



Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Електроніка та мікросхемотехніка»

напрямку 6.050702 «Електромеханіка» за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр», професійне спрямування «Електричні системи і комплекси ТЗ»

Частина I

Аналогова електроніка

Харків 2013

Электроника и микросхемотехника

Лекция 1

Предмет и задачи изучения дисциплины.

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микросхемотехника. М: «Высшая школа» - 2005 г. – 622 с.
2. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. (Полный курс): Учебник для ВУЗов. М.: «Горячая линия - телеком», -1999 г. – 768 с.
3. Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций. Санкт-Петербург: «Корона - принт» -1998 г. – 399 с.
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микросхемотехники. К: «Вища школа» - 1987 г.-422 с.
5. Скаржепа В.А., Сенько В.И. Электроника и микросхемотехника: Сб. Задач/ под общ.ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Вища школа. 1989 г. – 232 с
6. Основы электроники и микроэлектроники /Б.С. Гершунский. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1987. – 422 с.
7. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 2-х т. Т.1. Пер. с англ. Изд.2-е, стереотип. – М.:Мир, 1984. – 598 с.
8. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов – 2-е изд., исправ. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 320 с.
9. Справочная книга радиолюбителя – конструктора / А.А.Бокуняев, Н.М.Борисов, Р.В.Варламов и др.; Под ред. Н.И.Чистякова. – М.: Радио и связь, 1990. – 624 с.
10. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник/ Н.Н.Акимов, Е.П. Ващуков, В.А. Прохоренко, Ю.П. Ходоренко – Мн.: Белорусь, 1994. – 591 с.
11. Галкин В.И. и др. Полупроводниковые приборы: Транзисторы широкого применения: Справочник / В.И. Галкин, А.Л. Булычев, П.М. Лямин. – Мн.: Беларусь, 1995. – 383 с.

История и этапы развития электроники и её элементной базы

Электроника — это, то с чем мы сталкиваемся везде и всюду, где бы мы ни находились и что бы мы ни делали.

Что такое электроника? – Это передача, приём, обработка и хранение информации с помощью электрических зарядов.

В настоящее время невозможно найти какую-либо отрасль промышленности, в которой бы не использовались электронные приборы, электронные измерительные устройства, вычислительная техника.

Рождение электроники как науки следует отнести к концу XIX в. Её предпосылками явилось бурное развитие электротехники.

В 1872 г. русский электротехник А.Н.Лодыгин создал первую электрическую лампу накаливания.

В 1883 г. американский ученый Томас Эдисон пытался увеличить срок службы осветительной лампы с угольной нитью накаливания в вакууммированной стеклянной колбе. С этой целью в одном из опытов он ввёл в вакуумное пространство лампы металлическую пластину с проводником, выведенным наружу. При экспериментах он заметил, что вакуум проводит ток, причём только в направлении от электрода к накалённой нити и только тогда, когда нить накалена. Это было неожиданно для того времени, в то время считалось, что вакуум не может проводить ток, так как в нём нет носителей заряда. Изобретатель не понял тогда значение этого открытия, но на всякий случай запатентовал.

Благодаря этим экспериментам Эдисон стал автором фундаментального научного открытия, и открытое им явление — основа работы всех электронных ламп и всей электроники до создания полупроводниковых приборов. Впоследствии это явление назвали и называют сейчас термоэлектронной эмиссией.

За свою жизнь Томас Эдисон получил 1093 патента в США. Если разделить на количество лет работы Эдисона, то получается в среднем 1,5 патента в месяц. Кроме этого, у него есть еще около 3 тысяч патентов по всему миру. Стоимость всех его компаний на то время оценивалась в 15 млрд. долларов. Созданная им компания «Дженерал Электрик» и сегодня является одной из крупнейших компаний мира.

Для того чтобы добиться такого результата Томас Эдисон все свои деньги, время и энергию вкладывал в дело. На его предприятиях был ненормированный рабочий день, он сам трудился по 16-19 часов в сутки. Ему принадлежит знаменитая фраза о том, что «гений – это 1% вдохновения и 99% пота». Все изобретения Эдисона – это не столько именно открытия или фундаментальные изобретения. Скорее это доведение изобретений до коммерческого образца, который может использоваться широкой публикой. Томас Эдисон брал готовое сырое изобретение и усовершенствовал его.

В 1888 г. профессор Московского ун-та А.Г.Столетов исследовал явление фотоэлектронной эмиссии.

Англо-ирландский физик Джордж Джонстон Стоуни, первым указал в 1874 г. на существование элементарного электрического заряда и вычислил (1881) его величину. В 1891 г. Стоуни ввёл для обозначения этого элементарного заряда термин «электрон», понимая под этим элементарное количество электричества.

Дальше электроника развивалась довольно быстро. В 1895 г. Попов изобрёл и построил действующую модель радио-электронного устройства для беспроводной передачи информации, которое, по его словам, «полезно для лекционных целей и регистрирования пертурбаций, происходящих в атмосфере». Это устройство явилось прототипом беспроводного телеграфа. Герц провёл опыты по распространению радиоволн, Гульельмо Маркони развил и применил эти опыты для построения радио.

Последующее развитие электроники обуславливалось необходимостью повышения надёжности, уменьшения габаритов, массы, стоимости и потребляемой мощности электронных устройств и электронных элементов.

В зависимости от применяемой элементной базы можно выделить 4 основных этапа развития промышленной электроники, а вместе с ней, соответственно, и поколения электронных устройств.

- 1) ламповая электроника;
- 2) полупроводниковая электроника;
- 3) микроэлектроника.
- 4) БИС и СБИС.

I поколение (1904 – 1950 гг.) – основой элементной базы электронных устройств являются электровакуумные приборы, действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или в газе. Наиболее широко использовались радиолампы – электронно-вакуумные приборы, предназначенные для различного рода преобразований электрического тока.

Радиолампа состоит из герметичного баллона, а внутри баллона – вакуум и несколько металлических конструкций с выведенными наружу электродами. Одна из них – нить накала, по ней пропускается электрический ток, который нагревает её до температуры в 700–2300 °С. Эта нить разогревает катод, к которому подводится отрицательное напряжение, и катод испускает электроны. К аноду подводится положительное напряжение, разность потенциалов довольно высокая (100–300 В), и поэтому электроны, вылетевшие из катода, летят к аноду, и, следовательно, в лампе течёт ток.

В дальнейшем в радиолампу ввели ещё один дополнительный электрод – управляющую сетку. С помощью неё стало возможным управлять током в радиолампе. Это открыло большие возможности развития электроники. Мировое количество выпускаемых радиоламп выросло ко второй мировой войне до многих миллионов штук в год. Были изобретены и созданы многие устройства по приёму и передаче информации. Телефон и телеграф, радиоприёмники и радиопередатчики. Вместо патефонов появились проигрыватели пластинок, появились магнитофоны. Начали разрабатываться телевизоры.

Но радиолампа – сложное устройство. Во-первых, внутри неё глубокий вакуум, если он потеряется, анодный ток радиолампы понизится из-за соударений электронов с атомами воздуха и с ионами, получившимися в результате этих столкновений. Сетка лампы – это проволочная спираль, которая намотана вокруг катода. Она слабая, не выдерживает перегрузок, вибраций. Нить накала нагрета до высокой температуры, поэтому испускает не только электроны, но и довольно много атомов, т.е. нить всё время испаряется. Лампы имели достаточно большой размер, и электронные устройства, выполненные на лампах, имели сравнительно большие габариты и массу. Число элементов в единицу объёма (плотность монтажа) таких устройств $\gamma \approx 0,001 - 0,003 \frac{\text{ЭЛ}}{\text{см}^3}$.

Сборка таких электронных устройств, как правило, осуществлялась вручную. Устранить все эти недостатки и повысить срок службы не удалось.

II поколение (1950 – начало 60-х) – основой элементной базы являются дискретные полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы, тиристоры). Сборка устройств второго поколения осуществлялась обычно автоматически с применением печатного монтажа. Плотность монтажа таких устройств за счёт применения малогабаритных элементов составляла $\gamma \approx 0,5 \frac{\text{ЭЛ}}{\text{см}^3}$.

III поколение (1960 – 1980 гг.) связано с бурным развитием микроэлектроники – раздела электроники, охватывающего исследование и разработку качественно нового типа приборов – интегральных схем (ИС) и микросборок.

Интегральная схема – совокупность нескольких взаимосвязанных элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле, на одной и той же несущей конструкции (подложке), и выполняющих определённую функцию преобразования сигналов. Они представляют собой полупроводниковые пластины малой толщины, на которых на площади в несколько квадратных миллиметров выполнены десятки тысяч электрически соединённых между собой электронных элементов.

Интегральные схемы обладают целым рядом преимуществ перед своими предшественниками – схемами, которые собирались из отдельных компонентов. ИС имеют меньшие размеры, более высокие быстродействие и надёжность; они, кроме того, дешевле и в меньшей степени подвержены отказам, вызываемым воздействиями вибраций, влаги и старения. Большая часть микросхем изготавливается в корпусах для поверхностного монтажа.

Различают 2 основных типа интегральных схем: полупроводниковые (ПП) и плёночные.

Полупроводниковые интегральные схемы изготавливают из особо чистых ПП материалов (обычно кремний, германий), в которых перестраивают саму решётку кристаллов так, что отдельные области кристалла становятся элементами сложной схемы. Маленькая пластинка из кристаллического материала размерами $\sim 1 \text{ мм}^2$ превращается в самый сложный электронный прибор, эквивалентный радиотехническому блоку из 50–100 и более обычных деталей.

Технология изготовления ПП интегральных схем обеспечивает одновременную групповую обработку сразу большого количества схем. Это определяет в значительной степени идентичность схем по характеристикам. ПП интегральные схемы имеют высокую надёжность.

ПП интегральные схемы развиваются в направлении всё большей концентрации элементов в одном и том же объёме ПП кристалла. Разработаны ПП интегральные схемы, содержащие в одном кристалле сотни и тысячи элементов. В этом случае ПП интегральная схема превращается в большую интегральную систему (БИС).

Плёночные интегральные схемы создаются путём осаждения при низком давлении (порядка 10–5 мм рт. ст.) различных материалов в виде тонких (толщиной $< 1 \text{ мкм}$) или толстых (толщиной $> 1 \text{ мкм}$) плёнок на нагретую до

определённой температуры полированную подложку (обычно из керамики). В качестве материалов применяют алюминий, золото, титан, нихром, окись тантала, моноокись кремния, титанат бария, окись олова и др. Для получения ИС с определёнными функциями создаются тонкоплёночные многослойные структуры осаждением на подложку через различные маски (трафареты) материалов с необходимыми свойствами. В таких структурах один из слоев содержит микрорезисторы, другой — микроконденсаторы, несколько следующих – соединительные проводники тока и другие элементы. Все элементы в слоях имеют между собой связи, характерные для конкретных радиотехнических устройств.

Микросборка – интегральная схема, в состав которой входят однотипные элементы, например, только диоды или только транзисторы.

Плотность монтажа электронных устройств III поколения составляет $\gamma \leq 50 \frac{\text{Эл}}{\text{см}^3}$. С этим этапом развития электронных устройств связано не только резкое уменьшение габаритов, массы и энергопотребления, но и резкое повышение надёжности.

В связи с широким выбором ИС, параметры которых известны из технических условий, изменились задачи, стоящие перед разработчиками электронной аппаратуры. Если раньше значительная часть времени уходила на расчёты режимов отдельных каскадов, определение их параметров, решение вопросов термостабилизации и т.п. то в настоящее время главное внимание уделяется вопросам выбора схем соединений и взаимного согласования микросхем. Типовые микроузлы позволяют собрать нужный электронный блок без детального расчёта отдельных каскадов.

Разработчик электронной аппаратуры, определив, какие преобразования должен претерпеть электрический сигнал, подбирает необходимые интегральные микросхемы, разрабатывает схему их соединений и вводит обратные связи требуемого вида.

Только в том случае, когда выпускаемые интегральные микросхемы не позволяют решить какой-то конкретный вопрос, к ним добавляют отдельные узлы на дискретных компонентах, которые требуют проведения соответствующих расчётов.

IV поколение (с 1980 г. по настоящее время). Характеризуется дальнейшей миниатюризацией электронных устройств на базе применения БИС (большие интегральные схемы) и СБИС (сверхбольшие интегральные схемы), когда уже отдельные функциональные блоки выполняются в одной ИС, представляющей собой готовое электронное устройство приёма, преобразования или передачи информации. Плотность монтажа устройств IV поколения $\gamma > 1000 \frac{\text{Эл}}{\text{см}^3}$.

Одним из перспективных направлений развития электроники на сегодняшний день является пластиковая или органическая электроника, для

создания электронных компонент которой используют полимеры, полностью замещающие кремний, являющийся наиболее используемым полупроводником.

Огромное преимущество пластиковой электроники заключается в том, что она может быть изготовлена прямым образом, используя автоматическое проектирование при очень высокой скорости производства. При этом процессе создаются гибкие поверхности большого размера, производимые при помощи струйной печати и не требующие применения сложной фотолитографии и вакуумных систем, которые необходимы для создания транзисторов на основе кристаллического кремния.

Низкие температуры технологических процессов позволяют использовать дешевые подложки и наносить схемы на самый широкий спектр материалов.

Однако органические материалы по многим параметрам уступают традиционным. Современные техпроцессы позволяют производить из кремния многослойные схемы чрезвычайно высокой концентрации. Высокое число свободных носителей в кремнии и их низкая эффективная масса (по сравнению с доступными полимерами) позволяет компонентам кремниевых микросхем работать на высоких частотах, вплоть до терагерца (в логических схемах). Ещё более высокие частоты достижимы при применении арсенида галлия.

Струйные технологии, применяемые в пластиковой электронике, сейчас предполагают применение полимерных соединений или металлосодержащих проводящих паст, заметно уступающих чистому металлу. Тем не менее, недостатки пластиковых полупроводников для многих применений просто несущественны, в то время как стоимость – решающий параметр. Сегодня из-за очень низких производственных затрат печатная электроника стала повсеместной и находит бесчисленное количество повседневных деловых и потребительских приложений. Многие ранее громоздкие и тяжелые устройства теперь можно складывать, хранить и носить также легко, как листы бумаги.

Речь идет о гибких ТВ-дисплеях, которые можно сворачивать и вешать как плакаты; мобильных телефонах, которые удобно носить; электронных газетах с движущимися картинками; одноразовых нетбуках; «умной» упаковке и этикетках с анимированным текстом; вывесках в торговых точках, которые можно обновлять во всем магазине одним нажатием кнопки. Особенно популярны мультимедийные проигрыватели с увеличивающимся раскладным сенсорным экраном. Даже самые базовые модели в настоящее время имеют размер и вес кредитной карты и легко помещаются в кошелек.

На рынке печатной электроники наблюдается экспоненциальный рост. В настоящее время его мировой объем – более 300 миллиардов долларов. Эта технология быстро развивалась в 2010-е годы благодаря падению расходов и улучшению методов производства. В 2020-х годах с созданием нового поколения ультратонкой электроники произошел её прорыв в мейнстрим.

Лекция 2

Элементная база электронных устройств Пассивные компоненты электронных устройств

Пассивные элементы используются для преобразования электрической энергии в какой-либо другой вид энергии, а также для накопления энергии в электрическом или магнитном полях. Каждый из пассивных элементов связан только с одним видом преобразования или накопления электромагнитной энергии.

Резистор

Резистор (англ. *resistor*, от лат. *resisto* – сопротивляюсь) – пассивный элемент радиоэлектронной аппаратуры, предназначенный для создания в электрической цепи сопротивления требуемой величины, обеспечивающего перераспределение токов и напряжений между участками электрической цепи.

Резисторы – это наиболее распространённые компоненты электронной аппаратуры. В резисторе происходит только необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии в другой вид энергии, например, тепловую.

Условное обозначение резисторов показано на рис. 1.1.

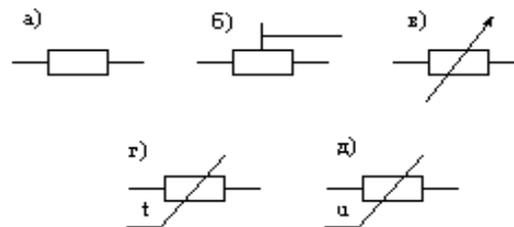


Рис.1.1. Условное обозначение резисторов. а – постоянные, б – подстроечные, в – переменные, г – терморезисторы, д - варисторы

Основу резистора составляет резистивный элемент, выполненный из материалов, обладающих электронным типом проводимости.

Математическая модель резистивного элемента устанавливается законом Ома. Если к резистору приложить напряжение U , то ток I , сопротивление резистора R и выделяемая на нём мощность P определяются следующими соотношениями:

$$I = \frac{U}{R}; \quad R = \frac{U}{I}; \quad U = IR; \quad P = UI$$

Если к резистору приложено напряжение 1 В и через него протекает ток 1 А, то сопротивление резистора равно 1 Ом.

При последовательном и параллельном соединении n резисторов их общие сопротивления соответственно равны:

$$R_{\text{эКВ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$\frac{1}{R_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

При анализе электрических схем сопротивление рассматривается как идеальный резистор, для которого в любой момент времени выполняется закон Ома. На практике же резисторы кроме сопротивления обладают также паразитной ёмкостью, паразитной индуктивностью, нелинейностью вольтамперной характеристики, температурной нестабильностью и т.п.

Поэтому в эквивалентную схему резистора (рис.1.2) входят конденсатор C и индуктивность L . Это обусловлено тем, что любой реальный резистор, даже выполненный в виде прямолинейного бруска, имеет определённую индуктивность. Ёмкость появляется между участками резистора, а также между резистором и близлежащими элементами. Т.е. каждый резистор представляет собой колебательный контур и ведёт себя соответственно. Индуктивность и ёмкость имеют распределённый характер, т.е. не сосредоточены в одной точке, а распределены по всей цепи. Однако для упрощения это обычно не учитывают и используют одну из приведённых эквивалентных схем.

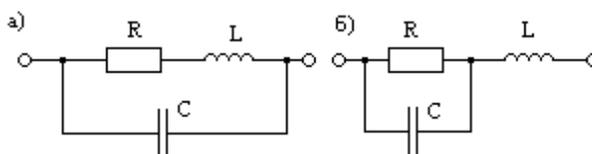


Рис.1.2. Эквивалентные схемы резисторов

Наличие индуктивности и ёмкости приводит как к появлению реактивной составляющей, так и к некоторому изменению эквивалентного значения активной составляющей.

Классификация резисторов

По постоянству значения сопротивления резисторы различают на:

постоянные – с фиксированным сопротивлением;

переменные (потенциометры) – позволяют плавно изменять сопротивление;

Подстроечные рассчитаны на проведение подстройки электрических режимов и имеют небольшую износоустойчивость (0 до 1000 циклов

перемещения подвижной части), а *регулируемые* – для проведения многократных регулировок. Они отличаются большой износоустойчивостью (более 5000 циклов).

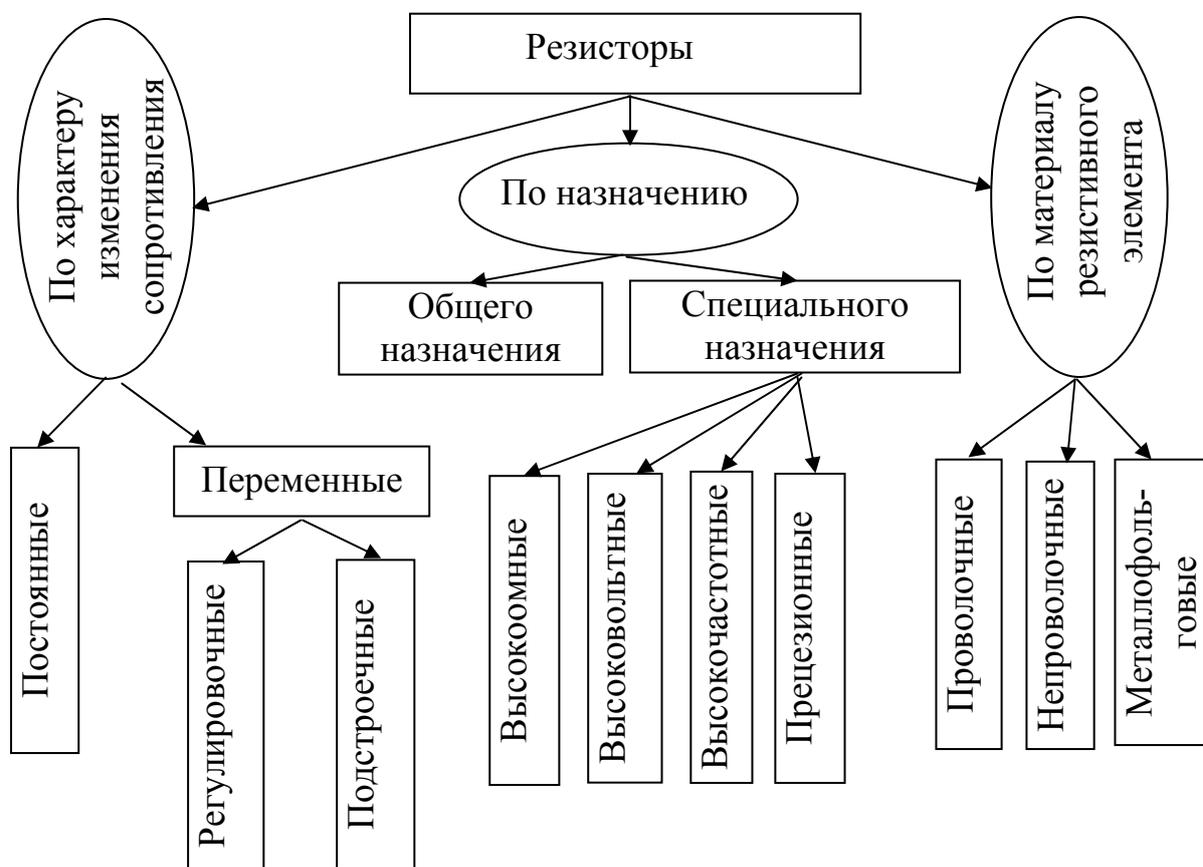


Рис. 1.3. Классификация резисторов
(Справочная книга радиолюбителя, 1990, с. 379)

По назначению:

Общего назначения – диапазоны номиналов 1 Ом – 10 МОм, номинальные мощности рассеивания 0,062 – 100 Вт.

Специального назначения:

а) *высокоомные* – от десятков мегаом до сотен тераом ($1 \text{ Том} = 10^{12}$), рабочее напряжение 100–400 В;

б) *высоковольтные* – сопротивления до 10^{11} Ом, рабочее напряжение – десятки кВ;

в) *высокочастотные* – имеют малые собственные ёмкости и индуктивности и предназначены для работы в высокочастотных цепях и кабелях;

г) *прецизионные* – имеют повышенную точность – допуск $\pm 0,0005 \dots 0,5 \%$, стабильность, номиналы 0,1 Ом – 10 МОм, номинальные мощности рассеивания до 2 Вт. Данные резисторы применяются в основном в измерительных приборах, усилителях, системах автоматики, счетно-решающих устройствах.

Резисторы специального назначения – сопротивление зависит от действия внешних факторов. К специальным резисторам относятся:

варисторы – сопротивление зависит от напряженности электрического поля. Они используются как стабилизаторы и ограничители напряжения.

терморезисторы (термисторы) – сопротивление зависит от температуры; Они выполняются или из металла, сопротивление которого линейно меняется с изменением температуры, или на основе полупроводников.

Терморезисторы используются в схемах для термостабилизации электронных цепей, компенсации температурных погрешностей, в измерителях температуры.

фоторезисторы – сопротивление зависит от освещения резистора;

магниторезисторы – сопротивление зависит от магнитного поля. Их используют в регуляторах громкости высококачественной радиоаппаратуры, в качестве датчиков угла поворота в устройствах автоматики.

позисторы – это терморезисторы с большой величиной положительного температурного коэффициента сопротивления (ПТКС).

Сопротивление позистора, в отличие от обычного терморезистора, определяется не только его температурой, но и величиной приложенного к нему напряжения.

Позисторы применяют в качестве чувствительных элементов датчиков систем регулирования температуры, тепловой защиты обмоток электрических машин от недопустимого перегрева. Позисторы эффективно работают в качестве автостабилизирующихся нагревательных элементов. На их основе изготавливают саморегулирующиеся термостаты и усилительно-преобразующие термостаты.

В зависимости от материала, использованного для создания проводящего элемента, резисторы подразделяют на *проволочные*, *непроволочные* и *металлофольговые* (проводящий элемент выполнен из фольги, нанесённой на непроводящее основание).

В проволочных резисторах из-за проявлений поверхностного эффекта (вытеснения электронов из середины проводника к его поверхности, причём при повышении частоты проявляющееся всё сильнее; плотность тока в сечении проводника неодинакова) сопротивление изменяется при повышении частоты. Это существенно проявляется, начиная с частоты в несколько МГц. В точных устройствах поверхностный эффект следует учитывать с частоты в несколько кГц. Так, сопротивление медного провода диаметром 1 мм при $f=10$ кГц увеличивается на 0,01 %.

Наибольшее применение нашли непроволочные резисторы, у которых проводящими элементами являются соединения углерода, сочетание диэлектрика с металлом, полупроводниковые материалы, графит и т.д.

По способу монтажа резисторы подразделяются на резисторы для навесного и печатного монтажа, для микромодулей и интегральных микросхем.

Основные характеристики резисторов

1. *Номинальное сопротивление* – электрическое сопротивление, значение которого обозначено на резисторе или указано в нормативной документации и является исходным для отсчёта отклонений от этого значения. Номинальные сопротивления резисторов стандартизированы и указываются в нормативной документации – ГОСТах и технических условиях. Например, для постоянных резисторов установлено шесть рядов E6, E12, E24, E48, E96, E192.

E6 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8

E12 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2

Цифра после буквы E указывает количество номинальных значений между минимальным и максимальным значениями. Эти номинальные значения рассчитываются путём умножения или деления чисел ряда на 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число.

2. *Допуск* – допускаемое отклонение действительного значения сопротивления от номинального, выраженное в процентах:

$$\Delta R = \frac{R_{\text{действ}} - R_{\text{ном}}}{R_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

3. *Номинальная мощность рассеивания* $P_{\text{ном}}$ указывает, какую максимальную мощность может рассеивать резистор в виде тепла в течение длительного времени при заданной стабильности сопротивления. Она определяется размерами резистора, конструкцией и свойствами резистивного слоя.

4. Ограничивающими факторами при работе резистора являются *температура окружающей среды* и *предельное рабочее напряжение*. С повышением температуры допустимая рассеиваемая мощность снижается. Рабочее напряжение не должно превышать напряжения, рассчитанного исходя из номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ и номинального сопротивления:

$$U_{\text{раб}} \leq \sqrt{P_{\text{ном}} \cdot R_{\text{ном}}}.$$

Например, для резистора сопротивлением 1кОм и рассеиваемой мощностью 0,125 Вт максимальное напряжение составляет 15 В. Однако при больших номинальных сопротивлениях это напряжение может достигать такой величины, при которой может возникнуть пробой. Поэтому для каждого типа резистора с учетом его конструкции устанавливается предельное рабочее напряжение $U_{\text{пред}}$.

Чтобы любой прибор надёжно работал в отведённый для него гарантийный срок, резисторы не должны работать в предельном режиме. Рассеиваемая резистором мощность не должна превышать $0,8 \cdot P_{\text{макс}}$.

5. Одним из важных параметров терморезисторов и позисторов является *температурный коэффициент сопротивления ТКС*, который указывает изменение сопротивления резистивного элемента при изменении температуры

на один градус:

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_H} \frac{1}{\Delta T},$$

где R_H – сопротивление резистора при нормальной температуре; ΔT – предельная разность между предельной положительной (отрицательной) и нормальной температурами; ΔR – алгебраическая разность между значениями сопротивлений, измеренными при предельной положительной (отрицательной) и нормальной температурами.

Чем меньше ТКС, тем большей температурной стабильностью обладает резистор. Значения ТКС прецизионных резисторов лежат в пределах от единиц до $\pm 100 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$, резисторов общего назначения $\pm 2000 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$.

6. *Уровень собственных шумов резистора* – это отношение электрического напряжения помех резистора, возникающих при прохождении по нему постоянного тока, к приложенному напряжению. Переменные резисторы имеют более высокий уровень шумов за счёт шумов переходного контакта.

На практике эти шумы слышны при прослушивании приёмника, когда в паузе вместо звука слышно шипение. Особенно если приёмник находился в длительной эксплуатации.

Собственные шумы резистора имеют две составляющие: тепловую и токовую. *Тепловые* шумы появляются вследствие тепловых движений электронов внутри твёрдого тела. Напряжение теплового шума определяется по формуле

$$U_T = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – абсолютная температура, К; R – сопротивление, Ом; $\Delta f = f_2 - f_1$ – полоса частот, Гц, в которой измеряется тепловой шум.

Токовые шумы обусловлены временным изменением объёмной концентрации электронов и изменением контактных сопротивлений между зёрнами проводника, имеющего зернистую структуру. Напряжение токового шума определяется через величину номинальной мощности, рассеиваемой резистором:

$$U_{ш} = k \sqrt{P_{ном} R_{ном}},$$

где k – коэффициент, зависящий от конструкции резистора, свойств резистивного слоя, полосы частот.

В электрической цепи, содержащей несколько резисторов, напряжение суммарного шума определяется уравнением:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_{T1}^2 + \dots + U_{Tn}^2 + U_{ш1}^2 + \dots + U_{шn}^2},$$

где n – количество резисторов.

При длительной эксплуатации происходит старение резисторов и их сопротивление меняется. Так, например, у резисторов типа С2-6 сопротивление может измениться до $\pm 20\%$ после 15000 ч работы. У некоторых типов резисторов после их выдержки в течение нескольких часов при повышенной температуре сопротивление не возвращается к начальному значению.

7. *Стабильность сопротивления* резисторов во времени характеризуется коэффициентом старения

$$\beta_R = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt},$$

где t – время; R_0 – сопротивление резистора непосредственно после изготовления. Коэффициент старения резисторов β_R существенно изменяется от партии к партии. Поэтому в технических условиях указывают коэффициент значительно меньший, чем у большей части резисторов.

Стабильность сопротивления резисторов при действии температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления:

$$\alpha_R = \frac{1}{R_{0T}} \frac{dR}{dT},$$

где T – температура; R_{0T} – сопротивление при номинальной температуре.

Огромное разнообразие резисторов подразумевает необходимость их маркировки обозначений.

Разработанные до 1968 года и выпускаемые в настоящее время резисторы обозначаются тремя буквами: первая обозначает материал резистивного элемента (У – углеродистые, К – композиционные, М – металлопленочные, П – проволочные и т.д.); вторая буква обозначает вид защиты (Л – лакированные, Г – герметизированные, Э – эмалированные и т.д.); третья буква – особые свойства или назначение резистора (Т – теплостойкие, П – прецизионные, В – высоковольтные и т.д.). Например, МЛТ – металлопленочные лакированные теплостойкие, КЛВ – композиционные лакированные высоковольтные резисторы. Также на корпусе резисторов указываются номинал и допуск.

Номинальное сопротивление резисторов маркируются цветным либо сокращенным буквенно-цифровым кодом.

Конденсаторы

Конденсатор – это элемент электрической цепи, предназначенный для использования его в качестве емкости, позволяющей накапливать электрический заряд. Ёмкость конденсатора характеризует способность

конденсатора накапливать электрический заряд.

Емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к разности потенциалов, которую заряд сообщает конденсатору

$$C = \frac{q}{U},$$

где C – емкость конденсатора, Ф; q – заряд, Кл; U – разность потенциалов на обкладках конденсатора, В.

Если на конденсаторе заряд равен 1Кл и разность потенциалов между обкладками равна 1В, то конденсатор имеет ёмкость 1Ф.

Конденсаторы, как и резисторы, являются одним из наиболее массовых элементов электронных цепей. Конструктивно конденсатор представляет собой две обкладки, между которыми находится диэлектрик. По форме конденсаторы бывают сферические, плоские и цилиндрические.

Если к конденсатору C приложено напряжение U , то заряд q , ёмкость C , ток I , энергия W_C и мощность P определяются следующими соотношениями:

$$q = CU; \quad C = \frac{q}{U}; \quad I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU}{dt}; \quad P = UI = CU \frac{dU}{dt}; \quad W_C = \int_{-\infty}^t P dt = \frac{CU^2}{2}$$

При последовательном и параллельном соединении n конденсаторов их общие ёмкости определяются выражениями соответственно:

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$$C_0 = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Если конденсатор емкостью C включен в цепь переменного тока с частотой колебаний ω , то его сопротивление X_C определяется выражением:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

Из выражения видно, что сопротивление конденсатора зависит от частоты электрических колебаний, которые приложены к конденсатору. Следовательно, сопротивление цепи, в которой содержится конденсатор, изменяется с изменением частоты электрических колебаний, действующих в цепи. Эти свойства конденсаторов используются для построения частотнозависимых и частотноизбирательных электрических цепей (дифференцирующих, интегрирующих, колебательных, фильтрующих и т.п.).

Электрические характеристики, конструкция и область применения зависят от типа диэлектрика между его обкладками.

По виду диэлектрика конденсаторы постоянной ёмкости можно подразделить на 5 групп:

1) с газообразным диэлектриком (воздушные, газонаполненные, вакуумные);

2) с жидким диэлектриком;

3) с твёрдым неорганическим диэлектриком (керамические, стеклокерамические, стеклоплёночные, тонкослойные из неорганических плёнок, слюдяные);

4) с твёрдым органическим диэлектриком (бумажные, металлобумажные, фторопластовые);

5) с оксидным диэлектриком (оксиднополупроводниковые, оксидно-металлические, электролитические) и др.

Конденсаторы бывают как постоянной, так и переменной емкости. По способу изменения емкости конденсаторы бывают с механически и электрически управляемой емкостью.

Условные обозначения конденсаторов показаны на рис.1.4.

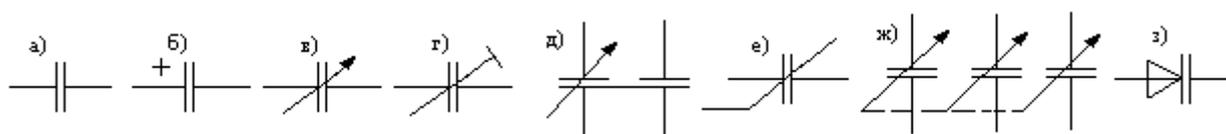


Рис.1.4. Условное обозначение конденсаторов: а – постоянной ёмкости; б – электролитический полярный; в – переменной ёмкости; г – подстроечный; д – вариконд; е – дифференциальный; ж – многосекционный; з – варикап.

В конденсаторах с механически изменяемой ёмкостью одна группа пластин или пластина перемещается относительно других пластин или пластины, составляющих обкладку конденсатора. При этом может меняться или взаимное перекрытие пластин, или расстояние между ними. На практике в основном используют изменение взаимного перекрытия пластин. Чаще всего применяют вращательное движение, и одну обкладку конденсатора выполняют в виде ротора, а другую – в виде статора.

Выпускаются переменные и подстроечные конденсаторы с воздушным, твёрдыми неорганическими (керамическими, слюдяными) и органическими (полистироловыми, полиэтиленовыми и т.д.) диэлектриками. При введении диэлектрика в зазор между подвижной и неподвижной обкладками существенно увеличивается ёмкость и снижаются габаритные размеры конденсаторов. Однако размер воздушного зазора, остающегося между пластинами в этом случае, не остаётся постоянным, и конденсатор не выдаёт стабильных результатов. Поэтому при необходимости хорошей повторяемости значений ёмкости используются воздушные конденсаторы. Конденсаторы с твёрдым диэлектриком чаще всего используются в качестве подстроечных.

К конденсаторам с электрически управляемой ёмкостью относятся вариконды и варикапы.

Вариконд – электрический конденсатор, ёмкость которого нелинейно

изменяется в широких пределах в зависимости от напряжения, приложенного к его обкладкам.

Варикап – полупроводниковый диод, работа которого основана на зависимости барьерной ёмкости $p-n$ перехода от обратного напряжения.

В зависимости от назначения конденсаторы можно условно разделить на конденсаторы общего применения и конденсаторы специального назначения. Конденсаторы общего применения используются в большинстве видов и классов аппаратуры. Традиционно к ним относят низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования. Остальные конденсаторы являются специальными, к ним относятся: высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые, высокочастотные и т.п.

Основные характеристики конденсаторов.

1. У конденсаторов различают *номинальное значение ёмкости* $C_{\text{ном}}$, которое указывается заводом-изготовителем на корпусе конденсатора или в сопроводительной документации. Фактическая ёмкость $C_{\text{ф}}$ определяется при данных температуре и частоте.

2. *Допускаемое отклонение* действительного значения ёмкости от номинального (в %):

$$\Delta C = \frac{C_{\text{д}} - C_{\text{ном}}}{C_{\text{ном}}} 100\%$$

3. *Тангенс угла потерь* $\text{tg} \delta$ характеризует активные потери энергии в конденсаторе.

На практике для характеристики потерь пользуются понятием *добротности* конденсатора $Q_C = \frac{1}{\text{tg} \delta} = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{R_{\text{п}} \omega C}$ или отношением реактивной мощности к активной.

Конденсатор как законченное устройство обладает рядом паразитных параметров. Эквивалентная схема конденсатора показана на рис.1.5, где L – определяется конструкцией, размерами обкладок и ограничивает частотный диапазон применения, $R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции, $R_{\text{п}}$ – сопротивление потерь.

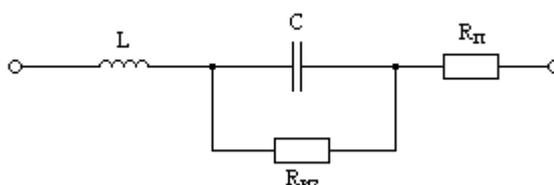


Рис.1.5. Эквивалентная схема конденсатора

4. Сопротивление изоляции и ток утечки. Эти параметры характеризуют

качество диэлектрика и используются при расчётах цепей, содержащих электролитические конденсаторы

5. Температурный коэффициент ёмкости – относительное изменение ёмкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (кельвин). Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ) определяется так:

$$\alpha_C = \text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta T},$$

где T – температура, C – значение ёмкости при номинальной температуре, ΔC – изменение ёмкости, вызванное изменением температуры ΔT .

Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ) – величина, применяемая для характеристики конденсаторов с линейной зависимостью ёмкости от температуры. Для конденсаторов с нелинейной зависимостью ёмкости от температуры обычно приводится относительное изменение ёмкости в рабочем интервале температур.

ТКЕ может быть отрицательным, нулевым и положительным. Для обеспечения нулевого ТКЕ используют последовательное и параллельное соединения нескольких конденсаторов с разным знаком ТКЕ.

6. Стабильность конденсаторов во времени характеризуется коэффициентом старения:

$$\beta_C = \frac{1}{C_0} \frac{dC}{dt},$$

где t – время, C_0 – значение ёмкости непосредственно после изготовления.

7. При воздействии на конденсатор напряжения в нем возникают электрические и акустические шумы. Электрические шумы вызваны частичными разрядами, мерцаниями ёмкости, пьезоэлектрическими эффектами. Акустические – обусловлены вибрацией обкладок под действием кулоновских и электродинамических сил.

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращенным и полным. В соответствии с действующей системой сокращенное условное обозначение состоит из букв и цифр.

Первый элемент – буква или сочетание букв, обозначающих подкласс конденсатора:

К – постоянной ёмкости;

КТ – подстроечные;

КП – переменной ёмкости;

КН – нелинейный;

КС – конденсаторные сборки.

Второй элемент – число, обозначающее группу конденсатора в зависимости от материала диэлектрика (в соответствии с табл.).

Третий элемент – пишется через дефис и обозначает регистрационный номер конкретного типа конденсатора. В состав третьего элемента может входить также буквенное обозначение.

Параметры и характеристики, входящие в полное условное обозначение, указываются в следующей последовательности:

- обозначение конструктивного исполнения;
- номинальное напряжение;
- номинальная емкость;
- допускаемое отклонение емкости (допуск);
- группа и класс по температурной стабильности емкости;
- номинальная реактивная мощность;
- другие, необходимые дополнительные характеристики.

Например:

K10-7B-M47-27пФ±10% ГОСТ 5.621-70. Это конденсатор керамический K10-7B, всеклиматического исполнения «В», группы ТКЕ М47, номинальной емкостью 27 пФ, с допуском ±10%, поставляемый по ГОСТ 5.621-70.

Маркировка на конденсаторах (так же как и условное обозначение) буквенно-цифровая. Она содержит: сокращенное обозначение конденсатора, номинальное напряжение, номинальное значение емкости, допуск, обозначение климатического исполнения и дату изготовления.

В современной схемотехнике конденсаторы находят исключительно широкое и разностороннее применение:

- создание колебательных контуров и их настройка;
- разделение цепей переменного и постоянного токов;
- получение делителей напряжения в цепях переменного тока;
- создание фильтров разного назначения;
- получение импульсов большей мощности;
- искрогашение в контактах реле и переключателей;
- накопление энергии для автономного питания;
- запуск электродвигателей переменного тока от однофазной цепи.

Катушки индуктивности

Катушка индуктивности – представляет собой винтовую, спиральную или винтоспиральную катушку из одножильного или многожильного изолированного провода, намотанного на цилиндрический, тороидальный или прямоугольный каркас из диэлектрика или плоскую спираль, волну или полосу печатного или другого проводника.

Принцип действия катушек индуктивности использует эффект взаимодействия переменного тока с магнитным полем, наводимым этим током.

При всяком изменении тока в проводнике электрической цепи, в том числе при включении и выключении цепи, магнитное поле, окружающее проводник, изменяется. При пересечении проводника своим собственным

магнитным полем в нём возникает ЭДС, называемая ЭДС самоиндукции e_L . По закону Ленца при увеличении тока в цепи ЭДС самоиндукции e_L будет направлена против ЭДС источника напряжения и будет способствовать уменьшению тока. При уменьшении тока в цепи ЭДС самоиндукции e_L действует в направлении тока, противодействуя его убыванию. Препятствуя изменению тока, ЭДС самоиндукции e_L оказывает ему сопротивление, которое называется индуктивным и обозначается X_L .

Индуктивность L (или коэффициент самоиндукции) – коэффициент пропорциональности между электрическим током, текущим в каком-либо замкнутом контуре, и магнитным потоком, создаваемым этим током.

Если через катушку протекает ток в 1А и создает магнитный поток в 1 Вб, то индуктивность катушки равна 1Гн.

Катушка индуктивности может быть представлена схемой замещения (рис.1.6), где L – индуктивность катушки и выводов; C_L – ёмкость обмоток, выводов, сердечника, экрана; R_{C_L} – сопротивление потерь в ёмкости; R_L – сопротивление потерь в катушке.

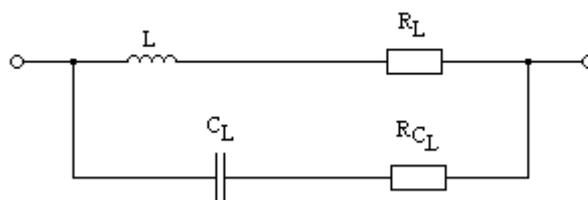


Рис.1.6. Эквивалентная схема катушки индуктивности

Если к L приложено напряжение U , то потокосцепление Ψ , индуктивность L , ток I , мощность P и энергия W_L определяются следующими соотношениями:

$$\Psi = LI; \quad L = \frac{\Psi}{I}; \quad U = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{dI}{dt}; \quad P = UI = LI \frac{dI}{dt}; \quad W_L = \int_{-\infty}^t P dt = \frac{LI^2}{2}$$

При последовательном и параллельном соединении n катушек их общая индуктивность определяется следующими выражениями соответственно:

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

Если катушка, обладающая индуктивностью L , включена в цепь переменного тока с частотой колебаний ω , то ее сопротивление X_L определяется выражением:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Так как сопротивление X_L зависит от частоты ω , то сопротивление цепи, в которой включена катушка индуктивности, также будет зависеть от частоты электрических колебаний, действующих в цепи. Эти свойства катушек индуктивности, как и подобные свойства конденсаторов, используются для создания дифференцирующих, интегрирующих, колебательных и фильтрующих цепей.

Катушки индуктивности, за исключением дросселей, не являются комплектующими изделиями, поэтому в зависимости от конкретной задачи рассчитываются и изготавливаются индивидуально.

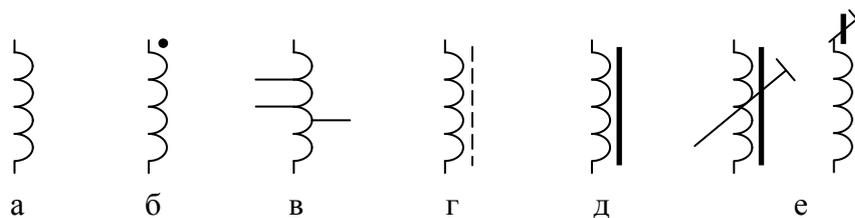


Рис.1.7. Условное обозначение катушек индуктивности: а – катушка индуктивности без сердечника; б – дроссель; в – с отводами; г – с магнитоэлектрическим сердечником; д – с ферритовым сердечником; е – с ферромагнитным подстроечным сердечником

Основные характеристики катушек индуктивности.

1. Номинальная индуктивность.
2. Допускаемое отклонение индуктивности (разность между предельным и номинальным значениями индуктивности).
3. Важнейшим параметром катушки индуктивности является *добротность* катушки, определяющая качество катушки, используемой в колебательном контуре, и характеризующая относительные потери мощности в ней.

Добротность определяется отношением реактивного сопротивления к активному:

$$Q = \omega L / R_{\text{п}} ,$$

где $R_{\text{пот}}$ – сопротивление потерь, которые складываются из потерь в проводах, диэлектрике, сердечнике.

Для снижения активного сопротивления провода обмотки катушки наматывают достаточно толстым проводом, применяя специальный многожильный провод, а для работы на высоких частотах покрывают его серебром. Повышение добротности также достигается увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями, универсальной намоткой (когда витки

укладываются не параллельно, а под некоторым углом друг к другу). Магнитопроводы и сердечники выбирают с малыми потерями на гистерезис и вихревые токи.

4. *Температурный коэффициент индуктивности* TKL – отношение относительного изменения индуктивности $\frac{\Delta L}{L}$ к интервалу температур ΔT , вызвавшему это изменение:

$$\alpha_L = TKL = \frac{\Delta L}{L} \frac{1}{\Delta T} \quad (1.12)$$

5. Изменение индуктивности во времени (старение) характеризуется *коэффициентом старения*:

$$\beta_L = \frac{\Delta L}{L} \frac{1}{\Delta t} \quad (1.13)$$

6. Рабочий диапазон температур.

7. Собственная ёмкость катушки индуктивности, составляющая с её индуктивностью резонансный контур.

Разновидности катушек индуктивности

Контурные катушки индуктивности, используемые в радиотехнике используются совместно с конденсаторами для организации резонансных контуров. Они должны иметь высокую термо- и долговременную стабильность, и добротность, требования к паразитной ёмкости обычно несущественны.

Катушки связи, или трансформаторы связи. Взаимодействующие магнитными полями пара и более катушек обычно включаются параллельно конденсаторам для организации колебательных контуров. Такие катушки применяются для обеспечения трансформаторной связи между отдельными цепями и каскадами, что позволяет разделить по постоянному току, например, цепь базы последующего усилительного каскада от коллектора предыдущего каскада и т. д.

Вариометры – это катушки, индуктивностью которых можно управлять (например, для перестройки частоты резонанса колебательных контуров) изменением взаимного расположения двух катушек, соединённых последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая обычно располагается внутри первой и вращается (ротор). Существуют и другие конструкции вариометров. При изменении положения ротора относительно статора изменяется степень взаимоиндукции, а следовательно, индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4 – 5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника относительно обмотки, либо изменением длины воздушного зазора замкнутого магнитопровода.

Дроссели – это катушки индуктивности, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Дроссели включаются последовательно с нагрузкой для ограничения

переменного тока в цепи, они часто применяются в цепях питания радиотехнических устройств в качестве фильтрующего элемента, сглаживающего пульсации. Их применяют тогда, когда источник питания должен отдавать большой ток (амперы-сотни ампер).

Для сетей питания с частотами 50–60 Гц выполняются на сердечниках из трансформаторной стали.

Дроссели ВЧ используют в высокочастотных электронных цепях, где пропускают токи только относительно низких частот. Они представляют собой катушки индуктивности, намотанные внавал или с определённым шагом на диэлектрический каркас.