротивление АММ. Тантал и ванадий повышают температурную стабильность магнитных свойств. Хром придает АММ высокие антикоррозийные свойства. Молибден улучшает частотные свойства АММ. В итоге, по магнитным свойствам аморфные магнитные сплавы не уступают электротехническим сталям. Большинство из них обладает петлей гистерезиса с высокой прямоугольностью. Удельные магнитные потери в переменных полях на высоких частотах (для лучших сплавов вплоть до 100 кГц) и малых уровнях индукции ниже удельных потерь в электротехнических сталях и составляют в среднем $0,1 \text{ Вт/кг}$ при $f = 1 \text{ кГц}$ и $B = 0,1 \text{ Тл}$. Магнитострикция АММ может иметь любой знак и по величине ($15 \cdot 10^{-6} \dots 30 \cdot 10^{-6}$) соизмерима с кристаллическими сплавами. Путем изменения химического состава, можно получить АММ практически с нулевой магнитострикцией.

Процесс производства АММ дешевле, чем производство пермаллоев и пермендюрлов. По механическим свойствам аморфные магнитные сплавы превосходят кристаллические стали. Для них характерно совмещение высокой прочности, твердости и пластичности. Очень важным обстоятельством, стимулирующим внедрение АММ в качестве материала для сложных магнитопроводов, сердечников импульсных трансформаторов, магнитных экранов и др. изделий, является необязательность отжига на заключительном этапе изготовления, как это требуется при изготовлении из кристаллических материалов.

Наиболее перспективными являются аморфные сплавы: железоникелевые (40% Fe, 40% Ni, 14% P, 6% B), высококобальтовые (70% Co, 5% Fe, 15% Si, 10% B) и высокожелезистые (80% Fe, 16% P, 3% C, 1% B).

4.4.7 Магнитодиэлектрики

Согласно ГОСТ 23618-79 *магнитодиэлектрик – это магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, а наполнителем – магнитный порошок*. Таким образом, магнитодиэлектрики представляют собой конгломерат из измельченного ферромагнетика, частицы которого электрически изолированы друг от друга пленками из диэлектрического (немагнитного) материала. Являясь высокочастотными магнитными материалами, они имеют некоторые *преимущества перед ферритами: более высокую температурную и временную стабильность, более высокую воспроизводимость*. Также в отличие от ферритов магнитодиэлектрики не теряют своих электромагнитных свойств при механических нагрузках. Но по ряду электромагнитных параметров магнитодиэлектрики уступают ферритам, в частности, имеют *существенно ниже магнитную проницаемость*.

Магнитодиэлектрики в основном используются в качестве сердечников катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, радиочастотных контуров радиотехнической и связной аппаратуры.

Магнитные свойства магнитодиэлектриков в значительной степени определяются особенностями намагничивания совокупности отдельных ферромагнитных частиц, их размерами и формой, взаимным расположением, количественным соотношением между ферромагнетиком и диэлектриком и в меньшей степени зависят от магнитных свойств исходного материала.

Несмотря на то, что общий объем содержащегося связующего материала (изолятора) V_D в общем объеме V_{MD} магнитодиэлектрика составляет относительно малую долю – не более 5...10%, магнитная проницаемость магнитодиэлектрика значительно меньше магнитной проницаемости наполнителя $\mu_{MD} \ll \mu$. Это объясняется наличием больших размагничивающих полей в каждой частице ферромагнетика, в результате чего реальное поле в частицах оказывается значительно меньшим, чем внешнее. Если предположить, что частицы имеют сферическую форму, то эффективная магнитная проницаемость магнитодиэлектрика будет определяться выражением

$$\mu_{MD} = \frac{1}{1/\mu + \theta/3}, \quad (4.14)$$

где $\theta = V_D/V_{MD}$ – относительный объем диэлектрика в магнитодиэлектрике.

Из анализа зависимости (4.14) следует, что, чем больше μ и θ , тем в меньшей степени магнитная проницаемость исходного магнитного материала μ сказываются на проницаемости магнитодиэлектрика μ_{MD} . Для случая, когда $\mu > 1000$, а $\theta/3 > 0,05/3 = 0,017$, первым слагаемым в знаменателе можно пренебречь. Тогда $\mu_{MD} \approx 3/\theta = 60$. Следовательно, для магнитодиэлектрика магнитная проницаемость становится зависимой только от содержания связующего вещества, а величина μ_{MD} не будет превышать 100 (при $\theta \geq 0,03$), что справедливо для большинства типов магнитодиэлектриков. Таким образом, магнитодиэлектрик представляет собой материал с *распределенным немагнитным зазором*, что способствует существенному снижению удельных потерь по сравнению с исходным материалом.

Потери в магнитодиэлектриках, как и в ферритах, оцениваются значением тангенса угла магнитных потерь $tg\delta$ или относительным тангенсом угла потерь $tg\delta/\mu_H$, который может быть непосредственно измерен специальным прибором.

К исходным ферромагнетикам, используемым для производства магнитодиэлектриков, предъявляются следующие основные требования:

- 1) возможность получения малых частиц, желательной определенной (сферической или чешуйчатой) формы;
- 2) большое удельное электрическое сопротивление;
- 3) малые потери, прежде всего на гистерезис, для отдельных частиц в слабых полях.

Наиболее полно этим требованиям соответствуют *альсифер*, *карбонильное железо* и *молибденовый пермаллой* (Мо-пермаллой).

Магнитодиэлектрики на основе альсифера. В магнитодиэлектриках используются альсиферы с содержанием кремния – 9...11% и алюминия – 6...8%. Важной особенностью альсифера является то, что его $TK\mu$ в зависимости от содержания кремния и алюминия может быть меньше, больше или равен нулю. В качестве изолирующего состава применяют как органические материалы (бакелит, полистирол, шеллак), так и неорганические (жидкое стекло, стеклоэмали и др.). *Альсифер является дешевым и недефицитным материалом.* Все это обеспечило ему широкое применение в качестве ферромагнитной фазы магнитодиэлектриков.

Магнитопроводы (сердечники) из альсифера изготавливают прессованием в пресс-формах на гидравлических прессах при высоких давлениях – $(14...20)10^2$

МПа, после чего подвергают отжигу при температуре 780°C с выдержкой около 40 мин. Для удаления жидкого стекла и остатков хромового ангидрида сердечники кипятят в воде, после чего высушивают в термостате, производят искусственное старение для стабилизации свойств во времени и пропитывают бакелитовым лаком для устранения гигроскопичности.

Маркировка магнитодиэлектриков на основе альсифера буквенно-цифровая. Буквами кодируется область применения или назначение, например: ТЧ – тональная частота; ТЧК – тональная частота с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости; ВЧ – высокая частота; ВЧК – высокая частота с компенсированным температурным коэффициентом магнитной проницаемости; П и Р – для аппаратуры проводной связи или радиоаппаратуры. Числовые значения указывают ориентировочно величину начальной магнитной проницаемости.

Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа. Карбонильное железо может быть получено в виде порошка с частицами сферической формы диаметром несколько микрометров (см. пункт 4.4.1). Размер частиц зависит от условий термического разложения *пентакарбонила железа* и увеличивается с ростом температуры.

Маркировка магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа также буквенно-цифровая: Р-10, Р-20, Р100, Р-100Ф (Р – фосфатированный) – для катушек индуктивности радиоаппаратуры; Пс – для катушек индуктивности проводной аппаратуры и радиоаппаратуры. Числовые значения указывают на максимально допустимую рабочую частоту в мегагерцах.

Магнитодиэлектрики на основе молибденового пермаллоя имеют наибольшую начальную магнитную проницаемость (до 200...250), более высокую стабильность и меньшие потери на гистерезис и вихревые токи (при равных значениях проницаемости), чем рассмотренные выше. Пермаллои обычных химических составов весьма пластичны, поэтому для придания сплаву хрупкости (что необходимо при измельчении в порошок) в процессе выплавки вводят небольшое количество серы. Сплав марки 80Н2М, предназначенный для изготовления магнитодиэлектрика, имеет следующий химический состав: 81% Ni; 2,6% Mo; 16,4% Fe; 0,02% S. Путем подбора режимов горячей и холодной деформаций отливок обеспечивают рекристаллизацию с образованием определенной структуры зерен. В процессе помола стремятся сохранить форму и размеры зерен, покрытых тончайшей пленкой сульфидов и окисульфидов металлов. Высокодисперсный порошок (десятки микрометров) подвергают термообработке в вакууме, смешивают с изоляцией (на первой стадии – с водным раствором хромового ангидрида; на второй – с водным раствором смеси гидрата оксида магния, жидкого стекла и талька) и прессуют изделия при удельном давлении до $2 \cdot 10^3$ МПа. В заключение производят термообработку в вакууме для снятия внутренних напряжений.

4.5 Ферриты

4.5.1 Общие сведения

Ферриты – это полупроводниковые магнитные материалы, представляющие собой твердые растворы сложных окислов железа с добавлением в кристаллическую решетку атомов двухвалентных металлов. Они, как правило, имеют составную структуру. Например: марганцево-цинковые (МЦ), никель-цинковые (НЦ), медно-цинковые, свинцово-никелевые и т.д. Ферриты относятся к ферримагнитным материалам (см. таблицу 4.1).

Благодаря невысокой стоимости и относительной простоте технологии изготовления, ферриты, наряду с магнитодиэлектриками, занимают ведущее место среди высокочастотных магнитных материалов. Наиболее широкое применение в РЭС получили марганцево-цинковые ($MnFe_2O_4 + ZnFe_2O_4$) и никель-цинковые ($NiFe_2O_4 + ZnFe_2O_4$) поликристаллические ферриты. Разнообразие марок МЦ- и НЦ-ферритов определяется, главным образом, соотношением основных компонентов, наличием легирующих присадок и режимов синтеза. В качестве примера на рисунке 4.8 приведены зависимости индукции насыщения B_S и температуры Кюри T_K от состава твердых растворов для никель-цинкового феррита. Из рисунка видно, что для ферритов существует оптимальное соотношение компонентов – около 40:60 %. Следует отметить, что ферриты являются твердыми и хрупкими керамическими материалами. Их механическая обработка затруднена.

4.5.2 Магнитные свойства ферритов

Магнитные свойства ферритов описываются, как и все магнитные материалы, характеристикой намагничивания и целым рядом параметров. В качестве основных параметров следует выделить: **начальную магнитную проницаемость μ_H** , **тангенс угла магнитных потерь $tg\delta$** , **относительный тангенс угла потерь $tg\delta/\mu_H$** , **критическую f_{KP} или граничную $f_{ГР}$ частоты**. Под f_{KP} понимают такую частоту, при которой $tg\delta$ достигает значения 0,1, а за $f_{ГР}$ принимают такую частоту, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от ее значения в постоянном или низкочастотном магнитном поле. Как правило, $f_{KP} < f_{ГР}$, но с практической точки зрения эти два параметра близки (одного порядка) и оба могут быть названы **предельной частотой**. Относительный тангенс угла потерь $tg\delta/\mu_H$ является удобной характеристикой при сравнительной оценке качества магнитомягких ферритов при заданных значениях напряженности H и частоты f .

Сравнение магнитных свойств ферритов, имеющих одинаковую начальную магнитную проницаемость показывает, что в области частот до 1 МГц марганцево-цинковые ферриты имеют существенно меньший относительный тангенс угла потерь, чем никель-цинковые ферриты. Это объясняется очень малыми потерями на гистерезис у марганцево-цинковых ферритов в слабых полях. Дополнительным преимуществом высокопроницаемых марганцево-цинковых ферритов является повышенная индукция насыщения B_S и более высокая температура Кюри T_K . В то же время никель-цинковые ферриты обладают более высоким удельным сопро-

тивлением и лучшими частотными свойствами (большими предельными частотами). Как правило, чем больше начальное значение магнитной проницаемости μ_H , тем ниже предельные частоты (f_{KP} и $f_{ГР}$) и тем выше значения $tg\delta$.

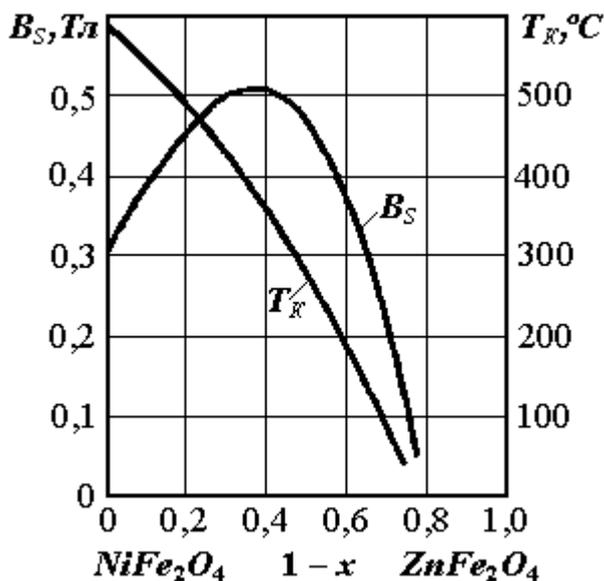


Рисунок 4.8 – Зависимости индукции насыщения B_S и температуры Кюри T_K от состава твердых растворов $NiFe_2O_4$ и $ZnFe_2O_4$

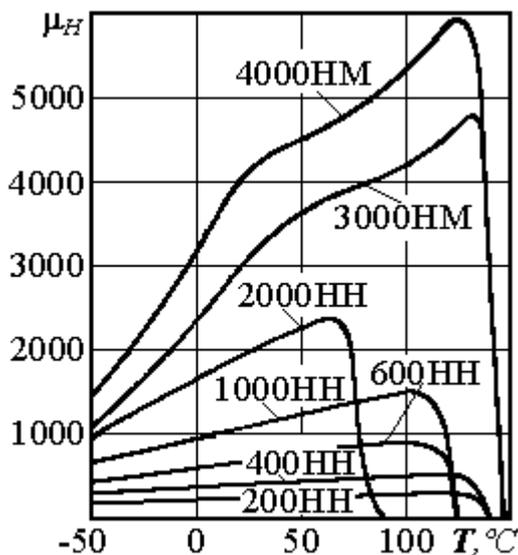


Рисунок 4.9 – Зависимости начальной магнитной проницаемости от температуры для марганцево-цинковых и никель-цинковых ферритов

Для ферритов, используемых в контурных катушках индуктивности, важнейшей характеристикой является зависимость μ_H от температуры. Соответственно, важнейшим параметром является **температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости $TK\mu_H$** . Зависимость начальной магнитной проницаемости некоторых ферритов от температуры приведена на рисунке 4.9.

Как видно из представленных здесь кривых, температурная стабильность магнитных свойств марганцево-цинковых и никель-цинковых ферритов плохая. Значение μ_H повышается с ростом температуры до точки Кюри и затем резко падает. Для уменьшения $TK\mu_H$ используют технологические и конструктивные методы. Технологический метод состоит во введении небольших добавок некоторых веществ (например, CoO), что благоприятно действует на температурные свойства ферритов. Конструктивный метод заключается в создании в магнитной цепи воздушного зазора. При этом суммарный температурный коэффициент всей цепи уменьшается, но это сопровождается также падением магнитной проницаемости.

Наряду с $TK\mu_H$ для характеристики термостабильности ферритов пользуются **относительным температурным коэффициентом начальной магнитной проницаемости $\alpha_{\mu} = (TK\mu_H) / \mu_H$** . В первом приближении можно считать, что α_{μ} и μ уменьшаются пропорционально друг другу.

К недостаткам ферритов (по отношению к ферромагнетикам) следует отнести не только температурную, но и **временную нестабильность** магнитных свойств (**старение**), которая характеризуется **коэффициентом начальной временной нестабильности K_t** магнитной проницаемости или другой величины. Обычно он дается для заданного промежутка времени.

Ферриты характеризуются большой зависимостью *реверсивной магнитной проницаемости* μ_r (см. пункт 4.2.2) от напряженности подмагничивающего поля H_0 . Как правило, зависимость $\mu_r(H_0)$ монотонно убывающая (рисунок 4.10, а). Это свойство ферритов используется в схемах дистанционной настройки колебательных контуров, реализованных на катушках индуктивности с сердечниками из ферритов. При этом на сердечник мотается дополнительная (управляющая) обмотка для изменения подмагничивания H_0 .

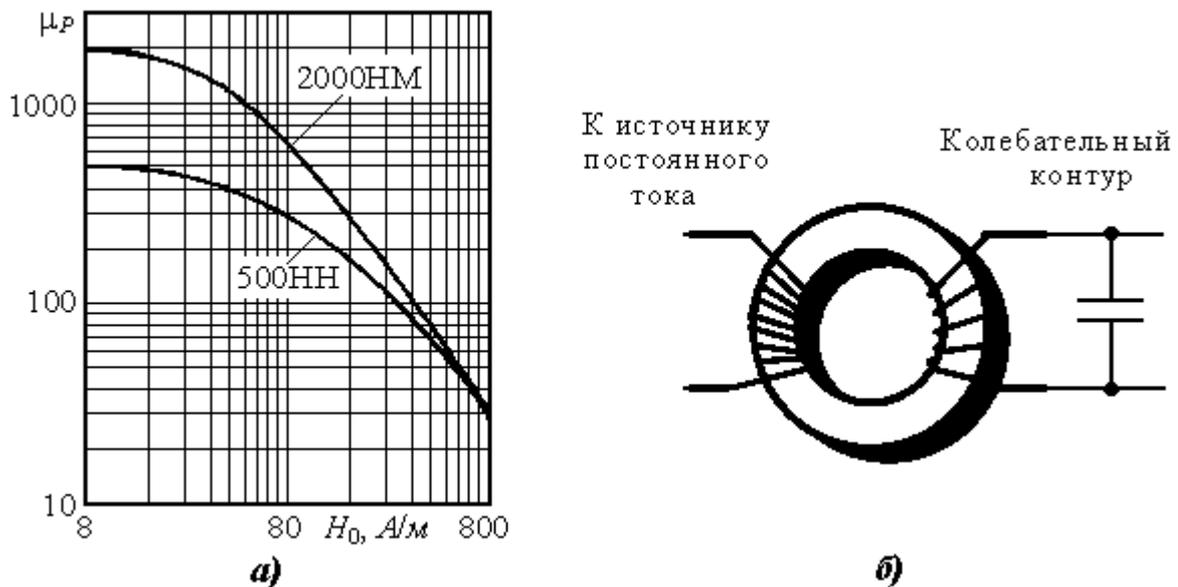


Рисунок 4.10 – Зависимость реверсивной магнитной проницаемости МЦ- и НЦ-ферритов от напряженности подмагничивающего поля H_0 и схема реализации дистанционного управления колебательным контуром

4.5.3 Электрические свойства ферритов

По электрическим свойствам ферриты относятся к классу *полупроводников*. Более того, они ближе к диэлектрикам, нежели к проводникам. Так в области высоких частот (ферриты относятся к высокочастотным материалам) *электрические потери* на вихревые токи в ферритах в большей степени определяются не электропроводностью, а *электрической поляризацией*. Поляризация носит электронно-релаксационный характер и обусловлена процессами *электронного обмена* между ионами переменной валентности, в частности, между ионами железа, которые могут быть двух- и трехвалентными. При повышении температуры увеличивается вероятность перескока электронов между ионами переменной валентности по *термоактивационному закону*. Среди многих факторов, влияющих на эффективное электрическое сопротивление ферритов (с учетом токов смещения), основным является концентрация в них ионов двухвалентного железа Fe^{2+} . Под влиянием теплового движения слабосвязанные электроны перескакивают от ионов железа Fe^{2+} к ионам Fe^{3+} и понижают валентность последних. У ферритов-шпинелей энергия активации электропроводности обычно лежит в пределах от 0,1 до 0,5 эВ. Наибольшей концентрацией ионов двухвалентного железа и, соответственно, наименьшим удельным сопротивлением обладает *магнетит* Fe_3O_4 (феррит желе-

за), у которого $\rho = 5 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В то же время в *феррогранатах* концентрация ионов Fe^{2+} мала, что обуславливает повышение удельного сопротивления их до $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Для ферритов характерна относительно большая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_{СТ} > 10^2 \dots 10^3$), которая зависит от частоты и состава материала. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает. Наиболее высокое значение ϵ присуще марганцево-цинковым ферритам, у которых она достигает тысяч единиц.

4.5.4 Маркировка магнитомягких НЧ- и ВЧ-ферритов

Маркировка магнитомягких ферритов буквенно-цифровая и в большинстве случаев состоит из трех и более позиций (см. таблицу 4.4).

Для ферритов общего применения и некоторых марок специального назначения первая позиция – численное значение магнитной проницаемости для ферритов общего применения – начальной, а для ферритов специального назначения – соответствующая основной характеристике, указывающей на специальные свойства (см. таблицу 4.4).

Вторая позиция буквенная, в которой:

- первая буква определяет рабочий частотный диапазон: "Н" – низкочастотный диапазон, соответствует значениям $f_{КР} < 50 \text{ МГц}$; "В" – высокочастотный – $f_{КР} > 50 \text{ МГц}$;
- вторая буква отражает состав материала: "М" – марганцево-цинковый; "Н" – никель-цинковый феррит и др.;
- третья буква характеризует специальные свойства феррита: "И" – импульсный; "П" – с подмагничиванием; "С" – термостабильный; "Т" – механически твердый (для магнитных головок) и пр.;
- другие буквенные обозначения, например, "А"- анизотропный (текстурированный) и т.д.

Для некоторых ферритов специального назначения приняты другие типы маркировок. Числа, стоящие в первой позиции могут означать величины, связанные с рабочей характеристикой этих ферритов.

4.5.5 Применение ферритов

Из магнитомягких ферритов изготавливаются: сердечники для импульсных и согласующих трансформаторов, высокочастотных катушек индуктивности, дросселей и магнитных антенн; статоры и роторы высокочастотных микродвигателей; детали отклоняющих систем телевизионной аппаратуры и другие радиокомпоненты. Все они используются в высокочастотных и импульсных магнитных полях. В постоянных полях и полях промышленной частоты магнитомягкие ферриты практически не находят применения.

Наиболее широкое применение в радиоэлектронике получили изделия из марганцево-цинковых и никель-цинковых ферритов. По назначению и области

применения они делятся на 11 групп, общие сведения о которых приведены в таблице 4.4.

В устройствах ВЧ- и СВЧ-диапазона используются также литиево-цинковые и свинцово-никелевые ферриты.

Таблица 4.4 – Группы и марки магнитомягких ферритов

Номер группы	Наименование группы	Марка ферритов	
		никель-цинковых	марганцево-цинковых
I	Общего применения	100НН, 400НН, 400НН1, 600НН, 1000НН, 2000НН	1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ
II	Термостабильные	7ВН, 20ВН, 30ВН, 50ВН, 100ВН, 150ВН,	700НМ, 1000НМ3, 1500НМ1, 1500НМ3, 2000НМ1, 2000НМ3
III	Высокопроницаемые	—	4000НМ, 6000НМ, 6000НМ1, 10000НМ, 20000НМ
IV	Для телевизионной техники	—	2500НМС1, 3000НМС
V	Для импульсных трансформаторов	300ННИ, 300ННИ1, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ, 1100ННИ	1100НМИ
VI	Для перестраиваемых контуров	10ВНП, 35..., 55..., 60..., 65..., 90..., 150..., 200..., 300ВНП	—
VII	Для широкополосных трансформаторов	50ВНС, 90ВНС, 200ВНС, 300ВНС	—
VIII	Для магнитных головок	500НТ, 500НТ1, 1000НТ, 1000НТ1, 2000НТ	500МТ, 1000МТ, 2000МТ, 5000МТ
IX	Для датчиков температуры	800НН, 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3	—
X	Для магнитного экранирования	200ВНРП, 800ВНРП	—
XI	Для устройств, работающих на основе ядерного спинового эффекта	1,5СЧИ, 3СЧИ	—

Ферриты по сравнению с металлическими магнитными материалами обладают низкой индукцией насыщения (в силу частичной компенсации магнитных моментов и их "разреженности" в матрице оксида), поэтому в сильных полях приме-

нять их не выгодно. Однако в переменных полях высокой частоты ферриты благодаря отсутствию размагничивающего действия вихревых токов могут иметь более высокую индукцию, чем металлические материалы. Магнитомягкие ферриты с начальной магнитной проницаемостью 400—20000 в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые ферромагнитные материалы – пермаллой и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у ферритов меньше индукция насыщения.

Некоторые наиболее распространенные изделия из ферритов показаны на рисунке 4.11. Ферритовые магнитопроводы выполняются либо монолитными (кольцевые, цилиндрические, трубчатые сердечники), либо составными, как правило, из двух хорошо отшлифованных друг к другу частей (например, броневые Ш-образные, броневые чашечные, стержневые П-образные и др. типы сердечников). Составные магнитопроводы предпочтительнее, так как в этом случае катушка выполняется отдельно на каркасе и потом вставляется в сердечник. Цилиндрические магнитопроводы (гладкие, нарезные, трубчатые) используются для создания магнитных антенн или в качестве подстроечников в контурных катушках индуктивности или в броневых чашечных сердечниках (рисунок 4.11, б). Перемещением подстроечника можно регулировать магнитную проницаемость и добротность магнитопровода и, соответственно, индуктивность и добротность катушки.

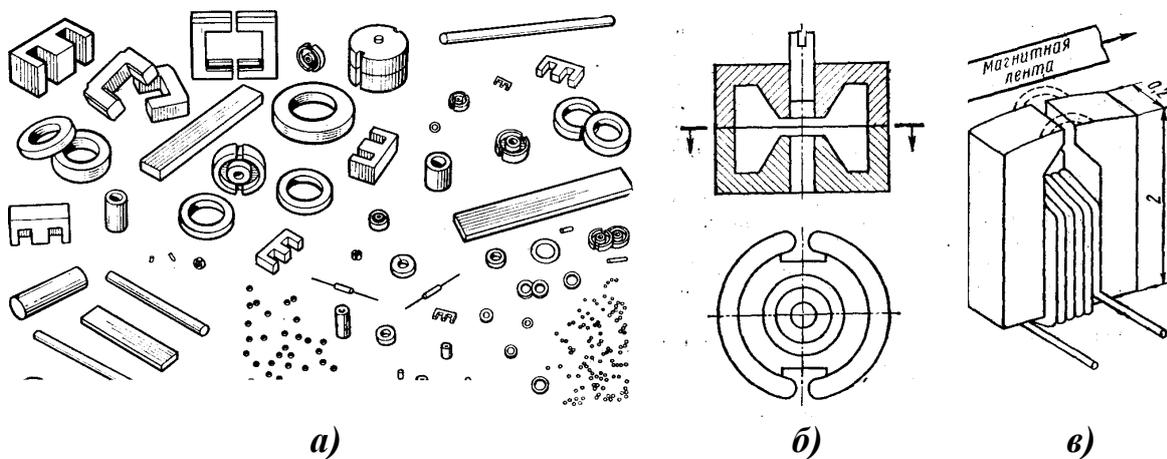


Рисунок 4.11 – Изделия из ферритов (а), в том числе, броневой сердечник (б) и магнитная головка (в)

Монокристаллы магнитомягких ферритов находят довольно широкое применение при изготовлении магнитных головок записи и воспроизведения звуковых и видео сигналов в магнитофонах. Ферритовые головки, по сравнению с металлическими, обладают высоким удельным сопротивлением, что важно для уменьшения потерь, и большей твердостью, что обеспечивает повышенную износостойчивость головки. Конструкция головки для магнитной записи показана на рисунке 4.11, в. Сердечник головки состоит из двух половин, склеенных стеклом, между которыми создается рабочий зазор 0,5...0,7 мкм. Такие сердечники изготавливают из монокристаллов марганцево-цинковых или никель-цинковых ферритов, выращиваемых газопламенным методом (см. группу VIII в таблице 4.4).

4.6 Магнитотвердые материалы

4.6.1 Общие сведения

Магнитотвердые материалы отличаются от магнитомягких высокой коэрцитивной силой H_C и остаточной индукцией $B_r - H_C > 4 \text{ кА/м}$, $B_r > 0,1 \text{ Тл}$ (см. рисунок 4.1). Им соответствует широкая петля гистерезиса, т.е. они с большим трудом намагничиваются. Будучи намагничеными, магнитотвердые материалы могут долго сохранять магнитную энергию и служить источниками постоянного магнитного поля. Поэтому их применяют преимущественно для изготовления постоянных магнитов. Кроме того, магнитотвердые материалы используются в устройствах для записи и длительного хранения информации (звука, изображения и т.п.).

4.6.2 Классификация, основные свойства и области применения

Магнитотвердые материалы классифицируют по основному способу получения. В соответствии с этим их можно разделить на следующие группы: литейные сплавы, порошковые и прочие магнитотвердые материалы.

1) Литейные сплавы изготавливаются на основе железа, никеля, алюминия и кобальта (Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Al-Co). Для улучшения определенных свойств сплавы легируются медью, титаном, ниобием и некоторыми другими элементами.

2) Порошковые магнитотвердые материалы получают из порошков. Изделия из них, преимущественно постоянные магниты, изготавливают прессованием с последующей термообработкой. В свою очередь порошковые материалы подразделяются на *металлокерамические*, *металлопластические*, *оксидные* и *микropорошковые*.

- **Металлокерамические** материалы получают из металлических порошков путем прессования и спекания при высокой температуре без связывающего материала. По магнитным свойствам они лишь немного уступают литым магнитам, но дороже последних.

- **Металлопластические** материалы изготавливаются также из порошков, но прессуются вместе с изолирующей связкой и подвергаются нагреву до высокой температуры, необходимой для полимеризации связующего вещества. Они обладают большим электрическим сопротивлением, малым удельным весом и относительно дешевы, но имеют пониженные магнитные свойства по сравнению с литыми сплавами.

- **Оксидные** магнитотвердые материалы изготавливают на основе феррита бария, феррита кобальта и из *микropорошков* (из железа или на основе марганец-висмут-интерметаллического соединения). Они обладают большой коэрцитивной силой, имеют большое удельное электрическое сопротивление. Основным недостатком – существенная зависимость свойств от температуры.

3) Прочие магнитотвердые материалы.

- **Мартенситные стали.** Мартенситная структура получается посредством закалки стали – нагрева до температуры, при которой сталь представляет собой раствор углерода в железе, и последующего резкого охлаждения в воде или масле. При мартенситной структуре кристаллы железа резко искажаются – стягиваются по длине, создаются большие внутренние напряжения решетки, что вызывает большие значения коэрцитивной силы. Мартенситные стали начали применять раньше всех других материалов для постоянных магнитов. В настоящее время их используют сравнительно мало ввиду низких магнитных свойств. Однако полностью от них еще не отказываются, потому что они недороги и допускают механическую обработку на металлорежущих станках.

- **Пластически деформируемые сплавы.** Эти сплавы обладают высокими в отношении механической обработки свойствами. Они хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на всех металлорежущих станках. Из пластически деформируемых сплавов можно изготовить ленты, пластины, листы, проволоку. Марок пластически деформируемых сплавов много, и физические процессы, благодаря которым они имеют высокие магнитные свойства, различны. Наиболее распространены сплавы кунифе (Cu-Ni-Fe) и викаллой (Co-V). Сплавы кунифе анизотропные, намагничиваются в направлении прокатки, часто применяют в виде проволоки малых диаметров, а также штамповок. Викаллой применяют для изготовления очень мелких магнитов сложной или ажурной конфигурации и в качестве высокопрочной магнитной ленты или проволоки.

- **Сплавы на основе благородных металлов.** К ним относятся сплавы серебра с марганцем и алюминием (сильманал) и сплавы платины с железом (77,8% Pt, 22,2% Fe) или платины с кобальтом (76,7% Pt, 23,3% Co). Материалы этой группы, особенно содержащие платину, очень дороги, поэтому их применяют только для сверхминиатюрных магнитов массой в несколько миллиграммов. При изготовлении магнитов из всех сплавов этой группы широко используют металлокерамическую технологию.

- **Эластичные магниты - магнитоэласты.** Важнейшим недостатком основных групп материалов для постоянных магнитов – литых сплавов и магнитотвердых ферритов – являются их плохие механические свойства (высокая твердость и хрупкость). Применение же пластически деформируемых сплавов ограничено их высокой стоимостью. В последнее время появились магниты, в которых в качестве связующего материала используется каучук. В качестве наполнителя в эластичных магнитах используются порошки из магнитотвердых материалов, в частности, наиболее часто используется феррит бария. Изделия из магнитоэластов могут быть изготовлены любой формы, которую допускает технология резиновых изделий – в виде шнуров, трубок, ленты, листов и т.п. Такой материал легко режется ножницами, штампуются, сгибается, скручивается. Магнитоэласты нашли широкое применение в электронных средствах: в качестве листов памяти для вычислительных машин; магнитов для отклоняющих систем в телевидении; корректирующих магнитов; в герконовых поляризованных реле и др. устройствах.

- **Материалы для магнитных лент.** Под магнитными лентами понимают ленточные магнитные носители информации. Наиболее широкое распространение

получили сплошные металлические ленты из нержавеющей стали, биметаллические ленты и ленты на пластмассовой основе с порошковым рабочим слоем. Сплошные металлические ленты используют главным образом в специальных целях и при работе в широком температурном диапазоне.

Ленты на пластмассовой основе получили более широкое применение. Основное назначение носителя магнитной записи заключается в создании на поверхности воспроизводящей головки магнитного поля, напряженность которого меняется во времени (при протяжке ленты) в соответствии изменяющемуся напряжению записываемого сигнала. Свойства лент с покрытием магнитными порошками существенно зависят не только от свойств исходных материалов, но и от степени измельчения частиц, объемной плотности магнитного материала в рабочем слое, ориентации частиц при наличии у них анизотропии формы и т.д. Рабочий слой (или толщина металлической ленты) должен быть по возможности более тонким, а сама лента – гладкой и гибкой для обеспечения максимального взаимодействия (магнитного контакта) между магнитным материалом ленты и записывающей/считывающей головкой. Остаточная намагниченность материала должна быть, по возможности, более высокой. К коэрцитивной силе H_C предъявляют противоречивые требования: для уменьшения саморазмагничивания необходимо по возможности более высокое значение H_C (не менее 24 кА/м), а для облегчения процесса стирания записи желательна малая величина H_C . Требования высокой остаточной намагниченности и минимальной чувствительности к саморазмагничиванию наилучшим образом удовлетворяются при прямоугольной форме размагничивающего участка петли гистерезиса, т.е. желательна иметь максимальное значение коэффициента выпуклости. Температурные и другие изменения магнитных свойств материала ленты должны быть наименьшими.

Из других видов магнитных носителей наиболее распространены магнитные диски. Жесткий магнитный диск представляет собой отполированную до 14-го класса чистоты омедненную алюминиевую пластину, с обеих сторон покрытую ферролаком на основе $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, сплавами Ni-Co, Co-W или чистым кобальтом, наносимым гальваническим путем. Возможны и другие технологии, которые динамично внедряются. На каждую рабочую поверхность диска устанавливается по одной магнитной головке «плавающего» типа. Принцип «плавания» состоит в том, что головка находится под действием двух противоположно действующих сил, уравнивающих друг друга: силы потока воздуха, специально созданного и направленного так, что головка стремится отойти от поверхности диска, и силы пружины, прижимающей головку к поверхности диска. В результате создается рабочий зазор порядка $1 \dots 5 \text{ мкм}$. Диск приводится во вращение двигателем с постоянной скоростью, а головка с помощью специального (управляемого, шагового) двигателя может перемещаться в радиальном направлении диска, переходя с дорожки на дорожку. Преимущество магнитного накопителя на дисках по сравнению с накопителем на ленте – высокая скорость передачи и малое время выборки.

Наряду с металлическими дисками применяют гибкие диски (флорпидиски), у которых магнитотвердый материал наносится на пластмассовую основу. Накопители с гибкими дисками не требуют создания плавающих головок, что существенно упрощает конструкцию считывающего устройства. Гибкие диски от-

носителем дешево, имеют малые габаритные размеры и массу, но менее надежны, чем жесткие диски.

Кроме рассмотренных, имеются другие магнитные носители, особенно в устройствах прикладного и специального назначения: магнитные карты, карандаши, документы с магнитным слоем и др.

Контрольные вопросы

1 На какие группы делятся твердые вещества по магнитным свойствам? Каковы основные магнитные свойства материалов этих групп?

2 Какими параметрами и характеристиками оцениваются магнитные материалы?

3 Какие свойства магнитных материалов характеризует петля гистерезиса? Что такое основная кривая намагничивания?

4 Физическая сущность магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости?

5 Что понимается под начальной, нормальной и максимальной магнитной проницаемостью? Как они между собою соотносятся?

6 Что понимается под дифференциальной, средней и реверсивной магнитной проницаемостью? Как они между собою соотносятся?

7 Чем обусловлены активные потери в магнитных материалах? От чего зависят потери на гистерезис? Каков их уровень на различных частотах?

8 Чем обусловлены активные потери в магнитных материалах? От чего зависят потери на вихревые токи? Каковы пути борьбы с этими потерями?

9 Классификация магнитомягких материалов? В чем принципиальное отличие низкочастотных и высокочастотных магнитных материалов?

10 Основные свойства и области применения магнитомягких материалов на основе чистого железа?

11 Основные свойства и области применения электротехнических сталей? В чем отличие электротехнической стали от чистого железа?

12 Что понимается под холоднокатаными текстурованными сталями? В чем отличие их свойств от горячекатаных сталей?

13 Маркировка электротехнических сталей? На какие классы делятся электротехнические стали по назначению?

14 Основные свойства и области применения холоднокатаных текстурованных и горячекатаных изотропных электротехнических сталей?

15 Что понимается под пермаллоями? В чем отличие высоконикелевых и низконикелевых пермаллоев?

16 Основные свойства и области применения высоконикелевых пермаллоев, в том числе супермаллоя?

17 Основные свойства и области применения низконикелевых пермаллоев?

18 Что такое альсифер? Основные свойства и области применения альсиферов?

19 Что такое пермендюр? Основные свойства и области применения низконикелевых пермендюров? Преимущества и недостатки пермендюров по сравнению с электротехническими сталями?

20 Особенности технологии изготовления аморфных магнитомягких материалов? Их основные свойства и области применения?

21 Что такое магнитодиэлектрики? Из каких материалов изготавливаются магнитодиэлектрики и какие требования к ним предъявляются?

22 Как зависит эффективная магнитная проницаемость магнитодиэлектрика от свойств его компонентов?

23 Особенности технологии изготовления магнитодиэлектриков на основе альсифера, карбонильного железа и Мо-пермаллоя?

24 Основные свойства и области применения магнитодиэлектриков? Как маркируются магнитодиэлектрики?

25 Что представляют из себя ферриты? Из каких материалов они изготавливаются и как маркируются?

26 Какими параметрами характеризуются магнитные свойства ферритов? Дать им определения.

27 Какими параметрами характеризуется стабильность ферритов? Дать оценку температурной нестабильности начальной магнитной проницаемости ферритов.

28 Какие характерные электрические свойства присущи ферритам?

29 Области применения ферритов?

5 РЕЗИСТОРЫ

5.1 Общие сведения и классификация

Резистором называют электрорадиоэлемент, предназначенный для создания в электрической цепи заданной величины активного сопротивления.

Сопротивление (R) – количественное выражение основного физического свойства резистора, величина основного параметра элемента.

Резисторы используют для формирования заданных величин токов и напряжений, в качестве элементов, вносящих определенные затухания в колебательные системы. Резисторы позволяют заменить более дорогие катушки индуктивности в фильтрах. Во многих РЭС они составляют до 30-50 % от общего числа дискретных ЭРЭ.

Приведём краткую **классификацию** по основным признакам.

а) *По назначению и исполнению* выделяются резисторы *постоянного* и *переменного* сопротивления, *нелинейные* резисторы и резисторы *для интегральных микросхем*.

Резисторы постоянного сопротивления разделяются на резисторы *общего применения* и *специального назначения* (рисунок 5.1).

Резисторы специального назначения, в свою очередь, делятся на: *прецизионные* и *высокоточные* (допуск $\delta R \leq 2\%$), *высоковольтные* ($U_H > 1$ кВ), *высокочастотные* ($f > 10$ МГц), *высокоомные* ($R_H > 1$ МОм), *микромодульные*, *теплостойкие*, *влагостойкие*, *вибропрочные* и *ударопрочные*, *высоконадёжные* и т.д.



Рисунок 5.1- Классификация резисторов по назначению и исполнению

б) *По типу резистивного элемента* резисторы постоянного и переменного сопротивления делятся на *проволочные* (из проволоки высокого сопротивления) и *непроволочные* (тонкослойные и композиционные из непроволочного материала).

Непроволочные резисторы по типу резистивного материала подразделяются на *углеродистые* и *бороуглеродистые*, *металлопленочные*, *металлоокисные* и

металлодиэлектрические, композиционные плёночные и объёмные, металлизированные.

в) К **специальным резисторам** относят резисторы, сопротивление которых существенно изменяется:

- под воздействием приложенного напряжения ($R = f(U)$) - **варисторы**;
- в зависимости от температуры резистора ($R = f(t)$) - **терморезисторы**

или **позисторы**;

- под воздействием деформации ($R = f(\delta l)$) – **тензомеры** и **тензорезисторы**;
- под воздействием напряжённости магнитного поля ($R = f(H)$) -

магниторезисторы;

- под воздействием излучения ($R = f(J)$) - **фоторезисторы**.

г) Особую группу составляют непроволочные **интегральные резисторы микросхем**:

- **ниточные**, выполняемые в виде дискретных микроминиатюрных ЭРЭ для ГИС;

- **толстопленочные**, полученные на общей подложке путём вжигания резистивных паст;

- **тонкоплёночные**, полученные путём напыления на подложку плёнок из тантала и др. металлов и сплавов;

- **полупроводниковые**, полученные путём диффузии в виде объёмов в теле полупроводниковой подложки.

5.2 Основные параметры и характеристики резисторов

5.2.1 Номинальное сопротивление и допуск

Сопротивление резистора определяется геометрическими параметрами и свойствами материала резистивного элемента

$$R = \rho \frac{l}{q}, \quad (5.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала резистивного элемента; l – длина резистивного элемента (путь тока); q – сечение резистивного элемента.

Очевидно, что величина сопротивления может быть изменена любой из трёх величин, т.е. подбором материала (ρ) или изменением габаритных размеров резистивного элемента (l и q).

Для выбора номинальных значений параметров сопротивлений используются ряды предпочтительных чисел (РПЧ), установленные международной электротехнической комиссией и государственными стандартами (ГОСТ 2825-67, 10318-74, 9664-74). Эти ряды обозначаются буквой E с номером ряда n и представляют собой геометрическую прогрессию со знаменателем прогрессии $g_n = \sqrt[n]{10}$, где номер ряда n указывает количество элементов в данном ряду. В таблице 5.1 приведены основные параметры шести рядов.

Таблица 5.1 - Ряды основных параметров стандартных резисторов

Наименование ряда	E6	E12	E24	E48	E96	E192
Количество резисторов в ряду (в декаде) – n	6	12	24	48	96	192
Значение коэффициента g_n	1,47	1,21	1,1	1,05	1,025	1,012
Допустимые отклонения сопротивления от номинала, %	± 20	± 10	± 5	± 2	± 1	$\pm 0,5$
Класс точности	III	II	I	Прецизионные		

Основными, наиболее широко употребляемыми в РЭА, являются первые три ряда – E6, E12, E24. Последние три ряда относятся к прецизионным резисторам. Для специальных высокоточных резисторов установлены более жёсткие допуски: $\pm 0,2$; $0,1$; $0,05$; $0,02$; $0,01$ %. С другой стороны для резисторов переменного сопротивления допускаются отклонения до ± 30 %. В таблице 5.2. приведены номинальные значения параметров для первых трех рядов, рассчитанные по данным таблицы 5.1.

Таблица 5.2 - Ряды номинальных значений параметров для различных допусков резисторов и конденсаторов

Индекс ряда	Номинальные значения параметров, умноженные на $10^{\pm k}$, где $k=1,2,3\dots$						Допуск на параметр
E6	1.0	1.5	5.2	3.3	4.7	6.8	$\pm 20\%$
E12	1.0 1.2	1.5 1.8	5.2 5.7	3.3 3.9	4.7 5.6	6.8 8.2	$\pm 10\%$
E24	1.0 1.1 1.2 1.3	1.5 1.6 1.8 5.0	5.2 5.4 5.7 3.0	3.3 3.6 3.9 4.3	4.7 5.1 5.6 6.2	6.8 7.5 8.2 9.1	$\pm 5\%$

Допуск δR – предельно допустимые отклонения от номинального значения, установленные для данной совокупности резисторов.

При массовом и серийном производстве резисторов их параметры будут случайными величинами, подчиняющимися, как правило, нормальному закону распределения. При этом *номинальное сопротивление R_N – есть среднее значение* (математическое ожидание) сопротивления из данной совокупности резисторов, а *допуск δR соответствует дисперсии σ выборки усечённого ряда – $|\delta R| \leq 3\sigma$.*

Аналогично устанавливаются номинальные значения и допуски емкости для типовых конденсаторов.

5.2.2 Номинальная мощность рассеивания

Номинальная мощность рассеивания P_N – максимально допустимая мощность, которую резистор может рассеивать при непрерывной работе в заданных условиях эксплуатации без изменения параметров ($R, \delta R$).

Тепловая мощность, выделяемая в резисторе, определяется током I и сопротивлением R :

$$P = I^2 \cdot R = U^2 / R, \quad (5.2)$$

Средний перегрев поверхности резистора τ относительно температуры окружающей среды t_C согласно уравнению Ньютона равен:

$$\tau = t_P - t_C = \frac{P}{\alpha \cdot S_{OХЛ}}, \quad (5.3)$$

где t_P – средняя температура поверхности резистора; $S_{OХЛ}$ – поверхность охлаждения резистора; α – коэффициент теплоотдачи, зависящий от многих факторов. В воздухе при естественной конвекции (отсутствии обдува) и при нормальных условиях ($t_C = 20^\circ\text{C}$; $H_B = 100 \text{ кПа}$ и относительной влажности 80 %) $\alpha_H = 15 \dots 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В технических условиях (ТУ) на резисторы указывается максимальная температура среды t_C , при которой резистор, рассеивая номинальную мощность, не перегревается сверх нормы и работает гарантированно в течение указанного срока службы. При импульсной нагрузке возможна перегрузка сверх номинальной мощности P_H без нарушения допуска параметра δR и надёжности. Однако средняя мощность P_{CP} не должна превышать P_H . Отношение $K_3 = P_{CP} / P_H \leq 1$ называется *коэффициентом загрузки*.

Номинальные мощности рассеяния резисторов также стандартизованы и могут быть от 0,01 до 1000 Вт (ГОСТ 9663-75), но в РЭС наиболее часто используют резисторы с номинальными мощностями от 0,05 до 2 Вт, условные обозначения которых в схемах приведены на рисунке 5.5.

5.2.3 Электрическая прочность резистора

Способность резистора работать при определенных напряжениях оценивается его *электрической прочностью*, которая характеризуется *предельным рабочим напряжением* $U_{ПР}$ и *испытательным напряжением* $U_{ИСП}$.

Предельное рабочее напряжение $U_{ПР}$ – это наибольшее напряжение, приложенное к выводам, при котором резистор должен работать в нормальных условиях в течение гарантированного срока службы без потери работоспособности. Величина предельного напряжения стандартизирована и указывается в ТУ. Наиболее употребительны $U_{ПР}$: 100, 150, 200, 250, 350, 500, 750, 1000, 1500 В и более.

Допустимое рабочее напряжение $U_{ДОП}$ зависит от условий эксплуатации, величины номинального сопротивления, требований к надёжности и т.д. Для высокоомных резисторов главным фактором является электрическая прочность. Поэтому их выбирают из условия $U_{ДОП} \leq U_{ПР}$. При этом необходимо помнить, что электрическая прочность очень сильно зависит от атмосферного давления. В этих случаях *предельно допустимое рабочее напряжение* U_m может быть определено по закону Пашена из условия отсутствия пробоя по поверхности резистора

$$U_m \leq \sqrt{p \cdot l}, \quad (5.4)$$

где U_m измеряется в В; p – давление воздуха в мм. рт. ст.; l – расстояние между выводами в см.

Для *низкоомных* резисторов определяющим является нагрев. Поэтому их следует проверять на допустимую мощность рассеивания, которая приводит к нагреву резистивных элементов до максимальной рабочей температуры

$$U_{\text{доп}} \leq \sqrt{P_H \cdot R_H}. \quad (5.5)$$

В процессе работы в РЭА неизбежны нестационарные процессы, при которых возможны перенапряжения в схемах и, в частности, на резисторах. Для отбраковки ненадежных резисторов проводят их испытания при повышенном напряжении. **Испытательное напряжение** $U_{\text{ИСП}}$ – это напряжение, которое может быть приложено к выводам резистора в течение короткого времени (секунды) без нарушения его работоспособности. Обычно $U_{\text{ИСП}} = (1,5 \dots 2) \cdot U_{\text{пр}}$.

5.2.4 Стабильность

На величину электрического сопротивления резисторов существенно влияют температура окружающей среды, режим отвода тепла от резистора в окружающую среду, геометрические и размерные характеристики резистивного слоя, характер протекания в них тока, влажность воздуха, механические напряжения, процессы старения, и другие факторы. Изменение сопротивления резистора R под влиянием температуры, влажности, времени (внешних факторов) и под влиянием физико-химических процессов в проводящем слое, в контактах и т.п. (внутренних факторов) характеризует его **стабильность**. Различают обратимые и необратимые процессы.

Обратимые изменения сопротивления под воздействием температуры характеризуются **температурным коэффициентом изменения сопротивления (ТКС)** – α_R .

Фактическое сопротивление резистора при рабочей температуре t определяется формулой

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_R (t - t_0)], \quad (5.6)$$

где R_0 - сопротивление резистора при температуре t_0 ;

$$\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{(t - t_0)R_0} = \frac{\Delta R}{\Delta t \cdot R_0}. \quad (5.7)$$

Обычно $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, тогда $R_0 = R_{20}$.

Обратимые изменения сопротивления под влиянием нагрузки в непроволочных резисторах оценивается **коэффициентом нагрузки**, т.е. относительным изменением сопротивления, вызванным изменением нагрузки (неравномерность нагрева, изменение сопротивления между проводящими микрочастицами и т.д.)

Необратимые изменения сопротивления (старение) могут быть вызваны воздействием температуры (например, старение токопроводящих элементов в непроволочном резисторе), воздействием влаги (из-за гигроскопичности проводящего слоя) и др. факторами. Под влиянием влажности воздуха непроволочные резисторы могут менять свое сопротивление до нескольких процентов, а проволочные – практически не меняют.

Старение резисторов, то есть изменение сопротивления во времени, оценивается **коэффициентом старения** β_R

$$\beta_R = \frac{dR}{d\tau} \cdot \frac{1}{R_0}, \quad (5.8)$$

где τ – время; R_0 – величина сопротивления резистора после изготовления при температуре $t = 20$ °С. У тонкопленочных резисторов $\beta_R = 1 \dots 2$ % за первый год и $3 \dots 5$ % за последующие годы, а у композиционных резисторов с органическим связующим материалом в $2 \dots 3$ раза больше.

Относительное изменение сопротивления после пребывания в течение определённого времени в условиях *повышенной влажности* называется **коэффициентом влажостойкости**. У непроволочных резисторов он обычно равен $1 \dots 3$ %.

В ТУ обычно указываются: *коэффициент сохранности* $\alpha_{СОХР}$ (для конца срока службы), *коэффициент теплостойкости* $\alpha_{ТЕПЛ}$ (после определённого теплового воздействия), *коэффициент старения* $\beta_{R,СТ}$ (после совместного действия температуры и нагрузки в течение 1000 или 10000 часов).

5.2.5 Собственные шумы

Собственные шумы резисторов – это изменяющееся случайным образом ЭДС, возникающее на выводах резистора вследствие флуктуации объёмной концентрации носителей заряда и флуктуации сопротивления резистивного элемента протекающему току. Они влияют на пороговую чувствительность РЭС.

Величина собственных шумов резисторов оценивается **ЭДС шумов** $E_{Ш}$ или **уровнем шумов** – это отношение действующего значения напряжения шума $U_{Ш}$ (мкВ) к величине приложенного к резистору постоянного напряжения U_0 (В):

$$E_{Ш} = \frac{U_{Ш}}{U_0} \left[\frac{\text{мкВ}}{\text{В}} \right]. \quad (5.9)$$

Различают шумы *тепловые* и *токовые*.

Тепловой шум обусловлен неупорядоченным тепловым движением электронов в резистивном элементе. Он практически не зависит от материала проводника и имеет практически равномерный спектр. Действующее значение напряжения теплового шума определяется уравнением Найквиста [12]:

$$U_{Ш.ТЕП} \approx \sqrt{4\pi \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}, \quad (5.10)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура (К), R – величина сопротивления, Δf – полоса частот, в которой определяется $U_{Ш.ТЕП}$.

Очевидно, что при увеличении диапазона частот тепловые шумы растут.

Токовые шумы присущи только непроволочным резисторам и обусловлены *дискретной неоднородностью структуры токопроводящего элемента*, что приводит к местным нагревам, нарушениям контактов между одними частицами и появлению его между другими в результате спекания. Как следствие этих процессов – флуктуации сопротивления и напряжения на выводах резистора на фоне постоянного приложенного напряжения.

Уровень токовых шумов $U_{Ш.ТОК}$ уменьшается с увеличением длины резистора и с уменьшением размеров зерен проводящего материала. С ростом полосы

рабочих частот токовые шумы вначале увеличиваются, а затем достигают насыщения и не меняются [12].

В первом приближении напряжение токового шума в заданной полосе частот описывается формулой

$$U_{Ш.ТОК} = k_1 U, \quad (5.11)$$

где U – напряжение на резисторе, а k_1 – коэффициент, зависящий от конструкции резистора, свойств резистивного слоя и полосы частот, в которой определяется шум. Коэффициент k_1 прямо пропорционален \sqrt{R} [12], тогда

$$E_{Ш.ТОК} = U_{Ш.ТОК} / U \approx \sqrt{R_0}, \text{ мкВ/В}, \quad (5.12)$$

где R_0 в килоомах.

Интенсивность токовых шумов сильно зависит от величины тока, увеличивается с увеличением тока. Частотный спектр токовых шумов – непрерывный с уменьшением интенсивности в области высоких частот.

Принято определять уровень шума резисторов $E_{Ш}$ в полосе частот $\Delta f = 50 \dots 5000 \text{ Гц}$. При этом резисторы разделяют на две группы: **A** – $E_{Ш} \leq 1 \text{ мкВ/В}$ и **B** – $E_{Ш} \leq 5 \text{ мкВ/В}$.

Наименьшие шумы у бороуглеродистых резисторов и у резисторов на основе тонких легированных пленок двуокиси олова ($E_{Ш} < 0,1 \text{ мкВ/В}$). Анализ показывает, что для *непроволочных резисторов* при малых напряжениях U преобладают тепловые шумы, а при больших – токовые. Чем больше размер зерен резистивной пленки *непроволочных резисторов*, тем больше шумы при больших напряжениях. Но обычно **токовые шумы гораздо интенсивнее тепловых**, а следовательно, **уровень собственных шумов непроволочных резисторов существенно выше, чем у проволочных**.

В резисторах переменного сопротивления преобладают **шумы переходных контактов**, обусловленные флуктуациями переходного сопротивления скользящего контакта, т.е. **уровень шумов переменных резисторов значительно выше, чем у резисторов постоянного сопротивления**.

5.2.6 Частотные свойства резисторов

В области высоких частот необходимо учитывать **частотные свойства резисторов**, определяемые паразитными реактивными параметрами. Полное сопротивление резистора переменному току зависит от частоты, в основном, из-за наличия индуктивности и емкости, распределенных по длине резистора, из-за поверхностного эффекта и из-за диэлектрических потерь в каркасе и в покрытиях.

Известны различные эквивалентные схемы замещения резисторов. На рисунке 5.2 приведена одна из эквивалентных схем замещения резистора *постоянного сопротивления* в области высоких частот, где R_R – сопротивление резистивного элемента; R_B – сопротивление выводов (и монтажа); L_R – эквивалентная паразитная индуктивность резистора и выводов; C_R – эквивалентная ёмкость резистивного элемента; $R_{ИЗ}$ – сопротивление изоляции; C_{B1}, C_{B2} – ёмкость выводов.

Так как $R_{ИЗ} \gg R_R \gg R_B$, то в высокоомных резисторах не учитывается сопротивление выводов R_B , а в низкоомных резисторах не учитывается $R_{ИЗ}$. Для низкоомных резисторов ($R < 300 \text{ Ом}$) в эквивалентной схеме можно не учитывать

распределенную емкость, а распределенную индуктивность включать последовательно с резистором. Для резисторов с $R > 300 \text{ Ом}$ предлагается не учитывать распределенную индуктивность, а учитывать только распределенную емкость, включенную параллельно резистору.

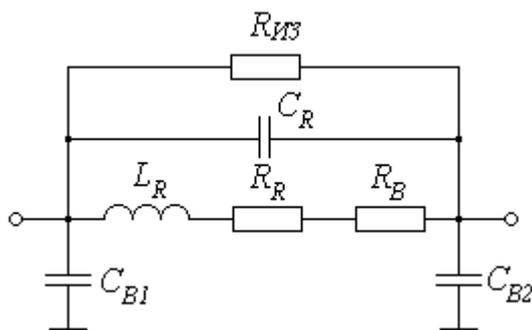


Рисунок 5.2 – Схема замещения резистора в области высоких частот

Наибольшая частота f_m , ниже которой активная составляющая сопротивления резистора равна с точностью до 0,5 % сопротивлению R на постоянном токе, определяется выражением

$$f_m \approx 3,5 \cdot R / l, \quad (5.13)$$

где l – длина резистора в см, сопротивление R в Ом, а частота f_m в МГц.

Емкость выводов учитывается лишь в области высоких частот. Наименьшими L_R и C_R обладают композиционные объёмные резисторы ($C_R \approx 0,1 \text{ нФ}$). Наибольшие паразитные параметры (индуктивность и емкости) имеют проволочные резисторы.

Для резисторов *переменного сопротивления* в эквивалентной схеме замещения дополнительно учитывают паразитные параметры переходного контакта.

5.2.7 Надежность резисторов

Надежность резисторов можно характеризовать интенсивностью отказов λ_0 при нормальных (лабораторных) условиях эксплуатации при номинальной мощности рассеивания. В этом случае для различных типов резисторов постоянного сопротивления $\lambda_0 \approx (2 \dots 4) \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$. Для резисторов переменного сопротивления интенсивность отказов, как правило, на 1-2 порядка выше.

5.2.8 Специфические параметры и характеристики резисторов переменного сопротивления

Рассмотренные выше параметры присущи резисторам как постоянного, так и переменного сопротивления. Кроме того, переменные резисторы характеризуются еще рядом специфических параметров и функциональной характеристикой.

Под **функциональной характеристикой** резисторов переменного сопротивления понимается зависимость величины сопротивления R между подвижным и одним из неподвижных контактов от угла поворота оси подвижной системы φ . По виду функциональной характеристики резисторы переменного сопротивления делятся на *линейные* – типа *А*, *логарифмические* – типа *Б* и *обратнолога-*

рифмические – типа **В** (рисунок 5.3).

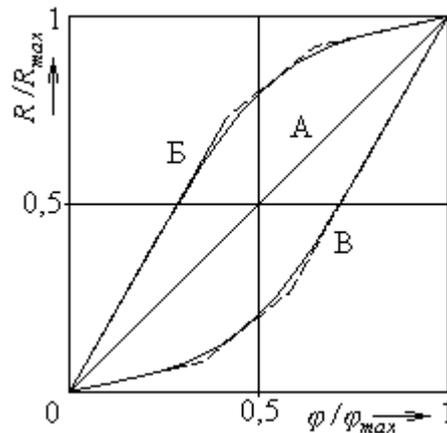


Рисунок 5.3 – Функциональные характеристики переменных резисторов

Функциональные характеристики можно представить в следующем виде.

Для *линейных резисторов*

$$R = r_0 + r\varphi. \quad (5.14)$$

Для *логарифмических*

$$R = r_0 e^{K\varphi}. \quad (5.15)$$

Для *обратнологарифмических*

$$R = R_{max}(1 - e^{-K\varphi}). \quad (5.16)$$

Здесь r_0 – начальное сопротивление, r – коэффициент, имеющий размерность сопротивления; φ – угол поворота оси подвижной системы; K – постоянная, R_{max} – максимальное значение сопротивления.

На рисунке 5.3 рассмотренные выше зависимости изображены сплошными линиями. В реальных резисторах точную зависимость $R = f(\varphi)$ получить трудно. Обычно резистивный элемент выполняется составным из 3-4 участков, имеющих разное удельное сопротивление. Поэтому в действительности характеристики имеют вид ломаной кривой (на рисунке 5.3 – штриховые линии). Тип зависимости $R(\varphi)$ маркируется на корпусах резисторов соответствующими буквами: А, Б и В.

К специфическим параметрам переменных резисторов относятся:

- **Разрешающая способность** показывает, при каком наименьшем изменении угла поворота подвижной системы изменение сопротивления резистора может быть различимо. Для однооборотных переменных резисторов разрешающая способность лежит в пределах 0,02...0,4 %, для многооборотных – 0,001...0,2 %.

- **Начальное сопротивление r_0** – это величина сопротивления между неподвижным (левым) и средним выводами при положении движка в крайнем левом положении ($\varphi = 0$). Она зависит от номинала сопротивления и типа характеристики резистора.

- **Скачки сопротивления.** Для нелинейных резисторах типа Б и В при переходе подвижного контакта с одного линейного участка на другой возможны скачки сопротивления до 1 – 2 %). Но наибольшее значение имеют **начальные**

скачки сопротивления, которые могут достигать 1...2 % у логарифмических резисторов и до 5...10 % у линейных и обратнологарифмических.

- **Шумы вращения** (шумы переходного контакта) – шумы, возникающие в процессе вращения подвижного контакта. Их величина порядка 1 мВ/В у новых и до 100 мВ/В у изношенных резисторов. То есть, шумы вращения на 3 порядка выше, чем токовые шумы.

Для переменных резисторов принимают свою специфику номинальное сопротивление и номинальная мощность.

Под **номинальной величиной переменного сопротивления** R_H понимается величина полного сопротивления между крайними выводами. R_H нормируются обычно рядом Е6 ($\delta R = \pm 20\%$), но могут иметь и более низкие допуски – $\pm 30\%$.

Номинальная мощность рассеяния P_H указывается в ТУ для всего проводящего элемента резистора. Для резисторов массового производства $P_H = 0,125; 0,15; 0,25; 0,5; 1; 2 \text{ Вт}$. При угле поворота $\varphi < \varphi_{max}$ **допустимая мощность рассеяния** $P_{доп}$ может быть определена по приближённой формуле

$$P_{доп} = I_{доп}^2 \cdot R_{РАБ} \leq I_H^2 \cdot R_{РАБ}, \quad (5.17)$$

где $R_{РАБ}$ – сопротивление рабочей части резистора, $I_{доп}$ и I_H – допустимый и номинальный токи, соответственно.

5.3 Условные и кодированные обозначения резисторов.

Их запись в конструкторских документах

Существуют несколько систем условных обозначений и кодировок резисторов. До 1968 года использовалась лишь **буквенная** система условных обозначений типов резисторов. **Наименование резистора** постоянного сопротивления обычно обозначалось тремя буквами (иногда - двумя или четырьмя), из которых:

- **первая буква** означала **вид резистивного элемента** (У – углеродистый, Б – бороуглеродистый, М – металлодиэлектрический (металлоокисный), К – композиционный, П – проволочный и т.д.);

- **вторая буква** – **вид защиты** (Л – лакированный, Г – герметизированный, Э – эмалированный, Н – незащищённый и т.д.);

- **третья буква** – **особые свойства или назначение** резистора (Т – теплоустойчивый, П – прецизионный, В – высоковольтный (влагостойкий), У – ультравысокочастотный, М – малогабаритный, И – измерительный и т.д.).

Номинал сопротивления и **допуск** указывались **цифрами**. Старые обозначения используются для резисторов, разработанных до введения новых обозначений. Большинство типов резисторов со старыми обозначениями сняты с производства и не должны применяться в новых разработках.

В 1968 г. принята **буквенно-цифровая** система обозначения в зависимости от группы и свойств резисторов (ГОСТ 13453-68).

Первый индекс - **буквенный** обозначает:

- С – резистор **постоянного** сопротивления;
- СП – резистор **переменного** сопротивления;
- СН – **нелинейный** резистор (сопротивление нелинейное - варистор);

- СТ – терморезистор (сопротивление термочувствительное);
- СФ – фоторезистор (сопротивление fotocувствительное).

Далее, для специальных резисторов типа СН, СТ и СФ в последующих индексах установлена своя специфическая система условных обозначений параметров и свойств.

Для резисторов постоянного и переменного сопротивлений (типа С и СП) в последующих индексах введена следующая система условных обозначений:

Второй индекс – числовой, указывает вид резистивного элемента:

1 – углеродистый, бороуглеродистый; 2 – металлоплёночный, металлоокисный или металлодиэлектрический; 3 – композиционный плёночный; 4 – композиционный объёмный; 5 – проволочный; 6 – тонкослойный металлизированный.

Третий индекс – числовой, указывает номер конструкторской разработки, например С5-5.

На резисторах постоянного и переменного сопротивлений *параметры* R_H и δR указываются либо непосредственно числами, либо используется буквенно-цифровая кодировка.

При кодированном обозначении используется следующая система:

- *номинал сопротивления R_H указывается двумя цифрами; размерность Ом обозначают буквой Е, килоом – буквой К, мегаом – буквой М, гигаом – буквой Г, тераом – буквой Т.* Одновременно эти буквы играют роль запятой, отделяющей целую часть в цифре номинала, от дробной. Например, К47 соответствует 0,47 кОм, 4К7 соответствует 4,7 кОм, а 47К соответствует 47 кОм.

- *допустимые отклонения, кодируются буквами.* В таблице 5.3 приведена кодировка допусков номиналов резисторов, принятых в нашей стране согласно ГОСТ 11076-69, и по международному стандарту РС 3542-75.

Таблица 5.3 - Кодировка допустимых отклонений сопротивлений резисторов от номинальных значений

<i>Допустимые отклонения, %</i>	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30
Код по ГОСТ 11076-69	<i>Ж</i>	<i>У</i>	<i>Д</i>	<i>Р</i>	<i>Л</i>	<i>И</i>	<i>С</i>	<i>В</i>	<i>Ф</i>
Код по РС 3542-75	<i>В</i>	<i>С</i>	<i>Д</i>	<i>Е</i>	<i>Г</i>	<i>И</i>	<i>К</i>	<i>М</i>	<i>Н</i>

В конструкторской документации помимо названия резистора, дается номер разработки, номинальная мощность, номинальное сопротивление, допуск на сопротивление, группа по уровню шума, номер стандарта или технических условий (ТУ). Для резисторов переменного сопротивления дополнительно указывается вид функциональной характеристики (А – линейная, Б – логарифмическая, В – обратнoлогарифмическая), конструкция конца вала, категория климатических условий.

Часть типов резисторов, разработанных после 1968 г., также снята с производства и не должна применяться в новых разработках.

С 1980 г. принята новая система обозначений.

Первый индекс - буквенный: Р – резистор постоянный; РП – резистор переменный; НР – набор резисторов.

Второй индекс – числовой: 1 – непроволочные; 2 – проволочные.

Третий индекс - цифровой - регистрационный номер конкретного типа резистора.

В настоящее время можно встретить все три системы условных обозначений (маркировки) резисторов.

Примеры записи резисторов в перечне элементов:

- Резистор С1-4-0,125-1,1 кОм $\pm 5\%$ -1-25 АПШК.434110.001ТУ – резистор постоянного сопротивления, углеродистый, номер разработки 4, $R_H = 0,125 \text{ Вт}$; $R_H = 1,1 \text{ кОм}$; допуск $\pm 5\%$, 1- первая группа по уровню шума, 25- длина выводов, обозначение документа на поставку АПШК.434110.001ТУ.

- Резистор СПЗ-37б-470 кОм $\pm 20\%$ -А-В ОЖО.468.366ТУ – резистор переменного сопротивления композиционный, пленочный; 37б - номер разработки и конструктивные особенности; $R_H = 470 \text{ кОм}$; допуск - $\pm 20\%$; А- функциональная характеристика линейная; В- всеклиматическое исполнение.

- Резистор Р1-16П-1 кОм $\pm 0,5\%$ -0,5-Д АЛЯР.434110.002ТУ – ЧИП-резистор постоянного сопротивления, непроволочный; 16- номер разработки, П- прецизионный, допуск $-0,5\%$, уровень шума $0,5 \text{ мкВ/В}$, Д- обозначение ТКС.

- Резистор РП1-33У-0,25 Вт-2,2 МОм $\pm 20\%$ А ВП-1-32 ОЖО.468.185 ТУ. Резистор переменного сопротивления, непроволочный; А - линейная характеристика, ВП-1-32 – конструкция конца вала (полый, гладкий, длина 32 мм).

- Резистор ППБ-16-Г-10 Ом, $\pm 5\%$ ОЖО.468.512 ТУ. Здесь ППБ – резистор переменный, проволочный, бескорпусной, $R_H = 16 \text{ Вт}$, вариант исполнения Г, $R_H = 10 \text{ Ом}$, допуск $\pm 5\%$.

Примеры представления конкретных типов резисторов в конструкторской документации обычно приводятся в стандартах, ТУ и справочниках.

К существенным недостаткам приведенных выше систем маркирования относится сложность визуального считывания параметров, особенно, с малогабаритных резисторов, что при серийном и массовом производстве значительно увеличивает время на электромонтаж и последующий контроль. Поэтому на малогабаритных резисторах используется также маркировка номиналов и допусков цветным кодом. При этом номинальные сопротивления резисторов в Омах выражаются двумя или тремя цифрами (в случае трех цифр последняя цифра не равна нулю), затем кодируется множитель 10^n , где n – целое число от -2 до 19. Существует три разновидности маркировки резисторов: четырехзначная (рисунок 5.4 а), пятизначная (рисунок 5.4 б) и маркировка с указанием первого знака (рисунок 5.4 в). Цветовая кодировка параметров резисторов приведена в таблице 5.4.

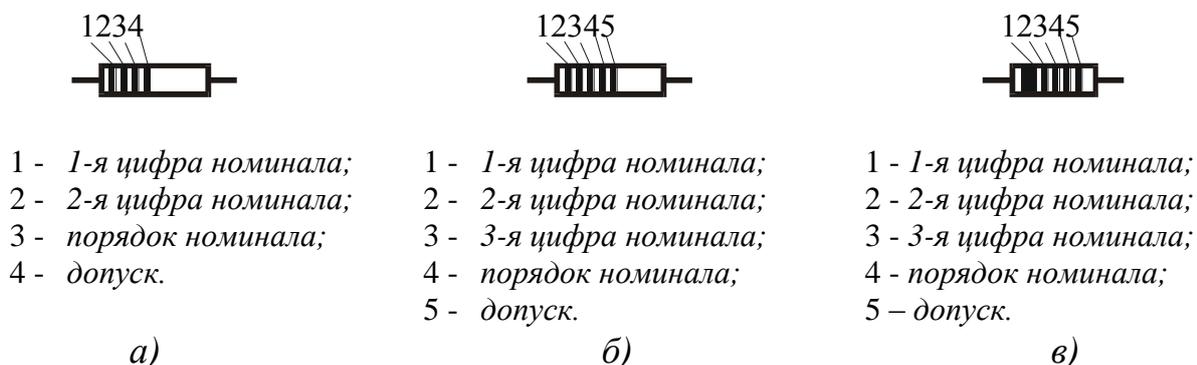
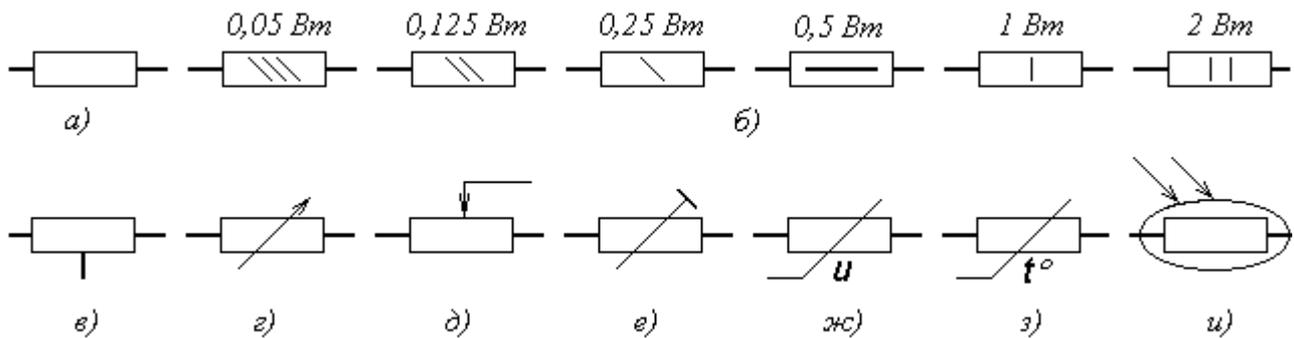


Рисунок 5.4 - Цветовая маркировка резисторов: а - четырехзначная; б - пятизначная; в - маркировка с указанием первого знака (утолщённая полоска)

Таблица 5.4 - Цвета знаков маркировки номинальных значений сопротивлений и допусков

Цвет знака	Номинал сопротивления, Ом				Допуск, %	Пример
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель		
Серебристый	-	-	-	10^{-2}	± 10	<p>47 кОм $\pm 5\%$</p> <p>Желтый --- 4 Фиолетовый --- 7 Оранжевый --- 10^3 Золотистый --- $\pm 5\%$</p>
Золотистый	-	-	-	10^{-1}	± 5	
Черный	-	0	-	1	-	
Коричневый	1	1	1	10	± 1	
Красный	2	2	2	10^2	± 2	
Оранжевый	3	3	3	10^3	-	
Желтый	4	4	4	10^4	-	
Зеленый	5	5	5	10^5	$\pm 0,5$	
Голубой	6	6	6	10^6	$\pm 0,25$	
Фиолетовый	7	7	7	10^7	$\pm 0,1$	
Серый	8	8	8	10^8	$\pm 0,05$	
Белый	9	9	9	10^9	-	

Условные обозначения резисторов в принципиальных электрических схемах приведены на рисунке 5.5.



а – нерегулируемый (общее обозначение); б – нерегулируемые с указанием (кодированием) номинальной мощности; в – нерегулируемый с отводом; г, д – переменного сопротивления; е – подстроечный; ж – нелинейный (варистор); з – нелинейный (терморезистор прямого подогрева); и – нелинейный (фоторезистор).

Рисунок 5.4 – Условные обозначения резисторов в электрических схемах

5.4 Физические процессы в резистивном материале и конструктивные элементы резисторов

В различных резистивных структурах протекание тока имеет свои особенности. В твердых телах электропроводность определяется движением электронов или "дырок" во внутренних областях тела. В тонких пленках (в предположении их целостности) следует учитывать влияние на общее сопротивление поверхностного сопротивления. В частности, с этим связывают размерный эффект – увеличение удельного сопротивления тонких пленок с уменьшением их толщины. В пленках, состоящих из участков с высокой проводимостью, изолированных друг

от друга или связанных через плохо проводящие пленки протекание тока связано со сложными процессами. Из-за отсутствия точной теории процессов электропроводности в тонких пленках резистивные свойства таких пленок определяются экспериментально. Также сложна и теория электропроводности объемных композиций, состоящих из элементов, обладающих проводимостью, разделенных тонкими диэлектрическими пленками. Проводимость в этом случае частично определяется туннелированием электронов через плохо проводящие пленки, разделяющие зерна. При относительном увеличении доли изоляционного материала туннельная проводимость исчезает и композиция приобретает свойства плохого диэлектрика.

Конструкция резистора состоит из основного – резистивного элемента и вспомогательных элементов, например, каркаса или основания, контактного слоя, контактных деталей (выводов) и защитного покрытия. Промышленностью выпускается более 100 типов резисторов, поэтому рассмотреть все их конструкции здесь не представляется возможным. Большинство постоянных резисторов выполнено на керамическом каркасе в виде цилиндра, иногда полого, на поверхности которого расположен резистивный слой в виде пленки или провода. На торцы каркаса надеваются металлические колпачки, имеющие контакт с резистивным слоем. К колпачкам привариваются металлические выводы, которые, как правило, имеют серебряное покрытие. Защитное покрытие наносится поверх резистивного слоя и колпачков. У мощных резисторов покрытие эмалевое, а у маломощных – лакокрасочное. В конструкциях переменных резисторов, помимо резистивного элемента и выводов, имеется подвижный скользящий контакт и элементы, обеспечивающие перемещение и фиксацию положения скользящего контакта. Наиболее ответственным в такой конструкции является контактный узел, состоящий из контактных пружин, контакта и резистивного слоя. Перемещение контакта по резистивному элементу осуществляется вращением механически связанной с контактом оси (например, в резисторе СПЗ-9) или линейным перемещением механически связанного с контактом ползуна (в резисторе СПЗ-23).

В многооборотных подстроечных резисторах перемещение контакта плавное за счет использования винтового механизма, преобразующего вращение оси в поступательное движение контактной щетки (резистор СП5-1), или за счет червячной передачи, преобразующей вращение оси в плавное вращение контактной щетки, закрепленной на червячном колесе, по поверхности резистивного элемента (резистор СП5-3).

5.5 Непроволочные резисторы постоянного сопротивления

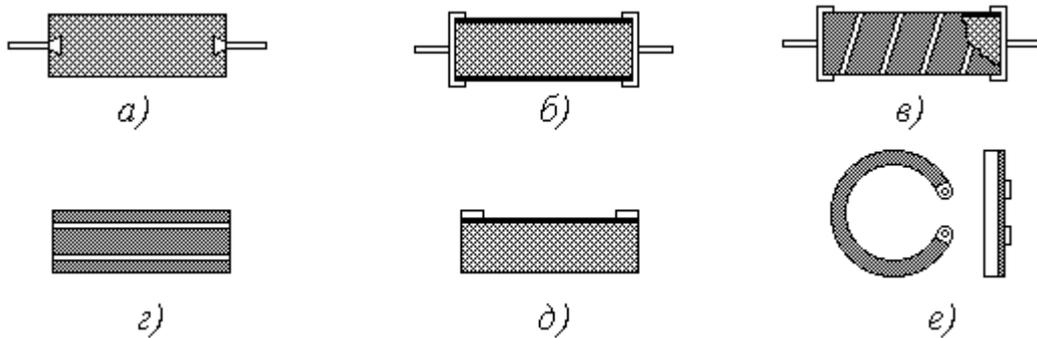
5.5.1 Конструктивные особенности непроволочных резисторов

Непроволочные резисторы получили наиболее широкое применение в современной РЭА. Они отличаются малыми габаритами, небольшими паразитными параметрами, низкой стоимостью. Основной конструктивной частью любого резистора является резистивный элемент, предназначенный для создания активного сопротивления. Преимущественное применение нашли резистивные элементы

объёмного и плёночного типов. На рисунке 5.5 приведены некоторые виды резистивных элементов непроволочных резисторов.

Для микросхем резисторы изготавливаются в виде плёнок. Иногда резистивные элементы в виде тонких плёнок наносятся непосредственно на основание платы – так называемые, печатные резисторы.

В настоящее время широкое применение получили углеродистые, бороуглеродистые, металлоплёночные, металлоокисные, металлодиэлектрические и композиционные непроволочные резисторы.



a – цилиндрический объёмный; *б* – цилиндрический с плёночным резистивным слоем; *в* – цилиндрический со спиральным плёночным слоем; *г* – цилиндрический с продольными прорезями на плёночном резистивном слое; *д* – плоский с плёночным резистивным слоем; *е* – подковообразный с плёночным резистивным слоем

Рисунок 5.5 - Типовые конструкции резистивных элементов непроволочных резисторов

5.5.2 Углеродистые и бороуглеродистые резисторы

Резистивный элемент *углеродистых резисторов* представляет слой углерода, нанесенный на диэлектрическое основание путем пиролиза (разложения при температуре 900...1000 °С без доступа кислорода) углеводородов (например, гептана – C_7H_{16}). *Достоинства таких резисторов*: низкая стоимость, высокая температурная стабильность, малая зависимость от напряжения и частоты, низкий уровень собственных шумов, стойкость к импульсным перегрузкам (коэффициент загрузки $K_3 = P_{CP}/P_H = 0.25...0.5$), возможность очень точной подгонки сопротивления. *Их недостатки*: большие габариты по сравнению с металлоплёночными резисторами, а также низкая стабильность и надёжность высокоомных маломощных резисторов, обусловленные слишком тонкой резистивной плёнкой (менее 1 мкм). Поэтому углеродистые резисторы выпускаются с $R_H \leq 1 \text{ МОм}$ при $P_H = 0.125 \text{ Вт}$ и $R_H \leq 10 \text{ МОм}$ при $P_H \leq 0.5...10 \text{ Вт}$. По уровню собственных шумов они делятся на две группы: **А**, где $U_{ш} \leq 1 \text{ мкВ/В}$ и **Б**, где $U_{ш} \leq 5 \text{ мкВ/В}$. Коэффициент напряжения – не более 1.5...2 %, ТКС отрицательный.

Для специальных целей используют резисторы повышенной стабильности – *бороуглеродистые*, а также *ультравысокочастотные* (например, в форме диска). Как и у плёночных резисторов других типов, для получения высокоомных углеродистых резисторов используется спиральная нарезка резистивного слоя. При этом уменьшается поперечное сечение токопроводящего слоя и увеличивается его

длина, что вызывает увеличение сопротивления. Из углеродистых резисторов для объёмного монтажа наиболее часто используют различные модификации резисторов общего применения постоянного сопротивления С1-4.

5.5.3 Металлопленочные и металлоокисные резисторы

Резистивный элемент **металлопленочных резисторов** – пленка толщиной 0.1...0.3 мкм из специальных сплавов или металлов, осажденная на керамическую заготовку в форме цилиндра методом термического испарения. В отличие от углеродистых резисторов, имеющих отрицательный ТКС, у этих резисторов ТКС может иметь любой знак. *Достоинство металлопленочных резисторов* перед углеродистыми – меньшие габариты и более высокая рабочая температура (до 200 °С). Примерами металлопленочных резисторов постоянного сопротивления для объёмного монтажа являются резисторы общего применения С2-33М-0.125, выпускаемые на номиналы от 0,1 Ом до 22 МОм с допуском $\pm 5\%$ и прецизионные резисторы С2-31 с допуском $\pm 1\%$.

Резистивный элемент **металлоокисных резисторов** – пленка жаропрочных окислов металлов (хлористых соединений олова), осажденная на изоляционное основание (как правило, керамику) в вакууме методом термического испарения. Примерами металлоокисных резисторов постоянного сопротивления для объёмного монтажа являются высокоомные и высоковольтные резисторы (Р1-32-1, выпускаемые с рабочими напряжениями до 10 кВ; С2-33НВ-0.125, выпускаемые с допуском $\pm 5\%$) и чип-резисторы Р1-33-1, выпускаемые на номинальные сопротивления от 10 МОм до 10^5 МОм с допуском $\pm 10\%$.

Металлопленочные и металлоокисные резисторы по сравнению с углеродистыми более термостойкие (например, резисторы С2-6 допускают работу при $t_{РАБ} = -60...300$ °С). Они имеют меньшие габариты, более низкие собственные шумы и лучшие частотные характеристики. Могут иметь как положительные, так и отрицательные ТКС. Основным *недостатком* их является малая устойчивость к импульсным нагрузкам ($K_3 = 0.1$), что обусловлено неоднородностью проводящей плёнки. К недостаткам по сравнению с углеродистыми резисторами следует также отнести их более высокую стоимость.

5.5.4 Композиционные резисторы

Резистивный элемент **композиционных резисторов** получают из композиций, состоящих из механических смесей порошкообразного проводника (например, сажа, графит) со связывающим органическим или неорганическим диэлектриком (терморезистивные смолы, кремнийорганические соединения, минеральные наполнители и т.п.). При изготовлении интегральных резисторов в качестве проводящих компонентов используют благородные металлы (золото, платину, палладий).

Отличаются *композиционные резисторы* высокой термостойкостью и влагостойкостью. Благодаря высокому удельному сопротивлению резистивного ма-

териала, толщина плёнки получается довольно толстой (до 50 мкм) даже при высоких сопротивлениях резисторов, что повышает их надёжность.

Конструктивно резисторы для объемного монтажа изготавливают в *объемном исполнении* в виде стержней, например, резисторы С4-1 или в *пленочном исполнении* (например, высокоомные и высоковольтные композиционные резисторы С3-9, С3-13, С3-14). Основное *достоинство* таких резисторов – *низкая стоимость*. Объемные резисторы стойки к большим импульсным и механическим перегрузкам, а резисторы С4-1, кроме того, могут работать до температуры среды +300°C. Общими *недостатками* данных резисторов являются: пониженная стабильность (особенно во времени), большой уровень шумов, существенная зависимость сопротивления от частоты и напряжения, причем нелинейная.

5.6 Проволочные резисторы постоянного сопротивления

Проволочные резисторы по назначению разделяются на: резисторы общего назначения, прецизионные и высокочастотные. В качестве резистивных материалов в проволочных резисторах используются *обмоточные провода* диаметром 0.02...1.0 мм и *микропровода* диаметром до 10 мкм, изготовленные из сплавов высокого сопротивления (манганин, константан, нихром, фехраль и др., см. пункт 2.6.2).

Достоинствами проволочных резисторов являются: малые отклонения от номинального значения, высокая стабильность, термостойкость и влагостойкость, стойкость к перегрузкам, малые ТКС и уровень шумов, большая допустимая мощность и высокая износоустойчивость. К *недостаткам* этих резисторов относятся: высокая стоимость, большие габариты, большие значения паразитных индуктивностей, емкостей и *относительно низкая надёжность* из-за ненадежности электрического контакта выводов с проволокой или межвитковых замыканий.

Каркасы проволочных резисторов выполняются обычно из керамики в виде полых или сплошных цилиндров, а для защиты резисторов используют стеклоэмали. Поэтому рабочая температура проволочных резисторов обычно составляет несколько сот градусов Цельсия. Так, например, резисторы типа ПЭВ и ПЭВР рассчитаны на работу при температуре до 440°C.

Благодаря достижениям микрометаллургии (получение микропровода в стеклянной изоляции), габариты проволочных резисторов стали соизмеримы с габаритами непроволочных, а благодаря конструктивным мерам – бифилярная намотка, применение металлических каркасов – паразитные параметры (L_R и C_R) существенно снижены. Поэтому стало возможным проволочные резисторы применять в цепях с частотами до единиц мегагерц. Ряд типов проволочных резисторов общего и специального назначения стандартизирован и выпускается массовым производством.

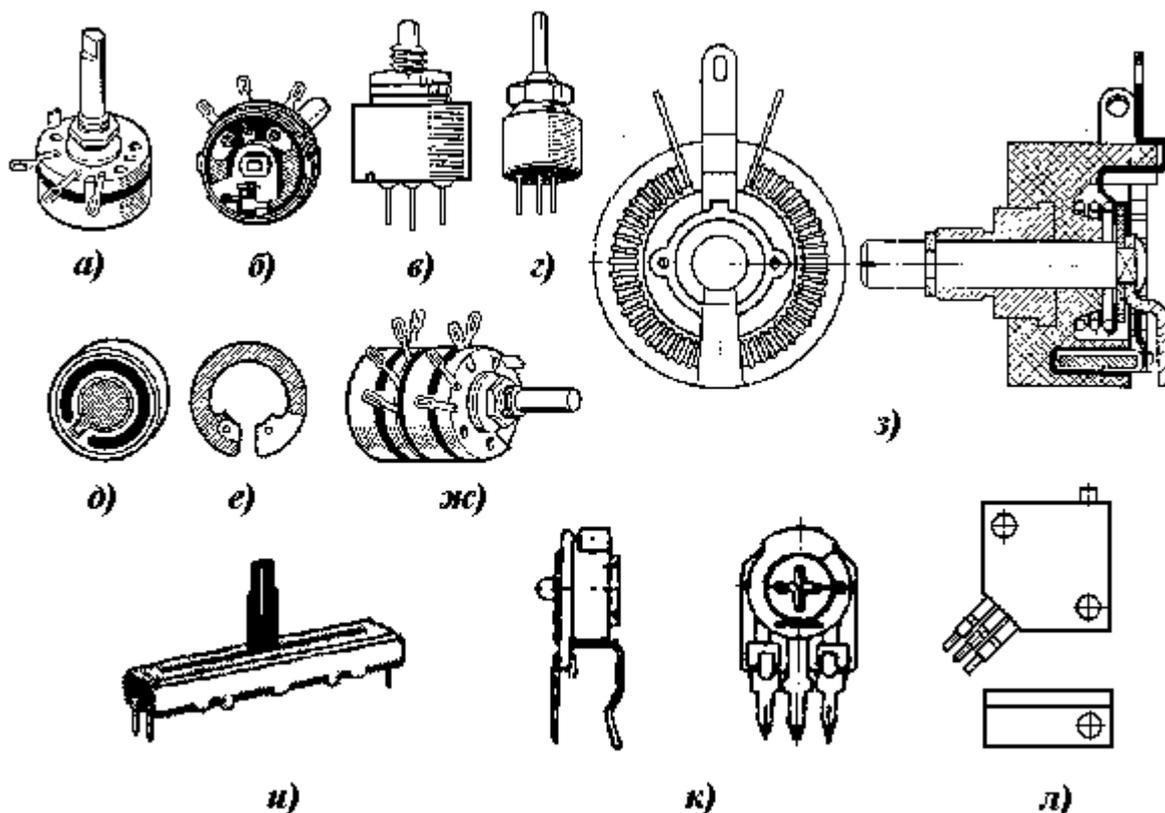
5.7 Резисторы переменного сопротивления

5.7.1 Непроволочные резисторы переменного сопротивления

На специализированных предприятиях выпускается широкий ассортимент различных типов *непроволочных резисторов переменного сопротивления*. Кон-

струкции некоторых типов регулировочных и подстроечных резисторов представлены на рисунке 5.6. Они могут иметь следующие конструктивные особенности:

- бескорпусные, в пластмассовом или в металлическом корпусе-экране;
- керамическое или пластмассовое основание с впрессованным резистивным элементом;
- со стопором оси или без него;
- с выключателем и без него;
- одинарные, сдвоенные или строенные;
- с одной осью или двумя концентрическими осями и т.д.



а, б – с резисторным элементом поверхностного типа; *в, г* – с резисторным элементом объёмного типа; *д, е* – резисторные элементы объёмного типа и типа «подковка»; *ж* – сдвоенный резистор; *з* – проволочный резистор; *и* – регулировочный движковый; *к, л* – подстроечные резисторы непроволочный и многооборотный

Рисунок 5.6 – Конструкции резисторов переменного сопротивления

В качестве примеров непроволочных резисторов переменного сопротивления можно привести:

- СПЗ-1, СПЗ-22, СПЗ-27, СПЗ-38 – резисторы подстроечные для печатного монтажа, бескорпусные;
- СПЗ-23 – резисторы регулировочные движковые для навесного монтажа, выпускаются 59 конструктивных видов;
- СПЗ-24, СПЗ-36, СПЗ-40 – резисторы подстроечные многооборотные.

Непроволочные резисторы переменного сопротивления выпускаются на номинальные сопротивления от 10 Ом до 4,7 МОм с номинальной мощностью $P_H = 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2 \text{ Вт}$ в зависимости от группы исполнения, рабочие напряжения $U_{РАБ} \leq 500 \text{ В}$.

Из переменных непроволочных резисторов наиболее широко используются металлоокисные (СП2-1, СП2-2 СП2-6, СП2-6а), композиционные (СП3-6, СП3-9а, СП3-10, СПО, СП3-17, СП3-23а, СП4-1,2,3,4) и многооборотные (СП3-37а, СП3-39а).

5.7.2 Проволочные резисторы переменного сопротивления

Проволочные резисторы переменного сопротивления (рисунке 5.6, з) имеют те же преимущества перед непроволочными, что и резисторы постоянного сопротивления (более стабильны, термостойки, меньше уровень шумов). Для иллюстрации разнообразия проволочных резисторов переменного сопротивления приведём резисторы типов:

- ППЗ-40, ..., ППЗ-47 – потенциометры проволочные, одинарные и сдвоенные для навесного монтажа ($P_H = 3 \text{ Вт}$, $R_H = 4.7 \dots 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $\delta R = 5, 10\%$);
- РП-25 и РП-80 – мощные потенциометры (реостаты) ($P_H = 25$ и 80 Вт);
- ЮС-1 – юстировочные ($P_H = 1 \text{ Вт}$; $R_H = 20 \dots 1000 \text{ Ом}$; $\delta R = \pm 1\%$; $f \leq 1 \text{ кГц}$);
- СП5 – низкочастотные, для навесного и печатного монтажа ($P_H = 1 \text{ Вт}$), многооборотные, червячного типа.

Из проволочных подстроечных резисторов часто используют СП5-1...4, СП5-14...18, СП5-20, 22, 24, а из регулировочных –ППБ, ППЗ, РП, СП5-29, 30, 37.

5.8 Характерные особенности и конструкции резисторов для поверхностного монтажа

5.8.1 Резисторы постоянного сопротивления

Для технологии поверхностного монтажа (ТМП) применяют постоянные резисторы, выполненные как по толстоплёночной, так и по тонкоплёночной технологиям. Кроме резисторов широкого применения, разработаны также и прецизионные резисторы. Постоянные ТМП резисторы выпускаются в двух конструктивных исполнениях: цилиндрические с металлизированными выводами типа *MELF* (*metal electrode face bonding*) и прямоугольные *chip-резисторы*.

Цилиндрические резисторы Конструктивно резисторы типа MELF представляют собой керамическое основание круглого сечения, на наружную поверхность которого нанесён методом тонкоплёночной технологии резистивный слой, а торцевые поверхности металлизированы. В России разработаны и выпускаются серийно постоянные непроволочные безвыводные резисторы цилиндрической формы типа P1-11, аналогичные зарубежным MELF-резисторам.

Резисторы типа P1-11 изготавливают в соответствии с техническими условиями АБШК.434110.0028 ТУ для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока; неизолированные, негерметичные, климатической категории и исполнения УХЛ5 по ГОСТ 15150-69. Резисторы имеют: диаметр 2.2 мм, длину 5.9 мм, ТКС $(50 \dots 500) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, предельное рабочее напряжение 250 В, номинальные мощности 0.25 или 0.4 Вт, предельное отклонение $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$. Диапазон номинальных сопротивлений от 1 Ом до 5.1 МОм. Резисторы работоспособны в диапазоне температур от $-60 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+70 \text{ } ^\circ\text{C}$ и относительной влаж-

ности до 98 % при 25 °С. При автоматизированном монтаже допускается пайка волной припоя при непосредственном погружении резистора в припой при температуре 250 °С на время не более 4 с. В случае крепления резистора клеем для его полимеризации допускается воздействие ультрафиолетового облучения (УФО) мощностью до 100 Вт/см² в течение одной минуты. Возможно трёхкратная пайка с общим временем до 10 с. Кроме того, допускается использование при монтаже припойной пасты. Резисторы поставляются россыпью, либо упакованными в пластмассовую формованную ленту, намотанную на бобину. Их условное обозначение в конструкторской документации: Резистор P1-11-0.25Вт-220кОм ±5%-А-Д-А АБШК.434110.0028ТУ, где А – группа по уровню шумов, Д – группа по ТКС, А – для автоматизированной сборки.

Прямоугольные чип-резисторы получили более широкое распространение вследствие их лучшей приспособленности к автоматизированному монтажу. *Прямоугольные чип-резисторы* общего применения изготавливают по толстоплёночной технологии, а прецизионные – по тонкоплёночной. К достоинствам резисторов этого типа стоит отнести: стандартизацию размеров на международном уровне, возможность автоматизированного электромонтажа, пайку ТМП-методами, наличие защиты внутреннего контактного слоя от растворения, упаковку в ленты.

Типовая конструкция толстоплёночного чип-резистора приведена на рисунке 5.7. Основанием резистора служит керамическая подложка на основе оксида алюминия, на которую наносится резистивный слой. Высокая точность величины

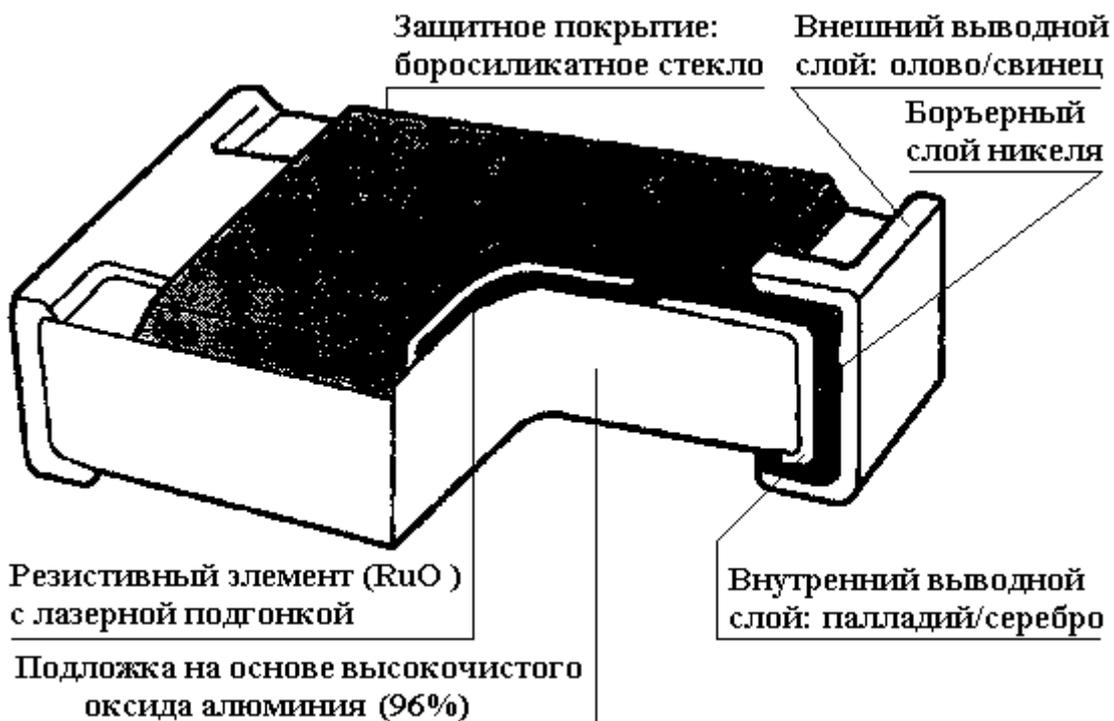


Рисунок 5.7 - Типовая конструкция прямоугольного толстоплёночного чип-резистора

сопротивления обеспечивается с помощью специальной системы лазерной подгонки. Электрический контакт с печатной платой обеспечивается трёхслойной

контактной поверхностью, состоящей из внутреннего выводного слоя, барьерного и внешнего выводного слоя. Благодаря введению в конструкцию дополнительного слоя никеля, при пайке предотвращается миграция серебра из внутреннего выводного слоя в припой. На защитное покрытие из боросиликатного стекла наносится несмываемая кодовая маркировка номинала. Используют лазерные, либо абразивные методы подгонки резисторов. Выбор метода обусловлен экономическими соображениями.

Тепловой режим оказывает значительное влияние на надёжность чип-резисторов, поскольку сложно отвести тепло в окружающее пространство. Разработанные ранее чип-резисторы предназначались для применения в ГИС, подложка в которых керамическая. Керамика более теплопроводна, чем стеклотекстолит печатных плат, поэтому тепловой режим в последнем случае значительно хуже, и резистор можно использовать лишь на половину номинальной мощности. Тепло отводят в окружающую среду через выводы на контактной площадке и через печатные проводники.

Выпускаются чип-резисторы типа P1-12. Пример их записи в конструкторской документации: Резистор P1-12-0.5-4.7кОм \pm 5%-А-А ШКАБ.434110.02ТУ, где 12 – номер разработки, А – норма уровня шума 1 мкВ/В, А – для автоматизированной сборки.

Резисторы P1-12 являются постоянными непроволочными резисторами общего применения и используются для работы в цепях постоянного и переменного тока в ГИС и для монтажа на поверхности, как для автоматизированной сборки, так и для ручной. Резисторы выпускают в корпусах 0805 и 1206 с ТКС $\pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ или $\pm 500 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, с допусками $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$. Резисторы изготавливаются на номинальную мощность 0.062; 0.125; 0.25; 0.5 Вт. Диапазон номинальных сопротивлений $1 \dots 22 \cdot 10^6 \text{ Ом}$, диапазон рабочих температур: $-60 \dots +125 \text{ } ^\circ\text{C}$. Резисторы P1-12 допускают пайку волной припоя при температуре $265 \text{ } ^\circ\text{C}$ в течение 4 с. Возможно повторная пайка с числом циклов не более 2 и длительностью каждого до 3 с. При пайке волной припоя резисторы фиксируют на поверхности при помощи клея (ГИПК 231 ТУ 6-05-25-96-79). Допускается трёхкратный нагрев до температуры $+150 \text{ } ^\circ\text{C}$ в течение 10 мин или до $+165 \text{ } ^\circ\text{C}$ – не более 15 с. Планируется выпуск резисторов P1-12 на мощность 1 Вт в корпусе 2412. При автоматизированной сборке упаковка производится в перфорированную ленту, называемую блистер-лентой. Лента намотана на катушку резистивным слоем вверх. Для ручной сборки используется групповая потребительская тара (полиэтиленовый пакет). При монтаже не допускается ставить элементы резистивным слоем вниз.

За рубежом выпускаются толстоплёночные чип-резисторы CR с допусками $\pm 1\%$, а также чип-резисторные сборки из 4-х резисторов на одной подложке САТ16 размерами $3.2 \times 1.6 \times 0.5 \text{ мм}$. Мощность каждого резистора 0.062 Вт.

Выпускаются также **прецизионные тонкоплёночные** отечественные чип-резисторы типов P1-16 (ОЖО.467.179ТУ), P1-16М (АБШК.434110.013ТУ) и P1-16П (АЛЯР.434110.002ТУ).

Резисторы P1-16М являются постоянными, непроволочными, прецизионными, незащищёнными резисторами, пригодными для автоматизированной сбор-

ки. Они выпускаются с габаритными размерами $3.2 \times 1.6 \times 0.7$ мм, выводами шириной 0.3 мм. Номинальная мощность 0.125 Вт, диапазон номинальных сопротивлений $10 \dots 10^6$ Ом, предельные отклонения $\pm 0.1 \dots \pm 0.5\%$, ТКС $(5 \dots 800) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, стабильность за 2000 часов $\pm(0.05 \dots 0.5)\%$. Пайку допускают волной припоя, погружением в расплавленный припой при температуре $+265 \text{ } ^\circ\text{C}$ в течение 4 с. Фиксацию проводят на печатной плате клеем ТК-200 по ТУ 6-10-863-76, ВК 9 по ОСТ 4 Г0.029.004 или БФ2 по ГОСТ 12172-74.

Металлоокисные высокоомные чип-резисторы Р1-33-1, выпускаются на номинальные сопротивления $10 \dots 10^5$ МОм с допусками $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ в корпусах 0805 и 1812. Пример их записи в конструкторской документации:

Резистор Р1-33-1-100 МОм $\pm 5\%$ АЛЯР.434110.008ТУ.

Отечественные чип-резисторы Р1-1 предназначены для работы в **СВЧ-диапазоне**. Номинальное сопротивление 50 Ом с допусками $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ и $\pm 5\%$ и габаритными размерами $14.7 \times 7.7 \times 1.3$ мм. Пример их записи в конструкторской документации: Резистор Р1-1-50 Ом $\pm 1\%$ -В ОЖО.467.149ТУ, всеклиматический (В).

Практика показывает, что до 10% общего объема чип-резисторов составляют перемычки. Для удовлетворения этой потребности разработаны толстопленочные чип-перемычки типа Р1-23 (АБШК 434110.003 ТУ), имеющие габаритные размеры $3.2 \times 1.6 \times 0.6$ мм (1206) и сопротивление не более 0.05 Ом.

5.8.2 Резисторы переменного сопротивления

Отечественная промышленность выпускает **переменные ТМП-резисторы** типов РП1-75, РП1-82, РП1-83. Их особенности: миниатюрная конструкция, совместимость с ТМП-методами пайки, возможность автоматизированной сборки с помощью ТМП-автоматов, упаковка в стандартную ленту, либо групповые кассеты. Резисторы выдерживают погружение в расплавленный припой в течение 5 ± 1 с, устойчивы к действию химических реагентов при отмывке остатков флюса.

Подстроечные резисторы РП1-83 (АПШК43160.018ТУ) (см. рисунок 5.8) представляют собой квадратный пластмассовый корпус, в который запрессовано керамическое основание с нанесенными на него резистивным элементом и выводами. Сверху в корпус вставлена подвижная система, представляющая собой держатель с вплавленной в него контактной пружиной. Держатель с пружиной прижимаются к резистивному элементу металлической крышкой, одеваемой на корпус. Подвижная система имеет круговые перемещения. Форму изгиба выводов резистора РП1-83 называют в литературе формой “крыла чайки”. Эта форма выводов часто используется и в конструкциях других КМП, так как удобна для распайки методами ТМП.

Резисторы выпускаются на номиналы от 10 Ом до 3 МОм с допусками $\pm 10\%$ или $\pm 20\%$ и номинальные мощности 0.125 Вт или 0.25 Вт. Отечественные подстроечные ТМП-резисторы имеют ТКС $\pm(100 \dots 250) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и могут работать при температурах от $-60 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+125 \text{ } ^\circ\text{C}$. Эти резисторы являются непроволочными, однооборотными и не уступают по техническим характеристикам зарубежным образцам ТС73Х, 3313, но имеют габаритные размеры на 20...30% боль-

ше. За рубежом выпускают многооборотные подстроечные резисторы марки 3224 с габаритами $5.1 \times 4.8 \times 3.9$ мм, имеющими более высокую стабильность и точность регулировки, так как подстройка осуществляется за 11 оборотов вместо одного.

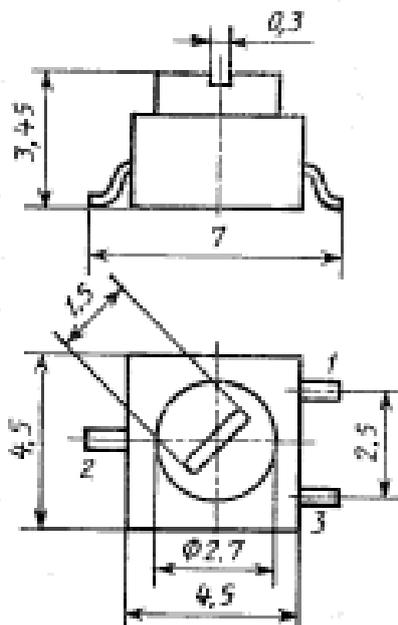


Рисунок 5.8 – Подстроечный резистор типа РП1-83-А

5.9 Специальные резисторы

Резисторы, сопротивление которых сильно меняется под влиянием вполне определенного внешнего воздействия, называются специальными. Классификация специальных резисторов приведена в подразделе 5.1.

5.9.1 Тензомеры и тензорезисторы

Тензомеры – резисторы, работа которых основана на изменении электрического сопротивления металлической проволоки (или фольги) при деформации (растяжении или сжатии). Конструктивно тензометрическое сопротивление представляет собой решетку из проволоки (константан, нихром, сплавы на основе никеля и молибдена и др.) или фольги (иногда полупроводниковой пленки), которая приклеивается к поверхности исследуемой детали (при повышенных температурах – приваривается). Изготавливаются и ненаклеиваемые тензометрические сопротивления, преимущество которых заключается в отсутствии поперечной тензочувствительности и малом гистерезисе.

Тензорезисторами называют полупроводниковые тензомеры, выполненные (например, из кремния р-типа) в виде брусочков малого сечения (не более 0.15×0.15 мм) с невыпрямляющими контактами выводов от их концов. Если у проволочных тензомеров изменение сопротивления при деформации связано с изменением размеров, то у полупроводников от деформаций сильно зависит и удельное сопротивление. Последняя зависимость связана с изменением при деформациях межатомных расстояний в кристалле, что приводит к изменению ширины запрещенной зоны и заметному изменению концентрации носителей.

Основная характеристика тензомеров – *тензочувствительность* K , которая определяется как отношение относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ к относительному изменению длины образца $\Delta l/l$:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}. \quad (5.18)$$

Для металлов величина K близка к двум, а для полупроводников может быть до 100...200, и существенно зависит от угла между деформирующей силой и осью кристалла. Полупроводниковые тензорезисторы практически безынерционны, так как имеют постоянную времени порядка 10^{-12} с, но имеют относительно большой ТКС.

5.9.2 Магниторезисторы

Магниторезисторы (МР) – это полупроводниковые резисторы, электрическое сопротивление которых зависит от величины напряженности магнитного поля. Действие МР основано на магниторезистивном эффекте, который заключается в уменьшении подвижности носителей заряда в полупроводнике, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное электрическому полю. Известно, что движущийся вдоль электрического поля носитель заряда отклоняется магнитным полем в поперечном направлении. При этом уменьшается групповая продольная скорость носителей заряда, что проявляется как уменьшение дрейфовой подвижности μ носителей заряда.

МР выполняют в виде диска, у которого один вывод делается от центра, а второй образует кольцевой контакт с внешней кромкой. В слабых магнитных полях приращение сопротивления ΔR пропорционально квадрату напряженности магнитного поля H , а в сильных – линейно зависит от H . МР изготавливают обычно из антимонида индия InSb и арсенида индия InAs. В первом случае, хотя чувствительность резистора к полю H мала, но мал и ТКС, а во втором – велика чувствительность, но велик и ТКС.

МР имеют очень малое начальное сопротивление R_0 (при $H = 0$), составляющее от десятых долей до единиц Ома. Увеличить его удастся в конструкциях составных МР, состоящих из ряда последовательно включенных элементарных МР. Начальное сопротивление МР и его зависимость от H сохраняются неизменными и для переменных токов, вплоть до $1 \dots 10$ МГц.

Чувствительность МР обычно описывают **магниторезистивным отношением**, то есть кратностью увеличения сопротивления R_B в магнитном поле с индукцией $B = 0.5$ Тл (или с $B = 1$ Тл) по сравнению с начальным значением R_0 (при $B = 0$ Тл). Типичные значения магниторезистивного отношения составляют 2 единицы для МР из InSb и 10 единиц для МР из InAs. Параметрами, ограничивающими предельные рабочие режимы МР, являются диапазон рабочих температур и максимальная рассеиваемая мощность. Внешний вид отечественных магниторезисторов показан на рисунке 5.9.

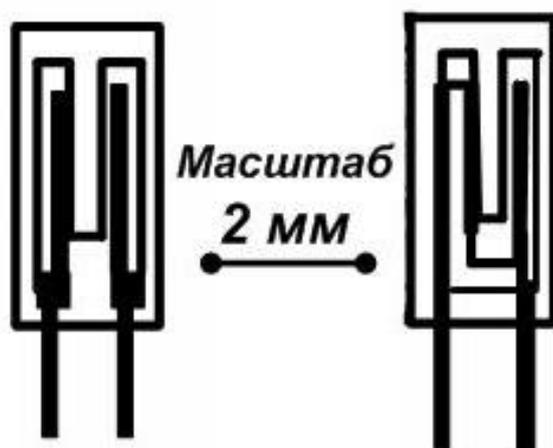


Рисунок 5.9- Внешний вид магниторезисторов отечественного производства

Выпускаемые магниторезисторы МР-1, МР-2 и МР-3 имеют номинальные сопротивления R_0 , соответственно, 50, 75 и 100 Ом, допуск $\pm 20\%$, магниторезистивное отношение $R_B/R_0 = 3.5$ при $B = 0.5$ Тл и $R_B/R_0 = 7$ при $B = 1$ Тл. Максимально допустимая мощность рассеяния у них равна 5 мВт без теплоотвода и 20 мВт с теплоотводом. Магниторезисторы СМ1-1 и СМ4-1 имеют номинальные сопротивления $R_0 = 47 \dots 220$ Ом, допуск $\pm 20\%$, магниторезистивное отношение $R_B/R_0 = 3.3$ при $B = 0.5$ Тл (СМ1-1) и $R_B/R_0 = 6 \dots 10$ при $B = 1$ Тл (СМ4-1). Максимально допустимая мощность рассеяния у них равна 6 мВт без теплоотвода (СМ4-1) и 0.125...0.5 мВт с теплоотводом (СМ1-1).

5.9.3 Фоторезисторы

Фоторезистор (ФР) – это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит существенно от освещённости. Действие фоторезисторов основано на внутреннем фотоэлектрическом эффекте, который заключается либо в переходе электронов из валентной зоны, либо из примесных уровней в зону проводимости, либо из валентной зоны на примесные уровни за счет энергии фотонов. Энергия фотонов должна равняться энергии активации соответствующего перехода E_a или превосходить ее:

$$h\nu \geq E_a, \quad (5.19)$$

где h – постоянная Планка ($6.67 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота электромагнитного излучения. Длина волны, соответствующая минимальному значению частоты, при которой условие (5.19) выполняется, называется *красной границей фотоэффекта* $\nu_{кр}$.

Технические свойства фоторезисторов оцениваются параметрами:

- *темновым сопротивлением* $R_{ТЕМН}$ – сопротивление ФР при полной защите от облучения (лежит в пределах от нескольких килоом до мегом);
- *кратностью изменения сопротивления* $R_{ТЕМН}/R_{ОСВ}$ – отношение темнового сопротивления к сопротивлению ФР при облучении световым потоком $\Phi = 200$ лм (составляет несколько порядков);

- *чувствительностью* $\Delta I / \Delta \Phi$ – отношение приращения светового тока к приращению светового потока в области $\Phi = 200$ лм;

- *удельной чувствительностью* $\frac{\Delta I / \Delta \Phi}{U_H}$ – чувствительность, приходящаяся

на один вольт приложенного напряжения. Лежит в пределах $1 \dots 5$ мА/(лм·В);

- *инерционностью*. Оценивается постоянной времени τ , которая составляет от десятых долей до сотен микросекунд и заметна при фиксации коротких световых импульсов.

Кроме отмеченных параметров в технических характеристиках указываются номинальная мощность рассеяния, рабочее напряжение и др.

Основными характеристиками ФР являются:

- *спектральная характеристика* – зависимость чувствительности от длины волны облучающего потока $\Delta I / \Delta \Phi(\lambda)$;

- *люксамперная характеристика*;

- *вольтамперная характеристика*.

Фоторезистивный эффект впервые открыт у селена, затем стали использоваться сернисто-таллиевые фоторезисторы. У селеновых фоторезисторов большая чувствительность, но они очень нестабильны во времени. Сернисто-таллиевые ФР также имеют существенные недостатки: зависимость чувствительности от температуры, потеря чувствительности в области коротковолнового диапазона (видимый свет), малый срок службы (до 400 часов). Для изготовления фоторезисторов наиболее часто используют сернистый свинец (PbS), сульфид и селенид кадмия (CdS, CdSe). Фоторезисторы изготавливают на разные диапазоны волн от инфракрасных до рентгеновских лучей. У селено-кадмиевых фоторезисторов чувствительность в 10^5 раз больше, чем у вакуумных фотоэлементов. На рисунке 5.10 приведены спектральные характеристики сульфидов кадмия и свинца.

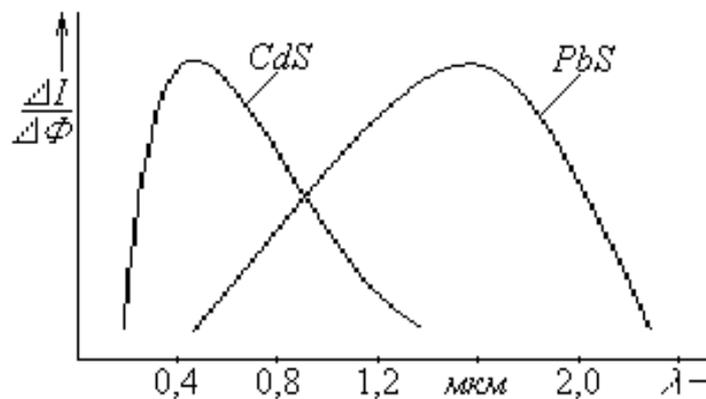
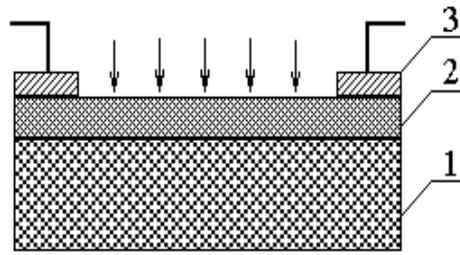


Рисунок 5.10 – Спектральные характеристики сульфидов и селенидов свинца

Из характеристик очевидно, что ФР на основе сульфида кадмия следует использовать в области ультрафиолетового излучения, а на основе сульфида свинца – в области инфракрасного излучения.

Конструктивно фоторезисторы выполняются в виде прямоугольной или круглой таблетки из спрессованного полупроводникового материала (объёмные) или плёночные (рисунок 5.11). На стеклянную подложку 1 наносится тонкий слой

полупроводника 2 (фоторезистива), на который, в свою очередь, наносятся металлические электроды 3 (выводы).



1 - подложка; 2 - фоторезистив; 3 - выводы

Рисунок 5.11 – Схематичное изображение конструкции ФР

В настоящее время промышленностью выпускается большое разнообразие фоторезисторов:

- сернисто-свинцовые (ФСА) – ФСА-1а, ФСА-Г1, СФ1-1;
- сернисто-кадмиевые (ФСК) – ФСК-7а, ФСК-7б, СФК-П1, СФ2-1; СФ2-5;
- селенисто-кадмиевые (ФСД) – ФСД-1а, СФ3-1 и др

На рисунке 5.12 показана конструкция фоторезистора СФ2-5А, , предназначенного для использования в экспонометрических устройствах, а также в схемах фотоэлектрической автоматики, телемеханики и радиоэлектроники. Его масса 2 г.

Пример его записи в конструкторской документации:

Фоторезистор СФ2-5А-В ОЖО.468.077 ТУ, где В – всеклиматическое исполнение.

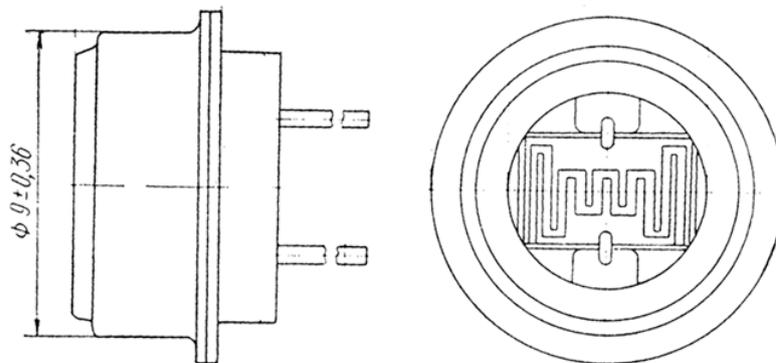


Рисунок 5.12 – Конструкция фоторезистора СФ2-5

Преимущества фоторезисторов перед вакуумными фотоэлементами:

- малые габариты, простота конструкции и меньшая стоимость фоторезистора;
- значительно большие фототоки (до единиц миллиампер).

К **недостаткам фоторезисторов** следует отнести большую инерционность и значительный разброс параметров.

Применяются фоторезисторы преимущественно в детекторах инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения (на основе PbS, PbSe, PbTe), рентгеновского γ -излучения (на основе CdS, CdSe), а также в пирометрии (на основе PbS, PbTe) для измерения температуры тел по излучению в световом диапазоне.

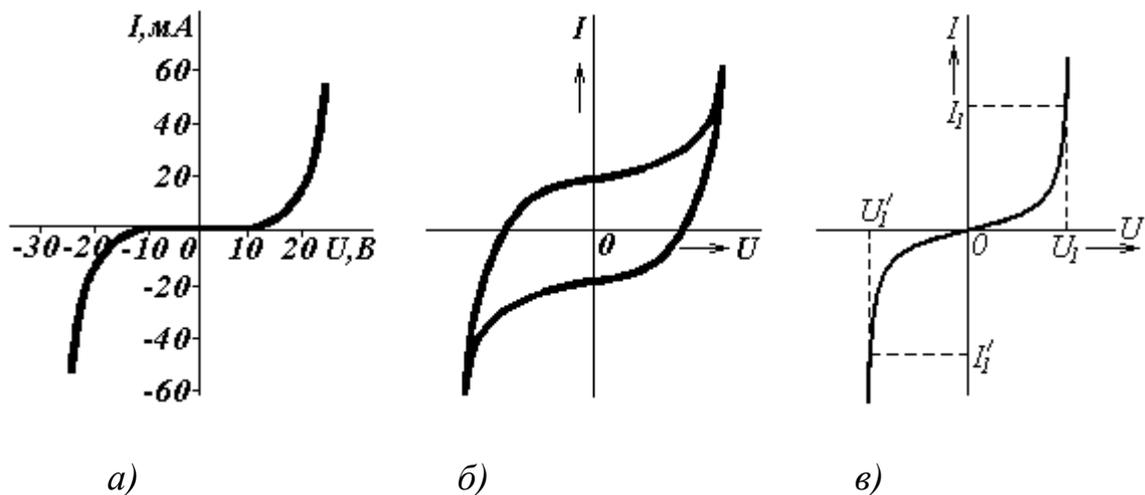
5.9.4 Варисторы

Варистор – это резистор с нелинейной, симметричной вольтамперной характеристикой (ВАХ) $R = \varphi(U)$, сопротивление которого при увеличении приложенного напряжения существенно уменьшается.

Это позволяет использовать варисторы в схемах защиты от перегрузок, как ограничители напряжения (разрядники) и для стабилизации напряжения в схемах автоматического регулирования усиления на переменном токе на частотах менее 1 кГц (рисунок 5.13, а). На более высоких частотах сказывается влияние ёмкости между зёрнами порошка легированного карбида кремния, составляющего, наряду со связующими веществами, основу резистивного элемента варистора. Кроме того, на высоких частотах нарушается однозначная зависимость между мгновенными значениями тока и напряжения – наблюдается гистерезис на ВАХ (рисунок 5.13, б). Нелинейность варистора обусловлена несколькими явлениями. Одно из них – увеличение степени перекрытия зазоров между зёрнами карбида кремния при микронагреве контактов в районе зазоров [5].

Резистивный элемент изготавливается путём спекания кристаллов карбида кремния и наполнителя – связующего вещества.

Основной характеристикой варисторов является ВАХ (рисунок 5.13, в). Симметрия ВАХ заключается в том, что при изменении полярности напряжения и $|U| = const$, полярность тока тоже меняется, а величина сопротивления остается неизменной ($R = const$). Представляет практический интерес также зависимость коэффициента нелинейности от тока – $\beta(I)$ (рисунок 14, б).



а) – на частоте 100 Гц; б) – на частоте 20 кГц;
в) – положение на ВАХ классификационных напряжений и токов

Рисунок 5.13 - Вольтамперные характеристики варистора

Свойства варисторов оцениваются рядом специфических параметров:

- статическим $R_{СТ}$ и динамическим $R_{ДИН}$ сопротивлениями;
- коэффициентом нелинейности β или показателем нелинейности $\alpha = 1/\beta$;
- классификационным током $I_{КЛ}$ и напряжением $U_{КЛ}$;
- коэффициентом асимметрии ε ;

- температурным коэффициентом изменения сопротивления (ТКС) α_R ;
- номинальной мощностью P_H ;
- предельным напряжением $U_{\text{ПРЕД}}$.

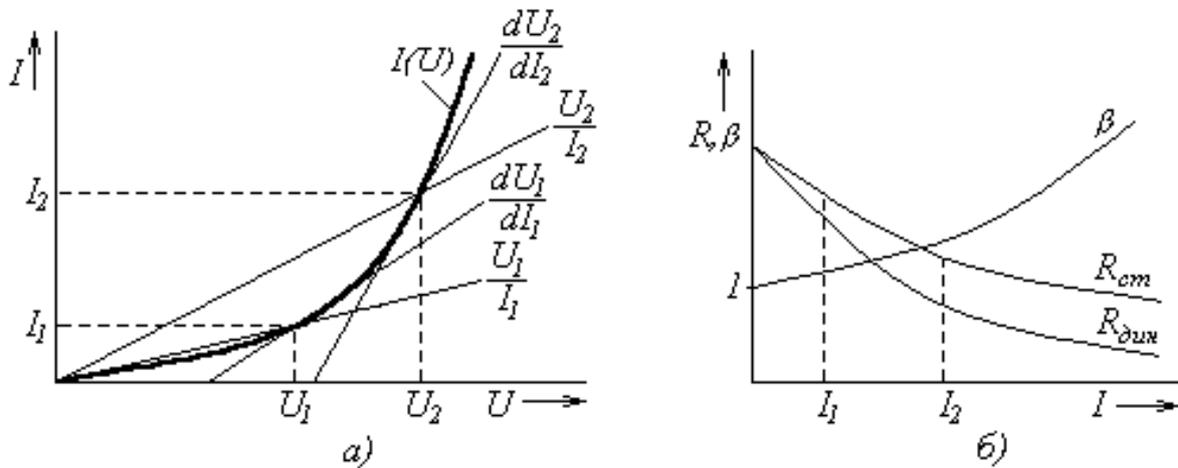


Рисунок 5.14 – Статическое и динамическое сопротивления (а) и коэффициент нелинейности варистора (б)

Статическое сопротивление $R_{СТ}$ – есть отношение постоянного напряжения U , приложенного к варистору, к току I , протекающему по нему (рисунок 5.14, а):

$$R_{СТ} = \frac{U}{I}. \quad (5.20)$$

Динамическое сопротивление $R_{ДИН}$ – есть производная напряжения по току:

$$R_{ДИН} = \frac{dU}{dI} \cong \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (5.21)$$

Под **коэффициентом нелинейности** варистора β понимается отношение статического сопротивления к динамическому (рисунок 5.14, б):

$$\beta = \frac{R_{СТ}}{R_{ДИН}} \approx \frac{U}{I} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta U} > 1. \quad (5.22)$$

В широком диапазоне напряжений имеет место соотношение:

$$I = K \cdot U^\beta, \quad (5.23)$$

где K – коэффициент, пропорциональный проводимости варистора.

Из анализа зависимостей $R(I)$ и $\beta(I)$ очевидно, что для варисторов $\beta > 1$, а для линейных резисторов $\beta = 1$.

Классификационное напряжение $U_{КЛ}$ варистора – условный параметр, показывающий величину постоянного напряжения при заданном значении классификационного тока $I_{КЛ}$. При классификационном токе и напряжении определяют основные параметры варистора: β , ε , α_R , P_H .

Под **коэффициентом асимметрии токов** ε понимается относительная величина разности токов варистора при положительном и отрицательном классификационном напряжении. Это показатель несимметрии ВАХ:

$$\varepsilon = \frac{I_1 - |I'_1|}{I_1}, \quad (5.24)$$

где I_1 и I'_1 – токи положительной и отрицательной полярности при $U_1 = |U'_1| = U_{кЛ}$ (рисунок 5.13, в).

Конструктивно варисторы изготавливаются в виде: стержней – стержневые (СН1-1-1, СН1-1-2); дисков – дисковые (СН1-2-1, СН1-2-2); микромодулей (СН1-3) на стандартной керамической подложке.

Пример условного обозначения варистора в конструкторской документации:

СН1-2-1-820±10% ТУ,

где СН – сопротивление нелинейное; 1 – карбид кремния; 2 – дисковый; 1 – номер разработки, 820 – классификационное напряжение, допуск – 10%.

Промышленностью выпускаются варисторы с параметрами: $U_{кЛ} = 15 \text{ В} \dots 25 \text{ кВ}$; $I_{кЛ} = 50 \text{ мкА} \dots 10 \text{ мА}$; $P_H = 0.8 \dots 3 \text{ Вт}$.

Характерными **недостатками** варисторов являются:

- разные сопротивления при постоянном и переменном токах;
- большая асимметрия – коэффициент асимметрии $\varepsilon = \pm(10 \dots 20)\%$;
- очень большая температурная нестабильность – $\alpha_R \geq 1000 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (например, для варисторов на основе карбида кремния $\alpha_R = 0.3 \dots 0.6 \text{ \%}/\text{К}$);
- большой разброс параметров ВАХ;
- сильная зависимость проводимости от частоты.

Применение варисторов также ограничено из-за низкой временной стабильности.

5.9.5 Терморезисторы

Терморезистором (термистором) называется прибор, выполненный на основе однородной полупроводниковой структуры, электрическое сопротивление которой существенно зависит от температуры.

Сопротивление терморезистора при больших токах становится зависимым также от величины действующего (среднеквадратического) значения тока и режима охлаждения. Поэтому при применении терморезисторов для измерения температуры следует использовать малые токи. Мощность на резисторе, в этом случае, должна быть меньше 10 мВт . Действие наиболее распространенных терморезисторов с отрицательным ТКС основано на сильной зависимости концентрации носителей заряда от температуры. В этом случае зависимость сопротивления от абсолютной температуры T имеет вид:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (5.25)$$

где A и B постоянные величины, причем, величина B прямо пропорциональна ширине запрещенной зоны материала.

Для изготовления терморезисторов применяют поликристаллические оксидные полупроводники – окислы меди, марганца, кобальта, титана, лития и никеля.

Терморезисторы на основе окислов имеют отрицательный ТКС, величина которого обратно пропорциональна квадрату температуры T :

$$TKC = -\frac{B}{T^2}. \quad (5.26)$$

Основными параметрами терморезисторов являются:

- диапазон рабочих температур $t_{min} \dots t_{max}$;
- чувствительность (ТКС) α_R ;
- инерционность (постоянная времени) τ ;
- номинальное сопротивление R_H – при температуре 20 °С;
- минимальная мощность P_{min} – мощность, при которой сопротивление изменяется на 1%;
- максимальная мощность – мощность, при которой резистор разогревается до максимально допустимой температуры.

В паспорте таких резисторов указываются также величины A и B . Значение постоянной времени τ терморезисторов зависит от массы, удельной теплоёмкости элементов и их конструкции. Для различных конструкций эта величина может быть в пределах от единиц до сотен секунд.

Основные характеристики терморезисторов – вольтамперная и функциональная (рисунок 5.15). Зависимость сопротивления от температуры описывается формулой (5.25).

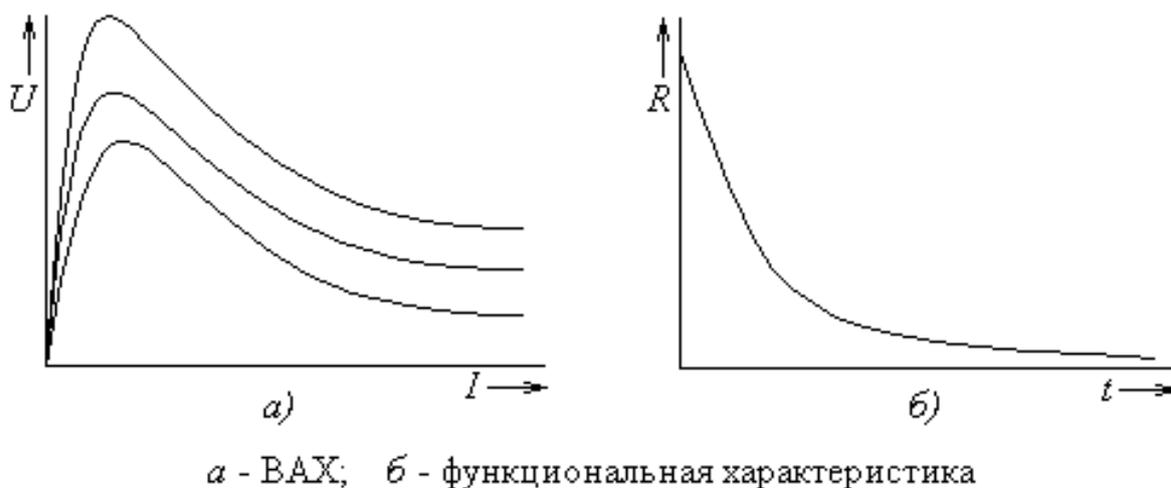


Рисунок 5.15 – Основные характеристики терморезисторов

Терморезисторы с отрицательным ТКС реализуются на основе смеси окислов Mn, Co, Ni, Cu; окислов Ge и Si, легированных различными примесями; карбида кремния (SiC); органических полупроводников и т.д.

Наиболее распространены медно-марганцевые (ММТ) и кобальтово-марганцевые (КММ) терморезисторы. Диапазон их рабочих температур лежит обычно в пределах от 170...210 K (–100...–60 °С) до 370...570 K (100...300 °С), а ТКС при 20 °С достигает величины $-(2.4 \dots 8.4) \cdot 10^{-2} K^{-1}$.

Имеются высокотемпературные терморезисторы, у которых $t_{max} \approx 700 \dots 1000$ °С и низкотемпературные, у которых $t_{min} \approx 4 \dots 77$ K (–269...–196 °С) при ТКС = $-(0.15 \dots 0.2) K^{-1}$.

Большинство терморезисторов разогревается лишь мощностью измерительного тока, и называются они **терморезисторами прямого нагрева**. Однако вы-

пускаются и **терморезисторы косвенного подогрева** (например, терморезистор ТР-6). Они содержат два электрически изолированных резистора (подогреватель и термочувствительный элемент) и имеют между собой сильную тепловую связь. Основной характеристикой таких терморезисторов является зависимость сопротивления термочувствительного элемента от тока через подогреватель при различных температурах.

Конструктивно терморезисторы изготавливаются в виде: стержней, трубок, дисков, шайб и бусинок. Размеры – от нескольких микрометров до нескольких сантиметров.

Имеются терморезисторы для индикации и измерения интенсивности теплового излучения в оптическом диапазоне частот (**болометры**).

Применяются терморезисторы в системах и устройствах дистанционного и централизованного измерения и регулирования температуры, температурной компенсации различных элементов электрических цепей, для стабилизации токов и напряжений, для измерения мощности, давления газов, скорости движения жидкостей и т.д.

К *недостаткам* терморезисторов относятся:

- нелинейная зависимость $R(t)$;
- плохая взаимозаменяемость из-за низкой воспроизводимости и большого разброса ТКС ($\pm 10\%$);
- относительно большая инерционность ($\tau \leq 30 \dots 130$ с).

Промышленностью выпускаются терморезисторы:

- ММТ (СТ2) – медно-марганцевые;
- КМТ (СТ1) – кобальтово-марганцевые;
- СТ3 – медно-кобальтовые;
- СТ6 – позисторы на основе титаната бария;
- ТКП – терморезисторы с косвенным подогревом, как управляемые резисторы и др.

Примеры:

- ММТ-1 и КМТ-1 – стержневые, негерметизированные;
- ММТ-4 и КМТ-4 – герметизированные;
- ММТ-8, 9 – шайбовые;
- КМТ-14, КМТ-17 – в виде бусинок, для высоких температур.

Кроме терморезисторов с отрицательным ТКС, в РЭС нашли применение **терморезисторы с большим положительным ТКС**, получившие название **позистор**. Они изготавливаются из сегнетоэлектриков, в частности, широко используется титанат бария (BaTiO_3), легированный лантаном, церием, висмутом и т.д. Титанат бария – это полупроводник с удельным сопротивлением $\rho = 10^3 \dots 10^5$ Ом·м. Принцип действия позисторов основан на резком изменении электропроводности кристаллов сегнетоэлектриков в области фазовых переходов, когда изменяется структура кристаллической решетки (в точке Кюри).

Характерным для этих позисторов является очень большой ТКС (до 0.5 K^{-1}) в области температур Δt , близких к сегнетоэлектрическому фазовому переходу (рисунок 5.16). Однако эта область весьма небольшая ($\Delta t \approx 5 \text{ K}$), но положение ее

можно смещать изменением состава твёрдого раствора (примерно от -70 до 230 °C). За пределами фазового перехода позисторы, как и терморезисторы, имеют отрицательный ТКС.

Благодаря высокой чувствительности позисторы нашли применение в качестве термодатчиков, например, в самонаводящихся ракетах типа «земля-воздух». Кроме того они могут использоваться в подогревных термостатах в качестве термостабилизатора. При понижении температуры среды их сопротивление уменьшается, а мощность на позисторе (нагревателе) возрастает, при повышении же температуры среды эта мощность уменьшается. При этом температура нагретого объекта оказывается практически не зависящей от температуры окружающей среды. Однако, из-за низкой температурной и временной стабильности позисторы по сравнению с терморезисторами не нашли широкого применения.

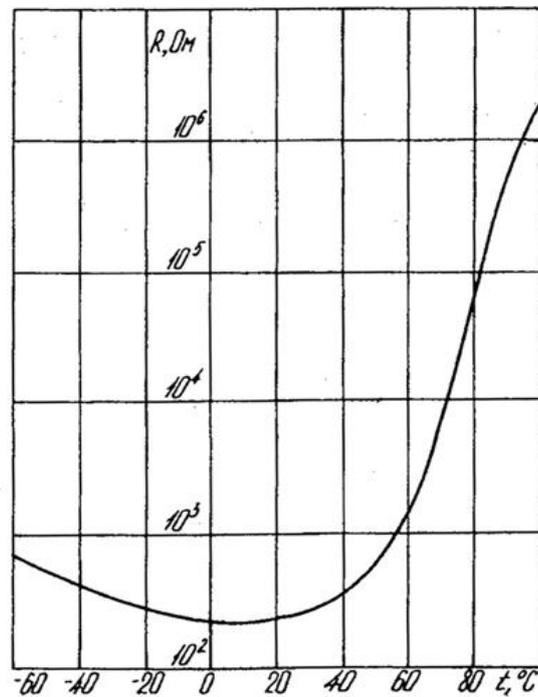


Рисунок 5.16 – Функциональная характеристика позистора СТ-6-4Б

В паспортных данных для позисторов указывают область температур, в которой ТКС максимальна, кратность изменения сопротивления в области положительного ТКС, максимальное значение ТКС и температуру, при которой оно достигается.

Контрольные вопросы

1. Что называется резистором?
2. На какие типы делятся резисторы по назначению, исполнению и резистивному материалу?
3. Какими параметрами и характеристиками оцениваются свойства резисторов постоянного и переменного сопротивления?
4. На какие ряды по величине номинального сопротивления и допуска делятся стандартные резисторы?
5. Что понимается под номинальной мощностью рассеивания резистора и чем она определяется?
6. Какими параметрами оценивается стабильность резисторов?
7. Что такое собственные шумы резисторов и чем они обусловлены?
8. Что понимается под функциональной характеристикой резисторов переменного сопротивления, и на какие типы делятся резисторы по их виду?
9. Какие системы условных обозначений и маркировки типов резисторов используются в настоящее время?
10. Условные обозначения резисторов в конструкторской документации и в электрических схемах?
11. Основные свойства и области применения непроволочных резисторов постоянного сопротивления?
12. Основные свойства и области применения проволочных резисторов постоянного сопротивления?
13. Основные свойства, области применения и конструктивные исполнения непроволочных и проволочных резисторов переменного сопротивления?
14. Каковы свойства и конструктивные особенности резисторов постоянного и переменного сопротивления для поверхностного монтажа?
15. Основные свойства, области применения и конструктивные исполнения тензомеров и тензорезисторов?
16. Основные свойства, области применения и конструктивные исполнения магниторезисторов и варисторов?
17. Основные свойства, области применения и конструктивные исполнения фоторезисторов и терморезисторов?
18. В чем достоинства и недостатки позисторов по сравнению с терморезисторами?

6 КОНДЕНСАТОРЫ

6.1 Общие сведения

Электрический конденсатор – электрорадиоэлемент, представляющий собой систему из двух и более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, обладающий способностью запасать электрическую энергию.

Основной параметр конденсатора – его *электрическая ёмкость* C , определяемая отношением накапливаемого на обкладках заряда Q к приложенному к обкладкам напряжению U :

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (6.1)$$

Ёмкость конденсатора зависит от рода диэлектрика; от геометрических размеров, формы и взаимного расположения обкладок; от количества обкладок. Например, у плоского конденсатора с числом обкладок N ёмкость может быть оценена по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S (N - 1)}{d}, \quad (6.2)$$

где $\varepsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$ Ф/м ≈ 8.855 пФ/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь обкладок; d – толщина диэлектрика.

Если размеры обкладок сравнимы по величине с толщиной диэлектрика d , то величина C будет несколько больше, чем вычисленная по формуле (6.2), так как часть силовых линий электрического поля будет проходить не через диэлектрик, а через воздух вблизи краев обкладок, оказывая заметное влияние на величину ёмкости (краевой эффект).

6.2 Классификация конденсаторов

6.2.1 По конструктивному исполнению и принципу функционирования конденсаторы можно разделить на пять типов:

- конденсаторы постоянной ёмкости;
- конденсаторы переменной ёмкости, управляемые механически (КПЕ);
- конденсаторы переменной ёмкости, управляемые электрически (нелинейные);
- подстрочные конденсаторы;
- специальные конденсаторы.

Конденсаторы постоянной ёмкости используются в колебательных контурах, для разделения электрических цепей с различной частотой, в сглаживающих и резонансных фильтрах, для связи отдельных цепей переменного тока, в качестве накопителей электрической энергии (интегрирующие цепи), в емкостных делителях напряжения и т.д.

Конденсаторы переменной ёмкости, управляемые механически, наиболее широкое применение нашли в РЭА для плавной настройки колебательных конту-

ров в пределах заданного диапазона изменения частот. Кроме того, они используются в качестве регулировочных, например, для регулировки электрической связи между различными участками цепи, для компенсации реактивного сопротивления в измерительных мостах переменного тока и т.д.

Подстроечные конденсаторы применяются в цепях, ёмкость которых должна точно устанавливаться при настройке и не изменяться в процессе эксплуатации, например, для настройки контуров с фиксированной частотой, для подстройки начальной частоты диапазонных контуров, в цепях связи и т.д.

Конденсаторы переменной ёмкости, управляемые электрически, – *вариконды и варикапы* называют также **нелинейными**.

Вариконды – это сегнетоэлектрические конденсаторы с явно выраженной нелинейной зависимостью ёмкости от приложенного напряжения.

Варикапы – это полупроводниковые конденсаторы, ёмкость которых нелинейно зависит от приложенного напряжения. Характер ёмкости – барьерная ёмкость обратно смещённого электронно-дырочного перехода.

Применяются нелинейные конденсаторы для дистанционной настройки колебательных контуров, для усиления мощности (в диэлектрических усилителях), для параметрической стабилизации тока или напряжения, для умножения и деления частоты, для модуляции электрических колебаний и т.д.

Специальные конденсаторы, в которых используется изменение ёмкости в зависимости от внешних воздействий (температуры, давления и т.п.) по определённому закону, могут применяться для электрических измерений неэлектрических величин, в системах автоматического регулирования и др.

6.2.2 Классификация конденсаторов по роду диэлектрика является одной из основных, так как тип диэлектрика определяет важнейшие характеристики конденсаторов. По роду диэлектрика конденсаторы подразделяются на конденсаторы с *газообразным, с твёрдым и с жидким диэлектриками*.

Конденсаторы с газообразным диэлектриком подразделяются на воздушные, газонаполненные и вакуумные.

Конденсаторы с твёрдым диэлектриком разделяют на:

- конденсаторы с **твёрдым неорганическим диэлектриком** – слюдяные, стеклоплёночные, стеклокерамические, стеклоэмалевые, керамические, в том числе ВЧ, НЧ, и сегнетоэлектрические;

- конденсаторы с **твёрдым органическим диэлектриком** – бумажные, металлобумажные, плёночные с диэлектриком из неполярных пленок (полистирольные, фторопластовые, полиэтиленовые) и из полярных пленок (лавсановые, поликарбонатные).

Конденсаторы с оксидным диэлектриком – алюминиевые, танталовые, ниобиевые, титановые. Они изготавливаются в основном трех типов: электролитические (с жидким и сухим электролитом), оксидно-полупроводниковые и оксидно-металлические.

6.2.3 Классификация конденсаторов весьма обширная:

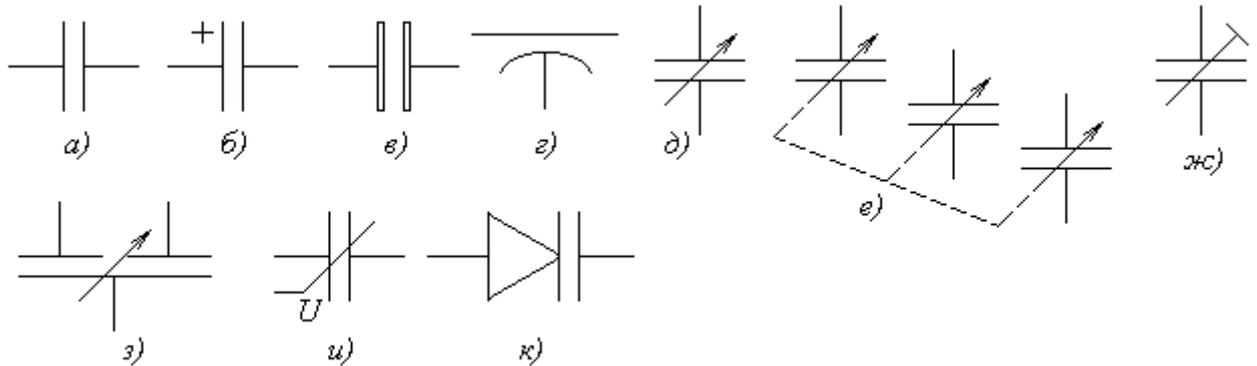
- по назначению – контурные, фильтровые, проходные и т.д.;

- по диапазону частот – низкочастотные (НЧ), высокочастотные (ВЧ);

- по рабочему напряжению – низковольтные, высоковольтные;
- по роду тока – для постоянного (пульсирующего), переменного, импульсного тока; универсальные и т.д.

6.3 Условные обозначения и маркировка конденсаторов

6.3.1 Условные обозначения конденсаторов в электрических схемах регламентированы ГОСТ 2.728-74 и 2.730-76. На рисунке 6.1 приведены некоторые примеры обозначений конденсаторов из указанных стандартов.



а – постоянной емкости; *б* – полярный с оксидным диэлектриком; *в* – биполярный с оксидным диэлектриком; *г* – проходной; *д* – переменный; *е* – блок переменных конденсаторов; *жс* – подстроечный; *з* – дифференциальный; *и* – вариконд; *к* – варикап

Рисунок 5.1 – Условные обозначения конденсаторов в электрических схемах

Система условных (кодированных) обозначений конденсаторов в настоящее время, согласно ГОСТ 13453-68, состоит для конденсаторов постоянной ёмкости из четырех, а для переменных конденсаторов – из трех буквенно-числовых индексов. Приведем наиболее важные сведения из этого стандарта.

1) Первый индекс (буквенный) для всех типов конденсаторов – указывает на группу (класс) конденсаторов по назначению или функциональному признаку:

К – конденсаторы постоянной ёмкости (постоянные);

КП – конденсаторы переменной ёмкости, управляемые механически (переменные);

КТ – конденсаторы подстроечные;

КН – конденсаторы нелинейные (вариконды, варикапы).

2) Второй индекс (числовой) указывает на тип конденсатора по виду диэлектрика для постоянных, переменных и подстроечных конденсаторов и на численное значение основного параметра для варикондов.

Для постоянных конденсаторов кодировка второго индекса следующая:

10 – керамические на номинальное напряжение до 1600 В (низковольтные); **15** – керамические на напряжение 1600 В и выше (высоковольтные); **20** – кварцевые; **21** – стеклянные; **22** – стеклокерамические; **23** – стеклоэмалевые; **24** – слюдяные малой мощности; **32** – слюдяные большой мощности; **40** – бумажные на напряжение до 1600 В с фольговыми обкладками; **41** – бумажные на напряжение свыше 1600 В; **42** – бумажные с металлизированными обкладками (металлобумажные); **50** – электролитические алюминиевые; **51** – электролитические танталовые;

вые фольговые; **52** – электролитические танталовые объемно-пористые; **53** – оксидно-полупроводниковые; **60** – воздушные; **61** – вакуумные; **70** – полистирольные с фольговыми обкладками; **71** – полистирольные металлоплёночные; **72** – фторопластовые; **73** – полиэтилентерефталатные металлоплёночные; **74** – полиэтилентерефталатные с фольговыми обкладками; **75** – комбинированные; **76** – лакоплёночные (с триацетатной пленкой); **77** – поликарбонатные; **78** – полипропиленовые.

Для переменных и подстроечных конденсаторов кодировка второго индекса: **1** – вакуумные; **2** – воздушные; **3** – с газообразным диэлектриком; **4** – с твёрдым диэлектриком.

Для варикондов второй индекс обозначает величину коэффициента нелинейности по напряжению или коэффициента прямоугольности.

3) Третий индекс указывает на назначение для постоянных конденсаторов и варикондов или на порядковый номер исполнения – для переменных и подстроечных конденсаторов.

Для постоянных конденсаторов:

(без обозначения) – для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока;

П – для работы в цепях постоянного и переменного тока;

Ч – для работы в цепях переменного тока (частотные);

У – для работы в цепях постоянного и переменного тока, а также в импульсных режимах (универсальные);

И – для работы в импульсных режимах (импульсные).

Для варикондов:

Ч – управляемые напряжением переменного тока;

П – управляемые напряжением постоянного тока;

ВТ – с прямоугольной петлей гистерезиса (для вычислительной техники).

Для переменных и подстроечных конденсаторов третий индекс указывает вариант исполнения конденсаторов одной группы по виду диэлектрика.

4) Четвертый индекс для постоянных конденсаторов указывает на вариант исполнения конденсаторов одной группы по виду диэлектрика, а для варикапов – вариант исполнения одного назначения.

Конденсаторы ранних разработок имеют буквенную кодировку – две-четыре буквы, которые соответствуют сокращенному названию конденсатора.

В конструкторской документации после слова «конденсатор» указывается его *тип, вариант конструкции* (крепления), *группа по температурному коэффициенту изменения ёмкости* (ТКЕ), *номинал напряжения, номинал ёмкости, допустимое отклонение от номинала в % или класс точности, группа по интервалу рабочей температуры и номер ТУ или ГОСТа.*

Примеры записи конденсаторов в конструкторской документации:

Конденсатор К10-50-В-МПО-4700 пФ ±10%-А ОЖО.460.192 ТУ

Здесь К10 – конденсатор керамический на номинальное напряжение ниже 1600 В; 50 – номер разработки; В – вариант исполнения, всеклиматический; МПО – группа по ТКЕ, плюс-минус ноль; 4700 пФ – номинальная ёмкость; ±10% – допуск; А – пригодный для автоматизированной сборки; ОЖО.460.192 ТУ – номер технических условий.

Конденсатор КТ4-21а- 4/20пФ ОЖО.460.103 ТУ

Здесь КТ – конденсатор подстроечный, 4 – с твёрдым диэлектриком, 21а – номер разработки, 4/20 пФ – минимальная (4) и максимальная (20) ёмкость, ОЖО.460.192 ТУ – номер технических условий.

Примеры обозначений конденсаторов в конструкторской документации обычно приводятся в справочной литературе и в стандартах.

6.3.2 При маркировке конденсаторов должны быть указаны: номинальная ёмкость C_H , допустимые отклонения ёмкости от номинального значения (допуск) δC_H и группа по ТКЕ. Если размеры конденсатора позволяют, то C_H и δC_H пишут на конденсаторе полностью с указанием размерности. Если размерность ёмкости не указана, то по умолчанию она дана в пикофарадах.

Для малогабаритных конденсаторов применяют буквенно-цифровую маркировку. При указании номинальной ёмкости величина и размерность совмещаются. Вместо запятой в числовом значении ёмкости указывается код размерности: М – микрофарады; Н – нанофарады; П – пикофарады. При этом цифра ноль опускается.

Следом за величиной ёмкости пишется буква – код допустимого отклонения δC_H . Принятая кодировка допусков приведена в таблице 6.1. Например, маркировка М15В означает: конденсатор ёмкостью $C_H = 0.15 \text{ мкФ}$ с допуском $\delta C_H = \pm 20\%$; маркировка 1Н5С означает: конденсатор ёмкостью $1500 \text{ пФ} \pm 10\%$.

Таблица 6.1 - Кодировка допустимых отклонений ёмкости конденсаторов

Кодированное обозначение	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В
Допустимое отклонение, %	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20

Окончание таблицы 6.1

Кодированное обозначение	Ф	Э	Б	А	Я	Ю	Х
Допустимое отклонение, %	± 30	+50... -10	+50... -20	+80... -20	+100	+100... -10	$\pm 0.4 \text{ пФ}$

По ТКЕ нормируются лишь слюдяные, керамические, стеклокерамические и стеклянные конденсаторы, обладающие достаточно высокой температурной стабильностью. На корпусе конденсатора, если позволяет место, указывается непосредственно группа по ТКЕ. Керамические конденсаторы небольших размеров маркируются по ТКЕ цветом окраски корпуса и цветом маркировочной точки. Группы по ТКЕ слюдяных, керамических, стеклянных и стеклокерамических конденсаторов и их кодировка приведены в таблицах 6.2 и 6.3. Остальные типы конденсаторов не нормируются по ТКЕ. Так бумажные, металlobумажные, сегнето-керамические и конденсаторы с оксидным диэлектриком не нормируются так как весьма нестабильны, а пленочные неполярные – высокостабильные.

6.4 Основные параметры и характеристики конденсаторов постоянной емкости

6.4.1 Свойства постоянных конденсаторов

Свойства постоянных конденсаторов характеризуются следующими параметрами: номинальной ёмкостью C_H и допуском δC_H ; электрической прочностью; сопротивлением изоляции; активными потерями или добротностью; реактивной мощностью; собственной индуктивностью; параметрами, характеризующими стабильность ёмкости при воздействии различных факторов: климатических, механических, времени и т.д. Рассмотрим несколько подробнее основные параметры.

6.4.2 Номинальная ёмкость и допуск

Номинальная ёмкость – это значение ёмкости конденсатора, которое должно обеспечиваться при оговоренных в ТУ условиях эксплуатации.

Допуск – предельно допустимая величина относительного отклонения ёмкости от номинального значения в нормальных условиях:

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C_H} = \frac{C - C_H}{C_H}; \quad \delta C [\%] = \delta C \cdot 100, \quad (6.3)$$

где C и C_H – фактическая и номинальная ёмкости конденсатора.

Номинальная ёмкость и допуск являются статистическими характеристиками. При массовом и серийном производстве *номинальная ёмкость* есть *среднее значение* ёмкости совокупности (выборки) конденсаторов, равное числу из ряда предпочтительных чисел (РПЧ). Допуск характеризует *технологический разброс ёмкости* конденсаторов.

Номинальная ёмкость и допуски постоянных конденсаторов регламентируются стандартом ГОСТ 2519-67, ряды которых приведены в разделе 5.2. Наиболее широкое применение находят конденсаторы *I-III классов точности* (таблица 5.1). Но промышленностью выпускаются конденсаторы как с более высоким классом точности – прецизионные ($\delta C = \pm 2\%$, $\pm 1\%$, $\pm 0.5\%$) и высокоточные (до 0.1% , так и с более низкой точностью – электролитические, сегнетокерамические.

6.4.3 Электрическая прочность

Электрическая прочность конденсаторов характеризуется тремя параметрами: *номинальным, испытательным и пробивным напряжениями*.

Под *номинальным напряжением* (U_H) понимают максимальное напряжение, при котором конденсатор должен надежно работать при оговоренных в ТУ условиях эксплуатации в течение длительного времени (100 ч и более).

Испытательное напряжение ($U_{ИСП}$) – это напряжение которое должен выдерживать конденсатор в течение определенного небольшого промежутка времени (десятки секунд), не теряя основных свойств.

Пробивное напряжение ($U_{ПР}$) – минимальное напряжение, при котором происходит пробой изоляции в течение короткого промежутка времени (доли секунды или секунды).

Соотношения между номинальным, испытательным и пробивным напряжениями определяются видом диэлектрика. Для слюдяных и стеклянных конденсаторов $U_{исп} = (2...3)U_H$, а для металлобумажных $U_{исп} = (1.5...2)U_H$.

При работе конденсатора в цепях с пульсирующим напряжением *максимальное* значение напряжения не должно превосходить *номинальной* величины. При этом амплитуда переменной составляющей не должна быть выше определенного значения, определяемого ТУ из условий температурного режима (потери, ионизация).

6.4.4 Сопротивление изоляции

Сопротивление изоляции ($R_{из}$) – это электрическое сопротивление между обкладками конденсатора для постоянного тока. Оно определяется качеством применяемого диэлектрика и его размерами (толщиной). При низком сопротивлении изоляции появляются значительные токи утечки, которые могут нарушить работу отдельных участков схемы.

Для конденсаторов с очень большим сопротивлением изоляции или с большой ёмкостью качество изоляции характеризуется **постоянной времени**:

$$\tau_{из} = R_{из} \cdot C_H, [с]. \quad (6.4)$$

Величина $\tau_{из}$ – постоянная времени саморазряда, равная времени, за которое напряжение на конденсаторе после отключения его от источника постоянного тока уменьшается в e раз (до 37%) по сравнению с первоначальным напряжением. Для разных типов конденсаторов постоянная времени может составлять от нескольких минут до нескольких суток.

У электролитических конденсаторов качество изоляции оценивают по величине тока утечки.

Для конденсаторов с органическим диэлектриком наблюдается резкая нелинейная зависимость сопротивления $R_{из}$ от температуры. Так при увеличении температуры на 10°C $R_{из}$ может уменьшиться в 2 раза, а при увеличении на 100°C – в 1000 раз.

Наибольшим сопротивлением изоляции обладают конденсаторы с пленочным неполярным диэлектриком ($R_{из} \geq 10^4 \text{ МОм}$), а наименьшим – электролитические конденсаторы ($R_{из} = 3...50 \text{ МОм}$).

6.4.5 Потери энергии

Потери на высоких частотах у малогабаритных конденсаторов определяются, в основном, *замедленной поляризацией и сопротивлением изоляции* $R_{из}$ диэлектрика. *Потери характеризуются тангенсом угла потерь $\text{tg}\delta$* , дополняющим до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением. **Величину, обратную $\text{tg}\delta$, называют добротностью Q_C** конденсатора:

$$Q_C = \frac{1}{\text{tg}\delta}. \quad (6.5)$$

Характер зависимости ёмкости и потерь (добротности) конденсаторов от различных факторов (температуры, частоты напряжения и др.) определяется ме-

ханизмом поляризации диэлектриков. Различают два вида поляризации: упругую (деформационную) и релаксационную. **Упругая поляризация** свойственна неполярным диэлектрикам (диэлектрикам первого класса). Она устанавливается за время $\tau = 10^{-12} \dots 10^{-15}$ с и может считаться практически безынерционной. У этих диэлектриков диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты вплоть до частот $10^{12} \dots 10^{15}$ Гц, а потери в диэлектрике малы и не связаны с процессом поляризации. **Релаксационная поляризация** (дипольная и структурная) присуща полярным диэлектрикам (диэлектрикам второго класса). Она устанавливается за время $\tau = 10^{-5} \dots 10^{-7}$ с и является инерционной, так как на частотах в диапазоне $10^6 \dots 10^7$ Гц дипольные молекулы не успевают поворачиваться при изменениях направления электрического поля. Из-за этого диэлектрическая проницаемость снижается и с увеличением частоты принимает значение, присущее упругой поляризации (см. рисунок 3.3). Релаксационная поляризация связана со значительными потерями, обусловленными тепловыделением при вращении молекул. К релаксационной поляризации относят и спонтанную (самопроизвольную) ориентацию в сегнетоэлектриках, когда диэлектрическая проницаемость зависит от электрического поля.

У высокодобротных конденсаторов величина Q_C может достигать нескольких тысяч, а у низкодобротных (бумажных, сегнетоэлектрических и др.) несколько десятков. Добротность Q_C имеет сложную зависимость от частоты и температуры, но всегда уменьшается с увеличением влажности воздуха. Конденсаторы, опрессованные в пластмассу, нормально работают при относительной влажности окружающего воздуха 65...70 %, а герметизированные при 98% и выше. При малых δ ёмкость конденсатора не зависит от потерь, а при больших – потери следует учитывать, так как эквивалентная ёмкость конденсатора будет зависеть от $\text{tg}\delta$:

$$C = \frac{C_H}{1 + \text{tg}^2 \delta}. \quad (6.6)$$

Современные конденсаторы характеризуются малыми потерями ($\text{tg}\delta \leq 0.01 \dots 0.001$). Исключение составляют электролитические конденсаторы ($\text{tg}\delta \geq 0.01 \dots 0.3$).

6.4.6 Реактивная мощность

При использовании конденсаторов в высокочастотных цепях важным параметром является предельно допустимая **реактивная мощность** P_P :

$$P_P = \frac{U_{II}^2}{X_C} = U_{II}^2 \omega C = 2\pi f C U_{II}^2, [\text{вар}], \quad (6.7)$$

где U_{II} – действующее значение переменной составляющей напряжения; X_C – реактивная составляющая сопротивления конденсатора.

Зная P_P , можно определить **предельно допустимое** действующее значение переменной составляющей напряжения:

$$U_{II, \text{доп}} = \sqrt{\frac{P_P}{2\pi C f}}. \quad (6.8)$$

Очевидно, что при выборе конденсаторов для цепей переменного и пульсирующего тока необходимо учитывать допустимую реактивную мощность.

6.4.7 Полное сопротивление и зависимость ёмкости от частоты

Полное сопротивление конденсатора определяется: величиной ёмкости C , собственной индуктивности L_C и сопротивлением потерь R_C . На рисунке 6.2 приведена простейшая схема замещения конденсатора на высоких частотах. Индуктивность L_C складывается из распределений индуктивности самого конденсатора, а также индуктивности внутренних и внешних соединительных проводов (выводов). Её величина зависит от размеров обкладок и проводов, а также от конструктивного исполнения конденсатора. Наибольшая собственная индуктивность у бумажных и металлобумажных конденсаторов, а наименьшая – у керамических и слюдяных. Сопротивление R_C определяется в основном активными потерями в диэлектрике, обусловленными поляризацией и сквозной проводимостью, и зависит от частоты.

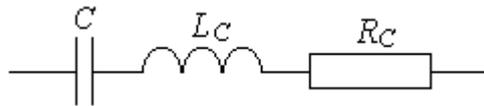


Рисунок 6.2 – Эквивалентная схема замещения конденсатора

Из схемы замещения следует, что в области высоких частот, близких к резонансной $f \leq f_P$, где:

$$f_P = (2\pi\sqrt{L_C C})^{-1}, \quad (6.9)$$

наблюдается *резкое увеличение* эквивалентной ёмкости конденсатора C_{Σ} :

$$C_{\Sigma} = \frac{C}{1 - \omega^2 L_C C}, \quad (6.10)$$

что весьма нежелательно при использовании конденсаторов в колебательных контурах. Таким образом, наличие собственной индуктивности ограничивает частотный диапазон конденсаторов. Обычно, *верхнюю частоту f_B , на которой может работать конденсатор, выбирают в 5 и более раз ниже резонансной f_P .*

6.4.8 Стабильность параметров конденсатора

Стабильность конденсатора характеризуется изменением его основных параметров под воздействием температуры, влажности, атмосферного давления, а также от механических воздействий, от времени и т.д.

Наиболее существенное влияние на величину ёмкости конденсаторов оказывает температура, под воздействием которой происходит изменение значения диэлектрической проницаемости диэлектриков, а также размеров обкладок, величины зазоров и т.д. Под воздействием температуры могут происходить *обратимые* и *необратимые* процессы.

Обратимые изменения характеризуются **температурным коэффициентом изменения ёмкости (ТКЕ)** – α_C , а необратимые – **коэффициентом температурной нестабильности ёмкости (КТНЕ)** – β_C .

По определению **ТКЕ** – относительное изменение ёмкости конденсатора при изменении температуры. В достаточно широком диапазоне изменения температур ΔC можно представить линейной частью разложения выражения для ёмкости конденсатора (6.2) в ряд Тейлора:

$$\alpha_C = \frac{\Delta C}{C_H \cdot \Delta t} \approx \frac{1}{C \Delta t} \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial \varepsilon} \cdot \Delta \varepsilon + \frac{\partial C}{\partial S} \cdot \Delta S + \frac{\partial C}{\partial d} \cdot \Delta d \right). \quad (6.11)$$

Частные производные от выражения для ёмкости конденсатора (6.2) по переменным ε , S и d будут равны:

$$\frac{\partial C}{\partial \varepsilon} = \frac{S(N-1)}{d} = \frac{C}{\varepsilon}, \quad \frac{\partial C}{\partial S} = \frac{\varepsilon(N-1)}{d} = \frac{C}{S}, \quad \frac{\partial C}{\partial d} = -\frac{\varepsilon S(N-1)}{d^2} = -\frac{C}{d}. \quad (6.12)$$

Подставив значения частных производных (6.12) в (6.11), получим:

$$\alpha_C \approx \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon \cdot \Delta t} + \frac{\Delta S}{S \cdot \Delta t} - \frac{\Delta d}{d \cdot \Delta t} = \alpha_\varepsilon(t) + \alpha_S(t) - \alpha_d(t), \quad (6.13)$$

где $\alpha_\varepsilon(t)$, $\alpha_S(t)$ и $\alpha_d(t)$ – температурные коэффициенты изменения диэлектрической проницаемости, площади обкладок и толщины диэлектрика, величина которых в общем случае зависит от температуры.

Таким образом, **ТКЕ** конденсатора равен алгебраической сумме температурных коэффициентов изменения диэлектрической проницаемости диэлектрика, площади обкладок и толщины диэлектрика.

Для уменьшения **ТКЕ** применяют диэлектрики с малым значением температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (ТКДП), а элементы конструкции конденсатора изготавливают из материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР).

Значения **ТКЕ** низковольтных конденсаторов общего назначения находятся в пределах от $\pm 30 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ (керамические, слюдяные) до $-10^{-2} K^{-1}$ (электролитические). Особенно большие **ТКЕ** у электролитических конденсаторов, причем зависимость $\alpha_C(t)$ очень нелинейная.

Необратимые изменения ёмкости связаны со старением диэлектрика и с необратимыми деформациями конденсатора под действием температуры и оцениваются **коэффициент температурной нестабильности конденсатора** β_C , равный относительному необратимому изменению ёмкости и часто измеряется в процентах:

$$\beta_C = \frac{\Delta C}{C} \cdot 100\%. \quad (6.14)$$

КТНЕ могут изменяться от $\pm 5 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ (некоторые керамические конденсаторы) до $\pm 2 \cdot 10^{-1} K^{-1}$ (бумажные, электролитические). Слюдяные конденсаторы относятся к высокостабильным и по значению **ТКЕ** и **ТКЛР** делятся на 4 группы (см. таблицу 6.2).

Таблица 6.2 - Группы ТКЕ слюдяных конденсаторов постоянной ёмкости (в диапазоне температур плюс 20...85 °С)

Группа	$\alpha_C \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	β_C
А	Не оговариваются	
Б	± 200	0.005
В	± 100	0.002
Г	± 50	0.001

У керамических, стеклокерамических и стеклянных конденсаторов *ТКЕ* изменяется в широком диапазоне, значения которых делятся на 14 групп, приведенных в таблице 6.3.

Таблица 6.3 - Группы *ТКЕ* керамических, стеклокерамических и стеклянных конденсаторов постоянной ёмкости (в диапазоне температур плюс 20...85 °С)

Группа	α_C, K^{-1}	β_C не более	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
П120	$+(120 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0005	Синий	–
П100	$+(100 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	–	Синий	Черный
П33	$+(33 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0005	Серый	–
МПО	$+(0 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	–	Голубой	Черный
М33	$-(33 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	–	Голубой	Коричневый
М47	$-(47 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0005	Голубой	Красный
М75	$-(75 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	–	Голубой	Красный
М150	$-(150 \pm 40) \cdot 10^{-6}$	–	Красный	Оранжевый
М220	$-(220 \pm 40) \cdot 10^{-6}$	–	Красный	Желтый
М330	$-(330 \pm 100) \cdot 10^{-6}$	0,0015	Красный	Зеленый
М470	$-(470 \pm 100) \cdot 10^{-6}$	–	Красный	Синий
М750	$-(750 \pm 100) \cdot 10^{-6}$	0,0015	Красный	–
М1500	$-(1500 \pm 200) \cdot 10^{-6}$	0,0015	Зеленый	–
М2200	$-(2200 \pm_{-300}^{+500}) \cdot 10^{-6}$	–	Зеленый	Желтый

В таблице введены следующие условные обозначения: П – $\alpha_C > 0$ (плюс); М – $\alpha_C < 0$ (минус); МПО – $\alpha_C \approx 0$ (минус-плюс ноль). Числовые значения после буквенного кода указывают на среднее значение величины α_C , умноженной на 10^{-6} , например: П120 – $\alpha_C = (120 \pm 30) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, М150 – $\alpha_C = -(150 \pm 40) \cdot 10^{-6} K^{-1}$; МПО – $\alpha_C = (0 \pm 30) \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Под влиянием температуры изменяется не только ёмкость конденсаторов, но и *добротность*. Это вызвано как изменением ёмкости, так и изменением удельного сопротивления проводников и диэлектрических потерь, которые могут быть особенно значительными при высоких температурах и высоких частотах. Добротность у большинства конденсаторов при изменении температуры в задан-

ных пределах (по ТУ), как правило, изменяется на несколько процентов. Однако у электролитических конденсаторов α_Q может изменяться в десятки раз.

Влажность и давление существенно сказываются на стабильности только у воздушных конденсаторов и конденсаторов с гигроскопичным диэлектриком открытой конструкции. Надёжной защитой от воздействия влажности и давления является герметизация.

6.4.9 Надёжность

Надёжность конденсаторов чаще всего характеризуют величиной **интенсивности отказов** λ или **средней наработкой до отказа** T , которые связаны между собой выражением:

$$\lambda = \frac{1}{T}. \quad (6.15)$$

За критерий отказа принимают состояние полной неработоспособности конденсатора, характеризующееся коротким замыканием обкладок (пробоем диэлектрика) или обрывом цепи. Причинами отказа может быть также недопустимые (по ТУ) изменения ёмкости, добротности или сопротивления изоляции.

Интенсивность отказов λ у конденсаторов постоянной ёмкости имеет значение в пределах $(1.5...5) \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, а у конденсаторов переменной ёмкости – $\lambda \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Установлено, что средняя наработка до отказа уменьшается примерно вдвое при повышении температуры сверх допустимой по ТУ на каждые $8...15 \text{ }^\circ\text{C}$. Особенно чувствительны к перегреву электролитические и бумажные конденсаторы. Так, например, повышение температуры на $(10...15) \text{ }^\circ\text{C}$ выше допустимой уменьшает наработку до отказа электролитических и бумажных конденсаторов в $8...10$ раз.

Для повышения надёжности конденсаторов рекомендуется использовать их при пониженных рабочих напряжениях ($K_H = U_{РАБ} / U_H \leq 0.8$), а реактивная мощность конденсаторов должна быть не более 0.7 от номинальной. Однако уменьшение K_H относительно слабо сказывается на увеличении срока службы.

6.4.10 Удельные показатели

Для сравнительной оценки качества различных конденсаторов применяются **удельные показатели** (характеристики):

- удельная ёмкость $C_{УД} = C_H / V_K$;
- удельный объем $V_{УД} = V_K / C_H$,
- удельная масса $G_{УД} = G_K / C_H$;
- удельная стоимость $\Pi_{УД} = \Pi_K / q = \Pi_K / (C_H U_H)$;
- удельная энергоёмкость $A_{УД} = C_H U_H^2 / 2V_K$;
- удельная реактивная мощность $P_{Р.УД} = P_P / V_K$,

где C_H – номинальная ёмкость; V_K – активный или полный объем конденсатора; G_K – масса; C_K – цена; q – заряд; P_P – реактивная мощность конденсатора.

Наибольшая величина *удельной ёмкости* $C_{уд}$ у электролитических конденсаторов, особенно низковольтных, а наименьшая – у воздушных.

6.5 Конструктивные особенности, основные свойства и области применения конденсаторов постоянной емкости

6.5.1 Керамические конденсаторы

В керамических конденсаторах в качестве диэлектрика используется *радиотехническая керамика*.

Керамические конденсаторы *отличаются*: простотой конструкции и технологичностью (пригодностью для массового производства), малыми потерями, высокой стабильностью параметров, малой собственной индуктивностью, невысокой стоимостью, малыми размерами. Эти свойства обусловили их широкое применение в качестве маломощных конденсаторов даже при относительно высоких температурах. Керамические конденсаторы работают в широком диапазоне температур и выпускаются с широким диапазоном *ТКЕ* (см. таблицу 6.3). Использование наборов конденсаторов с *ТКЕ* разного знака позволяет получить ёмкость с высокой температурной стабильностью.

Однако ряд типов керамических конденсаторов имеет существенную нестабильность ёмкости и не нормируется по *ТКЕ*, но разделяется на группы по величине допустимых изменений ёмкости в установленном диапазоне рабочих температур. В таблице 6.4 приведена классификация таких конденсаторов по группам и их кодировка, где буква Н означает, что α_C не нормируется, а нормируется лишь максимально допустимое изменение ёмкости δC в процентах от C_H при изменении температуры от -60 до $+85^\circ\text{C}$.

Керамические конденсаторы *отличаются широким диапазоном значений диэлектрических потерь* ($\text{tg}\delta = (10 \dots 350) \cdot 10^{-4}$), которые увеличиваются с ростом температуры и частоты. Все виды керамических конденсаторов подвержены влиянию температуры и процессу старения, при этом с увеличением температуры интенсивность старения повышается.

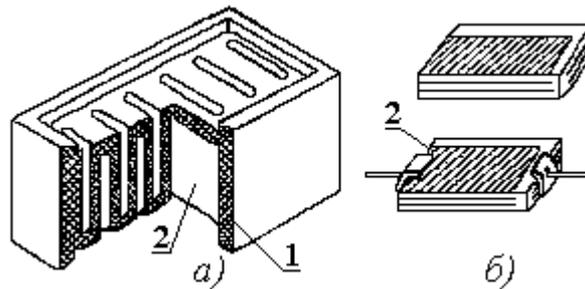
Таблица 6.4 - Допустимые изменения ёмкости керамических конденсаторов с ненормированным *ТКЕ* (для рабочих температур от -60 до $+85^\circ\text{C}$)

Группа	Изменение ёмкости, %	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
Н10	± 10	Оранжевый	Черный
Н20	± 20	Оранжевый	Красный
Н30	± 30	Оранжевый	Зеленый
Н50	-50	Оранжевый	Синий
Н70	-70	Оранжевый	–
Н90	-90	Оранжевый	Белый

Ёмкость керамических конденсаторов с обычной радиотехнической керамикой составляет от 1 до 2000 $n\Phi$, а с сегнетокерамикой – от 0.01 до 1 $\mu\kappa\Phi$. **Дисковые и трубчатые** конденсаторы имеют малую удельную ёмкость. Они используются на частотах либо до 500 $MГц$ (дисковые), либо до 100 $MГц$ (трубчатые). Обкладки наносятся методом вжигания, что исключает образование воздушных прослоек и увеличивает стабильность. Для уменьшения влияния внешних факторов (влаги) на параметры конденсаторы покрываются эмалью, глазурью, компаундами, опрессовываются пластмассой или герметизируются.

Широкое применение в малогабаритной аппаратуре получили **литые и монолитные конденсаторы**, удельная ёмкость которых значительно больше, чем у трубчатых и дисковых.

Литые конденсаторы изготавливают из секционных (щелевидных) заготовок, получаемых горячим литьем из керамической массы (рисунок 6.3, а). После обжига заготовки стенки, образующие щели, серебрят и, таким образом, получают обкладки конденсатора. При толщине стенок (0.1...0.2) $мм$ и $\epsilon = 3000$ удается получить удельную ёмкость $C_{уд} = 0.165 \mu\kappa\Phi/см^3$.



1 – керамическая заготовка; 2 – металлизация

Рисунок 6.3 – Схемы конструкций литых (а) и монолитных (б) конденсаторов

Монолитные конденсаторы КМ4 и КМ5 (рисунок 6.3, б) изготавливают из тонких необожженных керамических пленок с органическим пластификатором, металлизированных и собранных стопкой. После обжига эта стопка становится монолитным блоком плоского конденсатора. При реализуемых толщинах керамических пленок 30...35 $\mu\kappa\kappa$ удельная ёмкость достигает (10...20) $\mu\kappa\Phi/см^3$, а если число пленок мало, то при напряжении 50 В удельная ёмкость составляет (0.2...0.3) $\mu\kappa\Phi/см^3$. Монолитные конденсаторы изготавливают на напряжения от 15 до 300 В с величиной ёмкости от 16 $n\Phi$ до 3 $\mu\kappa\Phi$ при $tg\delta < 5 \cdot 10^{-4}$.

Многослойные монолитные керамические чип-конденсаторы – это наиболее многочисленный вид конденсаторов, составляющий 80% от всех выпускаемых **ТМП-конденсаторов**. Конденсаторы этого типа представляют собой несколько обкладок, соединенных параллельно, что обеспечивает высокую удельную ёмкость. Они обладают высокой температурной стабильностью, влагостойкостью, высокой надежностью. Диапазон емкостей от 1 $n\Phi$ до 1 $\mu\kappa\Phi$. Конструкция чип-конденсатора приведена на рисунке 6.4.

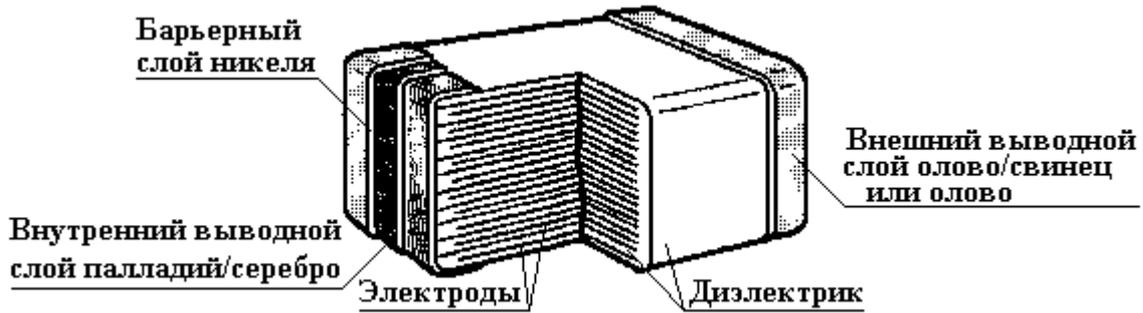


Рисунок 6.4 – Конструкция многослойного монолитного керамического чип-конденсатора

Такая конструкция получается путем последовательного нанесения диэлектрика и проводящего материала. Метод является групповым, изготавливается сразу несколько однотипных конденсаторов. Первоначально наносится базовый слой диэлектрика, который высушивается потоком воздуха или нагревом. На базовый слой наносят изображенные рисунки электродов через трафарет продавливанием пасты, при этом формируется первая обкладка. Затем поверх этого рисунка наносится слой диэлектрика, толщина которого зависит от требуемой ёмкости и рабочего напряжения (25...37 мкм для напряжения 50...100 В). Затем наносится слой проводящей пасты образующей вторую обкладку, поверх которого накладывают слой диэлектрика, и т.д. до получения требуемой ёмкости. Последняя ступень – нанесение поверхностного диэлектрического слоя (аналогичного слою основания). В результате получают мозаику из многочисленных чип-конденсаторов, которую разрезают на отдельные конденсаторы, спекают при температуре 1200 °С, производят механическую обработку торцовых поверхностей и формируют выводы. Чип-конденсаторы могут паяться теми же методами, что и чип-резисторы.

Зарубежные образцы конденсаторов типа NPO/GOG и X7R-25B-10% для номиналов (1...10000) нФ поставляются в корпусе 0603, а для номиналов (0.01...0.1) мкФ – в корпусе 0805. Чип-конденсаторы типа Y5B-16B-20% для номиналов (0.22...1) мкФ поставляются в корпусе 0805, а для номинала 2.2 мкФ – в корпусе 1206. Конденсаторы NPO/GOG и X7R могут работать в диапазоне температур (–55...+125) °С, а Y5B – в диапазоне (–30...+85) °С.

Отечественные керамические чип-конденсаторы характеризуются рабочими напряжениями от 10 до 500 В и ёмкостью от 1 нФ до 4.7 мкФ в зависимости от типов (К10-17-4В, К10-42, К10-43, К10-47, К10-50В, К10-56, К10-57, К10-60В, К10-73-6В). Конденсаторы с ёмкостями меньше 2700 нФ предназначены для работы при температурах (–60...+125) °С, а с большими ёмкостями – при температурах (–60...+85) °С.

Помимо перечисленных типов керамических конденсаторов в РЭС часто применяются **пластинчатые конденсаторы** типа КП и КПС, изолированные (с усиленной внешней изоляцией) К10-7, К10-15 (с ёмкостью до 0.33 мкФ), блоки конденсаторов КТБ, КТНБ и др. В фильтрах питания электронно-лучевых трубок, в мощных высокочастотных и импульсных устройствах используются высоко-

вольтные керамические конденсаторы на 10...25 кВ дискового, горшкового, бочоночного (К15-12) и трубчатого (К15-13) типов.

6.5.2 Стекланные конденсаторы

В *стекланных конденсаторах* в качестве диэлектрика используется *стекло*, основными *преимуществами* которого являются возможность получения высокой электрической прочности при небольшой толщине диэлектрического слоя, влагостойкость и радиационная стойкость, а также малая стоимость. *Недостатками* обычного стекла являются *высокие потери*, резко возрастающие при увеличении температуры, и большая хрупкость.

От этих недостатков можно избавиться, если вместо *стекланных пленок* использовать *стекланный порошок*. Естественно, при этом радикальным образом меняется технология изготовления конденсаторов по сравнению с керамическими и слюдяными. Конденсаторы, изготовленные на основе использования стеклальной пыли, получили название *стеклоэмалевых*.

В виду малой величины диэлектрической проницаемости стекла ($\epsilon = 10 \dots 12$) и значительной толщины слоя эмали ($d = 0.2 \dots 0.25$ мм) величина ёмкости стеклоэмалевых конденсаторов небольшая ($C_H = 10 \dots 100$ пФ). Для увеличения диэлектрической проницаемости в *стекланный порошок* добавляют керамику с большой величиной ϵ , благодаря чему существенно увеличивается C_H и $C_{уд}$. Такие конденсаторы получили название *стеклокерамических*.

Наряду со стеклокерамическими, применение находят *стеклоплёночные конденсаторы*. Они представляют собой секции чередующейся стеклальной плёнки толщиной 15...20 мкм и алюминиевой фольги, спеченных в монолитный блок. Так как диэлектрическая проницаемость у стекла выше, чем у слюды ($\epsilon = 6.5 \dots 7$), то $C_{уд}$ у стеклоплёночных конденсаторов выше, чем у слюдяных (до 10^4 пФ/м³).

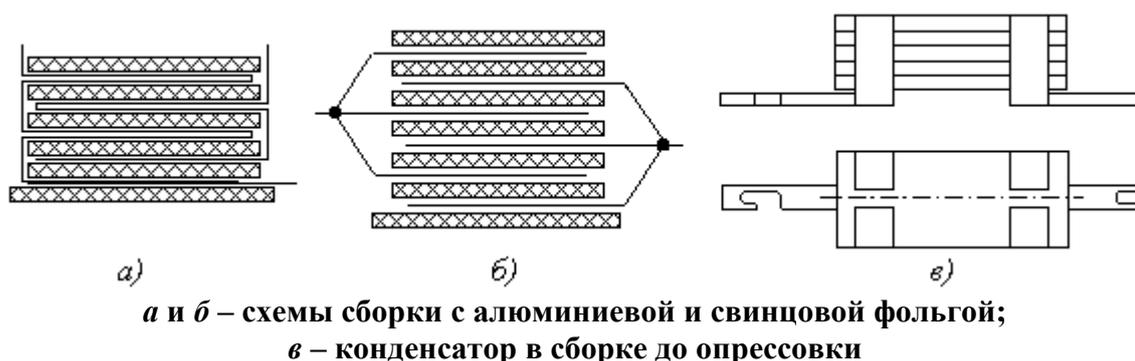
Стеклоплёночные конденсаторы используются в резонансных контурах, для ёмкостной связи и в качестве шунтирующих на высоких частотах. Наиболее широко применяют стеклокерамические конденсаторы типов К22У-2 для микромодулей и К22У-3 для интегральных схем. Стеклоэмалевые конденсаторы типа К21У-1,2,3,5 широко используются в линиях задержки. Стекланные и стеклокерамические конденсаторы обладают достаточно высокой температурной стабильностью (от $+120 \cdot 10^{-6}$ до $-330 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹) и нормируются по *ТКЕ* (см. таблицу 6.3).

6.5.3 Слюдяные конденсаторы

Конструктивно *слюдяные конденсаторы* представляют собой пакет слюдяных пластин, с вкладными алюминиевыми или свинцово-оловянными обкладками (рисунок 6.5,а и б), опрессованных в пластмассу. В некоторых конструкциях обкладки напыляются серебром непосредственно на пластины до сборки в пакеты.

В качестве диэлектрика в слюдяных конденсаторах используются нормализованные пластинки (шаблонки) конденсаторной слюды сорта «*мусковит*» (толщиной 0.02...0.06 мм) марок: СО – слюда образцовая (для образцовых конденса-

торов), СФ – для фильтровых конденсаторов, СВЧ и СНЧ – для высокочастотных и низкочастотных конденсаторов.



*а и б – схемы сборки с алюминиевой и свинцовой фольгой;
в – конденсатор в сборке до опрессовки*

Рисунок 6.5 – Устройство слюдяных конденсаторов с вкладными обкладками

Конденсаторам с фольговыми обкладками характерны существенные недостатки: низкая стабильность из-за неизбежных воздушных прослоек между обкладками и диэлектриком, повышенный угол потерь $\operatorname{tg}\delta$ и довольно низкая удельная ёмкость. Напротив, конденсаторы с серебряными нанесенными обкладками обладают высокой стабильностью, низким TKE и малым $\operatorname{tg}\delta$.

Основными **достоинствами** слюдяных конденсаторов перед другими являются: *высокая стабильность ёмкости, повышенная добротность и высокая степень надёжности*. По TKE слюдяные конденсаторы нормируются (таблица 6.2). **Недостатки**: относительно *низкая удельная ёмкость $C_{уд}$, относительно высокая удельная стоимость $C_{уд}$* .

Слюдяные конденсаторы выпускались нескольких типов: опрессованные (КСО), герметизированные малогабаритные (СГМ, СГМЗ и др.), герметизированные в металлическом корпусе (КСГ-1, КСГ-2), эталонные для измерительной аппаратуры и др. Диапазон рабочих температур от -60 до $+125$ °С, диапазон частот от постоянного тока до 200 МГц. Диапазон рабочих напряжений от 250 В до 7 кВ. В настоящее время слюдяные конденсаторы используются лишь как образцовые конденсаторы. Большинство же типов слюдяных конденсаторов практически вытеснены более дешевыми и малогабаритными керамическими, стеклоэмалевыми и пленочными конденсаторами и сняты с производства.

6.5.4 Бумажные и металлобумажные конденсаторы

Бумажные конденсаторы выполняются из двух полос алюминиевой или свинцово-оловянной фольги толщиной до 5...6 мкм, разделенных несколькими слоями конденсаторной бумаги толщиной от 4 до 15 мкм и свернутых в виде овального или круглого рулона. Для придания конденсаторам прямоугольной формы заготовки опрессовывают. Намотка может производиться различными способами: обычная (со скрытой фольгой), безиндуктивная (с выступающей фольгой), проходная (с обкладками различной ширины).

Выводы обкладок могут быть вкладные и с выступающей фольгой. Вкладные выводы имеют существенный недостаток, при длительном хранении на выводах и обкладках образуется пленка окисла и контакт теряется. При подаче вы-

сокого напряжения этот контакт может быть восстановлен. Во втором варианте указанное явление исключено, т.к. на выступающие обкладки с обоих торцов напыляют олово, к которому припаивают выводы.

Для повышения электрической прочности и стабильности рулоны пропитывают парафином, церезином, вазелином, маслами и компаундами. При пропитке повышается электрическая прочность и увеличивается ёмкость конденсаторов.

В металlobумажных конденсаторах обкладки наносят методом вакуумного испарения на лакированную сторону бумажной ленты. Такие конденсаторы **обладают свойством самовосстановления**, которое заключается в том, что при наличии короткого замыкания между обкладками очень тонкая металлическая пленка плавится и испаряется (выгорает), изолируя тем самым точку короткого замыкания. Это свойство позволило перейти от двойного слоя бумаги к одному слою. Кроме того, толщина обкладок у металlobумажных конденсаторов может быть доведена до $0.03 \dots 0.05 \text{ мкм}$ (по сравнению с $5 \dots 6 \text{ мкм}$ у бумажных). Все это позволило увеличить $C_{уд}$ металlobумажных конденсаторов в 4 и более раз по сравнению с бумажными. К тому же они имеют более высокую стабильность, так как в них исключены воздушные прослойки между обкладками и диэлектриком.

Бумажные и металlobумажные конденсаторы выпускаются на рабочее напряжение от 160 В до 4 кВ и номинальные ёмкости от 470 пФ до 10 мкФ . Они могут работать при температуре от -60 до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$, а термостойкие – до $+100 \text{ }^\circ\text{C}$ и имеют более высокую удельную ёмкость и значительно дешевле, чем слюдяные и керамические конденсаторы. Их **недостатки** в сравнительно низкой стабильности и в невозможности использования на частотах выше *нескольких сотен кГц* из-за *больших потерь* в диэлектрике.

Конструктивно бумажные и металlobумажные конденсаторы оформляются в корпусах в виде цилиндров или параллелепипедов (рисунок 6.7).

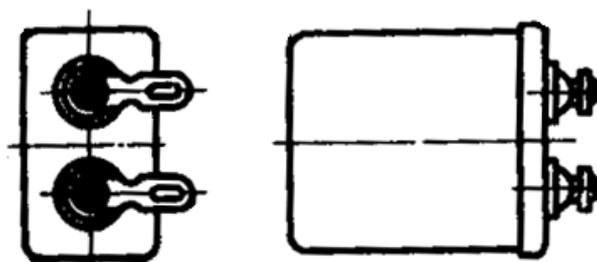


Рисунок 6.7 – Бумажный конденсатор типа БМП

Бумажные и металlobумажные конденсаторы используют на низких частотах в РЭС, отказ которых не приводит к большим затратам средств и времени. Они могут применяться в качестве блокировочных, развязывающих, разделительных и фильтрующих элементов в цепях постоянного, переменного и импульсного напряжения. Ассортимент выпускаемых промышленностью бумажных и металlobумажных конденсаторов довольно большой: КБГ, БМ, БМП, БМТ, КБГИ, КБГМ, К40-13, и т.д. – бумажные; К42У-2, МБГП-1 и т.д. – металlobумажные.

В настоящее время многие типы бумажных и металlobумажных конденсаторов сняты с производства, так как активно вытесняются более качественными пленочными конденсаторами.

6.5.5 Пленочные конденсаторы

Плѐночные конденсаторы сходны по конструкции и по диапазону номинальных емкостей с бумажными и с металлобумажными, но диэлектриком в них являются синтетические плѐнки. Плѐночные конденсаторы *отличаются* от двух последних типов тем, что имеют *большее по величине сопротивление изоляции, большую стабильность и меньшие потери*. В плѐночных конденсаторах применяют полярные и неполярные плѐнки.

Неполярные плѐнки из полистирола, полиэтилена, политетрафторэтилена (ПТФЭ, фторопласт-4) характеризуются: небольшой величиной диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 2 \dots 2.5$); очень малыми потерями ($\operatorname{tg} \delta = (5 \dots 6) \cdot 10^{-4}$), практически независимыми от частоты; высоким удельным сопротивлением ($R_{уд} \geq 10^{17} \dots 10^{19} \text{ Ом} \cdot \text{см}$); эти плѐнки практически не впитывают влагу. Поляризация тонких пленок носит электронный характер.

Наиболее широкое применение из пленочных неполярных конденсаторов получили *полистирольные К70-6* (с фольговыми обкладками), которые отличаются особенно высоким сопротивлением изоляции (постоянная времени $\tau_{из}$ до 10^5 с ($\text{МОм} \cdot \text{мкФ}$)), очень малыми потерями и высокой стабильностью ($\alpha_C = -(75 \dots 200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$). Благодаря указанным свойствам, полистирольные конденсаторы нашли широкое применение в специализированных электроизмерительных и счетно-решающих устройствах, а также в высококачественных контурах. Изготавливаются такие конденсаторы с малыми допусками по ёмкости ($\delta C = 0.1 \dots 1\%$). К недостаткам полистирольных конденсаторов относятся низкая теплостойкость (до $60 \text{ }^\circ\text{C}$) и малая удельная емкость $C_{уд}$ (на порядок меньше, чем у бумажных).

Более высокой теплостойкостью обладают *фторопластовые* конденсаторы К72-П6 (с фольговыми обкладками) на основе фторопласта-4, у которых диапазон рабочих температур от -60 до $+200 \text{ }^\circ\text{C}$. Сравнительно большая добротность ($Q > 600$), низкий $\operatorname{TKE} = -(75 \dots 200) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ и большая величина сопротивления изоляции позволяют применять их в качестве переходных и во времязадающих цепях с большой величиной постоянной времени. Лишь высокая стоимость фторопластовых конденсаторов и низкая радиационная стойкость ограничивают их область применения.

Все неполярные плѐночные конденсаторы имеют довольно малую удельную ёмкость ($C_{уд} = 10^3 \dots 10^4 \text{ пФ/см}^3$).

Полярные плѐнки (ацетат целлюлозы, политрифторхлорэтилен, полиэтилентерефталат – лавсан) отличаются от неполярных повышенной величиной ϵ и $\operatorname{tg} \delta$. Конденсаторы на основе полярных пленок имеют *низкую добротность и стабильность*, но обладают значительно *большой удельной ёмкостью*, чем неполярные конденсаторы. Область применения полярных пленочных конденсаторов та же, что и бумажных. Обладая более высокими электрическими свойствами, они во многих случаях вытесняют бумажные.

Значительно *большой удельной ёмкостью* по сравнению с пленочными конденсаторами обладают *металлоплѐночные и лакоплѐночные*.

Металлоплёночные конденсаторы изготавливаются, как и металлобумажные, путем металлизации синтетических пленок методом испарения в вакууме и также обладают свойством самовосстановления (например, К73-36 – лавсановые с металлизированными обкладками). Конструктивно они выполняются либо аналогично металлобумажным в виде цилиндров или параллелепипедов для объемного монтажа, либо в виде плоских прямоугольных пластин (с однонаправленными выводами) для печатного монтажа. Обладая лучшими электрическими свойствами (большим $C_{уд}$, меньшим $\text{tg}\delta$, лучшей стабильностью) металлоплёночные конденсаторы все больше вытесняют плёночные, бумажные и металлобумажные, особенно в низковольтных, малогабаритных РЭС.

Лакоплёночные конденсаторы изготавливаются на основе синтетических пленок, полученных путем отливки из раствора (лака). Отливка производится на изоляционную или металлическую подложку, благодаря чему удается достичь толщины плёнки до 2...3 мкм по сравнению с 6...8 мкм при обычной технологии изготовления пленок. Они могут изготавливаться из плёнки с подложкой или без подложки. Конденсаторы с удаленной подложкой имеют большую удельную ёмкость. Так, например, конденсатор К76П-1 на основе триацетатной плёнки имеет $C_{уд}$ в 3 раза больше, чем у металлобумажных конденсаторов. При $U_H = 50 \text{ В}$ удельная емкость $C_{уд} \approx 1 \text{ мкФ/см}^3$, что на порядок выше, чем у металлобумажных конденсаторов. Характеристики лакоплёночных конденсаторов близки к характеристикам металлобумажных, но их преимущество перед металлобумажными конденсаторами в более высокой удельной ёмкости. Такие конденсаторы, например К76П-1, имеют ёмкость до 22 мкФ, невысокое рабочее напряжение (не более 50 В) и размеры в 5...7 раз меньше размеров равноценных металлобумажных конденсаторов.

Плёночные конденсаторы работают на частотах вплоть до сотен МГц.

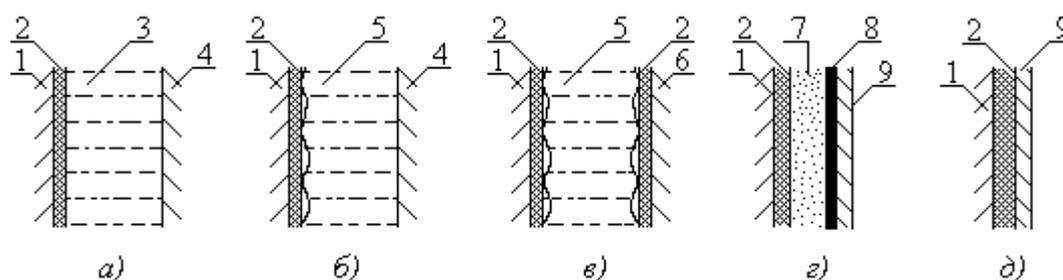
6.5.6 Конденсаторы с оксидным диэлектриком

Конденсаторы с оксидным диэлектриком существенно отличаются от рассмотренных выше конденсаторов по конструкции, технологии изготовления и электрическим свойствам. В зависимости от конструкции и технологии изготовления они разделяются на **электролитические, оксидно-полупроводниковые и оксидно-металлические**.

Конструктивно конденсаторы с оксидным диэлектриком (рисунок 6.8) состоят из двух электродов – анода 1 и катода 4. Диэлектриком в них служит тонкая оксидная пленка 2, полученная на аноде электрохимическим способом. Анод выполняется либо в виде объемного цилиндра (**объемно-пористые**), либо в виде тонкой металлической ленты.

Так как поверхность оксидной плёнки получается сильно шероховатой, то для обеспечения надежного контакта ее с катодом используется посредник. В электролитических конденсаторах роль такого посредника выполняет электролит. В объемно-пористых конденсаторах анод погружается в жидкий электролит 3, который способен свободно проникать в поры анода. В **сухих электролитических конденсаторах** (рисунок 6.8, б, в) электролит используется в виде вязкого желе-

образного вещества, которым пропитывается волокнистая тонкая прокладка 5 из бумаги или ткани. Сухие конденсаторы имеют меньший ток утечки, а жидкостные – обладают свойством самовосстановления при частичном пробое. В **оксидно-полупроводниковых конденсаторах** (рисунок 6.8, *з*) роль посредника выполняет твёрдый полупроводник 7, а катодом служит слой графита 8 с напыленной пленкой металла 9. В **оксидно-металлических конденсаторах** (рисунок 6.8, *д*) катод наносится методом испарения в виде тонкого слоя металла 9 непосредственно на оксидную пленку.



а – жидкий; *б* – сухой; *в* – сухой неполярный; *з* – оксидно-полупроводниковый; *д* – оксидно-металлический конденсаторы.

1 – анод (вентильный металл); 2 – оксидный слой; 3 – жидкий электролит; 4 – катод (металлический корпус); 5 – волокнистая прокладка, пропитанная электролитом; 6 – катодная фольга; 8 – слой графита; 9 – тонкий слой металла, напыленного испарением

Рисунок 6.8 – Схемы устройства элементов конденсаторов с оксидным диэлектриком

Оксидная пленка обладает свойством *униполярной проводимости* (вентильным свойством), т.е. высоким активным сопротивлением лишь тогда, когда к аноду приложено положительное относительно катода напряжение. Поэтому конденсаторы с оксидным диэлектриком в обычном исполнении **полярные** и могут быть использованы лишь в цепях постоянного или пульсирующего напряжения. При несоблюдении полярности через конденсатор потечет большой ток, который вызовет интенсивный разогрев и выход из строя конденсатора (иногда это сопровождается взрывом). В цепях, в которых пульсирующий ток может менять направление, используются неполярные конденсаторы (рисунок 6.8, *в*). Основными элементами конструкции таких конденсаторов служат два анода покрытых оксидным слоем, между которыми находится волокнистая прокладка, пропитанная вязким электролитом. При любой полярности напряжения между анодами на одном из анодов оксидный слой будет иметь высокое сопротивление, что ограничивает ток проводимости через конденсатор.

Для изготовления анода используются металлы: алюминий, тантал, ниобий. В зависимости от этого различают **алюминиевые, танталовые и ниобиевые конденсаторы с оксидным диэлектриком**.

Несмотря на то, что по большинству технических характеристик конденсаторы с оксидным диэлектриком **уступают** конденсаторам других типов, они нашли очень широкое применение из-за очень большой удельной ёмкости (до 30 мкФ/см^3 и выше) и широкого диапазона номинальных емкостей ($1 \dots 10^4 \text{ мкФ}$). Это объясняется малой толщиной оксидной плёнки ($0.01 \dots 6.0 \text{ мкм}$), ее высокой

диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_{Al} \approx 10$, $\epsilon_{Ta} \approx 27$, $\epsilon_{Nb} \approx 45$) и большой активной поверхностью анода. Алюминиевые конденсаторы, кроме того, еще имеют низкую удельную стоимость, что обусловлено низкой стоимостью исходных материалов и большими номиналами емкостей.

Основными **недостатками** конденсаторов с оксидным диэлектриком являются: низкая надежность, низкая точность и стабильность ёмкости, большие потери, низкое сопротивление изоляции (большие токи утечки), чувствительность к перенапряжениям и температуре. При понижении температуры ёмкость уменьшается, а потери увеличиваются; при повышении температуры ёмкость и ток утечки увеличиваются. **Существенными недостатками** конденсаторов с оксидным диэлектриком являются также относительно невысокое рабочее напряжение (до 500 В у алюминиевых, до 600 В у танталовых и только до 20 В у ниобиевых), а также сильная зависимость ёмкости и $\text{tg}\delta$ от частоты.

Общий характер зависимости $C_{уд}$ и $\text{tg}\delta$ от частоты и температуры для электролитических конденсаторов представлен на рисунке 6.9.

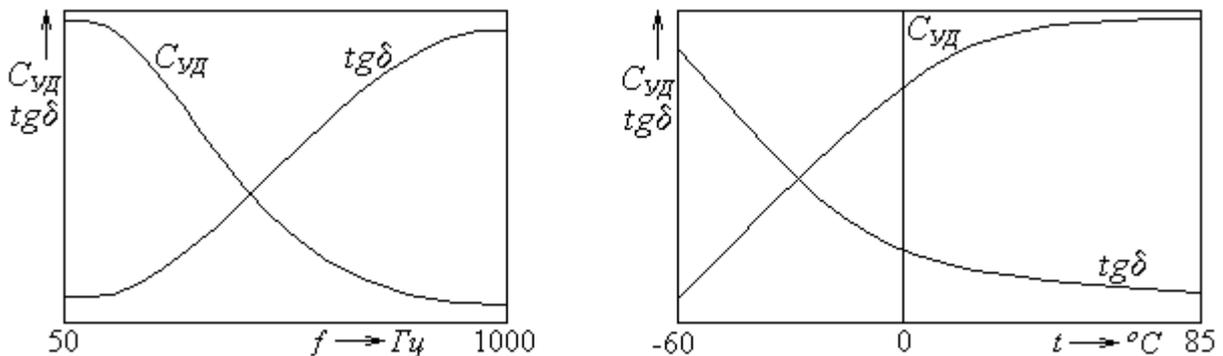


Рисунок 6.9 – Зависимости $C_{уд}$ и $\text{tg}\delta$ от частоты переменной составляющей f и температуры t для электролитических конденсаторов

Алюминиевые конденсаторы с оксидным диэлектриком, как наиболее дешевые, получили более широкое применение. Из них наиболее употребительны из-за дешевизны сухие **алюминиевые конденсаторы** с ёмкостью от 0.5 до 5000 мкФ на напряжения от 3 до 500 В (К50-16 – широкого применения, К50-15 – малогабаритные, К50-17, -21, -24, -27, -29, ... -50, -51, -53, -68, -69, -71, -72 и т.д.).

По величине минимально допустимой температуры t_{min} эти конденсаторы делят на 4 типа: *H* – неморозостойкие ($t_{min} = -10^\circ\text{C}$), *M* – морозостойкие (-40°C), *ПМ* – повышенной морозостойкости (-50°C) и *ОМ* – особо морозостойкие (-60°C). Для типов *M*, *ОМ* и *ПМ* верхняя допустимая температура $t_{max} = +60^\circ\text{C}$, а конденсаторы типа *H* работают при комнатной температуре. При минимальной температуре ёмкость уменьшается в 1.5...2 раза, а при максимальной – увеличивается в 6.3. Конденсаторы типов *H* и *M* имеют травленные аноды, большую удельную ёмкость и большие потери по сравнению с конденсаторами типов *ОМ* и *ПМ*.

Танталовые электролитические конденсаторы имеют меньшие габариты и лучшие электрические характеристики по сравнению с алюминиевыми. Это объясняется более высокой стабильностью свойств окиси тантала и более высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости. У них больше верхняя рабочая частота $f \sim 10^5$ Гц (у алюминиевых $f \sim 10^3$ Гц), более широкий диапазон рабо-

чих температур ($-80\dots+85^{\circ}\text{C}$). Использование в танталовых конденсаторах объемно-пористого анода позволило увеличить их удельную ёмкость в $5\dots 10$ раз по сравнению с алюминиевыми. Общим *недостатком танталовых конденсаторов* с оксидным диэлектриком по сравнению с другими является их *дороговизна*.

Достоинство оксидно-полупроводниковых танталовых конденсаторов (К53-7, -16, -18, -22, -25, -28...30 и т.д.) перед *электролитическими* (К52-8, -9, -11, -12 и т.д.) в слабой зависимости ёмкости и потерь в области низких температур, а их *недостаток* – более низкие рабочие напряжения (до 35 В).

Ниобиевые оксидно-полупроводниковых конденсаторы более дешевы (К53-4А). Они имеют электрические параметры близкие к танталовым, но обладают более высокой удельной ёмкостью. Основным *недостатком* ниобиевых конденсаторов является *низкое рабочее напряжение* (от 6 до 20 В).

В силу отмеченных выше свойств конденсаторы с оксидным диэлектриком нашли преимущественное применение в сглаживающих фильтрах. Однако допустимая величина пульсаций напряжения $U_{m,доп}$ в значительной степени зависит от частоты пульсаций $f_{п}$ и оговаривается в ТУ. Так, например, для танталовых электролитических и оксидно-полупроводниковых конденсаторов при повышении $f_{п}$ с 50 до 1000 Гц допустимое напряжение пульсаций $U_{m,доп}$ уменьшается в $5\dots 6$ раз, а для алюминиевых электролитических конденсаторов – в 10 и более раз. Но из-за высокой стоимости и дефицитности танталовые конденсаторы применяются преимущественно в РЭА специального назначения.

Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы ТМП-типов находят все более широкое применение в современных разработках, вытесняя традиционные конструкции оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Отечественная промышленность выпускает *оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы ТМП-типов* К53-36 ОЖО.464.249 и К53-37 НДПК.673546.0007.

Конденсаторы типа К53-36 имеют ёмкости от 0.1 до 68 мкФ , рабочие напряжения от 6.2 до 32 В и габаритные размеры $(4.2\dots 4.5)\times(2\dots 2.5)\times(2.5\dots 5)\text{ мм}$, а конденсаторы типа К53-37 имеют ёмкости от 0.1 до 100 мкФ , рабочие напряжения от 4 до 50 В и габаритные размеры $(6.6\dots 4)\times(6.6\dots 3)\times(4\dots 7.1)\text{ мм}$. Типовая конструкция танталового чип-конденсатора изображена на рисунке 6.10.

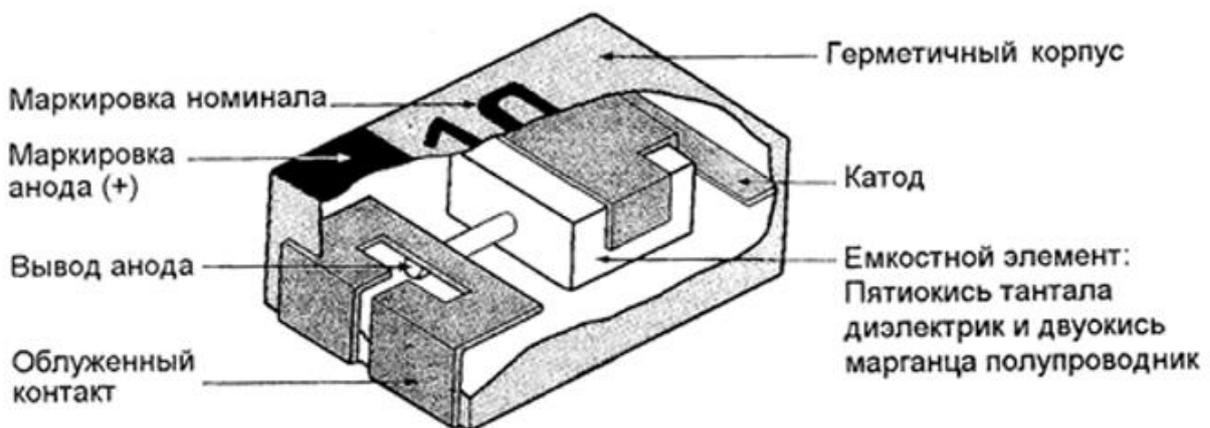


Рисунок 6.10 – Типовая конструкция танталового чип-конденсатора [13]

В этих конденсаторах в качестве диэлектрика используют пятиокись тантала, а в качестве полупроводника – двуокись марганца. Корпус конденсатора изготавливается из пластмассы. В диапазоне рабочих температур от -55 до $+85$ °С ёмкость конденсаторов меняется на 20%, увеличиваясь с ростом температуры. Эти конденсаторы выдерживают двукратное погружение в расплавленный припой в течение 5 с при температуре 245 °С или пайку в течение 10 с при температуре 260 °С. Зарубежные танталовые чип-конденсаторы имеют ёмкости от 0.47 до 220 мкФ и рабочие напряжения от 4 до 35 В.

6.5.7 Интегральные конденсаторы

Интегральные конденсаторы различают *плёночные*, применяемые в гибридных ИС и *полупроводниковые*, применяемые в полупроводниковых и совмещенных ИС.

Плёночные конденсаторы конструктивно выполняются обычно однослойными. В качестве диэлектриков применяются преимущественно окислы металлов: Al, Si, Ta, Sb (Al_2O_3 , SiO, SiO_2 , Ta_2O_5 , Sb_2O_3), которые формируются непосредственно на обкладках. Реже применяются плёнки из полимерных материалов – полистирола, фторопласта-4, стекла, керамики и т.д. Одна обкладка наносится непосредственно на подложку ИС (методом катодного распыления) толщиной не более 0.5 мкм. На ее поверхность наносится (или формируется химическим способом) диэлектрическая пленка, а на диэлектрик наносится вторая обкладка (катодным распылением или вакуумным испарением).

Основным достоинством плёночных интегральных конденсаторов является большая номинальная ёмкость (до сотен нанофард) и высокая удельная ёмкость ($C_{уд} = 100 \dots 1000 \text{ нФ/мм}^2$). Также необходимо отметить их относительно высокую стабильность и добротность. К недостаткам следует отнести, прежде всего, большие габариты (большая площадь, занимаемая на подложке ИС) и низкую точность ($\delta C \geq 20\%$). Для увеличения точности применяются гребенчатые конденсаторы, позволяющие подгонять (путем подрезки обкладок) ёмкость до нужной точности.

Многослойные плёночные конденсаторы отличаются сложностью изготовления и низкой надёжностью, вследствие чего применяются редко.

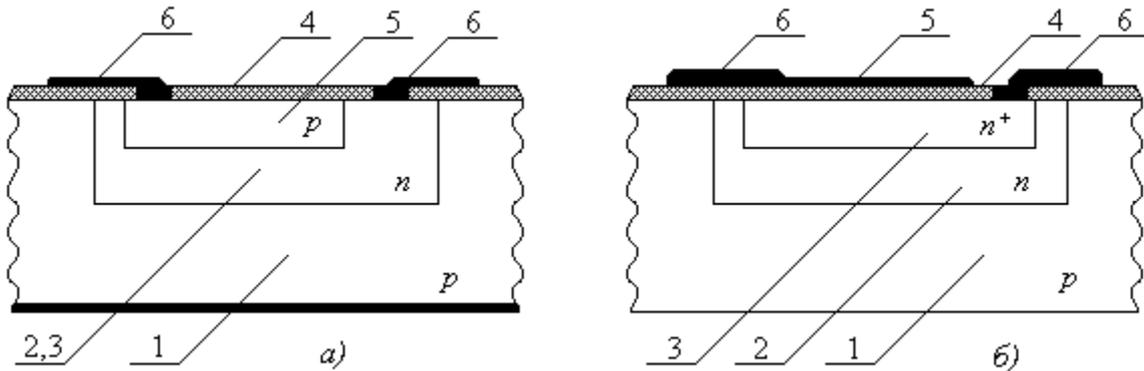
В последнее время в интегральных микросхемах более широкое применение находят *полупроводниковые* конденсаторы и конденсаторы с *МДП-структурой* (окисно-полупроводниковые).

Работа полупроводниковых конденсаторов (рисунок 6.11, а) основана на использовании барьерной ёмкости *p-n*-перехода при обратном смещении. Обычно используется переход база-коллектор, на котором обеспечиваются наименьшие потери, а, следовательно, достигается наибольшая добротность.

Обкладками являются легированные слои зоны коллектора 3 (нижняя обкладка) и зоны базы 5 (верхняя обкладка), разделенные *p-n*-переходом. Электрические выводы 6 осуществляют напылением тонкой алюминиевой плёнки. Для устранения влияния *p-n*-перехода коллектор-подложка на последнюю подают запирающее напряжение.

Эти конденсаторы имеют удельную ёмкость $C_{уд} = 300 \dots 350 \text{ нФ/мм}^2$ и могут быть выполнены на ёмкость до 400 нФ , но обладают низкой добротностью ($Q \leq 10$), имеют небольшое рабочее напряжение (не более 20 В) и низкую рабочую частоту (до 1 МГц). К тому же ёмкость и добротность полупроводниковых конденсаторов сильно зависят от приложенного напряжения. Поэтому такие конденсаторы используются только в низкочастотных цепях. Основными достоинствами их являются возможность совместного изготовления с основными элементами ИС и небольшие размеры занимаемой площади.

Существенно лучшими свойствами обладают конденсаторы с МДП-структурой (рисунок 6.11, б). У них нижняя обкладка 3 формируется через трафарет в эпитаксиальном слое методом локальной диффузии. При этом на поверхности образуется оксидная пленка (SiO_2) 4 толщиной $50 \dots 100 \text{ мкм}$, являющаяся диэлектриком. На пленку наносится верхняя обкладка 5, обычно из алюминия (толщиной $50 \dots 100 \text{ мкм}$).



а – полупроводниковый конденсатор; *б* – конденсатор с МДП-структурой.
1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – нижняя обкладка; 4 – диэлектрическая пленка; 5 – верхняя обкладка; 6 – металлизированные выводы

Рисунок 6.11 – Схемы устройства полупроводниковых интегральных конденсаторов

Такие конденсаторы имеют $C_{уд} = 400 \dots 640 \text{ нФ/мм}^2$, сравнительно малые потери и могут работать в области частот до 10 МГц . Рабочее напряжение конденсаторов значительно выше, чем у полупроводниковых (до 60 В), а ёмкость слабо зависит от приложенного напряжения. В качестве основного недостатка следует отметить их полярность.

6.6 Конденсаторы переменной емкости

6.6.1 Общие сведения

Наиболее часто для изменения ёмкости используются механическое управление (конденсаторы переменной ёмкости – КПЕ) и управление электрическим напряжением (вариконды и варикапы). Конденсаторы с управляемой ёмкостью используются преимущественно для настройки колебательных контуров. Как видно из выражения (6.2), для управления величиной ёмкости в КПЕ можно использовать:

- изменение площади перекрытия пластин S (рисунок 6.12, а);

- изменение расстояния между пластинами d (рисунок 6.12, б);
- изменение диэлектрической проницаемости путем введения и удаления между пластинами **твёрдого диэлектрика** с $\varepsilon \gg 1$ (рисунок 6.12, в).

Кроме того, в варикондах используется изменение ε диэлектрика с помощью приложенного напряжения U (рисунок 6.12, г), а в варикапах используется изменение расстояния между заряженными обкладками d под действием приложенного напряжения U .

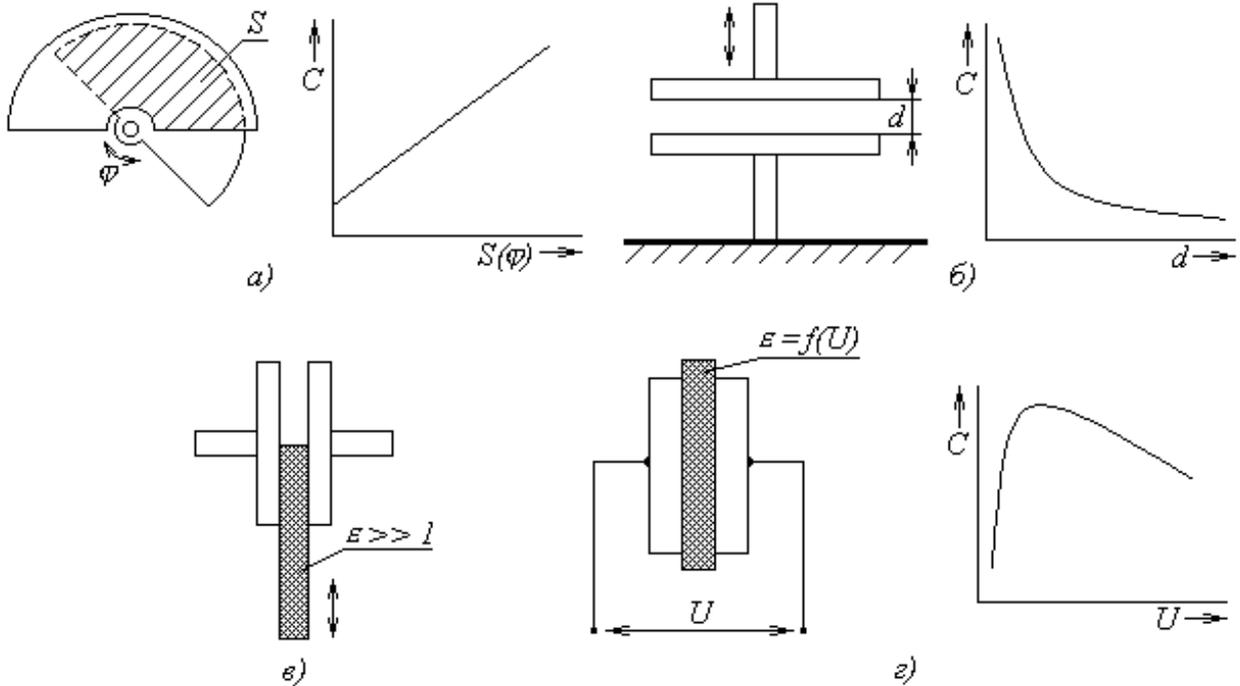


Рисунок 6.12 – Способы получения переменной ёмкости

Таким образом, в зависимости от способа изменения (управления) переменной ёмкости, конденсаторы можно разделить на два вида:

- конденсаторы, **управляемые механически (КПЕ)**;
- конденсаторы, **управляемые электрически – нелинейные конденсаторы (вариконды и варикапы)**.

В свою очередь, **КПЕ разделяются:**

- по величине допустимого напряжения – на низковольтные ($U_H < 200 \text{ В}$), среднего напряжения ($U_H = 200 \dots 1000 \text{ В}$) и высоковольтные ($U_H > 1000 \text{ В}$);
- по типу диэлектрика – с воздушным, газообразным, жидким и твёрдым диэлектриком;
- по характеру перемещения подвижных обкладок или диэлектрика – вращательного и поступательного типа;
- по закону изменения ёмкости – прямоемкостные, прямоволновые, прямо-частотные и логарифмические;
- по периодичности изменения ёмкости – регулируемые и подстроечные.

КПЕ с газообразным и жидким диэлектриком весьма сложны по конструкции, громоздки и дорогостоящи, имеют самую низкую удельную ёмкость ($C_{уд} \leq 0.1 \dots 8 \text{ нФ/см}^3$) и применяются только в спецаппаратуре. Конденсаторы с поступательным перемещением обкладок имеют малую ёмкость и сложны по кон-

струкции. Поэтому в РЭС общего назначения (серийного и массового производства) используются преимущественно пластинчатые конденсаторы с поворотным ротором и воздушным диэлектриком. Они отличаются простотой конструкции, большой точностью установки ёмкости, малыми потерями и высокой стабильностью.

Конденсаторы с твёрдым диэлектриком несколько проще в изготовлении и меньше по габаритам, чем воздушные, но обладают низкой точностью и стабильностью. Поэтому они применяются преимущественно в качестве подстроечных, а также как регулировочные в цепях низкой частоты и в малогабаритных портативных приемниках.

КПЕ наиболее широкое применение в РЭА получили для настройки *диапазонных колебательных контуров* на определенную частоту. Кроме того, они используются для изменения ёмкости связи между отдельными участками электрической цепи, для балансировки емкостных мостов (в измерительных приборах), для подгонки реактивного сопротивления и т.д.

Нелинейные конденсаторы по типу диэлектрика делятся на *сегнетоэлектрические* – **вариконды** и *полупроводниковые* – **варикапы**. Они применяются для параметрической стабилизации напряжения или тока, для усиления мощности (в диэлектрических усилителях), для умножения и деления частоты, для дистанционного управления колебательными контурами, в системах автоматической подстройки частоты и т.д.

Достоинства КПЕ и подстроечных конденсаторов: возможность реализации заданных законов изменения ёмкости при перемещении пластин, высокая добротность, широкий диапазон изменения ёмкости, большое рабочее напряжение, малый *ТКЕ*, независимость величины ёмкости от приложенного напряжения. **Недостатки:** сложность конструкции, большие габариты КПЕ, зависимость ёмкости от влажности и механических воздействий.

Достоинства варикапов и варикондов в малых габаритах, в простоте конструкции, в возможности быстрой перестройки ($\sim 10^{-7}$ с), в малой зависимости ёмкости от влажности и механических воздействий. **Их недостатки:** невозможность обеспечения требуемых законов изменения ёмкости от напряжения, низкая добротность, сравнительно большие ТКЕ, ограниченный диапазон изменения ёмкости, зависимость ёмкости от величины сигнала в контурах.

Конструкции КПЕ весьма разнообразны и приведены в литературе [10].

6.6.2 Параметры и характеристики конденсаторов переменной ёмкости

Как и конденсаторы постоянной ёмкости (см. подраздел 6.4) *КПЕ характеризуются: номинальной ёмкостью, величиной рабочего (номинального), испытательного и пробивного напряжения, ТКЕ, коэффициентом неустойчивости, добротностью, точностью.*

Только в качестве **номинальной** принимается **максимальная ёмкость** $C_H = C_{max}$ и вводится еще **минимальная ёмкость** $C_0 = C_{min}$.

Для воздушных конденсаторов, предназначенных для работы в нормальных условиях, между номинальным U_H , испытательным $U_{ИСП}$ и пробивным $U_{ПР}$ напряжениями устанавливаются следующие соотношения:

$$U_H = (0.6 \dots 0.75) \cdot U_{ПР}, \quad U_{ИСП} = (0.85 \dots 0.9) \cdot U_{ПР}. \quad (6.16)$$

ТКЕ и коэффициент температурной неустойчивости зависят главным образом от конструкции конденсатора и используемых материалов. У воздушных конденсаторов общего назначения $\alpha_C \leq (200 \dots 300) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, $\beta_C \leq (1 \dots 2)\%$, а для спецаппаратуры могут иметь $\alpha_C \leq (10 \dots 20) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и $\beta_C \leq (0.01 \dots 0.05)\%$.

Добротность КПЕ определяется в основном потерями в изоляционных элементах конструкции, а на частотах свыше 200 МГц и потерями в металлических обкладках. Обычно для воздушных конденсаторов $Q = 500 \dots 5000$ и уменьшается (в 4...6 раз) с уменьшением угла перекрытия пластин. В сильной степени добротность зависит от влажности и температуры (уменьшается в 2...15 раз).

Кроме отмеченных выше параметров **КПЕ характеризуются**:

- сопротивлением переходных контактов токосъема;
- моментом вращения подвижной части (ротора);
- устойчивостью параметров при внешних воздействиях.

Сопротивление переходных контактов определяется их типом, конструкцией, маркой используемых материалов и составляет обычно $R_{ПЕР} = 0.01 \dots 0.02$ Ом. Флуктуации переходного сопротивления определяют **уровень шума** КПЕ ($E_{Ш} \geq 2 \dots 6$ мкВ/В).

Основной характеристикой КПЕ является закон изменения ёмкости – функциональная характеристика, которая определяет характер изменения частоты колебательного контура от угла поворота ротора φ . По этому признаку они делятся на: прямоёмкостные, прямоволновые, прямочастотные и логарифмические.

1. **Прямоёмкостные** конденсаторы построены по закону, обеспечивающему линейную зависимость ёмкости от угла поворота:

$$C(\varphi) = a_1 + b_1\varphi, \quad (f(\varphi) = 1/\sqrt{a_1 + \beta_1\varphi}). \quad (6.17)$$

Они наиболее просты по конструктивному исполнению, но при использовании в контурах дают наибольшую нелинейность зависимости частоты от угла поворота $f(\varphi)$, поэтому применяются в основном в качестве регулировочных (в мостах переменного тока, в емкостных делителях напряжения).

2. **Прямо волновые** конденсаторы позволяют получить прямолинейную зависимость длины волны колебательного контура от угла поворота:

$$\lambda(\varphi) = \alpha_2 + \beta_2\varphi, \quad (C(\varphi) = (a_2 + b_2\varphi)^2). \quad (6.18)$$

Они находят ограниченное применение, главным образом в измерительной аппаратуре – в волномерах.

3. **Прямочастотные** конденсаторы дают равномерное изменение частоты по диапазону и обеспечивают одинаковую плотность настройки:

$$f(\varphi) = \alpha_3 + \beta_3\varphi, \quad (C(\varphi) = (a_3 + b_3\varphi)^{-2}). \quad (6.19)$$

Очевидно, что с увеличением угла поворота ёмкость должна уменьшаться. Применяются прямочастотные конденсаторы в РЭА, в которой необходимо иметь

равномерную по частоте шкалу настройки (в приемниках, передатчиках, в измерительных приборах).

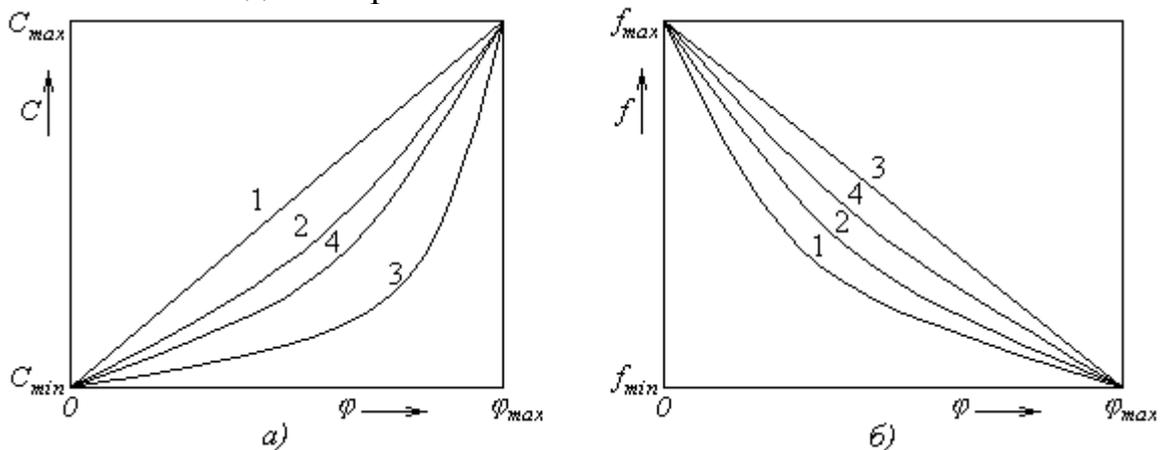
4. **Логарифмические** конденсаторы характеризуются постоянством относительного изменения частоты от угла поворота ротора ($df/d\varphi = const$), что обеспечивает одинаковую точность отсчета по всей шкале, но по равномерности настройки шкалы несколько уступают прямочастотным:

$$C(\varphi) = a_4 e^{b_4 \varphi}, \quad (f(\varphi) = \alpha_4 e^{-\beta_4 \varphi}). \quad (6.20)$$

Этот тип конденсаторов находит широкое применение в радиоизмерительных приборах, а также в радиопередающих и радиоприемных устройствах с дистанционной настройкой колебательных контуров.

В формулах (6.17)...(6.20) $a_1...a_4$, $b_1...b_4$, $\alpha_1... \alpha_4$ и $\beta_1... \beta_4$ – константы.

На рисунке 6.13 приведены функциональные характеристики рассмотренных выше типов конденсаторов.



1 – прямоемкостный; 2 – прямоволновый; 3 – прямочастотный; 4 – логарифмический

Рисунок 6.13 – Изменение ёмкости (а) и частоты (б) колебательного контура при настройке различными типами КПЕ

6.6.3 Подстроечные конденсаторы

Подстроечные конденсаторы по конструкции незначительно отличаются от переменных. Изготавливаются они на малые ёмкости (десятки-сотни пикофарад) и в них предусматривается фиксация положения после настройки. Требование к точности и закону изменения ёмкости значительно ниже, чем у переменных. Основное применение подстроечные конденсаторы находят в колебательных контурах для установки минимальной ёмкости контура. Наиболее удобны для этой цели прямоемкостные конденсаторы с $C_{max} \approx 25...35 \text{ пФ}$.

Конструктивно подстроечные конденсаторы выполняются вращательного, либо поступательного типа, воздушные или с твёрдым диэлектриком. Отечественной промышленностью подстроечные конденсаторы выпускаются серийно. Наиболее широкое применение получили воздушные и керамические конденсаторы:

- КПВМ – конденсаторы подстроечные с воздушным диэлектриком малогабаритные 1КПВМ...3КПВМ. Обозначение их в конструкторской документации: Конденсатор 1КПВМ – 8 ИХО.465.002ТУ, где 8 – вид;

- КТ2-51 – конденсаторы подстроечные с воздушным диэлектриком трубчатые. Конденсатор КТ2-51-500В-2/50 пФ ОЖО.460.215ТУ, где В – всеклиматическое исполнение;
- КТ4-30 – конденсаторы подстроечные керамические трубчатые;
- КТ4-25 – конденсаторы подстроечные керамические;
- КТ4-24 – конденсаторы подстроечные керамические для настройки наручных электронных часов массой 0.5 г.

6.7 Конденсаторы с электрически управляемой емкостью

6.7.1 Полупроводниковые конденсаторы – варикапы

Варикапами называют полупроводниковые диоды, используемые в качестве конденсаторов, ёмкость C_U которых зависит от приложенного запирающего напряжения $U_{OBR} = u$. С увеличением u возрастает ширина запирающего слоя d – расстояние между «обкладками», что приводит к уменьшению ёмкости C_U .

Это свойство полупроводниковых структур широко используется для реализации конденсаторов переменной ёмкости. В настоящее время для изготовления полупроводниковых конденсаторов используется преимущественно кремний. Для кремниевых варикапов с резким p - n -переходом:

$$C_U \approx \frac{128S}{\sqrt{u + 0,83}}, \quad (6.21)$$

где C_U – в $n\Phi$, а S – площадь перехода в $мм^2$.

На рисунке 6.14 приведена вольт-фарадная характеристика кремниевых варикапов типа КВ144А...Г. Очевидно, что она имеет гиперболический характер.

Промышленность выпускает кремниевые варикапы, работающие на частотах до 50...300 МГц, с номинальными ёмкостями от 20 до 600 $n\Phi$, с коэффициентом перекрытия по ёмкости в 3...4 раза, с добротностью от 25 до 1500 и с ТКЕ $(2...5) \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Пример записи варикапов в конструкторских документах:

Варикап КВ143А АДБК.432.120.151 ТУ,

где К – материал p - n -перехода – кремний (при специальной приёмке цифра 2); В – варикап; 143 – номер разработки; А – тип исполнения корпуса.

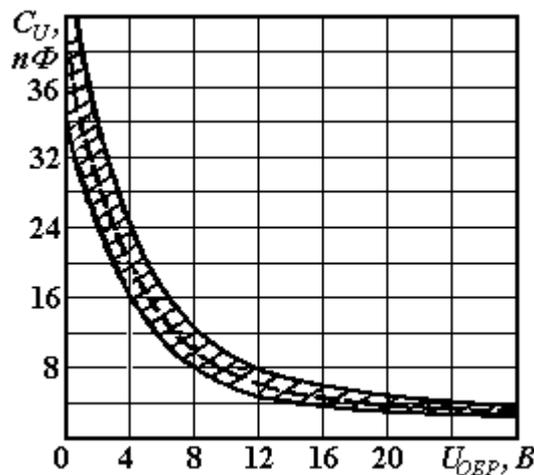


Рисунок 6.14 – Область изменения вольт-фарадной характеристики кремниевых варикапов типа КВ144А...Г

Типичное конструктивное оформление современных варикапов – в стеклянном или в пластмассовом корпусах. На рисунке 6.15, *а* приведена конструкция варикапа в стеклянном корпусе. На рисунке 6.15, *б* представлена эквивалентная схема замещения варикапа, где C – основная ёмкость; C_{Π} и L_{Π} – паразитные ёмкость и индуктивность; R – сопротивление утечки; r – активное сопротивление p - n -перехода.

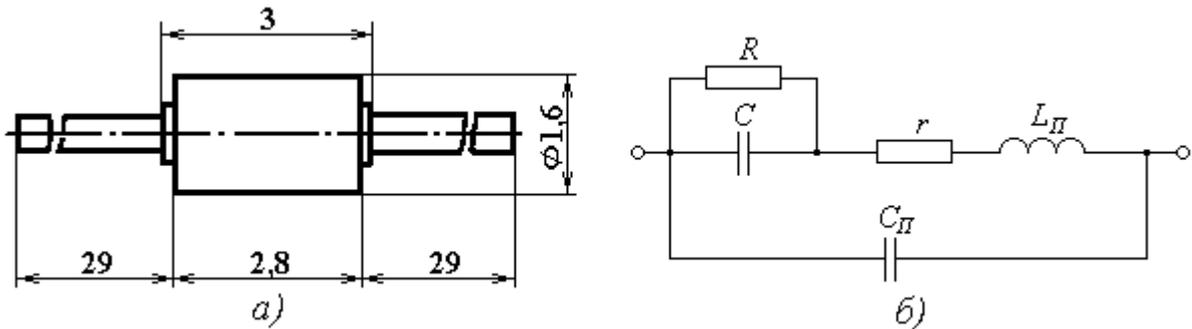


Рисунок 6.15 – Конструктивное оформление варикапов в стеклянном корпусе (а) и эквивалентная схема замещения варикапа (б)

Для варикапов характерна высокая добротность, которая имеет максимальное значение на определенной частоте (рисунок 6.16), уменьшается с ростом температуры и возрастает с ростом $U_{\text{ОБР}}$. Поэтому использование варикапов для настройки контуров рационально лишь в определенном диапазоне частот.

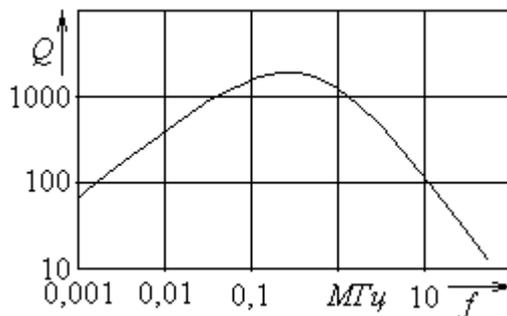


Рисунок 6.16 – Зависимость добротности от частоты кремниевого варикапа

TKE полупроводниковых конденсаторов зависит нелинейно как от величины приложенного напряжения, так и от температуры, что наглядно видно из рисунков 6.17. Чем меньше напряжение U , приложенное к варикапу, тем больше TKE , однако при значительном уровне управляющего напряжения TKE довольно мал и в широком диапазоне температур остается практически линейным. Из приведенных характеристик очевидно, что полупроводниковые конденсаторы имеют весьма высокую стабильность, добротность, а также однозначную характеристику $C(U)$ и малые диэлектрические потери даже на высоких частотах, что выдвигает их на первый план для применению в контурах с дистанционным управ-

лением, особенно в малогабаритной аппаратуре. Также довольно широко варикапы используются для автоматической подстройки частоты.

Одним из *недостатков* варикапов является малая ёмкость (от $C_{min} = 6...44$ до $C_{max} = 90...600$ пФ), что ограничивает диапазон частот контуров, в которых они используются.

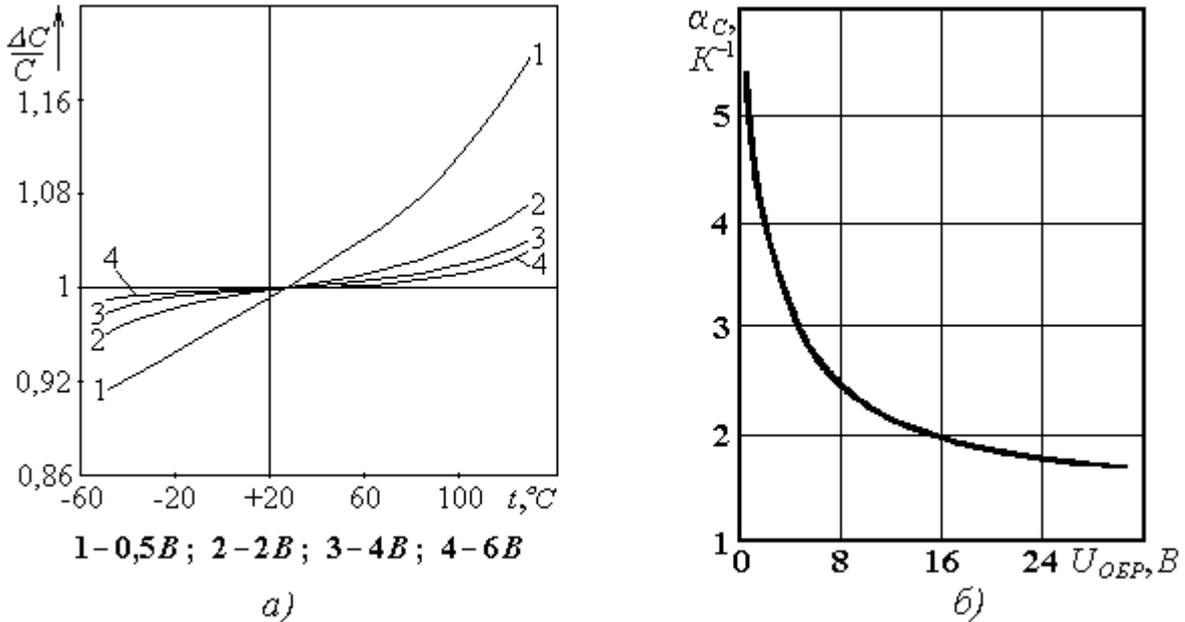


Рисунок 6.17 – Изменение ёмкости от температуры при различных запирающих напряжениях (а) и зависимость ТКЕ кремниевого варикапа KB144В от обратного напряжения (б)

В последнее время выпускаются *варикапы с плавными p-n-переходами*, полученными методами *эпитаксиального наращивания* ориентированных слоев полупроводникового материала – *эпикапы*. При этом существенно снижается активное сопротивление контура (r), что позволяет получить добротность $Q \approx 300$ при $f = 50$ МГц (рисунок 6.18). Такая добротность соответствует $\text{tg} \delta \approx 33 \cdot 10^{-4}$, что трудно достичь на таких частотах даже для обычных конденсаторов.

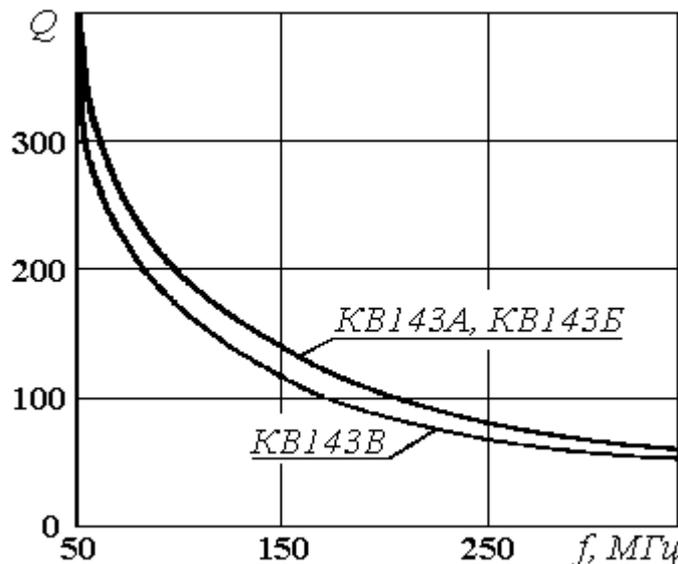
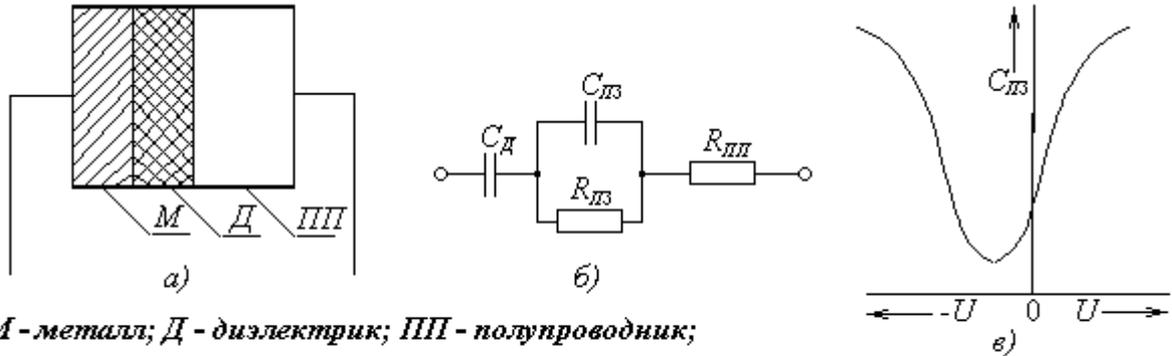


Рисунок 6.18 – Зависимость добротности от частоты

кремниевых варикапов KB144A – KB144B

Для интегральной микроэлектроники представляют интерес также конденсаторы, полученные на основе МДП-структур. Схема конструкции и эквивалентная схема замещения МЛП-конденсатора приведены на рисунках 6.19, а и б. Основной в данном конденсаторе является ёмкость пространственного заряда $C_{ПЗ}$, зависимость которой от приложенного напряжения приведена на рисунке 6.19, в.



*М - металл; Д - диэлектрик; ПП - полупроводник;
 $C_{Д}$ - ёмкость слоя диэлектрика; $C_{ПЗ}$ и $R_{ПЗ}$ - ёмкость и сопротивление пространственного заряда; $R_{ПП}$ - сопротивление полупроводника*

Рисунок 6.19 – Схема конструкции (а), схема замещения (б) и функциональная характеристика МДП-конденсатора (в)

Область применения эпилкапов и конденсаторов на МДП-структуре аналогична области применения варикапов, но частотный диапазон может быть расширен до 10 МГц и выше. Однако следует отметить, что у эпилкапов и конденсаторов на МДП-структуре зависимость $C(U)$ выражена весьма слабо.

6.7.2 Сегнетоэлектрические конденсаторы – вариконды

Вариконды – это конденсаторы на основе сегнетоэлектриков с резко выраженной зависимостью ёмкости от приложенного напряжения. Конструкция варикондов аналогична конструкции обычных дисковых керамических конденсаторов.

Вариконды значительно превосходят варикапы по величине максимальной ёмкости (до 0.095 мкФ) и по диапазону изменения ёмкости (в 6...10 раз). Другое достоинство варикондов – их *низкая стоимость*. Однако они применяются ограниченно из-за *низкой временной и, особенно, температурной стабильности* и *малой добротности* ($Q \approx 10...25$), изменяющейся в зависимости от напряжения, а также *неоднозначности зависимости ёмкости от приложенного напряжения*. Например, для вариконда типа ВК-2 при изменении температуры от 20 до 60 °С коэффициент диэлектрической проницаемости изменяется в 2 раза [10].

В сегнетоэлектрических конденсаторах используется характерная для спонтанной поляризации зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от напряженности электрического поля E (рисунок 6.20, а). В качестве диэлектрика в них

наиболее широкое применение получили *титанат бария* BaTiO_3 (кривая 1) и специальная *сегнетокерамика типа ВК* (кривая 2).

Из характеристики $\varepsilon(E)$ очевидно, что зависимость $C(U)$ может носить как положительный, так и отрицательный характер, а величина ёмкости может достигать очень больших величин. В варикондах используется область до фазового пьезоэлектрического перехода (спонтанной поляризации), имеющей место при слабых электрических полях, то есть положительная зависимость $\varepsilon(E)$. В области слабых электрических полей (до 10 В/мм), также резко выражена зависимость $\varepsilon(t)$ (рисунок 6.20, б), но при увеличении E зависимость $\varepsilon(t)$ очень сильно ослабляется.

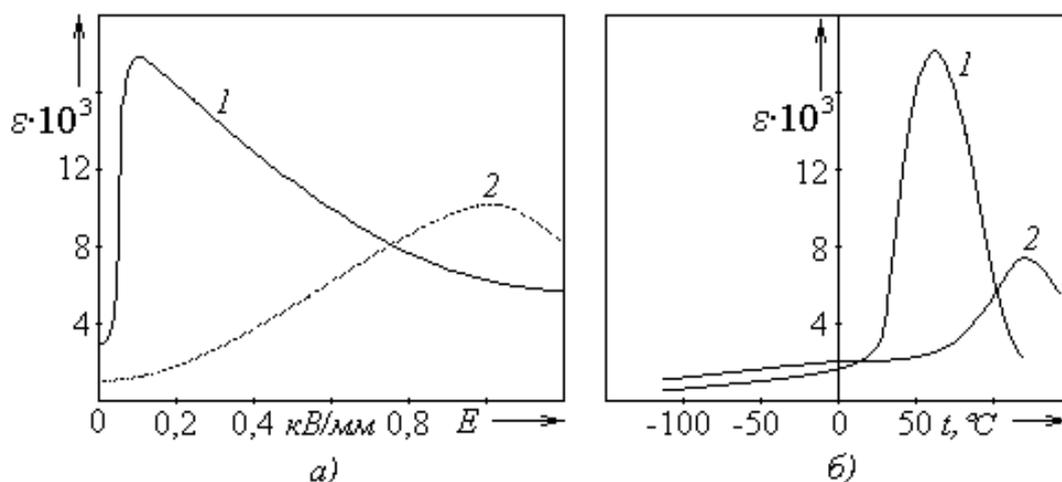


Рисунок 6.20 – Зависимости диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля (а) и температуры (б) для сегнетоэлектриков

Для сегнетоэлектриков характерно явление гистерезиса, что обуславливает повышенные активные потери и низкую добротность варикондов.

В связи с резко выраженной нелинейностью и наличием гистерезиса для характеристики качества сегнетоэлектрических конденсаторов вводятся специфические **параметры**: статическая C_{\equiv} , эффективная $C_{\text{Э}}$, дифференциальная $C_{\text{Д}}$, реверсивная $C_{\text{Р}}$ и номинальная $C_{\text{Н}}$ ёмкости, а также коэффициент нелинейности $K_{\text{Н}}$ и коэффициент управления $K_{\text{У}}$.

$$C_{\equiv} = \frac{Q_{\equiv}}{U_{\equiv}}, \quad C_{\text{Э}} = \frac{Q_m}{U_m}, \quad C_{\text{Д}} = \frac{dq}{dU}, \quad C_{\text{Р}} = \left(\frac{Q_m}{U_m} \right)_{U_{\equiv}}, \quad C_{\text{Н}} = \frac{Q_m}{U_{\text{нн}}}, \quad (6.22)$$

где C_{\equiv} и U_{\equiv} – установившиеся значения ёмкости и напряжения на конденсаторе; Q_m и U_m – максимальные значения заряда и напряжения линейного конденсатора, эквивалентные нелинейному.

Статическая ёмкость C_{\equiv} характеризует нелинейность конденсатора в цепях постоянного тока.

Эффективная ёмкость $C_{\text{Э}}$ определяет ток, потребляемый конденсатором при работе в цепях переменного напряжения.

Реверсивная ёмкость $C_{\text{Р}}$ характеризует конденсатор при работе в цепях постоянного тока при наличии пульсаций.

Динамическая ёмкость $C_{\text{Д}}$ определяет динамические свойства вариконда.

Номинальная ёмкость C_H представляет собой эффективную ёмкость при номинальном синусоидальном напряжении U_H в нормальных условиях.

Коэффициент нелинейности K_H показывает, во сколько раз увеличивается ёмкость варикондов при изменении напряжения переменного тока частотой 50 Гц от 5 В до величины C_{max} , при которой ёмкость вариконда достигает максимального значения:

$$K_H = C_{max} / C_5, \quad (6.23)$$

где C_5 и C_{max} – ёмкость, измеренная при 5 В , и максимальная ёмкость варикапа.

Коэффициент управления K_y варикондов показывает, во сколько раз уменьшается ёмкость вариконда при изменении постоянного напряжения от 0 до 200 В .

Диэлектрические потери сегнетоэлектрических конденсаторов велики и определяются, в основном, площадью петли гистерезиса и зависят от величины приложенного напряжения.

Конструкция дискового вариконда показана на рисунке 6.21, а.

Выпускаемые отечественной промышленностью вариконды ВК2, ВК4, КН1-5 и КН1-6 имеют коэффициент нелинейности $K_H = 7 \dots 8$ и $K_y > 1.3 \dots 1.5$. Частотный диапазон у варикондов КН1-5 до 200 МГц , а у КН1-6 – до 10 ГГц . Тангенс угла потерь у варикондов: ВК2 и ВК4 $\text{tg}\delta = 0.04$; КН1-5 $\text{tg}\delta = 0.008$; КН1-6 $\text{tg}\delta = 0.005$. Отклонения ёмкости варикондов от номинального значения велики – от $(\pm 5 \dots \pm 20)\%$ до $(-20 \dots + 80)\%$.

Вариконды применяются в РЭА для параметрической стабилизации напряжения и тока, для усиления электрических сигналов (в диэлектрических усилителях), для умножения и деления частоты, в системах автоматического регулирования частоты и т.д.

Выпускаются **термоконденсаторы** КН2-2, использующие зависимость ёмкости сегнетоэлектрических конденсаторов, от температуры. На рисунки 6.21, б приведена конструкция термоконденсаторов типа КН2-2, предназначенных для работы в РЭС и в кварцевых генераторах электронных наручных часов. Они имеют массу всего 0.1 г и габаритные размеры $6.5 \times 2.4 \times 0.8 \text{ мм}$. Зависимость отклонения ёмкости от температуры термоконденсаторов КН2-2 приведена на рисунке 6.21, в.

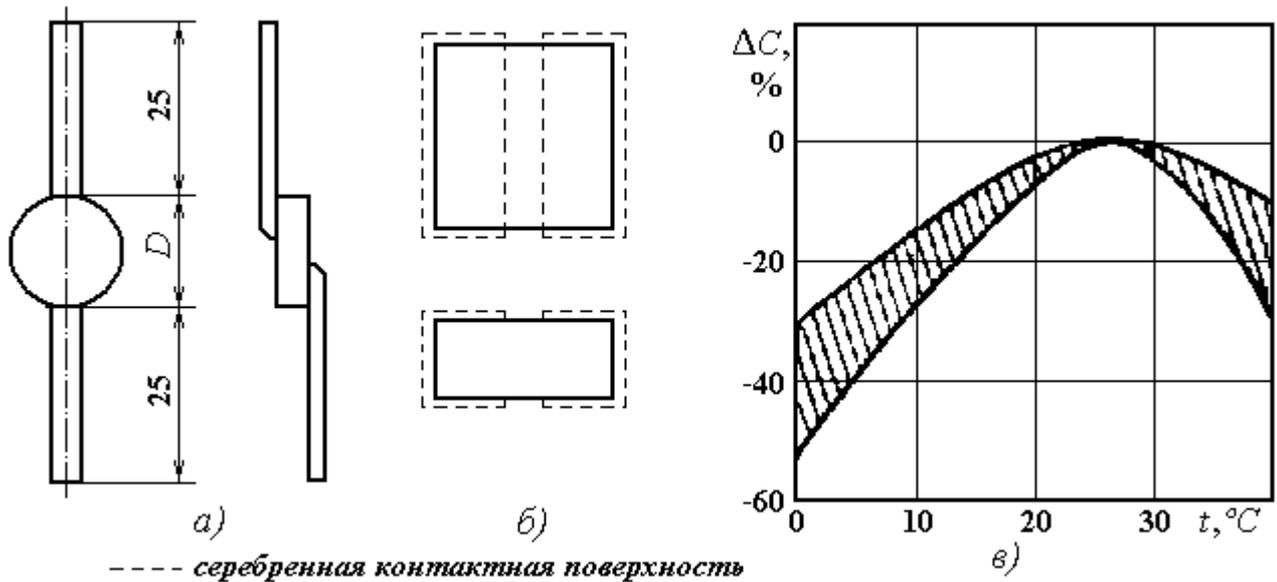


Рисунок 6.21 – Конструкции варикондов типа ВК2, ВК4 (а); конструкция (б) и зависимость отклонения ёмкости от температуры (в) термоконденсаторов типа КН2-2

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим конденсатором?
2. Как связана ёмкость конденсатора с геометрическими параметрами и физическими свойствами диэлектрика?
3. Классификация конденсаторов по конструктивному исполнению и принципу функционирования? Дать определения и указать назначение.
4. Классификация конденсаторов по роду диэлектрика?
5. Условные обозначения конденсаторов в электрических схемах?
6. Системы маркировки и кодированных обозначений типов конденсаторов на элементах?
7. Система условных и кодированных обозначений типов конденсаторов в конструкторской документации?
8. Что понимается под номинальной ёмкостью и допуском конденсаторов? На какие ряды и классы точности делятся конденсаторы по номинальной ёмкости и допуску?
9. Какими параметрами характеризуется электрическая прочность конденсаторов? Дать им определения.
10. Что понимается под постоянной времени, и какие свойства конденсаторов она характеризует?
16. Какие свойства конденсаторов характеризуют тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ и добротность?
12. Что такое реактивная мощность конденсатора и как она связана с допустимым рабочим напряжением?
16. Как зависит эффективная ёмкость конденсатора от паразитной индуктивности? Привести эквивалентную схему замещения конденсатора.

14. Что характеризует температурный коэффициент изменения ёмкости (TKE)? Какие конденсаторы нормируются по TKE ?

15. Как зависит надежность конденсаторов от рабочей температуры?

16. Какими удельными показателями характеризуются конденсаторы?

17. Конструктивные особенности, основные свойства и области применения керамических конденсаторов постоянной ёмкости, в том числе, чип-конденсаторов?

18. Конструктивные особенности, основные свойства и области применения стеклянных и слюдяных конденсаторов постоянной ёмкости?

19. Конструктивные особенности, основные свойства и области применения бумажных и пленочных конденсаторов постоянной ёмкости?

20. Конструктивные особенности, основные свойства и области применения конденсаторов с оксидным диэлектриком постоянной ёмкости, в том числе, чип-конденсаторов?

26. Конструктивные особенности, основные свойства и области применения интегральных конденсаторов постоянной ёмкости?

22. Способы реализации, конструктивные исполнения, основные свойства и области применения конденсаторов переменной ёмкости, управляемых механически, и подстроечных конденсаторов?

26. Параметры и характеристики конденсаторов переменной ёмкости, управляемых механически?

24. Параметры и характеристики, основные свойства, конструктивные исполнения и области применения полупроводниковых конденсаторов?

25. Параметры и характеристики, основные свойства, конструктивные исполнения и области применения сегнетоэлектрических конденсаторов?

7 ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

7.1 Общие сведения

7.1.1 Определения

Катушкой индуктивности называют изделие, обладающее сосредоточенной индуктивностью и используемое в цепях частотной селекции.

Высокочастотной катушкой индуктивности (ВКИ) называется свернутый в спираль (изолированный) проводник, обладающий в области высоких частот (0.1...400 МГц) значительным индуктивным сопротивлением при относительно малом активном и ёмкостном сопротивлении.

7.1.2 Классификация и области применения

В зависимости от *назначения* ВКИ делятся на три вида: *катушки контуров, катушки связи и дроссели высокой частоты.*

Катушки контуров предназначаются для работы в колебательных контурах входных цепей приемников, в узкополосных и широкополосных фильтрах, в промежуточных цепях и оконечных каскадах передающих устройств, в задающих генераторах и других функциональных устройствах. Конструктивно катушки контуров могут быть выполнены с постоянной индуктивностью или с переменной – вариометры.

Катушки связи используются для передачи энергии от антенного устройства во входной каскад приемника, от выходного каскада передатчика к антенне, а также для связи отдельных цепей различных каскадов в РЭА.

Дроссели высокой частоты – это катушки индуктивности, используемые для увеличения реактивного сопротивления высокочастотных апериодических цепей и для ограничения токов высокой частоты. Основным назначением дросселей высокой частоты является фильтрация высокочастотных составляющих тока.

По назначению дроссели можно разделить на *фильтровые и корректирующие*. *Фильтровые* используются в фильтрах цепей питания на высоких частотах. *Корректирующие* используются в цепях коррекции амплитудно-фазовых характеристик в области высоких частот.

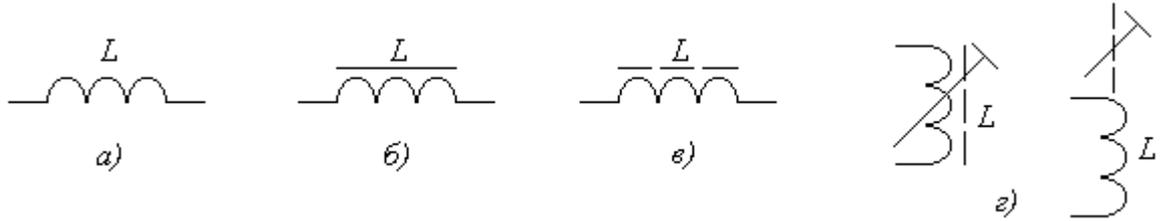
По конструктивному признаку ВКИ можно разделить на:

- однослойные и многослойные;
- секционированные и несекционированные;
- цилиндрические, кольцевые (тороидальные) и спиральные (плоские, печатные);
- катушки без сердечников, с магнитными сердечниками и с немагнитными сердечниками.

По виду защиты ВКИ можно разделить на катушки экранированные и не экранированные.

7.1.3 Условные обозначения высокочастотных катушек индуктивности

В электрических схемах катушки индуктивности и высокочастотные дроссели условно обозначаются согласно ГОСТ 2.723-68. Наиболее часто встречающиеся общие обозначения приведены на рисунке 7.1.



а – без сердечника; *б* – с ферромагнитным сердечником без зазора;
в – с магнитоэлектрическим сердечником (с распределенным немагнитным зазором); *г* – с подстраиваемым магнитоэлектрическим сердечником

Рисунок 7.1 – Условные обозначения катушек индуктивности

7.2 Основные параметры катушек индуктивности. Схемы замещения

Высокочастотные катушки индуктивности характеризуются величиной и точностью (допуском) индуктивности, добротностью, собственной ёмкостью и стабильностью, надёжностью и другими параметрами.

7.2.1 Индуктивность и допустимые отклонения

Индуктивность – количественное выражение основного свойства, заключающегося в способности катушки с током во взаимодействии с окружающей средой накапливать магнитную энергию W_M :

$$W_M = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (7.1)$$

где L – индуктивность катушки; I – ток, протекающий по катушке.

Физический смысл индуктивности – это коэффициент пропорциональности между изменяющимся потокосцеплением ψ и током катушки i :

$$L = \frac{d\psi}{di}. \quad (7.2)$$

Индуктивность измеряется в генри ($1 \text{ Гн} = 10^3 \text{ мГн} = 10^6 \text{ мкГн} = 10^9 \text{ нГн}$). В зависимости от назначения индуктивность катушек может быть от нескольких нГн до сотен мГн . Величина номинальной индуктивности катушек не стандартизована, но при её выборе можно руководствоваться рядами номинальных значений параметров для допусков резисторов и конденсаторов (таблица 5.2).

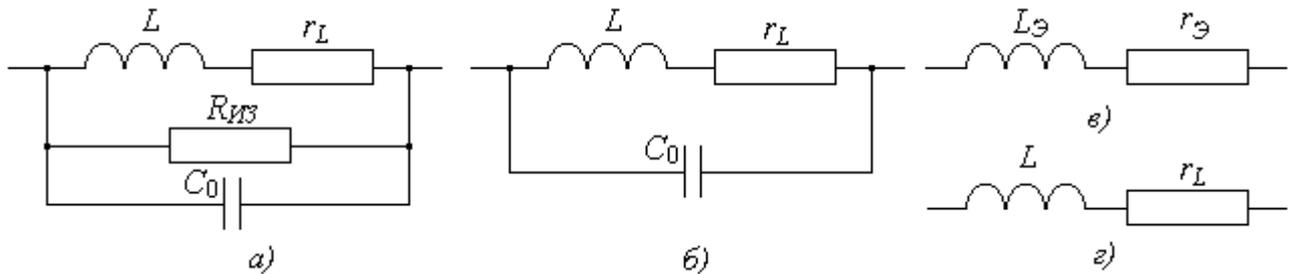
Реактивное сопротивление X_L индуктивности на частоте f равно:

$$X_L = 2\pi fL. \quad (7.3)$$

Допустимые отклонения (допуски) **индуктивности** δL определяются назначением катушки, технологией изготовления и могут быть от долей процента для катушек контуров при соответствующей настройке, предусмотренной технологией производства, и до $\pm(10...15)\%$ для катушек связи и дросселей.

7.2.2 Паразитные эффекты и схемы замещения ВКИ

Паразитные эффекты в катушке – активные потери и накопление электрической энергии – учитываются эквивалентным *сопротивлением потерь* r_L и *собственной ёмкостью катушки* C_0 , а **полезный эффект** – накопление магнитной энергии – учитывается *индуктивностью* L . На рисунке 7.2 приведены варианты представления *схем замещения катушки индуктивности*.



а - полная схема; *б* – без учета потерь в изоляции; *в* – в области высоких частот; *г* – в области низких частот

Рисунок 7.2 – Эквивалентные схемы замещения ВКИ

На рисунке 7.2, *а* приведена полная схема замещения ВКИ с учетом сопротивления изоляции $R_{ИЗ}$. Обычно $R_{ИЗ} \gg \omega L$, поэтому сопротивлением изоляции можно пренебречь и перейти к более простой схеме замещения (схема *б*). В свою очередь полная схема замещения может быть преобразована к последовательной с эквивалентными параметрами $L_{Э}$ и $r_{Э}$ (схема *в*). Полагая, что $\omega L \gg r_L$ и $\frac{1}{\omega C_0} \gg R_{ИЗ}$, можно получить:

$$L_{Э} = L \left(\frac{1}{1 - \omega^2 / \omega_0^2} \right) \approx L \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right), \quad r_{Э} = r_L + \omega^2 L^2 C_0 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (7.4)$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_0}$ – собственная резонансная частота катушки; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектриках катушки:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_0 R_{ИЗ}}. \quad (7.5)$$

Если рабочая частота ω достаточно далека от резонансной ω_0 и не слишком высока, то потерями в диэлектрике можно пренебречь. Тогда можно использовать простейшую схему замещения (рисунок 7.2, *г*).

7.2.3 Добротность катушки

Добротность катушки Q_L есть отношение индуктивного сопротивления катушки к сопротивлению потерь r_L :

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L}. \quad (7.6)$$

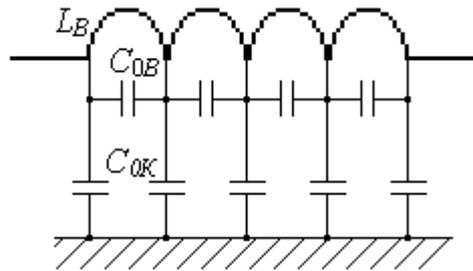
Если рабочая частота ω высокая (соизмерима с ω_0), то необходимо учитывать собственную ёмкость катушки и потери в диэлектрике. Тогда *эквивалентная добротность катушки* $Q_{L\text{Э}}$ будет равна (рисунок 7.2, в):

$$Q_{L\text{Э}} = \frac{\omega L_{\text{Э}}}{r_{\text{Э}}}. \quad (7.7)$$

Добротность может колебаться от нескольких десятков до сотен единиц и определяет избирательные свойства и КПД колебательного контура. Поэтому у катушек контуров стремятся увеличить Q_L путем снижения сопротивления потерь r_L и собственной ёмкости C_0 . Однако увеличение добротности, как правило, сопряжено с увеличением габаритов и стоимости катушек. Добротность катушек средних размеров и стоимости лежит в пределах от 50 до 300 единиц.

7.2.4 Собственная ёмкость

Собственная ёмкость катушки C_0 (рисунок 7.3) обусловлена распределенной ёмкостью между отдельными витками C_{0B} , ёмкостью между обмоткой и корпусом прибора через изоляцию $C_{0К}$, между обмоткой и экраном, между выводами и т.д. Однако, для упрощения анализа и расчета собственная ёмкость катушки представляется как сосредоточенный параметр (рисунок 7.2). Ее величина определяется габаритными размерами и конструкцией катушки, типом диэлектрика, типом намотки и т.д. Величина C_0 обычно лежит в пределах от 1 до 15...20 пФ и тем больше, чем больше габариты катушки.



L_B – индуктивность витка; C_{0B} – ёмкость межвитковая;
 $C_{0К}$ – ёмкость между витком и корпусом (экраном)

Рисунок 7.3 – Схема замещения ВКИ с распределенными параметрами

Собственная ёмкость, как следует из формул (7.4)-(7.7), увеличивает действующую (эквивалентную) индуктивность $L_{\text{ЭК}}$, уменьшает добротность Q_L и понижает стабильность:

$$L_{\text{ЭК}} = \frac{L}{1 - \omega^2 LC_0}. \quad (7.8)$$

Высокочастотные дроссели должны иметь большую индуктивность при малой собственной ёмкости. Для достижения этого применяют специальные меры: используют ферритовые сердечники, обмоточные провода малых диаметров, обмотки с переменным шагом, а также секционированные обмотки (при этом C_0 уменьшается пропорционально числу секций).

7.2.5 Стабильность параметров

Стабильность параметров катушки определяется, главным образом, воздействием температуры и влажности.

Обратимые изменения индуктивности от температуры ΔL характеризуются **температурным коэффициентом изменения индуктивности (ТКИ) α_L** , величина которого зависит от способа намотки и качества материала каркаса:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L\Delta t}, \quad (7.9)$$

где Δt – изменение температуры.

Необратимые изменения ΔL_H характеризуются коэффициентом температурной нестабильности индуктивности (КТНИ) β_L , зависящим от прочности сцепления витков катушки с поверхностью каркаса и от старения диэлектрика каркаса:

$$\beta_L = \frac{\Delta L_H}{L}. \quad (7.10)$$

Так как сопротивление провода обмотки **с ростом температуры** увеличивается, то **добротность катушки Q_L** в этом случае **падает**. Дополнительное снижение добротности происходит за счет увеличения проводимости каркаса на высоких частотах с ростом температуры.

Уменьшение C_0 и повышение добротности Q_L до (150...400) в однослойных катушках достигается благодаря переходу от сплошной намотки к намотке *с шагом*. Для повышения стабильности катушек используют *тугую намотку*, когда провод наматывается со значительным натяжением. Повышение стабильности получается и при намотке нагретым до 120...180 °С проводом, а также при выполнении намотки *вжиганием* металла в керамический каркас с последующим гальваническим наращиванием. Наибольшей нестабильностью (до 20%) обладают катушки с замкнутым магнитопроводом, что обусловлено нестабильностью магнитной проницаемости сердечника, а наименьшей (до 0.01%) – катушки с керамическими каркасами и обмоткой, нанесенной путем вжигания серебра на каркас.

При универсальной намотке витки не располагаются параллельно, а идут попеременно от одного края катушки к другому, пересекаясь под некоторым углом. Такая намотка используется в многослойных катушках и позволяет получить *высокую прочность обмотки без применения каркасов при малой собственной ёмкости и высокой добротности*. Уменьшение собственной ёмкости достигается также *секционированием обмоток*, когда катушка выполняется в виде секций, которые располагаются на одном каркасе и соединяются последовательно между собою.

Под влиянием **влажности** увеличиваются собственная ёмкость и диэлектрические потери, уменьшается стабильность. Для защиты катушек от влияния влаги и механических воздействий их **обмотки пропитывают** лаками, компаундами и другими негигроскопичными веществами. При этом немного уменьшается добротность и существенно увеличивается собственная ёмкость C_0 (на 20...30%).

Под воздействием **ударов** может произойти сдвиг витков друг относительно друга (для бескаркасных катушек), что приводит к изменению L и Q_L .

7.2.6 Надежность катушек

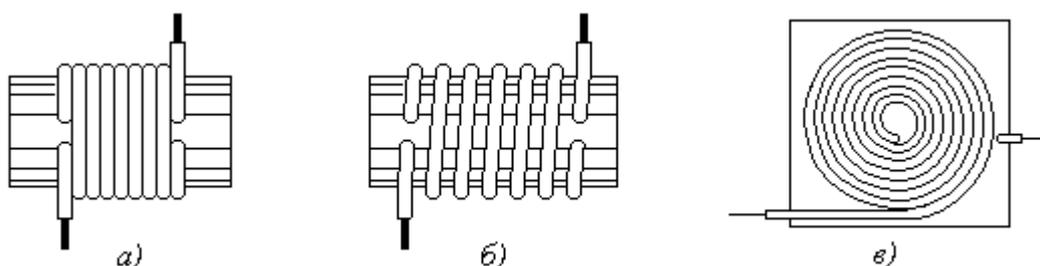
Надёжность катушек определяется, как правило, постепенными отказами, связанными с увеличением нестабильности под воздействием температуры и влажности.

7.3 Типы намоток катушек индуктивности

Намотки бывают однослойные, многослойные и плоские. В свою очередь, однослойные намотки разделяются на сплошные и с шагом (рисунок 7.4, а и б). **Однослойные катушки с шагом** отличаются высокой добротностью ($Q = 150 \dots 400$), стабильностью и применяются в колебательных контурах диапазонов КВ и УКВ.

Как уже упоминалось, для высокостабильных катушек применяются *специальные способы изготовления намоток* – *тугая, горячая и осажденная* (нанесенная), которые обеспечивают высокую точность фиксации обмотки на каркасе. При этом каркасы выполняются, как правило, из высокостабильной установочной керамики. *Осажденная намотка* наносится методом вжигания на каркас с последующей гальванизацией (наращиванием). Такие катушки отличаются очень высокой стабильностью, но имеют пониженную (до 20%) добротность. Близки по своим свойствам к однослойным *плоские катушки* (рисунок 7.4, в), которые применяются в конструкциях с печатным монтажом.

Плоские (печатные) катушки и однослойные с шаговой намоткой изготавливаются на небольшие индуктивности ($1.8 \dots 30 \text{ мкГн}$). Если требуется большая индуктивность, то применяется *сплошная намотка*. Добротность однослойных катушек со сплошной намоткой порядка 150...200 единиц, а индуктивность: $L \leq 500 \text{ мкГн}$.



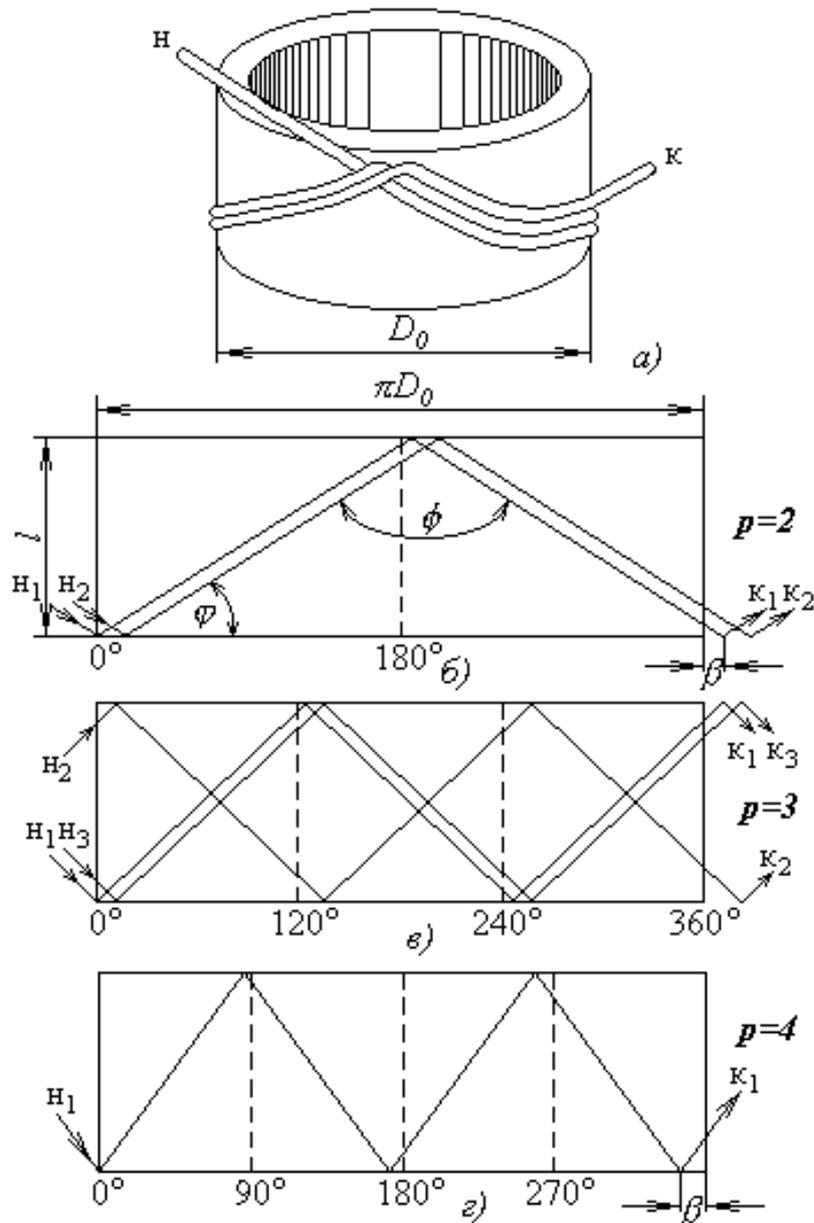
а – однослойная сплошная намотка; б – однослойная шаговая намотка;
в – плоская намотка

Рисунок 7.4 – Катушки индуктивности с однослойной и плоской намоткой

Многослойные намотки разделяются на *простые* и сложные. Примером простых намоток являются *рядовая* и *«кучей»* («в навал»).

Несекционированные многослойные катушки с простой намоткой имеют низкую добротность и применяются лишь для низкочастотных контуров ДВ и в качестве дросселей. **Секционированные многослойные** катушки с простой намоткой имеют хорошую добротность (до 150...170) и небольшую собственную ёмкость C_0 , просты в изготовлении. Применяются в контурах ДВ и СВ.

Наиболее широкое применение в РЭА получили *катушки с многослойной универсальной намоткой типа «Универсаль»*. Особенность универсальной намотки состоит в том, что обмотка располагается не перпендикулярно к оси сердечника, а под углом $(90^\circ - \varphi)$ и за один виток меняет свое направление p раз, т.е. имеет p перегибов провода. На рисунке 7.5 представлена схема намотки типа «Универсаль» и развертки ее при различных p . Такая намотка придает катушке *высокую механическую прочность без применения специальных каркасов, достаточно высокую добротность и малую собственную ёмкость*.



н – начало витка (цикла); **к** – конец витка; **а** – схема намотки; **б, в, г** – развертки обмоток

Рисунок 7.5 – Универсальная намотка

Увеличение числа переходов p уменьшает собственную ёмкость C_0 , но снижает добротность Q_L , увеличивает трудоёмкость при изготовлении и увеличивает габариты катушки. Максимально допустимое число переходов можно рассчитать по формуле:

$$p = \frac{\pi D_0 \operatorname{tg} \varphi}{l}, \quad (7.11)$$

где D_0 и l – диаметр и длина катушки; φ – угол отклонения провода, характеризующий величину отклонения провода от вертикали. Обычно $p \leq 6$.

Катушки с универсальной намоткой характеризуются малыми размерами и удовлетворительными электрическими свойствами. Обычно $D_0 \leq 15 \dots 20$ мм, $l \leq 5 \dots 8$ мм, а $Q_L \leq 80 \dots 100$.

В контурах ДВ и СВ приемников для реализации внутренней ферритовой антенны используется, так называемая, **перекрестная намотка**. Но такие длинные катушки отличаются низкой Q_L и высокой C_0 .

7.4 Геометрические параметры катушек

Однослойные катушки (рисунок 7.6, а) характеризуются диаметром намотки D , длиной намотки катушки l и шагом намотки τ :

$$l = \tau(N - 1), \quad (7.12)$$

где N – число витков.

Для катушки со сплошной намоткой:

$$l = \alpha \cdot d \cdot (N - 1), \quad (7.13)$$

где d – диаметр провода в изоляции; α – коэффициент неплотности намотки.

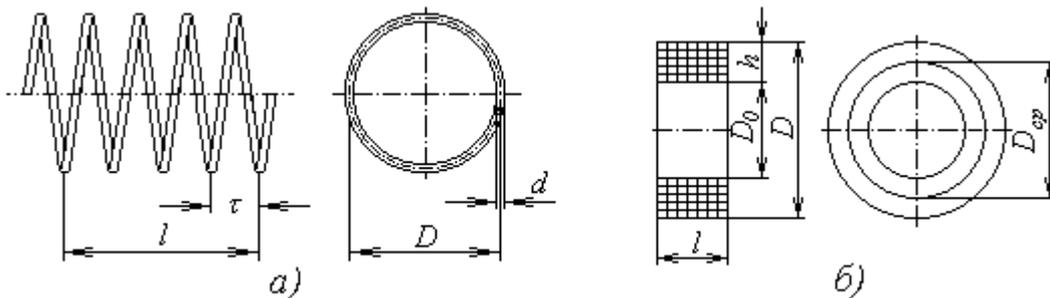


Рисунок 7.6 – Расчетные размеры однослойной и многослойной катушек

Размеры многослойных катушек (рисунок 7.6, б) определяются величиной наружного D и внутреннего D_0 диаметров катушки (каркаса), длиной l и глубиной h намотки. Радиальная глубина намотки:

$$h = (D - D_0)/2. \quad (7.14)$$

Величину D_0 принимают равной диаметру каркаса. Значения D_0 и l задают из конструктивных соображений, а D и h – определяется числом витков, диаметром провода и способом намотки. Для многослойных катушек обычно $D_0 \leq 15 \dots 20$ мм, $l \leq 5 \dots 8$ мм.

Для простой рядовой намотки и намотки «кучей»:

$$h = \alpha d^2 N / l, \quad (7.15)$$

где α принимается на 10...15% больше, чем коэффициент неплотности для однослойных обмоток.

Для катушек с универсальной намоткой:

$$h = 2p \cdot d \cdot N_{ц\beta} / 360^\circ, \quad (7.16)$$

где p – число переходов; $N_{Ц}$ – число циклов; β – угловой шаг,

$$N_{Ц} = N \left(1 \pm \frac{\beta}{360^\circ} \right); \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{2d}{D_0 \sin \varphi}. \quad (7.17)$$

Углы отклонения провода для намотки типа «Универсаль» и для универсальной перекрестной намотки могут быть рассчитаны, соответственно, по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi = pl / (\pi D_0); \quad \operatorname{tg} \varphi = 2l / (\pi D_0 q), \quad (7.18)$$

где q – число витков в цикле.

Основы проектирования катушек индуктивности подробно представлены в [11, подраздел 4.5].

7.5 Экранирование катушек индуктивности

Для устранения взаимного влияния через внешнее электромагнитное поле катушки индуктивности экранируются. Экранирующее действие характеризуется коэффициентом экранирования $K_{Э}$ – отношением напряженности внешнего поля катушки при наличии экрана (за пределами экрана) и без него. Для экранов среднего качества $K_{Э} \approx 0.01 - 0.05$.

Физическая сущность экранирования магнитного поля катушки заключается в следующем. При прохождении по обмотке катушки высокочастотного тока I_K создается магнитный поток Φ_K (рисунок 7.7, а), часть силовых линий которого пересекает экран (для упрощения силовые линии магнитного потока показаны только с одной стороны). По закону электромагнитной индукции в экране создается ЭДС. Под воздействием ЭДС в экране потечет ток $I_{Э}$, который создает магнитный поток $\Phi_{Э}$, направление которого, согласно закону электромагнитной индукции, будет противоположно основному потоку Φ_K . Благодаря этому большая часть внешнего магнитного потока катушки будет компенсирована.

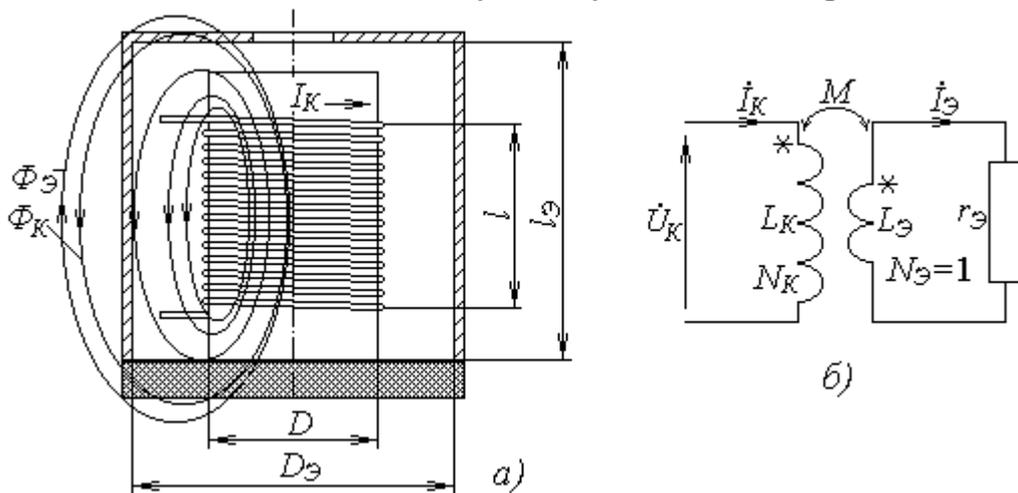


Рисунок 7.7 – Катушка индуктивности с немагнитным экраном (а) и ее электрическая схема замещения (б)

Кроме положительного эффекта экран оказывает нежелательное воздействие на электрические параметры катушки, уменьшая L , Q и увеличивая соб-

ственную ёмкость C_0 и нестабильность индуктивности. Кроме этого экраны, особенно немагнитные, увеличивают габариты катушки в несколько раз. Поэтому при расчете экранов приходится принимать некоторое компромиссное решение, учитывая основные требования к параметрам катушек.

Рассмотрим влияние немагнитного экрана на индуктивность и добротность катушки.

Электрическую схему ВКИ с экраном можно представить в виде двух магнитно связанных катушек (рисунок 7.7, б). Полагая, что катушка и экран имеют высокую добротность ($\omega L_K \gg r_K$ и $\omega L_{\text{Э}} \gg r_{\text{Э}}$), для данной схемы составим уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \dot{U}_K = \dot{I}_K j\omega L_K - \dot{I}_{\text{Э}} j\omega M, \\ 0 = -\dot{I}_K j\omega M + \dot{I}_{\text{Э}} j\omega L_{\text{Э}}, \end{cases} \quad (7.19)$$

где $M = k_{CB} \sqrt{L_K L_{\text{Э}}}$ – взаимная индуктивность между катушкой и экраном; k_{CB} – коэффициент связи катушки с экраном.

Решая систему уравнений (7.19) относительно тока \dot{I}_K , получим:

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_K}{\omega L_K (1 - k_{CB}^2)} = \frac{\dot{U}_K}{\omega L_{K\text{Э}}}.$$

Следовательно, эквивалентная индуктивность катушки с экраном $L_{K\text{Э}}$:

$$L_{K\text{Э}} = L_K (1 - k_{CB}^2) \quad (7.20)$$

будет меньше индуктивности катушки без экрана L_K на величину $\Delta L_{\text{Э}}$:

$$\Delta L_{\text{Э}} = k_{CB}^2 L_K. \quad (7.21)$$

В случае низкокачественного экрана, когда $r_{\text{Э}}$ соизмерима с $\omega L_{\text{Э}}$, индуктивность катушки снизится несколько меньше за счет снижения тока экрана $I_{\text{Э}}$ и, соответственно, уменьшения магнитного потока экрана $\Phi_{\text{Э}}$:

$$\Delta L_{\text{Э}} = k_{CB}^2 L_K \frac{(\omega L_K)^2}{r_{\text{Э}}^2 + (\omega L_K)^2}. \quad (7.22)$$

Соответственно, эффективность такого экрана будет также ниже.

Здесь коэффициент взаимной связи k_{CB} зависит от геометрических размеров катушки и экрана. Для однослойных и тонких многослойных катушек он может быть рассчитан по формуле:

$$k_{CB}^2 = \eta (D/D_{\text{Э}})^3, \quad (7.23)$$

где η – коэффициент, зависящий от соотношения (l/D) (рисунок 7.8).

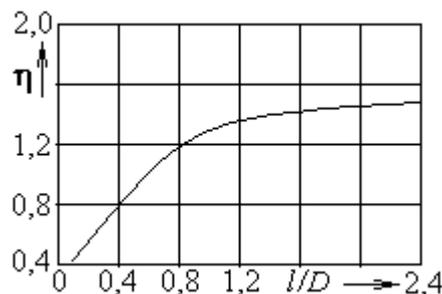


Рисунок 7.8 – Зависимость коэффициента η от соотношения l/D

На активное сопротивление катушки наличие экрана сказывается двояким образом. Во-первых, сопротивление катушки r_L увеличивается на величину вносимого сопротивления экрана $\Delta r'_\Delta$, которое может быть определено, как и ΔL_Δ , на основании теории взаимосвязанных цепей:

$$\Delta r'_\Delta = \frac{(\omega M)^2 r_\Delta}{r_\Delta^2 + (\omega M)^2} \approx k_{CB}^2 N^2 \frac{D}{D_\Delta} r_\Delta, \quad (7.24)$$

где $M^2 = k_{CB}^2 L_K L_\Delta$; $L_\Delta = L_{0\Delta} D_\Delta \approx L_0 \cdot D_\Delta$; $L_K = L_0 \cdot N^2 \cdot D$.

С другой стороны, за счет ослабления эффекта близости (уменьшается основной поток катушки Φ_K на величину Φ_Δ) происходит уменьшение сопротивления катушки на величину $\Delta r''_\Delta$):

$$\Delta r''_\Delta = r_0 k_{CB}^2 (2 - k_{CB}^2) \cdot \left(\frac{KNd}{2D} \right)^2 \cdot G(z), \quad (7.25)$$

где r_0 – сопротивление провода постоянному току; K – коэффициент, учитывающий влияние размеров катушки на эффект близости, зависит от соотношения l/D ; $G(z)$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления за счет эффекта близости, и определяются через функции Бесселя.

Следовательно, эквивалентное сопротивление и добротность экранированной катушки будут равны:

$$r_{K\Delta} = r_f + \Delta r_\Delta = r_f + \Delta r'_\Delta - \Delta r''_\Delta, \quad (7.26)$$

$$Q_{K\Delta} = \frac{\omega L_{K\Delta}}{r_{K\Delta}}. \quad (7.27)$$

Причем добротность катушки с экраном оказывается всегда меньше добротности катушки без экрана, то есть $Q_{K\Delta} < Q_K$.

Проведя анализ приведенных выше соотношений, и учитывая то, что плотность внешнего магнитного поля с удалением от катушки существенно уменьшается, можно сделать следующие **выводы**:

- чем больше будет отношение диаметров экрана и катушки D_Δ/D , тем эффективнее будет экранирование и тем меньше будет влияние экрана на параметры катушки, то есть, тем меньше снизятся L_K и Q_K ;

- чем выше будет качество экрана, то есть, чем меньше будет сопротивление экрана току высокой частоты r_Δ , тем эффективнее будет экранирование и тем выше будет добротность катушки $Q_{K\Delta}$.

Но при увеличении соотношения D_Δ/D существенно увеличивается габаритный объем катушки.

Для того чтобы индуктивность и добротность катушки не падали более, чем на 10%, рекомендуется выполнять соотношение $D_\Delta/D = 1.5 \dots 2$, которое тем меньше, чем короче катушка. Для снижения влияния экрана на добротность катушки экраны выполняются из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь), а внутренняя поверхность шлифуется и покрывается тонким слоем серебра или золота.

Наличие экрана снижает стабильность катушек, поэтому для высокостабильных катушек рекомендуется отношение $D_\Delta/D \geq 2.5$.

Ослабить влияние экрана на L_K и Q_K можно с помощью цилиндра из магнитоэлектрика или феррита, помещенного между катушкой и экраном. Для малогабаритных катушек ограничиваются одним магнитным экраном.

7.6 Катушки индуктивности с магнитными сердечниками

7.6.1 Основные свойства высокочастотных магнитных материалов

Использование магнитных сердечников позволяет существенно уменьшить габариты и увеличить добротность катушки, а также получить возможность подстройки индуктивности. Характеристики катушек индуктивности определяются свойствами магнитных сердечников и их конструкциями.

Для изготовления сердечников ВКИ используются высокочастотные магнитные материалы – магнитоэлектрики и ферриты (см. раздел 4).

Магнитоэлектрики представляют собой конгломерат ферромагнитного порошка (альсифера, карбонильного железа, *Mo*-пермаллоя), связанного диэлектриком (бакелитом, аминопластом, полистиролом и т.д.) (см. пункт 4.4.7).

Ферриты – это полупроводниковые магнитные материалы, представляющие собой твердые растворы сложных окислов железа с добавлением в кристаллическую решетку атомов двухвалентных металлов. Они, как правило, имеют составную структуру. Например: марганцево-цинковые (МЦ), никель-цинковые (НЦ), медно-цинковые, свинцово-никелевые и т.д. (см. подраздел 4.5).

Основные свойства высокочастотных магнитных материалов характеризуются *начальной магнитной проницаемостью μ_H , диапазоном рабочих частот $f_{min} \dots f_{max}$, потерями и стабильностью*, измерение которых производится на образцовых тороидальных катушках.

Величина μ_H определяется отношением индуктивности образцовой тороидальной катушки с сердечником $L_{КС.ОБР}$ и без него $L_{К.ОБР}$, т.е.:

$$\mu_H = \frac{L_{КС.ОБР}}{L_{К.ОБР}}. \quad (7.28)$$

Величина μ_H зависит от магнитных свойств, технологии изготовления материала и лежит в пределах 9...250 для магнитоэлектриков и 10...20000 для ферритов.

Диапазон рабочих частот определяется эффективностью применения данного материала. На частотах $f < f_{min}$ эффективнее использовать другие материалы, имеющие более высокую магнитную проницаемость, а при $f > f_{max}$ наблюдается резкое увеличение потерь в сердечнике и снижение магнитной проницаемости, что делает бессмысленным применение данного сердечника.

Область использования магнитоэлектриков – от 10 кГц до 100 МГц, а ферриты могут использоваться на более высоких частотах (до 250 МГц и выше).

Потери в высокочастотных материалах можно разделить на четыре составляющие: потери на гистерезис, на вихревые токи, на последствие и потери в диэлектрике. Величина их характеризуется соответствующим *коэффициентом потерь* δ_G , δ_B , δ_{II} и δ_D . Очевидно, что общие потери в магнитном материале будут равны:

$$\underline{\text{tg}}\delta_{\mu} = \text{tg}\delta_{\Gamma} + \text{tg}\delta_{B} + \text{tg}\delta_{\Pi} + \text{tg}\delta_{D}. \quad (7.29)$$

Учитывая, что потери на гистерезис пропорциональны амплитуде напряженности магнитного поля H_m , а потери на вихревые токи пропорциональны частоте f , а также учитывая, что углы потерь обычно небольшие, т.е. $\text{tg}\delta \approx \delta$, то выражение (7.29) можно представить как:

$$\text{tg}\delta_{\mu} \approx \delta_{\Gamma} H_m + \delta_B f + \delta_{\Pi} + \delta_D. \quad (7.30)$$

Значения коэффициентов δ_{Γ} , δ_B , δ_{Π} обычно приводятся в характеристиках материалов [10, таблица 4-7]. Диэлектрические потери не поддаются точному расчёту, но оказывают влияние на общие потери.

Стабильность магнитных материалов характеризуется изменением μ и $\text{tg}\delta$ под влиянием температуры, влаги и времени. Наибольшее влияние оказывает температура. Так для альсифера $\alpha_{\mu} = -(40...100) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, для карбонильного железа $\alpha_{\mu} = (180...220) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, а для ферритов $\alpha_{\mu} = (600...6000) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Как видно из приведенных данных, альсиферы и карбонильное железо имеют наибольшую стабильность, а ферриты – наименьшую. К тому же альсиферы имеют отрицательный $T\mu$, что позволяет использовать сердечники из них для термокомпенсации ТКИ катушек. Следует также отметить, что у ферритов при высоких температурах, достигающих точки Кюри (80...200 °С) магнитные свойства полностью исчезают.

Под влиянием времени изменяется структура магнитных материалов. Особенно сильно проявляется старение у ферритов и альсиферов: $(\Delta\mu/\mu)_{CT} = 0.5...1.5\%$ в год. Кроме того, ферриты гигроскопичны, и влажность сильно сказывается на их свойствах.

Условные обозначения ферритов и магнитодиэлектриков – буквенно-цифровые. Буквами шифруются марка материала, назначение, частотный диапазон и т.д. Числовые значения, как правило, указывают на величину начальной магнитной проницаемости μ_H . Приведем несколько примеров:

- ферриты 700НМ1...4000НМ1 – низкочастотные (Н), марганцево-цинковые (М), высокостабильные (1), имеющие $\mu_H = 700...4000$;
- ферриты 100НН...2000НН – низкочастотные (Н), никель-цинковые (Н) ферриты, имеющие $\mu_H = 100...2000$, используются на частотах до 300 кГц;
- ферриты 20ВЧ...150ВЧ – высокочастотные никель-цинковые ферриты с $\mu_H = 20...150$;
- альсиферы марок ТЧ-90, ТЧК-55, ВЧ-32, ВЧК-22, РЧ-9, ФИ-25 – для тональной частоты (ТЧ), высокочастотные (ВЧ), радиочастотные (РЧ), для ферровариометров (ФИ), термокомпенсированные (К);
- карбонильное железо МР-10, МР-20 – карбонильное железо для РЭА, работающей на частотах до 2 МГц с $\mu_H = 10$ и 20, соответственно;
- Мо-пермаллои (пресспермы) МП-60, МП-250 с $\mu_H = 60$ и 250, соответственно.

Более подробные сведения о высокочастотных материалах см. в пункте 4.4.7 и в подразделе 4.5.

7.6.2 Типы и свойства магнитных сердечников

Свойства магнитных сердечников определяются следующими параметрами: *относительной действующей магнитной проницаемостью* μ_C (μ_{OTH}), *коэффициентом использования магнитных свойств материала* k_μ , *степенью увеличения добротности* k_Q , *потерями* $tg\delta_C$, *стабильностью и диапазоном рабочих частот* $f_{min} \dots f_{max}$.

Относительная действующая магнитная проницаемость – отношение действительного значения индуктивности катушки с данным типом сердечника к индуктивности катушки без сердечника (в рабочем режиме):

$$\mu_C = \mu_{OTH} = \frac{L_{KC}}{L_K}. \quad (7.31)$$

Величина μ_C зависит от свойств материала сердечника, от конструкции сердечника и катушки (от соотношения их геометрических размеров), а также от режима работы (частоты f , амплитуды переменной магнитной индукции B_m , величины подмагничивания B_0) и технологии изготовления.

Коэффициент использования магнитных свойств материала – отношение действующей магнитной проницаемости сердечника к начальной магнитной проницаемости материала $k_\mu = \mu_C / \mu_H$. Величина k_μ точному расчёту не поддаётся. Поэтому в расчётах, как правило, пользуются экспериментально снятыми зависимостями $k_\mu = f(\mu_H)$ для каждого конкретного типа сердечника. Если на k_μ оказывают влияние геометрические размеры сердечника, то вводится поправочный коэффициент k . Тогда $\mu_C = k \cdot k_\mu \cdot \mu_H$. Обычно $k_\mu \approx 0.15 \dots 0.5$.

Степень увеличения добротности катушки или относительная добротность при наличии сердечника определяется как отношение добротности катушки с сердечником к добротности катушки без сердечника: $k_Q = Q_{KC} / Q_K$. Если бы отсутствовали потери, вносимые сердечником, то добротность катушки с сердечником увеличивалась бы в μ_C раз, так как $L_{KC} = \mu_C \cdot L_K$. С учетом же потерь в сердечнике добротность можно определить по формуле:

$$Q_{KC} \approx \frac{\mu_C Q_K Q_C}{\mu_C Q_K + Q_C} < \mu_C Q_K, \quad (7.32)$$

где $Q_C = 1/tg\delta_C$ – добротность сердечника.

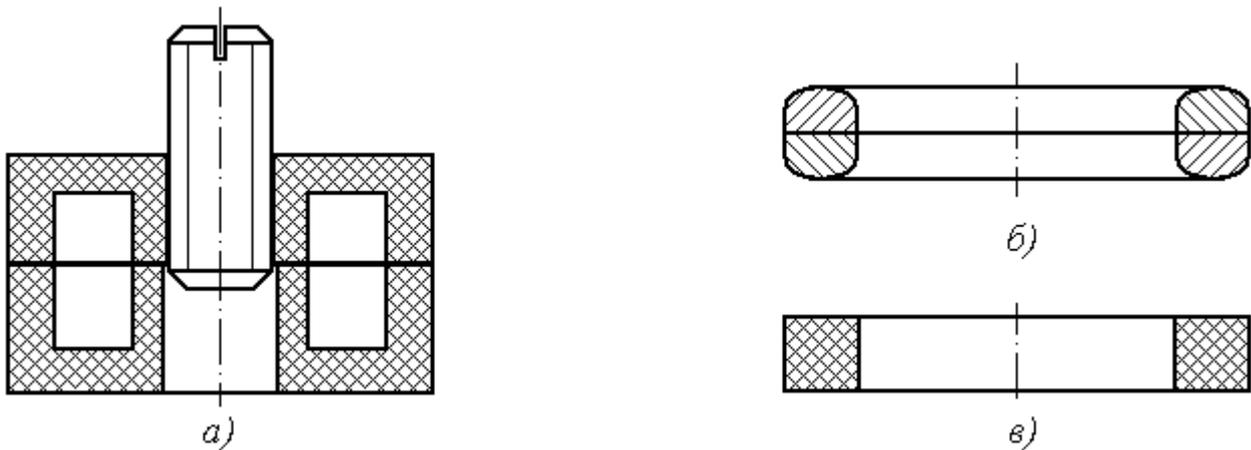
Так как величина μ_C и потери очень сильно зависят от частоты f , то и величина Q_C также зависит от частоты. Величина k_Q является мерой для определения диапазона рабочих частот. Обычно принимается $k_Q \geq 1$.

Как и материалы, сердечники характеризуются **потерями** $tg\delta_C$, **стабильностью** и **диапазоном рабочих частот**. Потери находятся в прямой зависимости от μ_C и частоты f . Часто сердечники оценивают **добротностью** $Q_C = 1/tg\delta_C$. Верхняя граница рабочего диапазона частот f_{max} ограничивается величиной потерь и определяется обычно соотношением $Q_{KC} / Q_K \geq 1$. Стабильность сердечника оценивается теми же параметрами, что и материалы. При этом значение α_{μ_C} тем ниже, чем больше величины μ_C и k_μ .

Наиболее широкое распространение в индуктивных катушках РЭА получили цилиндрические, катушечные, броневые и кольцевые (тороидальные) типы сердечников (см. рисунки 7.9 и 4.11).

Простейшими из них является сердечники цилиндрические: с резьбой (СЦР), гладкие (СЦГ) и трубчатые (СЦТ); которые нашли применение в качестве подстроечных сердечников, в магнитных антеннах, в дросселях и в ферровариометрах. Они просты в изготовлении, но имеют наименьшие значения μ_C и k_μ , например, для карбонильного железа $\mu_C = 1.25 \dots 2.4$, а $k_\mu = 0.2 \dots 0.35$.

Сердечники катушечного типа имеют довольно хорошие характеристики ($k_\mu = 0.3 \dots 0.5$; $\mu_C = 3 \dots 5$ для карбонильного железа или $\mu_C = 5 \dots 25$ для ферритов), но область рабочих частот ограничена ($4 \dots 5$ МГц) из-за резкого падения добротности в области ВЧ. Они используются в контурах приёмников ДВ и СВ, а также в высокочастотных дросселях.



а – броневой с замкнутой магнитной цепью; *б* – кольцевой составной с овальным сечением; *в* – кольцевой с прямоугольным сечением

Рисунок 7.9 – Конструкции броневого и тороидального сердечников

Сердечники броневого типа изготавливаются из карбонильного железа замкнутого типа СБ-а (рисунок 7.9, *а*) или разомкнутого типа СБ-б и из феррита также замкнутые или разомкнутые типа Б. Сердечники разомкнутого типа имеют бóльшую добротность, более стабильны и могут работать на более высоких частотах, но у них меньше значение μ_C . Сердечники из карбонильного железа могут использоваться на частотах до 25 МГц, а из ферритов – до 100 МГц. Ценным свойством броневых сердечников является сильное ослабление внешнего магнитного поля, что позволяет получить малогабаритные катушки без использования экранов. Применяются такие сердечники в контурах приёмников ДВ, СВ и в усилителях промежуточной частоты. Их параметры: $k_\mu \approx 0.15 \dots 0.5$; $\mu_C = 3 \dots 6.5$ (карбонильное железо) или $\mu_C = 10 \dots 50$ (ферриты).

Наиболее полное использование магнитных свойств имеет место в кольцевых (тороидальных) сердечниках ($\mu_C \approx \mu_H$). Тороидальные сердечники выполняются из ферритов по ГОСТ 17141-76 и 14208-77 (прямоугольного сечения, как на рисунке 7.9, *в*) или из альсифера – по ГОСТ 8763-77 (круглого сечения из двух половинок, рисунок 7.9, *б*). Достоинствами кольцевых сердечников являются возможность выполнения высокодобротных (до 400...500 единиц) катушек и нали-

чие минимальных внешних магнитных полей, что позволяет их использовать без экранов. Они находят применение в катушках постоянной индуктивности, используемых в малогабаритной РЭА, работающих в широком диапазоне частот, в катушках связи ($k_{CB} \approx 1$), а также в дросселях высокой частоты. Основным недостатком ВКИ на кольцевых сердечниках является низкая стабильность, определяемая, главным образом, низкой стабильностью материала сердечника.

Кроме кольцевых сердечников часто применяют также сердечники чашечного типа и H-образные сердечники.

7.6.3 Особенности проектирования катушек индуктивности с магнитными сердечниками

Индуктивность катушек с магнитными сердечниками L_{KC} может быть рассчитана по общеизвестной формуле:

$$L_{KC} = \frac{\mu_0 \mu_C S_C N^2}{l_C}, \quad (7.33)$$

где μ_C – относительная проницаемость сердечника; l_C и S_C – длина средней силовой линии и сечение сердечника.

Из (7.33) можно выразить число витков:

$$N = n \sqrt{L_{3AD}}, \quad (7.34)$$

где n – постоянная, определяемая геометрическими размерами сердечника и свойствами магнитного материала. Она может быть легко определена экспериментально или рассчитана при известном значении μ_C :

$$n = \sqrt{\frac{l_C}{\mu_0 \mu_C S_C}}. \quad (7.35)$$

Для стандартных сердечников n указывается в справочных данных.

Потери в катушках с магнитными сердечниками состоят из собственных потерь в обмотке r_f и потерь, вносимых сердечником Δr_C , т.е.:

$$r_L = r_f + \Delta r_C = r_f + \omega L_{KC} (\delta_{CF} H_C + \delta_{CB} f + \delta_{CP}) = r_f + \omega L_{KC} \cdot \text{tg} \delta_C, \quad (7.36)$$

где δ_{CF} , δ_{CB} , δ_{CP} – коэффициенты потерь сердечника на гистерезис, на вихревые токи и на последствие; H_C – напряженность магнитного поля в сердечнике; δ_C – общий угол потерь (обычно указываются в справочных данных).

Очевидно, что потери зависят от частоты f , переменной составляющей H_C (или B_C) и свойств материала.

Введение немагнитного зазора в сердечник ослабляет магнитный поток катушки, уменьшает действующую магнитную проницаемость сердечника μ_C , однако потери также уменьшаются. На рисунке 7.10 показана качественная зависимость сопротивления катушки от величины немагнитного зазора l_3 . Очевидно, что можно подобрать такой зазор $l_{3.опт}$, при котором сопротивление катушки будет минимально, а добротность максимальна. Но индуктивность такой катушки существенно уменьшится по сравнению с ВКИ с сердечником без зазора.

Расчеты ВКИ с магнитными сердечниками проводятся графоаналитическим методом с использованием характеристик сердечников. Выбрав типоразмер сер-

дечника, из справочных данных находят значения μ_C и Q_C . По формулам (7.37) рассчитываются индуктивность и добротность катушки без сердечника:

$$L_K = \frac{L_{KC}}{\mu_C}, \quad Q_K = \frac{Q_C Q_{KC}}{\mu_C (Q_C - Q_{KC})}, \quad (7.37)$$

где $L_{KC} = L_{ЗАД}$ и $Q_{KC} = Q_{ЗАД}$ – заданные в техническом задании индуктивность и добротность катушки с сердечником. Далее рассчитывается катушка без сердечника по приведенной в [11, подраздел 4.5] методике.

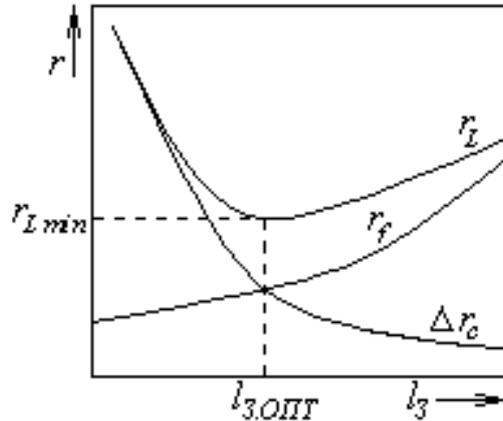


Рисунок 7.10 – Влияние зазора на сопротивление потерь в катушке

Для подстройки индуктивности в катушках диапазонов КВ и УКВ часто применяются сердечники из немагнитного металла (латунь, медь) или из диэлектрика (керамика). Конструктивно они выполняются либо стержневого, либо чашечного типа. Немагнитные сердечники уменьшают индуктивность катушки на 3...5% и добротность до 10%. Однако катушки с немагнитными сердечниками отличаются высокой стабильностью и применяются в высокочастотных РЭС.

7.7 Индуктивные элементы для поверхностного монтажа

За рубежом в исполнении для технологии поверхностного монтажа (ТМП) выпускают катушки индуктивности и трансформаторы. Типовые конструкции чип-индуктивностей показаны на рисунке 7.11.

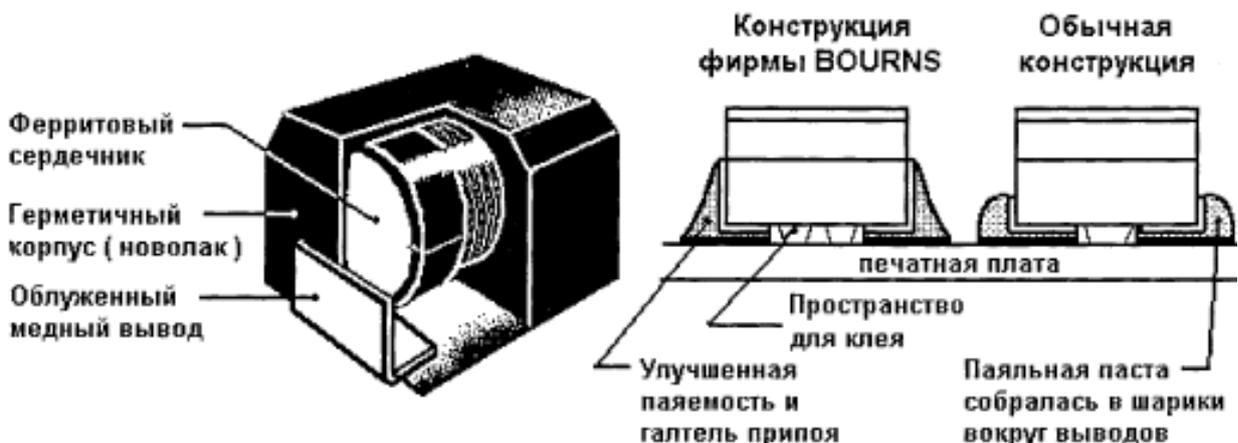


Рисунок 7.11 – Типовые конструкции чип-индуктивностей

Монолитная конструкция с ферритовым сердечником помещается в герметичный корпус из новолака. Обмотки выполнены лакированным медным проводом. Например, фирма BOURNS выпускает чип-элементы: в корпусе 0805 с параметрами – индуктивность $L = 0.039...1$ мкГн и добротность $Q = 6...15$; в корпусе 1008 – $L = 0,01...100$ мкГн и $Q = 10...25$; в корпусе 1210 – $L = 0.047...220$ мкГн и $Q = 10...30$; в корпусе 1812 – $L = 0.1...1000$ мкГн и $Q = 30...50$. Точность изготовления индуктивностей $\pm 10\%$. При пайке волной припой эти индуктивности выдерживают погружение в расплавленный припой ($260\text{ }^\circ\text{C}$) в течение 10 с.

Выпуск отечественных индуктивных чип-элементов пока не налажен.

7.8 Вариометры

Вариометром называется катушка переменной индуктивности, предназначенная для настройки колебательных контуров. Применение вариометров позволяет упростить конструкцию блока настройки, уменьшить его габариты и стоимость по сравнению с конденсаторным блоком, а также увеличить стабильность контуров. Свойства вариометров оцениваются теми же параметрами, что и катушки с фиксированной индуктивностью. Кроме того, вводятся дополнительные параметры и характеристики: минимальная L_{min} и максимальная L_{max} индуктивность, величина изменения индуктивности $\Delta L = L_{max} - L_{min}$, коэффициент перекрытия индуктивности $K_L = L_{max}/L_{min}$, закон изменения индуктивности $L(\varphi)$ (функциональная характеристика) и др.

В зависимости от способа регулирования индуктивности вариометры разделяются на четыре типа:

- а) вариометры с переменным числом витков (реостатного типа);
- б) вариометры с переменной взаимной индуктивностью;
- в) ферровариометры;
- г) вариометры с немагнитными сердечниками.

На рисунке 7.12 представлена конструкция **вариометра с изменяющимся числом витков**. Он прост по конструкции и позволяет изменять индуктивность в очень широких пределах по определенному (преимущественно по линейному) закону $L(\varphi)$, но наличие контакта вносит большие и непостоянные потери. Реостатные вариометры могут иметь очень большой коэффициент перекрытия K_L . Преимущественное применение такие вариометры нашли в передатчиках и приёмниках диапазона УКВ.

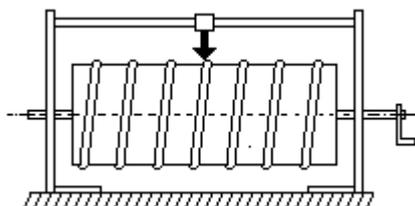
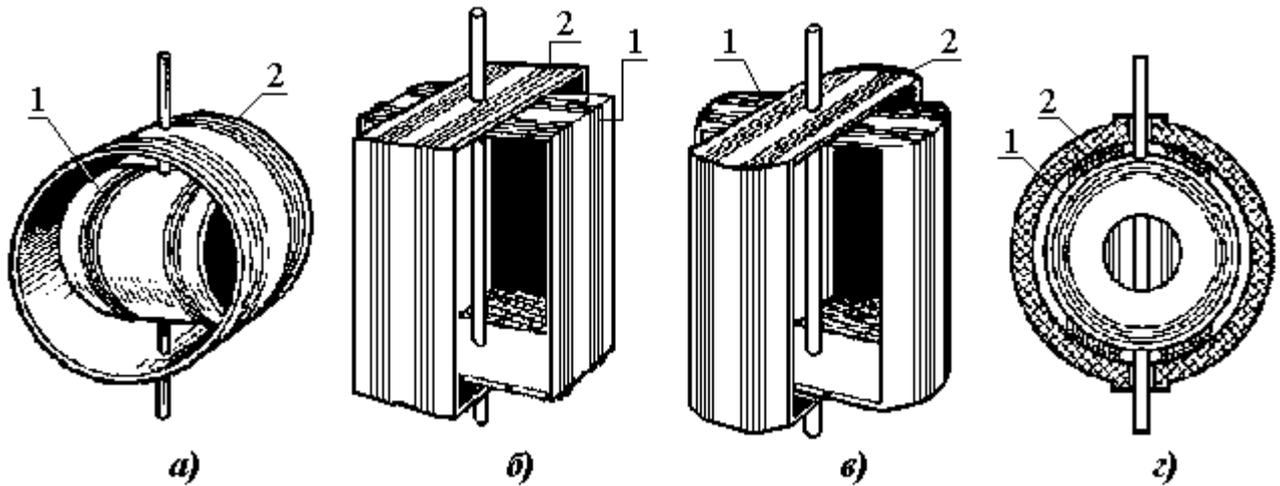


Рисунок 7.12 – Вариометр реостатного типа

Вариометры с переменной взаимной индуктивностью по конструктивному исполнению разделяются на цилиндрические и шаровые (рисунок 7.13). В

свою очередь цилиндрические вариометры могут быть выполнены с цилиндрическими катушками и круглыми витками (а), с прямоугольными катушками и прямоугольными витками (б), с цилиндрическими катушками и прямоугольными витками (в).



а – с цилиндрическими катушками и круглыми витками; б – с прямоугольными катушками; в – с цилиндрическими катушками и прямоугольными витками; г – шаровой вариометр. 1 – обмотка ротора; 2 – обмотка статора

Рисунок 7.13 – Устройство вариометров с взаимной индуктивностью

Катушки ротора (подвижной части) и статора в зависимости от пределов регулирования индуктивности могут соединяться последовательно или параллельно. При последовательном соединении величина изменения индуктивности:

$$\Delta L = L_{max} - L_{min} = (L_C + L_P + 2M) - (L_C + L_P - 2M) = 4M, \quad (7.38)$$

где L_C , L_P , M – индуктивности статора, ротора и взаимная индуктивность:

$$M = k_{CB} \sqrt{L_C L_P},$$

где k_{CB} – коэффициент взаимной связи статора и ротора.

Коэффициент перекрытия будет равен:

$$K_L = \frac{L_{max}}{L_{min}} = \frac{L_C + L_P + 2M}{L_C + L_P - 2M}. \quad (7.39)$$

Если принять $L_C = L_P = L$, то $M = k_{CB}L$ и, соответственно:

$$\Delta L = 4k_{CB}L, \quad K_L = \frac{1 + k_{CB}}{1 - k_{CB}}. \quad (7.40)$$

В высокочастотных контурах катушки ротора и статора соединяются параллельно. При этом диапазон изменения индуктивности уменьшается. Так при $L_C = L_P = L$ величина изменения индуктивности ΔL уменьшается в четыре раза:

$$\Delta L = \frac{L_C \cdot L_P - M^2}{L_C + L_P - 2M} - \frac{L_C \cdot L_P - M^2}{L_C + L_P + 2M} = k_{CB}L = M. \quad (7.41)$$

При этом коэффициент перекрытия K_L остается прежним.

Вариометры с цилиндрическими и прямоугольными катушками (рисунки 7.13, а и б) отличаются простотой конструкции, но имеют малый коэффициент перекрытия $K_L \leq 4 \dots 5$.

Цилиндрический вариометр с прямоугольными витками и шаровой вариометр (рисунки 7.13, в и з) имеют большие коэффициенты перекрытия ($K_L \approx 6 \dots 8$ и $K_L \approx 12 \dots 15$, соответственно), поэтому получили наиболее широкое применение (в стабильных задающих генераторах диапазонных передатчиков).

Для увеличения коэффициента перекрытия (до $15 \dots 20$) в вариометрах данного типа могут быть использованы магнитные сердечники.

Наиболее высокие значения K_L достигаются в **ферровариометрах**, представляющих собой цилиндрическую катушку индуктивности, внутри которой перемещается сердечник из магнитного материала с высоким магнитной проницаемостью μ_c , например, альсифер ФИ-25, ($\mu_H = 20 \dots 25$), феррит 600НН ($\mu_H = 600$). Для увеличения коэффициента перекрытия K_L используются сердечники замкнутого типа с изменяющимся немагнитным зазором ($K_L \leq 85$).

Ферровариометры отличаются малыми габаритами и гораздо меньшим рассеянием магнитного поля. Применяются ферровариометры преимущественно в малогабаритных приемниках во всём диапазоне частот от ДВ до УКВ.

Вариометры с немагнитными сердечниками конструктивно выполняются так же, как и ферровариометры, но отличаются малым коэффициентом перекрытия и высокой стабильностью. Они нашли применение в высокостабильных контурах УКВ.

7.9 Дроссели высокой частоты

Дроссели высокой частоты применяются в РЭА либо для ослабления (фильтрации) высокочастотных составляющих тока, либо для коррекции амплитудно-частотных характеристик электронных устройств. Поэтому к ним по точности, добротности и стабильности особых требований не предъявляется. Важнейшей для них является частотная характеристика. На рисунке 7.14 приведены схемы замещения дросселя и частотная зависимость полного сопротивления дросселя $z(f)$.

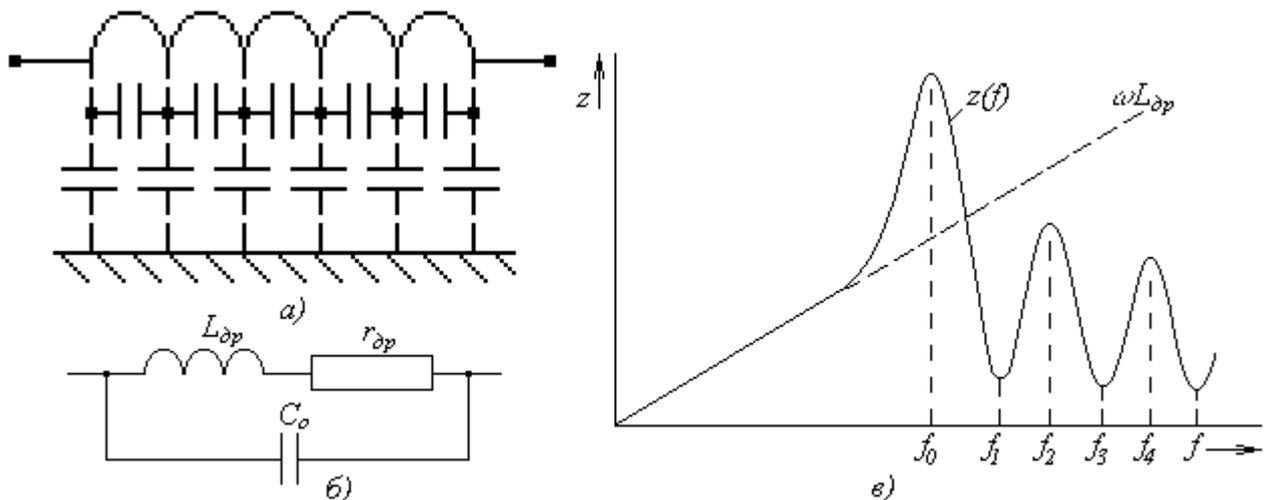


Рисунок 7.14 – Эквивалентные схемы замещения (а и б) и частотная характеристика (в) дросселя высокой частоты

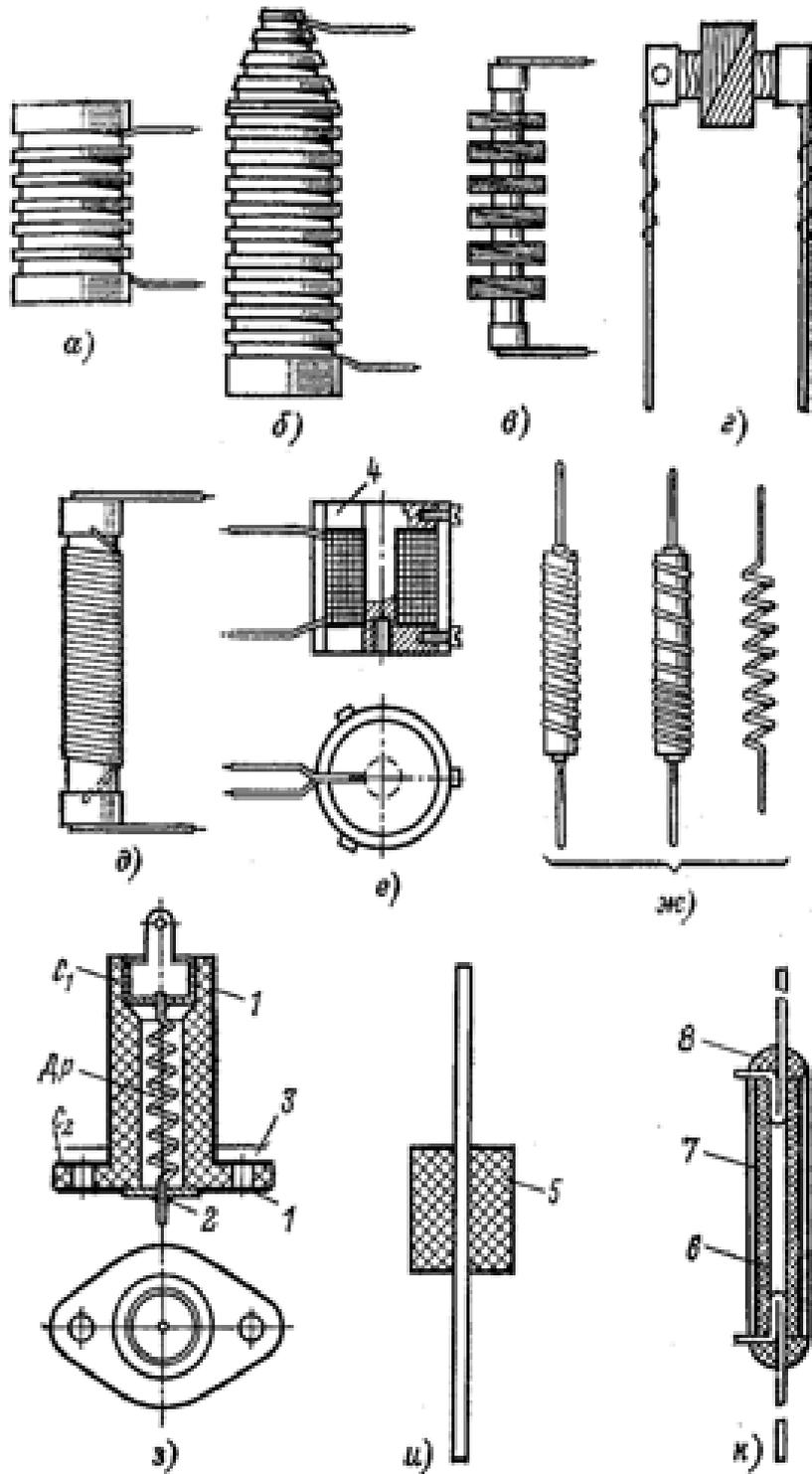
В общем случае дроссель следует рассматривать как цепь с распределенными параметрами (рисунок 7.14, *a*). В области высоких частот характеристика представляет собой чередование частных резонансов напряжений (f_1, f_3, f_5, \dots) и резонансов тока (f_0, f_2, f_4, \dots). Здесь f_0 – собственная частота дросселя, f_1 – частота первого последовательного резонанса, называемая критической частотой. На этой частоте сопротивление дросселя мало, и он при работе в достаточно мощных цепях на частотах, близких к f_1 , может нагреться сверх допустимой для изоляции температуры и отказать из-за разрушения изоляции. В области низких частот ($f < f_0$) дроссель можно представить упрощенной схемой замещения (рисунок 7.14, *b*).

Таким образом, для «*фильтровых*» дросселей очень важным параметром является собственная ёмкость C_0 . Чем меньше значение C_0 , тем больше собственная частота f_0 , следовательно, тем шире будет область рабочих частот. Поэтому конструктивно дроссели фильтров выполняются: либо в виде длинных секционированных катушек с малым диаметром ($D < 10$ мм) для диапазонов ДВ и СВ (рисунки 7.15, *a, б, в*), либо в виде тонких однослойных катушек для диапазона УКВ (рисунки 7.15, *ж*), либо на керамических стержнях резисторов для диапазона КВ (рисунок 7.15, *д*). В дросселях накальных цепей для повышения добротности применяются ферромагнитные сердечники, чаще всего замкнутого типа: броне-вые, катушечные, кольцевые (рисунок 7.15, *е*).

Дроссели корректирующих цепей, как правило, выполняются в виде коротких катушек на стержнях резисторов (рисунок 7.15, *з*). Для последних двух типов дросселей особых требований к величине C_0 не предъявляется.

Добротность фильтровых дросселей обычно низкая ($Q = 10 \dots 30$).

Расчет дросселей заключается в определении индуктивности, числа витков, собственной ёмкости и полного сопротивления.



a – для длинных волн; *б* – для широкого диапазона (длинные и средние волны); *в* – для средних волн; *г* – корректирующий; *д* – для коротких волн; *е* – дроссель цепей питания со стальным сердечником; *ж* – дроссели для диапазона УКВ; *з* – фильтр питания диапазона УКВ; *и* – дроссель с ферритовой втулкой; *к* – дроссель с ферритовым сердечником; 1 – металлизация; 2 – пайка; 3 – шасси; 4 – разрез; 5 – ферритовая втулка «бусинка»; 6 – ферритовый сердечник; 7 – обмотка; 8 – проходной изолятор

Рисунок 7.15 – Конструкции дросселей высокой частоты [10]

Контрольные вопросы

1. Что называется высокочастотной катушкой индуктивности (ВКИ)?
2. На какие виды делятся ВКИ по назначению? Их области применения?
3. Условные обозначения катушек индуктивности в электрических схемах?
7. Что такое индуктивность катушки и ее физический смысл?
5. Что такое добротность ВКИ?
6. Чем определяются сопротивление потерь и собственная ёмкость катушки? Схемы замещения ВКИ?
7. Как влияют сопротивление потерь и собственная ёмкость на эквивалентную индуктивность и добротность ВКИ?
8. Какими параметрами оценивается стабильность индуктивности и добротности ВКИ? Каковы пути увеличения стабильности параметров ВКИ?
9. Типы намоток катушек индуктивности, их особенности и области применения?
10. Для чего экранируют ВКИ? Физическая сущность экранирования магнитного поля катушки?
11. Какое влияние оказывает немагнитный экран на индуктивность и добротность ВКИ?
12. Для какой цели используются ферромагнитные сердечники в ВКИ?
13. Какие материалы используются в ферромагнитных сердечниках для ВКИ? Какими параметрами оцениваются их свойства?
14. Какие типы ферромагнитных сердечников нашли применение в ВКИ, и какими параметрами оцениваются их свойства?
15. Как зависят индуктивность, добротность и стабильность ВКИ от свойств ферромагнитных сердечников?
16. Особенности расчета ВКИ с ферромагнитными сердечниками?
17. Что собою представляют индуктивные элементы для поверхностного монтажа?
18. Что такое вариометр? Какие типы вариометров существуют, какими параметрами и характеристиками определяются их свойства?
19. Конструктивные особенности и свойства вариометров с взаимной индуктивностью?
20. Что понимается под дросселями высокой частоты? Каковы их конструктивные исполнения и области применения в РЭС?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: Учебное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 352 с.
- 2 Нефедцев Е.В. Радиоматериалы радиокомпоненты: Учебное пособие. – Томск: ТМЦ ДО, 2000. – 290 с.
- 3 Электрорадиоматериалы / Б.М. Тареев, Н.В. Короткова и др. / Под ред. Б.М. Тареева: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
- 4 Никулин Н.В., Назаров А.С. Радиоматериалы и радиодетали: Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1986. – 208 с.
- 5 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
- 6 Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т.3. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
- 7 Трубицын А.М. Электрорадиоматериалы. Диэлектрики. Учебное пособие. Томск, изд-во ТАСУР, 1995.-76с.
- 8 Солдатова Л.Ю. Материаловедение и материалы электронных средств: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2001. – 147 с.
- 9 Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. – М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
- 10 2. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
- 11 Кузубных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база РЭС. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 263 с.
- 12 5. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под. ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М.: Энергия, 1976.
- 13 22. Поверхностный монтаж. Электронные компоненты. Краткий каталог. – М.: ЗАО ОСТЕК, 2000.
- 14 23. Монтаж на поверхность. Элементная база / Под ред. И.О. Шурчкова. – М.: Издательство стандартов, 1993.
- 15 Кузубных Н.И. Перспективная элементная база РЭС. Ч. 2. Функциональные устройства РЭС: Учебное пособие. –
- 16 Кузубных Н.И. Физика функциональных устройств: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 152 с.