



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Кафедра электроники и микроэлектроники

В.В. Леванов

ПАССИВНЫЕ RLC КОМПОНЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Учебное пособие

Магнитогорск
ФГБОУ ВПО «МГТУ»
2011

Рецензенты

Главный инженер НПО «Автоматика»

А.Р. Максинаев

Кандидат технических наук, доцент
кафедры электроснабжения промышленных предприятий
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

Н.Т. Патшин

Леванов В.В.

Пассивные RLC компоненты и функциональные устройства на их основе [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Вадим Васильевич Леванов; ФГБОУ ВПО «МГТУ». – Электрон. текстовые дан. (0,79 Мб). – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: IBM PC, любой, более 1 GHz; 512 Мб RAM; 10 Мб HDD; MS Windows XP и выше; Adobe Reader 7.0 и выше; CD/DVD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с контейнера.

Приведены основные характеристики и параметры резистивных, емкостных и индуктивных компонентов электронных устройств. Рассмотрены различные функциональные устройства на их основе. Приведены методики идентификации и тестирования пассивных компонентов.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140200 - «Электроэнергетика» специальности 140211 - «Электроснабжение», а также может быть полезно для студентов направления 210100 - «Электроника и микроэлектроника».

УДК 621.38

© Леванов В.В., 2011.

© ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2011.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
1.Параметры и характеристики пассивных компонентов	6
1.1.Резисторы	6
1.2. Конденсаторы	11
1.3.Индуктивные компоненты	21
2.Функциональные устройства на пассивных компонентах	28
2.1. Ограничители тока, шунты и резистивные делители напряжения	28
2.2. Сглаживающие фильтры и разделительные цепи	30
2.3. Частотные селекторы	34
2.4. Фазосдвигающие устройства	42
3.Идентификация и проверка исправности компонентов	46
Вопросы для самоконтроля	50
Библиографический список	51

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие предназначено для студентов направления «Электроснабжение» и «Электроэнергетика» при изучении дисциплины «Информационно-измерительная техника и электроника». Оно также может быть полезно студентам направления «Электроника» при изучении дисциплины «Материалы и элементы электронной техники».

В пособии рассматриваются пассивные линейные компоненты как наиболее часто используемые в электронных устройствах – резистивные, емкостные, индуктивные компоненты. Приводятся наиболее важные, с практической точки зрения, их параметры, а для ознакомления с полным списком параметров и их конкретными величинами даны ссылки на соответствующие справочники. Рассмотрены также вопросы практического использования пассивных компонентов в различных функциональных устройствах на их основе.

Материал, приведенный в данной работе, опирается на предшествующие дисциплины – «Общая физика» и «Электротехника», и не требует для усвоения дополнительных источников.

ВВЕДЕНИЕ

Электронные устройства, входящие в состав любого средства измерения, например, цифрового мультиметра, представляют собой совокупность *активных и пассивных компонентов*, соединённых между собой в соответствии с *принципиальной схемой*. Именно принципиальная схема, индивидуальная для каждого устройства, определяет его функцию. Например, каждое электронное средство измерения имеет устройство отображения измерительной информации, состоящее, в свою очередь, из индикатора (дисплея), преобразующего электрические сигналы в видимое изображение, и устройства управления им. Схема устройства отображения информации, выводящая, к примеру, результат измерений в виде четырёхразрядного числа, более простая, чем у устройства, позволяющего выводить на экран индикатора график зависимости измеряемой величины от времени. Многие электронные средства измерений имеют также источник питания, преобразующий переменное напряжение электрической сети 220В в ряд постоянных напряжений, необходимых для работы электронных устройств, входящих в состав средства измерения и т.д.

К числу активных компонентов можно отнести такие компоненты устройства, которые, будучи включенными в какую-либо его электрическую цепь, способны преобразовывать электрические токи и напряжения, действующие в данной цепи. В частности, увеличивать (усиливать) их, менять закон изменения их во времени под воздействием внешних сигналов либо в силу присущих им внутренних свойств. Активными компонентами являются диоды, транзисторы, тиристоры и др. Это полупроводниковые приборы в том смысле, что каждый из них имеет в составе своей конструкции кристалл полупроводника с более или менее сложной структурой. Интегральные микросхемы также являются активными компонентами, поскольку созданы на базе вышеупомянутых приборов.

К числу пассивных относят компоненты, не обладающие указанными свойствами, такие как резисторы, конденсаторы и компоненты, обладающие индуктивностью. Они являются линейными компонентами в том смысле, что в установившемся режиме закон изменения во времени токов, протекающих по ним (без учета сдвига фазы), совпадает с законом изменения во времени напряжений, приложенных к их выводам.

В пособии рассмотрены основные определяющие параметры и характеристики пассивных компонентов. Дополнительную информацию можно найти в [1 – 4]. Информация о нелинейных компонентах, например, варисторах (нелинейных резисторах), варикондах (нелинейных конденсаторах) и др. приведена в [6].

1. Параметры и характеристики пассивных компонентов

1.1. Резисторы

Слово *резистор* можно перевести как *оказывающий сопротивление*, имеется в виду – сопротивление электрическому току. Действительно, при включении резистора в электрическую цепь, её ток в той или иной степени уменьшается. Основным параметром резистора является его сопротивление, измеряемое в омах, а также в кратных – килоомы ($1\text{кОм}=10^3\text{ Ом}$), мегаомы ($1\text{МОм}=10^6\text{ Ом}$) и дольных – миллиомы ($1\text{мОм}=10^{-3}\text{ Ом}$) единицах. Протекающий по резистору ток I и напряжение на его выводах U_R (обычно говорят – *падение напряжения*) связаны законом Ома:

$$U_R = IR. \quad (1)$$

Сопротивление резистора, если позволяют его размеры, может быть указано на его корпусе. Например, обозначение вида 2Е,2К2,2М1,М20 соответствуют следующим (их называют *номинальными*) значениям сопротивлений: 2Ом, 2,2 кОм, 2,1 МОм, 0,2 Мом. Существует также система цветной маркировки резисторов в виде точек или полосок на корпусе. Номинальные значения сопротивлений резисторов устанавливаются в соответствии с так называемым *рядом номинальных значений сопротивлений*. Существует шесть таких рядов. Информация о них, а также о системах цветной маркировки приведена в [1],[2],[4].

Фактическое значение сопротивления резистора может отличаться от номинального значения на некоторую величину, выраженную в процентах от номинального значения. Стандартные величины максимального значения этого отклонения (классы точности) – 0,1; 0,5;1;5;10;20%. Величина отклонения является вторым важным параметром резистора. Если, к примеру, номинальное значение сопротивления резистора составляет 2,2кОм, а его класс точности – 10%, то фактическое значение сопротивления находится в диапазоне $2,2\pm0,22\text{кОм}$.

В случае отсутствия резистора с необходимым значением сопротивления, его можно получить, соединяя резисторы последовательно или параллельно. В первом случае их сопротивления складываются, во втором – складываются их проводимости. Общее сопротивление двух последовательно соединенных резисторов $R1, R2$:

$$R_{\text{пол}} = R_1 + R_2 \quad (2)$$

При параллельном соединении двух резисторов их общая проводимость $G_{\text{пар}}$:

$$G_{\text{пар}} = 1/R_{\text{пар}} = G_1 + G_2 = 1/R_1 + 1/R_2 = (R_1 + R_2)/R_1 R_2 \quad (3)$$

Таким образом, общее сопротивление двух параллельно соединенных резисторов:

$$R_{\text{пар}} = 1/G_{\text{пар}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \quad (4)$$

будет меньше наименьшего значения сопротивления. Выражение (4) полезно запомнить, так как случаи параллельного соединения более чем двух резисторов редки.

Ещё одним важным параметром резисторов является *допустимая (номинальная) мощность рассеяния* $P_{\text{доп}}$ (P_n). Дело в том, что при прохождении тока через резистор, последний греется. Количество генерируемого резистором тепла пропорционально мощности P , расходуемой на прохождение тока через резистор:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (5)$$

где I – ток, протекающий по резистору; U – падение напряжения на нем. Выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду. Поскольку количество рассеиваемой тепловой энергии пропорционально, при прочих равных условиях, температуре резистора, то, при определенном её значении, выделяемая и рассеиваемая тепловые энергии становятся равными, и наступает состояние равновесия. Однако, если эта температура превысит некоторую критическую величину, то может произойти разрушение токопроводящего материала (резиста). Для предупреждения отказа резистора необходимо, чтобы рассеиваемая резистором мощность не превысила предельно допустимое значение $P_{\text{доп}}$, т.е. $P \leq P_{\text{доп}}$.

Если по резистору протекает периодически изменяющийся ток одного направления (пульсирующий), то для определения рассеиваемой мощности необходимо найти среднее за период значение тока или напряжения. В случае переменного тока (изменяющегося как по величине, так и по направлению) необходимо найти среднеквадратическое (действующее) его значение, после чего использовать (5). Зная сопротивление резистора и его мощность рассеяния, найденные расчетным путем, из справочника [1],[2] выбирают его тип и номинальное значение с учетом требуемого класса точности.

Все резисторы, в зависимости от используемого высокоомного токопроводящего материала, подразделяются на проволочные и непроволочные. Первые изготавливаются из проволоки с высоким удельным сопротивлением, их допустимая мощность рассеяния составляет 5-25Вт. Максимальное сопротивление проволочных резисторов порядка единиц килоом, минимальное - не ограничено. Непроволочные резисторы, используемые в электронных измерительных устройствах, в подавляющем большинстве случаев изготавливают из высокоомного композитного ма-

териала (резиста), являющегося полупроводником, на мощность рассеяния не более двух ватт и сопротивлением от долей ома до единиц гигаом. Примеры условных обозначений резисторов с различной мощностью рассеяния приведены на рис. 1.

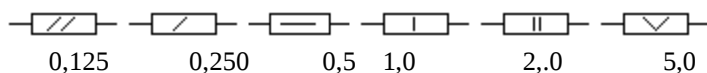


Рис. 1. Условные обозначения постоянных резисторов с различной мощностью рассеяния, Вт

Все изложенное выше относится к *постоянным* резисторам, т.е. к резисторам с постоянным сопротивлением. Их конструкции разнообразны. Постоянные резисторы, предназначенные для установки в заранее подготовленные отверстия в печатной плате, имеют цилиндрический корпус, диаметр которого тем меньше, чем меньше допустимая мощность рассеяния и два гибких или мягких вывода. При прохождении по резистору переменного или пульсирующего токов металлические части его конструкции (особенно выводы) вносят дополнительное паразитное реактивное сопротивление, поскольку, как известно, любой проводник обладает емкостью и индуктивностью. На низких частотах этим сопротивлением можно пренебречь, но на частотах порядка ста мегагерц и более его влияние существенно. Данный эффект проявляет себя в меньшей степени у компонентов, изготовленных по современной технологии SMC (SMD) - Surface Mounted Components (Devices) - компоненты (приборы), монтируемые на поверхности. Эти компоненты изготавливаются в миниатюрном исполнении. У них вместо выводов имеются контактные площадки, которыми они посредством пайки соединяются с другими компонентами устройства в соответствии с принципиальной схемой. Выпускаются такие компоненты разных типоразмеров. Например, резисторы типоразмера 1206 имеют длину корпуса 0,12 дюйма, ширину 0,06 дюйма, т.е. 3×1,5мм при толщине корпуса 1мм. Применение компонентов технологии SMD позволяет упростить их монтаж, т.к. исключает необходимость сверления в печатной плате большого количества отверстий под выводы компонентов, изготовленных по старой технологии, а также существенно уменьшает размеры электронных устройств. Мощность рассеяния резисторов данного типоразмера составляет до 0,25Вт, отклонение фактического сопротивления от номинального значения - от одного до пяти процентов. Величина номинального значения сопротивления резистора указывается трехразрядным числом, младший разряд которого является показателем степени, в которую необходимо возвести число десять, и полученный результат умножается на число в оставшихся разрядах. Результат получается в омах. Например, на корпусе нанесено чис-

ло 120, следовательно, сопротивление резистора $12 \cdot 10^0 = 12 \text{ Ом}$, или 744, что означает $74 \cdot 10^4 = 740 \text{ кОм}$. Однако, надо иметь в виду, что ряд фирм-производителей вместо цифр используют различные символы, например, вместо «8» наносят на поверхность корпуса «:».

Промышленность выпускает и так называемые *наборы резисторов*, представляющие собой единую конструкцию с общим корпусом и рядом выводов, объединяющую несколько либо автономных, либо соединенных определенным образом резисторов.

Помимо постоянных резисторов находят применение *переменные* и *подстраиваемые (подстроечные)* резисторы. Они также могут быть как проволочными, так и непроволочными. Общим для них является наличие подвижного (скользящего) контакта (движка), перемещаемого по токопроводящему материалу. Это перемещение может быть как круговым (что чаще всего имеет место), так и линейным. В первом случае резист наносят на диэлектрическое основание в виде кольца, во втором – в виде полоски. Подстроечные резисторы могут иметь два или три внешних вывода. В последнем случае движок соединяется с одним из выводов резистивного элемента внутри корпуса резистора. Примером проволочного переменного резистора является реостат. Условные обозначения переменных и подстраиваемых резисторов приведены на рис. 2.

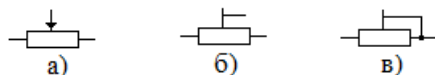


Рис. 2. Условные обозначения переменных (а) и подстраиваемых (б,в) резисторов

Переменные резисторы (их ещё называют *потенциометрами*) предназначены для многократного регулирования параметров какого-либо устройства, например осциллографа, в процессе его эксплуатации. С этой целью ось движка потенциометра выводят на переднюю панель устройства. Максимальный угол поворота оси обычно не превышает 270

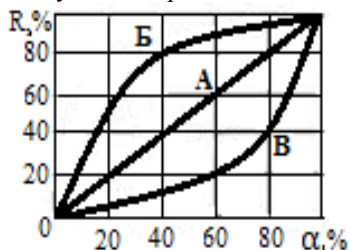


Рис.3. Функции $R(\alpha)$ переменных резисторов

Зависимость сопротивления между одним из выводов и движком и углом его поворота α может быть как линейной, так и нелинейной, что

находит своё отражение в маркировке резистора: А – линейная, Б – логарифмическая, В – обратнологарифмическая (рис.3).

Подстроечные резисторы применяют либо для точной установки требуемого значения сопротивления, после чего положение его движка фиксируют, либо для подстройки параметров устройства, которые в процессе эксплуатации отклонились от требуемого постоянного значения. Существуют так называемые *многооборотные* подстроечные резисторы, у которых вращающий момент движку передаётся через понижающий редуктор, что позволяет очень точно установить требуемое сопротивление.



Рис.4. Внешний вид переменных и постоянных резисторов

На рис.4 приведен внешний вид резисторов: переменного (1), подстраиваемого (2); постоянных резисторов непроволочных: технологии SMD на номинальную мощность 68мВт (3), технологии МЛТ на 125мВт (4), 0,5Вт (5), 2,0Вт (6) и проволочный резистор 15Вт (7).

Сопротивление резисторов зависит от температуры окружающей среды. Параметром, характеризующем эту зависимость, является *температурный коэффициент сопротивления* (ТКС). Его находят как относительное изменение сопротивления на один градус Цельсия или Кельвина.

$$\text{ТКС} = (R_2 - R_1) / [R_1(t_2 - t_1)],$$

где R_1 –сопротивление резистора при температуре t_1 (обычно комнатной, т.е. 25°C), R_2 –сопротивление резистора при температуре t_2 (обычно принимается равной верхнему или нижнему пределу рабочего диапазона температур). Чем меньше ТКС, тем большей температурной стабильностью обладает резистор. Лучшие резисторы широкого приме-

нения имеют ТКС до $\pm 2 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, прецизионные (особо точные) – $\pm 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$.

При прохождении электрического тока по резистору всегда имеют место его (тока) *флуктуации*, т.е. отклонения от среднего значения, имеющие случайный, беспорядочный характер. Это связано с дискретностью тока, поскольку им является направленное движение электронов, и каждый из них создаёт свой электрический микроимпульс. Поскольку свободных электронов огромное количество, то в соответствии с теорией статистики в каждый миг времени по резистору будет проходить различное количество электронов, что приведет к появлению вышеуказанных флуктуаций. Их интенсивность растёт с ростом температуры, что связано с увеличением скорости собственного, теплового движения электронов, мешающего перемещению их под действием электрического поля, т.е. их *дрейфу*. Эти случайные изменения тока резисторов называют *шумом*. Шум – это паразитный сигнал, избавиться от которого невозможно. Его оценкой является *э.д.с. шумов*, измеряемая в микровольтах на один вольт приложенного к резистору напряжения и составляет для непроволочных резисторов величину от долей единиц до десятков микровольт на вольт. При перемещении подвижного контакта переменного резистора дополнительно возникают *шумы скольжения (вращения)*, которые тем больше, чем более неровной является поверхность резистивного элемента. Шумы скольжения имеют величину порядка десятка милливольт.

1.2. Конденсаторы

Конструктивно конденсатор представляют собой устройство, состоящее из двух металлических *обкладок* с внешними выводами или контактными площадками, и вещества-диэлектрика, расположенного между обкладками. В качестве диэлектрика используют органические и неорганические материалы: полистирол, фторопласт, полиэтилентерефталат, бумагу, слюду, керамику и др. Наиболее важными параметрами конденсатора являются: *ёмкость, рабочее напряжение, температурный коэффициент ёмкости, тангенс угла потерь, сопротивление изоляции, ток утечки, рабочий диапазон температур ΔT* .

Конденсаторы по своим свойствам существенно отличаются от резисторов, в частности, они способны накапливать электрический заряд Q . Наиболее важным, в этом смысле, параметром конденсатора является его *ёмкость*, измеряемая в фарадах, [Ф] или [F]. Используют либо основные, либо дольные единицы ёмкости – фарады, микрофарады (10^{-6}Ф , обозначаемые как мкФ или μF), нанофарады (10^{-9}Ф – нФ или nF), пикофарады (10^{-12}Ф – пФ или pF). На корпусе конденсатора или в технической документации указывается его *номинальная ёмкость*, которая может отли-

чатся от фактической на величину допускаемого отклонения. Номинальные значения ёмкости стандартизованы и выбираются из некоторого количества рядов номинальных значений, приведенных в справочной литературе [2], [3]. Система кодированного обозначения номинальных ёмкостей конденсаторов с внешними выводами такая же, как и у соответствующих резисторов, например 2П2 (2p2) – это 2,2пФ, 1Н5 (1n5) – 1,5нФ=1500пФ, М1 (μ1) – 0,1мкФ=100нФ, 10М (10μ) – 10мкФ, 1Ф0 (1F0) – 1Ф=1000мкФ. Число 107 на корпусе конденсатора, изготовленного по технологии SMD, указывает на его ёмкость – 100мкФ, хотя у других фирм-изготовителей могут быть иные кодировки ёмкости, в частности, цветовая кодировка [3,4].

В электронных промышленных и информационно-измерительных приборах используют в основном конденсаторы с постоянной ёмкостью. Существуют также конденсаторы переменной ёмкости и подстроечные конденсаторы. Конденсаторы с постоянной ёмкостью, в свою очередь, подразделяется на полярные и неполярные. Полярные конденсаторы включают в цепь в соответствии с указанной на их корпусе полярностью. Ошибочное включение влечет за собой отказ конденсатора. Если по условиям эксплуатации полярность приложенного к конденсатору напряжения может эпизодически меняться, но необходимо всё-таки использовать полярные конденсаторы, то применяют два конденсатора, включенные последовательно-встречно. Их общую ёмкость находят по выражению (11). Полярные конденсаторы имеют самую высокую ёмкость – вплоть до одной фарады (ёмкость порядка ёмкости земного шара). Для получения столь высокой ёмкости нужна большая площадь обкладок конденсатора. В их качестве используют фольговые ленты с нанесённым на них слоем диэлектрика–оксида (например, оксида алюминия), свернутые в рулон. Такие конденсаторы часто называют оксидными. Сходную конструкцию имеют и неполярные «бумажные» конденсаторы, у которых вместо оксидной плёнки между фольговыми лентами закладывается бумага.

Вполне очевидно, что при такой конструкции конденсатор должен обладать заметной индуктивностью. Для её нейтрализации параллельно оксидным конденсаторам большой ёмкости иногда включают неполярные конденсаторы ёмкостью порядка нанофарады.

Полярные конденсаторы используют в цепях постоянного и пульсирующего (т.е. периодически изменяющегося по величине, но имеющего одно направление) токов. Неполярные конденсаторы – в любых цепях.

Подстроечные конденсаторы находят ограниченное применение, например, их используют для подгонки фактической входной ёмкости электронных осциллографов под номинальное значение. Максимальная ёмкость подстроечных конденсаторов - 30-40пФ. Конденсаторы пере-

менной ёмкости в промышленных и информационно-измерительных электронных устройствах не применяются.

Следующим важным параметром конденсатора является его *номинальное (рабочее) напряжение* U_n (U_p). Оно указывается для случая эксплуатации конденсатора в цепях постоянного тока. Если на выводах неполярного конденсатора действует переменное напряжение, то его амплитуда должна быть примерно в два раза меньше номинального напряжения. Превышение номинального напряжения сокращает срок службы конденсатора и даже может вызвать его пробой и выход из строя. Величина номинального напряжения в некоторой степени зависит от температуры и при её росте снижается.

Изменение температуры вызывает также изменение размеров обкладок конденсатора, расстояния между ними и значения диэлектрической проницаемости вещества между обкладками. Как следствие изменяется и ёмкость конденсатора. Зависимость ёмкости конденсатора от температуры, как правило, нелинейная и оценивается таким параметром как *температурный коэффициент ёмкости* (ТКЕ).

$$\text{ТКЕ} = (C_2 - C_1) / [C_1(t_2 - t_1)],$$

где C_1 – ёмкость конденсатора при температуре t_1 (обычно комнатной, т.е. 25°C), C_2 – ёмкость конденсатора при температуре t_2 (обычно принимается равной верхнему или нижнему пределу рабочего диапазона температур). Температурный коэффициент может быть положительным, отрицательным, а также близким к нулю. ТКЕ входит в состав маркировки конденсатора в виде буквы (М – минус, П – плюс МП – близко к нулю) и числа – величины ТКЕ. Также применяется кодировка в виде точки, цвет которой указывает на значение ТКЕ [2], [4].

У идеального конденсатора, включенного в цепь переменного тока, отсутствуют потери активной энергии, поскольку угол сдвига фаз ϕ между приложенным к конденсатору напряжением и протекающим по нему током равен 90° (см.(8)). У реального конденсатора такие потери имеют место, поэтому угол сдвига фаз уменьшается на величину δ от noticeably 90°. В связи с этим потери энергии в конденсаторе принято оценивать *тангенсом угла потерь* – $\text{tg}\delta$, также являющимся параметром конденсатора. Величину, обратную тангенсу угла потерь, называют *добротностью* конденсатора. Наличие потерь приводит к нагреву конденсатора при прохождении по нему переменного тока. У слюдяных, полистирольных, фторопластовых конденсаторов значение тангенса угла потерь лежит в пределах $(10-15) \cdot 10^{-4}$, полиэтилентерефталатных – $(1,0-1,2) \cdot 10^{-2}$, оксидных $-(5-35) \cdot 10^{-2}$.

Однажды заряженный и затем отключенный от источника конденсатор рано или поздно обязательно разрядится. У одних конденсаторов

это произойдёт через несколько дней, у других - через несколько лет. Время разряда определяется такими параметрами конденсатора как *сопротивление изоляции*, или *ток утечки*, которые у идеального конденсатора равны бесконечности и нулю соответственно. Сопротивление изоляции как параметр реального конденсатора учитывают у конденсаторов сравнительно небольшой ёмкости – до десятков микрофарад, его измеряют между выводами конденсатора. Например, у керамических (имеется в виду материал диэлектрика) конденсаторов сопротивление изоляции составляет до десяти гигаом, у полистирольных – до ста гигаом. Ток утечки как параметр, характеризующий изоляцию, используют для конденсаторов большой ёмкости - вплоть до одной фарады. Например, у оксидных конденсаторов ток утечки может составлять величину порядка от нескольких микроампер до нескольких миллиампер.

С учетом вышесказанного схема замещения конденсатора имеет вид, представленный на рис.5.

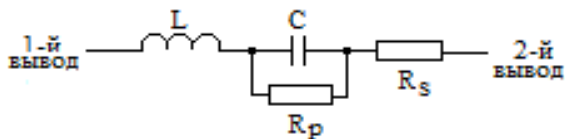


Рис.5.Схема замещения конденсатора

Резистор R_p , включенный параллельно собственно конденсатору C , учитывает сопротивление изоляции между обкладками конденсатора. Его сопротивление определяется материалом изолятора (диэлектрика) и достаточно велико, поэтому в расчетах иногда им можно пренебречь. Величина этого сопротивления определяет ток утечки конденсатора, благодаря которому однажды заряженный и затем отключенный от источника конденсатор рано или поздно разрядится. Резистор R_s учитывает все остальные потери в конденсаторе: сопротивление выводов, переходное сопротивление вывод – обкладка, эквивалентное сопротивление, связанное с частотно-зависимыми потерями в диэлектрике. Раздельно измерить их невозможно, поэтому их учитывают введением резистора R_s , который называют *эквивалентным последовательным сопротивлением* - ЭПС, англоязычная аббревиатура ESR - Equivalent Series Resistance. ЭПС является важным параметром, особенно для оксидных конденсаторов. По разным причинам оно может увеличиваться, приводя к нарушениям в работе того электронного устройства, в котором этот конденсатор используется.

На рис.6 приведены условные обозначения конденсаторов: постоянных полярных (а), постоянных неполярных (б), подстроечных (в), переменных (г).

Один из вариантов конструкции подстроечного конденсатора приведен на рис.7. Статор 3 и ротор 2 конденсатора выполнены из керамики. На верхней половине круга ротора и половине круга статора нанесены проводящие покрытия, являющиеся обкладками конденсатора. Обкладка статора соединена с верхним выводом 4. С помощью диэлектрической отвёртки, вставляемой в шлиц металлического винта 1, соединённого с обкладкой ротора и нижним

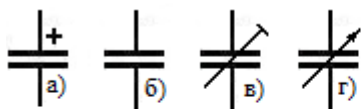


Рис.6. Условные обозначения конденсаторов

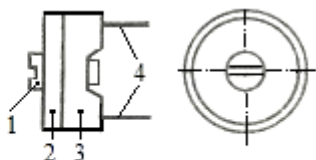


Рис.7. Конструкция подстроечного конденсатора

выводом 4, вращают ротор. При этом площадь перекрытия обкладок и, следовательно, ёмкость конденсатора изменяются.

На рис.8 представлены изображения конденсаторов постоянной ёмкости различных типов: SMD-конденсатор ёмкостью 0,01мкФ на рабочее напряжение 16В (1), трубчатый керамический конденсатор с отрицательным ТКЕ и ёмкостью 33пФ (2), два керамических конденсатора с положительным ТКЕ и ёмкостью 47нФ (3) и 15нФ (4), бумажный конденсатор ёмкостью 0,5мкФ на рабочее напряжение 160В (5), оксидный конденсатор ёмкостью 470мкФ на рабочее напряжение 25В (6).



Рис.8. Внешний вид конденсаторов постоянной ёмкости

Чем больше ёмкость конденсатора, тем больший заряд он может накопить. Как следствие, на выводах конденсатора появляется разность потенциалов U_c , величина которой зависит от величины заряда и емкости конденсатора:

$$V_c = \frac{q}{c} \quad (6)$$

где U_c – напряжение на выводах конденсатора, В; Q – количество электричества, [Кл]; C – ёмкость, [Ф]. Современная промышленность изготавливает конденсаторы настолько большой ёмкости, что их можно использовать вместо аккумуляторов, например, известны случаи применения специальных конденсаторов для запуска двигателей автомобилей.

При рассмотрении конденсатора удобно использовать гидравлические аналогии, отождествляя количество электричества с количеством жидкости, ёмкость конденсатора с ёмкостью сосуда, уровень жидкости в нем – с разностью потенциалов. Действительно, чем больше ёмкость сосуда, тем ниже уровень одного и того же количества жидкости в нем, как это следует из (6).

Дифференцируя (6) по t , имеем:

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} i_c, \text{ откуда } i_c = C \frac{dU_c}{dt}, \quad (7)$$

где i_c – ток конденсатора.

Как следует из (7), ток, протекающий по выводам конденсатора, пропорционален его ёмкости и скорости изменения напряжения на его обкладках. Поскольку между ними располагается диэлектрик, то этот ток не является током проводимости, а образуется в результате перемещения электронов в металлических обкладках конденсатора под действием внешнего электрического поля, возникшего при подаче напряжения на выводы конденсатора. Как только напряжение перестаёт изменяться, то, независимо от его величины, ток прекращается.

Таким образом, если на выводы предварительно разряженного конденсатора скачком подать постоянное напряжение, то, даже если оно очень мало, например, порядка милливольт, ток конденсатора в первый момент времени теоретически может принять бесконечно большое значение, поскольку скорость изменения напряжения на его выводах бесконечно велика. В действительности величина тока, согласно закону Ома для полной цепи, ограничивается внутренним сопротивлением источника и сопротивлением того участка цепи, по которому ток протекает. Имея в виду указанные обстоятельства, говорят, что конденсатор, в момент подачи на него “скачка” напряжения, обладает как бы нулевым сопротивлением. Далее, по мере заряда конденсатора, напряжение на его обкладках растёт, а ток уменьшается по экспоненциальному закону (рис.10). Когда напряжение источника и напряжение на выводах конденсатора станут равными, ток конденсатора примет нулевое значение (если не учитывать ток утечки). В этом случае говорят, что сопротивление конденсатора, в установившемся режиме, бесконечно велико.

Если напряжение на конденсаторе изменяется, например, по гармоническому закону, т.е. $u_c = U_m \sin(\omega t)$, где U_m – амплитуда (максималь-

ное значение) напряжения, то в цепи конденсатора будет протекать ток i_c , величина которого с учетом (7):

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_m \cos(\omega t) = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

где u_c – текущее (мгновенное) значение напряжения на конденсаторе.

Анализ (8) показывает, что ток конденсатора также изменяется по гармоническому закону, опережая напряжение на четверть периода. Следовательно, конденсатор потребляет из цепи реактивную энергию, а значит обладает реактивным сопротивлением X_c . Его величина может быть найдена с учётом (8):

$$X_c = \frac{U_k}{I_k} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (9)$$

где I_k , U_k – действующие (среднеквадратические) значения тока и напряжения конденсатора; f – частота изменения тока. Размерность используемых в (9) единиц – ом, герц, фарада соответственно.

Конденсаторы, также как и резисторы, изготавливаются со значениями ёмкости, соответствующими тому или иному нормальному ряду. Если ни одно из значений ряда не соответствует необходимой величине, то конденсаторы соединяют либо последовательно, либо параллельно. Используя гидравлические аналогии легко придти к выводу, что при параллельном соединении двух конденсаторов ёмкостью C_1 и C_2 их общая ёмкость $C_{\text{пар}}$ составит:

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 \quad (10)$$

При последовательном их соединении общая ёмкость $C_{\text{посл}}$ будет меньше наименьшего значения:

$$C_{\text{посл}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (11)$$

Необходимо иметь в виду, что при последовательном соединении конденсаторов, напряжение на них будет распределяться в соответствии с (6), т.е. обратно пропорционально ёмкости, и оно не должно превысить U_p для каждого конденсатора.

Для оценки роли конденсаторов в электронных устройствах рассмотрим схемы, изображенные на рис. 9а, 9б. Устройство, изображённое на рис. 9а, является *четырёхполюсником* в том смысле, что оно имеет четыре внешних вывода. Выводы 1-1 называют *входной цепью* четырёхполюсника или *входом*, а выводы 2-2 *выходной цепью* или *выходом*.

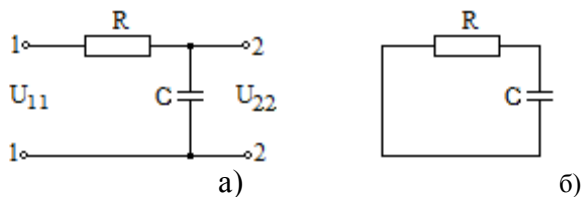


Рис. 9. Цепи заряда (а) и разряда (б) конденсатора

Пусть на входе четырехполюсника действует постоянное напряжение U_{11} идеального источника напряжения. Выходным напряжением схемы является напряжение на выводах конденсатора, т.е. $U_{22}=U_C$. Поскольку по резистору и конденсатору протекает один и тот же ток – ток конденсатора I_C , то в соответствии со вторым законом Кирхгофа $U_R+U_C=I_C R+U_C=U_{11}$. Учитывая (7), имеем

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = U_{11}$$

или

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = \frac{1}{RC} U_{11} \quad (12)$$

Полученное выражение представляет собой неоднородное линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Из теории дифференциальных уравнений известно, что его общее решение можно получить путем прибавления любого его же частного решения к общему решению соответствующего (имея в виду его левую часть) однородного уравнения. Как известно, у однородного уравнения правая часть равна нулю, т.е. выражение (12) приводится к виду(13):

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC} U_C = 0 \quad (13)$$

Оно описывает процесс, происходящий при замыкании предварительно заряженного конденсатора на резистор R , что соответствует схеме рис. 9б. Разделив в (13) переменные, получим

$$\frac{dU_C}{U_C} = -\frac{1}{RC} dt$$

Интегрируя и представляя постоянную интегрирования (для удобства дальнейших преобразований) в виде $\ln const$, получим

$$\ln U_C = -\frac{1}{RC} t + \ln const.$$

После потенцирования полученного выражения имеем

$$U_c = const \times e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (14)$$

Выражение (14) является общим решением уравнения (13).

Как следует из анализа (12), его частным решением (при $t=\infty$) является $U_c=U_{11}$. Следовательно, общее решение уравнения (12)

$$U_c = const \times e^{-\frac{t}{RC}} + U_{11}$$

В начальный момент времени $t=0$, т.е. в момент подачи входного напряжения U_{11} , напряжение на конденсаторе равно нулю. Следовательно, $const = -U_{11}$ и общее решение уравнения (12)

$$U_c = U_{11} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (15)$$

Что касается решения уравнения (13), то при $t=0$ напряжение на конденсаторе равно напряжению U_{11} источника (поскольку конденсатор был ранее от него заряжен). Следовательно, в начальный момент времени при замыкании конденсатора на резистор $U_c=U_{11}$. Отсюда, из (14), $const = U_{11}$, и общее решение (13)

$$U_c = U_{11} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (16)$$

Произведение RC имеет размерность времени (попробуйте проверить) и называется *постоянной времени* RC цепи. Она обозначается как τ , т.е.

$$\tau = RC \quad (17)$$

и если сопротивление берется в омах, а ёмкость в фарадах, то постоянная времени получается в секундах. По прошествии промежутка времени, равного постоянной времени ($t=\tau$), величина экспоненциально убывающей функции становится в e раз меньше начального значения. Например, подставляя в (16) $t=\tau$, получим

$$U_c = U_{11} e^{-\frac{t}{\tau}} = U_{11} e^{-1} = 0,37 U_{11}$$

(см. рис.106). Чем больше τ , тем медленнее происходят процессы заряда и разряда конденсатора.

Термин «постоянная времени» имеет следующее происхождение. Если на графике зависимости $U_c = f(t)$, построенному по выражению (16), в любой его точке провести касательную, то отрезок (называемый подкасательной), расположенный между проекцией этой точки на ось времени и точкой пересечения касательной с осью времени, будет величиной постоянной и равной τ .

Ток заряда конденсатора может быть найден дифференцированием выражения для U_C (15) с учетом (7)

$$i_c = C \frac{dU_C}{dt} = \frac{U_{11}}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (18)$$

Падение напряжения на резисторе:

$$U_R = i_c R = U_{11} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (19)$$

Как следует из (18), появление в момент времени $t=0$ скачка напряжения U_{11} вызывает резкий бросок тока до величины U_{11}/R с последующим его уменьшением по экспоненциальному закону (с постоянной времени τ). В указанный момент времени выводы конденсатора как бы закорочены, и все напряжение источника приложено к резистору, т.е. $U_R = U_{11}$ (19), а затем также снижается по экспоненте. Графики зависимостей (15) и (18) в относительных единицах приведены на рис.10.

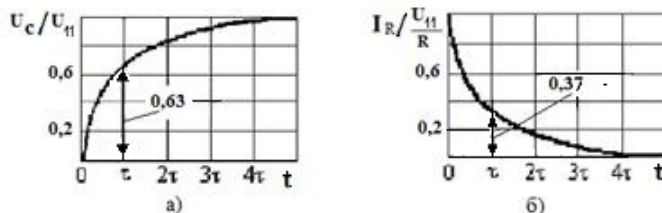


Рис. 10. Графики изменения напряжения на конденсаторе (а) и тока его заряда (б) в относительных единицах

Теоретически процесс, описываемый экспоненциально убывающей функцией, длится бесконечно долго, поскольку $e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow 0$ лишь при $t \rightarrow \infty$. Однако на практике процесс считают закончившимся через время $t_{уст} = 3\tau$, которое называют *временем установления*. За это время величина $e^{-\frac{t}{\tau}}$ уменьшается до 0,05 начального значения.

Как известно, экспоненциальная функция вида $e^{-\frac{t}{\tau}}$ может быть разложена в ряд: $e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots$

Если для аппроксимации рассматриваемой экспоненты использовать только два первых члена ряда, то при $t/\tau \leq 0,35$ левая и правая части последнего выражения (для двух членов ряда) будут отличаться друг от друга количественно не более чем на 10%. А при $t/\tau \leq 0,15$ ошибка составит всего лишь 1,2%. Это означает, что выражение (15) может быть приведено к более простому виду:

$$U_c = U_{11} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \approx U_{11} \frac{t}{\tau}. \quad (20)$$

Таким образом, нарастание напряжения на конденсаторе в начале процесса его заряда (рис.10а) будет происходить практически по линейному закону. Такой способ получения линейно изменяющегося напряжения зачастую используется в генераторах пилообразного напряжения, применяемых, например, в устройствах развертки аналоговых осциллографов [7]. При этом процесс заряда происходит по схеме рис.9а с постоянной времени τ_3 , а процесс разряда – по схеме рис. 9б с постоянной времени τ_p . Если заряжать конденсатор через резистор с большим сопротивлением, используя, по сути, источник тока, а разряжать через резистор с сопротивлением много меньшим (т.е. $\tau_3 \gg \tau_p$), то напряжение на конденсаторе будет иметь пилообразный импульсный характер с логичным (согласно (20)) линейным фронтом и крутым, почти вертикальным - срезом ([7], рис.3).

Как уже упоминалось, однажды заряженный конденсатор рано или поздно разрядится, даже если его выводы никуда не подключены. Такой самопроизвольный разряд происходит из-за существования тока утечки конденсатора. Ток утечки как параметр во многих случаях играет важную роль. Например, конденсаторы, входящие в состав цифровых измерительных приборов, выбирают с минимальными токами утечки, поскольку от этого зависит точность измерений. Величина тока утечки определяется качеством диэлектрика, степенью загрязненности корпуса конденсатора и др. причинами.

При изготовлении конденсаторов наряду с традиционной технологией используется технология SMD. Ёмкость таких конденсаторов составляет от единиц пикофард до десятков микрофард.

Особую группу приборов представляют *проходные* конденсаторы, предназначенные для борьбы с помехами в системах электроснабжения.

1.3.Индуктивные компоненты

Наряду с конденсаторами в электронных устройствах находят применение *индуктивные компоненты*, важнейшим параметром которых является их индуктивность L , измеряемая в *генри* [Г].

Известно, что индуктивностью (как и ёмкостью) обладает любой проводник. Если по какому либо проводу (проводнику) проходит электрический ток, то вокруг него создаётся магнитное поле, силовые линии которого представляют собой окружности с центром на оси провода. Если придать этому проводу форму окружности (витка), то силовые линии каждого элемента провода складываются, следовательно, магнитное поле витка оказывается больше магнитного поля провода, не свёрнутого в ви-

ток. Ещё большим оно будет у катушки, имеющей несколько витков. Поскольку направления силовых линий каждого элемента витка и витков в целом совпадают, то магнитное поле катушки имеет определённую направленность, в связи с чем используется понятие *магнитного потока* Ψ (потока энергии магнитного поля). Электрический ток силой I , протекая по виткам катушки, создает пронизывающий их магнитный поток $\Psi = LI$, измеряемый в веберах [Вб].

Таким образом, катушка индуктивности, так же как и конденсатор, может накапливать энергию в виде энергии магнитного поля. Однако, конденсатор может длительное время (практически годы) сохранять свой заряд, если его ток утечки пренебрежимо мал, в то время как магнитное поле катушки исчезает спустя некоторое время после прекращения прохождения по ней электрического тока.

При изменении силы тока i , вызванного каким-то внешним воздействием (например, шунтированием катушки или разрывом цепи), возникает э.д.с. самоиндукции ξ_s

$$\xi_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -\left(L\frac{di}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right). \quad (21)$$

Причиной появления э.д.с. является энергия магнитного поля, возникающего вокруг катушки при прохождении тока по ее виткам. Если индуктивность катушки не зависит от величины тока ее витков, то есть $L = \text{const}$ (это имеет место при отсутствии у катушки сердечника, выполненного из ферромагнитного материала), то выражение (21) преобразуется к виду (22):

$$\xi_s = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(Li)}{dt} = -L\frac{di}{dt}. \quad (22)$$

Знак минус в выражении (22) указывает на то, что ток индукции всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Иными словами, направление (полярность) э.д.с. самоиндукции таково, что она стремится сохранить прежнюю величину и направление тока в цепи катушки. Если по катушке протекает постоянный по величине и направлению ток, то магнитное поле катушки и падение напряжения на ней постоянны и полярность падения напряжения на катушке соответствует направлению тока. Но если ток в цепи будет уменьшаться (например, вследствие введения сопротивления или разрыва цепи), то появится э.д.с. самоиндукции с полярностью, противоположной прежней полярности падения напряжения, стремясь сохранить прежнее направление тока. Величина этой э.д.с., как следует из (22), тем больше, чем больше скорость изменения тока в цепи. Таким образом, как конденсатор, так и катушка индуктивности способны запастись энергией – в виде энергии электрического поля, либо энергии поля магнитного соответ-

венно (в этом проявляется их сходство). Следствием этого является наличие у них определенной «инерции»: запасенная энергия не может быть израсходована мгновенно - у предварительно заряженного и затем замкнутого на резистор конденсатора ток протекает по резистору некоторое время (рис. 10б), аналогичным свойством обладает и катушка индуктивности.

Если по катушке без сердечника протекает ток, изменяющийся по гармоническому закону $i = I_m \sin(\omega t)$, где I_m – амплитудное значение тока, то напряжение на катушке U_L в соответствии с (22) без учета знака составит:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t) = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (23)$$

Таким образом, напряжение на катушке также изменяется по гармоническому закону, но опережает ток на четверть периода. Следовательно, для переменного напряжения катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением X_L , величина которого в соответствии с (23) составляет:

$$X_L = \frac{U_K}{I_K} = \omega L = 2\pi f L \quad (24)$$

где U_K, I_K – среднеквадратические (действующие, эффективные) значения падения напряжения на катушке и тока в ней, f – частота изменения тока (напряжения). Размерность используемых в (24) единиц – ом, герц, генри соответственно.



Рис.11 Условные обозначения катушек индуктивности

На рис.11 изображены условные обозначения катушек постоянной индуктивности с сердечниками - низкочастотным (а), высокочастотным (б), без сердечника (г) и высокочастотной катушки с изменяющейся индуктивностью (в).

Низкочастотными называют сердечники, используемые для токов промышленной частоты 50Гц. Их изготавливают из трансформаторных сталей различных марок. Для более высоких частот используют немагнитические материалы, например, из группы ферритов, либо не используют сердечники вообще. С помощью сердечников осуществляется концентрация магнитных потоков и уменьшение, тем самым, потоков рассеяния. Кроме того, сердечник позволяет при меньшем количестве витков

катушки получить большую индуктивность. Низкочастотные катушки обычно имеют много витков, поэтому их наматывают на диэлектрическом каркасе. У высокочастотных катушек витков много меньше, поэтому каркас используется лишь для фиксации сердечника внутри катушки, а если сердечника нет, то катушка может и не иметь каркаса, если содержит несколько – до десятка – витков провода сравнительно большого – порядка 1мм - диаметра. Катушку с двумя выводами обычно называют *дросселем*. Высокочастотные дроссели внешне могут быть похожими на резистор 4, представленный на рис.4: катушку, намотанную на ферритовый сердечник, «окукливают» компаундом для защиты от внешней среды и фиксации внешних выводов. На корпус дросселя наносят цветную маркировку, указывающую на параметры дросселя, в частности, одним из важных параметров дросселя, кроме индуктивности, является максимально допустимое значение постоянного тока.

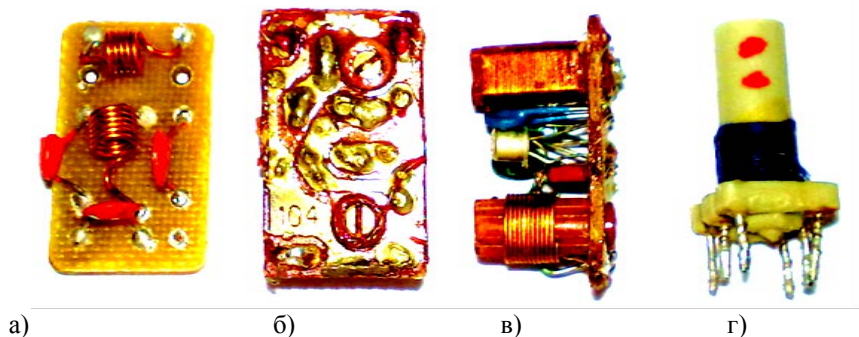


Рис. 12. Конструкции высокочастотных катушек индуктивности

На рис.12а представлена плата с двумя бескаркасными катушками (масштаб на рис.12 такой же, как и на рис.8). Рис.12в – вид сбоку платы с двумя катушками, намотанными на прямоугольном (вверху) и ребристом (внизу) каркасах с внутренними сердечниками, закрепленными в диэлектрических оправках с резьбой на их внешней поверхности, рис.12б – вид снизу той же платы. Оправки имеют углубления (шлицы) в своей нижней части, которые хорошо видно на рис.12б. Вращение оправки с помощью отвертки вызывает перемещение сердечника по оси катушки, что приводит к изменению её индуктивности. На рис. 12г изображена катушка, намотанная на цилиндрическом каркасе также с перемещаемым внутренним сердечником. Условное обозначение катушки на рис. 12а изображено на рис.11г, катушек 12в, 12г - на рис.11в.

Компоненты, обладающие индуктивностью, также как резисторы и конденсаторы, могут быть изготовлены по технологии SMD.

Для оценки роли индуктивных компонентов в электронных устройствах рассмотрим схему, изображенную на рис. 13а. Резистором R в данном случае учитывается активное сопротивление идеальной, чисто индуктивной катушки L , имеющей нулевое активное сопротивление.

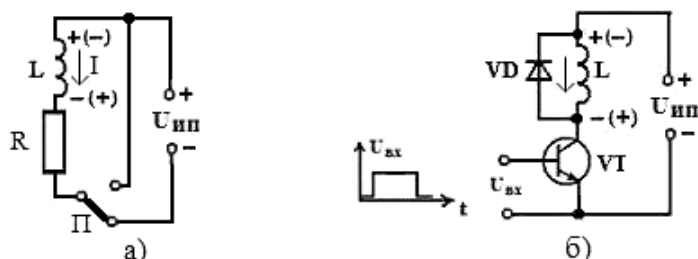


Рис.13. Способы коммутации (переключения) катушки индуктивности: а) – контактный, б) - бесконтактный

В момент времени $t=0$ подадим напряжение $U_{ин}$ от источника питания - идеального источника постоянного напряжения (переключатель Π в нижнем положении), . Мгновенно появится э.д.с. самоиндукции (ее полярность указана без скобок), которая направлена встречно напряжению источника и полностью компенсирует его. Поэтому в момент $t=0$ ток катушки равен нулю. Э.д.с. самоиндукции будет действовать до тех пор, пока сила тока не достигнет установившегося значения (направление этого тока показано стрелкой). Следовательно, в соответствии с законом Ома для переходного периода в общем виде имеем:

$$iR = U_{ин} + \xi_s = U_{ин} - L \frac{di}{dt},$$

где ξ_s -э.д.с. самоиндукции, откуда

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \frac{U_{ин}}{L} \quad (25)$$

Полученное выражение, по сути, аналогично выражению (12), поэтому для его решения должен быть применен аналогичный подход. Чтобы технически реализовать режим работы, соответствующий однородному уравнению, необходимо – после достижения установившегося значения тока катушки – мгновенно замкнуть источник питания накоротко. В этом случае напряжение источника питания и правая часть (25) станут равными нулю. Надо иметь в виду, что перевод переключателя « Π » в верхнее положение, как бы быстро он ни произошел, вызовет появление э.д.с. самоиндукции значительной величины, пропорциональной индуктивности катушки. При этом возможно появление дугового разряда, для гашения которого в мощных устройствах электроснабжения применяют

специальные дугогасители. Можно использовать также бесконтактный способ коммутации (переключения), например, подключать и отключать катушку от источника с помощью биполярного транзистора VT, играющего в данном случае роль бесконтактного переключателя (ключа), управляемого маломощным сигналом $U_{\text{вх}}$ (рис.136).

Будем полагать, что в момент, предшествующий короткому замыканию цепи, сила тока катушки достигла установившегося значения I_0 :

$$I_0 = \frac{U_{\text{ин}}}{R} \quad (26)$$

В момент замыкания ток I_0 начнет уменьшаться, что вызовет появление э.д.с. самоиндукции, стремящейся сохранить прежнее значение и направление тока. Поэтому полярность э.д.с. самоиндукции меняется на противоположную (на рис. 13а,13б показана в скобках), чтобы сохранить прежнее направление прохождения тока. Общее решение однородного уравнения может быть получено с учетом начальных условий (26) при $t=0$ в следующем виде:

$$i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \text{ или } i = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (27)$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ называют *постоянной времени RL-цепи*. Как следует из анализа (27) τ – это отрезок времени, в течение которого ток катушки уменьшается в e раз по сравнению с I_0 .

Вернемся к уравнению (25). Его частным решением для $t=\infty$ будет $i=I_0 = U_{\text{ин}}/R$, т.е. (26). Следовательно, общее решение уравнения (25) будет иметь вид

$$i = I_0 + \text{const} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

В момент времени $t=0$ вследствие действия э.д.с. самоиндукции ток в цепи катушки равен нулю. Следовательно, $\text{const} = -I_0$ и окончательное выражение для силы тока в цепи катушки при подключении к ней источника напряжения имеет вид

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right). \quad (28)$$

Как следует из (28), после подключения источника ток в катушке нарастает по экспоненциальному закону до установившегося значения I_0 , а после замыкания катушки спадает также по экспоненте в соответствии с (27). Временные графики указанных процессов соответствуют графикам рис.10а,10б – необходимо только вместо U_c/U_{11} и I_R/U_{11} указать I/I_0 .

Тогда график рис. 10а будет представлять процесс нарастания тока при подключении источника к катушке, а график рис.10б – процесс его убы-

вания при коротком замыкании катушки. Временные параметры указанных процессов могут быть найдены с учетом (20).

Схема на рис.13б является бесконтактным аналогом схемы рис.13а. Транзистор VT в данном случае играет роль управляемого ключа, замыкающего цепь источника питания и катушки L при высоком уровне своего входного сигнала $U_{вх}$ и размыкающего ее при низком уровне $U_{вх}$. Диод VD также играет роль ключа, но только ключа неуправляемого. Точнее, его сопротивление зависит от полярности приложенного к нему напряжения и его величины. Это сопротивление будет низким (ключ замкнут, переключатель «П» в верхнем положении) при полярности напряжения на катушке, указанной в скобках, и высоким (ключ разомкнут) при обратной полярности. Таким образом, когда $U_{вх}=0$, то аналогом этой ситуации применительно к схеме рис.13а является нахождение переключателя «П» в среднем положении, когда ничто не подключено и не замкнуто. При высоком уровне $U_{вх}$ транзистор (ключ) замыкает цепь источника на катушку, и начинается процесс нарастания тока в ней по закону (28). Ключ-диод при данной полярности напряжения на своих выводах (без скобок) имеет высокое сопротивление, т.е. разомкнут. Эта ситуация соответствует нижнему положению переключателя «П». Когда же $U_{вх}$ станет равным нулю, транзистор – ключ разомкнет цепь источника. Диод – ключ, напротив, замкнет катушку накоротко, поскольку возникшая при размыкании ключа-транзистора э.д.с. самоиндукции (ее полярность указана в скобках) вызовет резкое уменьшение сопротивления диода до величины порядка десятка-сотни миллиом, и ток в катушке начнет уменьшаться по закону (27). Данное состояние соответствует верхнему положению переключателя «П».

2. Функциональные устройства на пассивных компонентах

2.1. Ограничители тока, шунты и резистивные делители напряжения

Одно из назначений резистора – уменьшать ток каких-либо приборов или устройств до безопасной величины. Для этого резистор включают последовательно с ним. Предположим, что ставится задача включения светодиода вместо лампочки накаливания в фонарь, работающий от группы из трех аккумуляторов с общим напряжением 3,6В. Предельное безопасное значение тока светодиода составляет 20 мА при напряжении 2,8В. Понятно, что при непосредственном включении диод выйдет из строя из-за превышения предельно-допустимого значения тока. Поэтому последовательно с ним и аккумулятором можно включить резистор. Падение напряжения на нём в соответствии со вторым законом Кирхгофа составит 0,8В (3,6-2,8), а его сопротивление по закону Ома - $0,8\text{В}/(20 \cdot 10^{-3}\text{А})=40\text{Ом}$. Мощность, рассеиваемую резистором, найдем в соответствии с (5): $0,8\text{В} \cdot (20 \cdot 10^{-3}\text{А})=16 \cdot 10^{-3}\text{Вт}=16\text{мВт}$. Из [1], [2] выбираем типоразмер резистора, и, если такое номинального значения отсутствует в ряде номинальных значений сопротивлений, то выбираем ближайшее большее, после чего проводим уточняющий расчет с учетом класса точности выбранного резистора.

Данное решение имеет тот недостаток, что на резисторе бесполезно рассеивается мощность источника. Существуют более экономичные способы согласования нагрузки (в данном случае - светодиода) с источником, которые требуют применения активных компонентов.

Как следует из (1), при постоянном сопротивлении резистора падение напряжения на нём пропорционально протекающему по резистору току. Следовательно, резистор можно использовать в качестве преобразователя тока в напряжение, например, осуществляя косвенное измерение тока по величине падения напряжения на резисторе. Способ косвенного измерения применяют в том случае, если по какой-то причине прямое измерение тока невозможно. Резистор, используемый в данном качестве, называют шунтом. Например, если по резистору сопротивлением 10кОм протекает ток 2мкА (20^{-6}А), то падение напряжения на нём - $2 \cdot 10^{-6} \times 10 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^{-2}\text{В}=0,02\text{В}=20\text{мВ}$.

Выбор сопротивления шунта не однозначен. С одной стороны оно должно быть как можно меньшим, чтобы существенно не уменьшить протекающий в цепи ток, но при этом уменьшается и падение напряжения на нём, что снижает точность измерения, поскольку падение напряжения на шунте может оказаться соизмеримым с разрешающей способностью вольтметра, под которой понимают минимальную измеряемую им величину. Обычно стараются выбрать сопротивление шунта не менее

чем на два порядка меньше внутреннего сопротивления вольтметра для того, чтобы не учитывать его в расчетах тока, проходящего по шунту.

На рис.4 представлен внешний вид шунта (8), рассчитанный на номинальный ток 20А, при котором номинальное падение напряжения составляет 75мВ при классе точности 0,5. Шунт изготовлен из *манганина* – материала, имеющего высокое удельное сопротивление и отрицательный ТКС, что позволяет уменьшить влияние температуры на величину падения напряжения на шунте. Полоска манганина расположена между контактными площадками, к которым подключаются с помощью болтового соединения электрическая цепь, в которой производится измерение тока, и вольтметр, измеряющий падение напряжения на шунте.

Часто резисторы используют в *делителях напряжения*, с помощью которых можно получить напряжение меньшее, чем то, которое имеет место на данном участке электрической цепи. Схема такого делителя, составленного из резисторов R_1 , R_2 (их иногда называют *плечами*), приведена на рис. 14а.

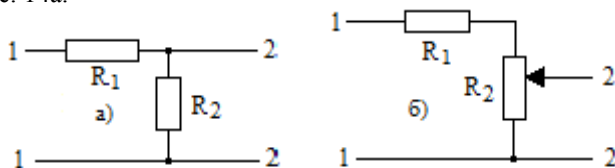


Рис.14. Резистивный делитель напряжения – нерегулируемый а), регулируемый б)

При приложении входного напряжения U_{11} , на выходе получаем напряжение $U_{22}=U_{R2}=U_{11}R_2/(R_1+R_2)$. Коэффициент передачи K такого четырёхполосника (отношение выходного сигнала к входному) – $K=U_{22}/U_{11}=R_2/(R_1+R_2)$ – постоянен и всегда меньше единицы. Поэтому $U_{22}<U_{11}$, причём, выходной сигнал изменяется во времени по тому же закону, что и входной, поскольку резисторы являются линейными компонентами, подчиняющимися закону Ома. Подобные делители применяются в измерительных приборах, например, для расширения пределов измерения вольтметров. Резистор R_2 в этом случае является внутренним сопротивлением вольтметра, а R_1 – добавочным резистором.

Напряжение на выходе делителя используется каким-либо функциональным узлом электронного устройства, чье входное сопротивление всегда известно. Оно должно не менее чем на порядок превышать сопротивление резистора R_2 для того, чтобы не влиять на величину коэффициента передачи. Таким образом находится сопротивление R_2 . Величину сопротивления R_1 рассчитывают, исходя из требуемого значения коэффициента передачи делителя K . После проведенных расчетов сравнивают сопротивление делителя (R_1+R_2) с внутренним сопротивлением источни-

ка напряжения U_{11} . Оно должно быть существенно меньше сопротивления делителя, чтобы получить требуемое значение напряжения U_{22} . В противном случае необходимо увеличивать напряжение U_{11} на входе делителя.

Резистивные делители используют для преобразования постоянных, переменных и пульсирующих напряжений. Если устройство предназначено для работы в области высоких и сверхвысоких частот, то часто применяют ёмкостные делители, собранные на конденсаторах. Схема и принцип расчета таких делителей аналогичны, только вместо активных сопротивлений используют реактивные, найденные по (9).

Переменные резисторы применяют в качестве регулируемых делителей напряжения (рис. 146). Коэффициент передачи потенциометра может плавно изменяться от нуля до максимума ($1 \geq K \geq 0$ при $R_1 = 0$). С помощью потенциометров, например, осуществляют плавную регулировку коэффициентов отклонения луча по вертикали и горизонтали в аналоговых осциллографах. Их также используют для регулирования величины напряжения при снятии вольтамперных характеристик каких-либо приборов. Постоянный резистор R_1 (рис. 146) в этом случае служит для ограничения тока исследуемого прибора до безопасной величины при верхнем положении движка R_2 .

Подстраиваемые резисторы используют в процессе регулировки электронной аппаратуры, когда необходимо однократно выставить точное значение сопротивления резистора. После регулировки положение скользящего контакта фиксируют, например, с помощью краски.

2.2. Сглаживающие фильтры и разделительные цепи

Резисторы и конденсаторы часто применяют в так называемых сглаживающих RC-фильтрах источников вторичного электропитания (ИВЭП), используемых для питания различных электронных устройств. ИВЭП преобразуют энергию переменного тока промышленной частоты 50 Гц в энергию постоянного тока для питания какого-либо электронного устройства, например, осциллографа, электронного вольтметра и др., которые нуждаются в энергии постоянного (постоянного – в смысле однонаправленного) тока для своего функционирования. Эти устройства являются *нагрузкой* ИВЭП. В процессе подобного преобразования переменное (знакопеременное, разнополярное) напряжение вначале выпрямляется, т.е. преобразуется (с помощью диодов, принцип работы которых описан на стр.28) в *пульсирующее* напряжение, имеющее постоянную полярность, но изменяющееся по величине (график $U_{11}(t)$ на рис. 156). Как видно из графика, пульсирующее напряжение имеет как постоянную составляющую, являющуюся средним значением напряжения за период,

так и переменную составляющую. И хотя оно является однополярным (и в этом смысле, в принципе, может называться постоянным), но для питания электронных устройств не пригодно, т.к. имеет большую амплитуду пульсаций. Для сглаживания пульсаций может быть использован RC – фильтр, изображенный на рис.15а. Здесь R_H – модель нагрузки в виде резистора, R – обобщенное внутреннее сопротивление выпрямителя. В момент $t=0$ появляется пульсирующее напряжение и начинается процесс заряда конденсатора (рис. 15б), причем, напряжение на конденсаторе всегда несколько меньше U_{11} вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении выпрямителя.

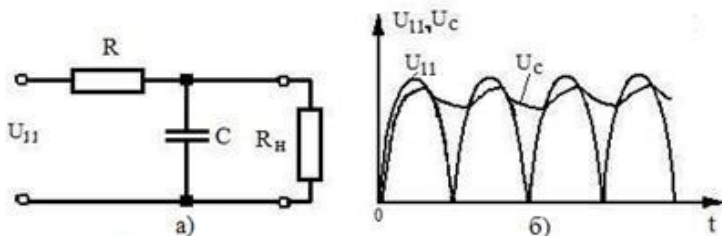


Рис. 15. RC – фильтр (а) и процесс сглаживания пульсаций (б)

Когда напряжение U_{11} , начиная уменьшаться, становится равным, а затем и меньшим напряжения на конденсаторе, начинается процесс разряда конденсатора на нагрузку. Разряд конденсатора на источник U_{11} блокируется диодом, входящим в состав источника (на рисунке не показан). Процесс разряда происходит более медленно, чем процесс заряда, поскольку $R_H > R$, а емкость конденсатора достаточно велика – тысячи и десятки тысяч микрофард. В результате, повторный заряд конденсатора начнется при гораздо большем значении $U_{11} = U_C$, что приведет к существенному уменьшению амплитуды пульсаций.

Следовательно, если по резистору нагрузки протекает пульсирующий ток, но необходимо, чтобы напряжение на нем было практически постоянным, то параллельно ему надо включить конденсатор такой емкости, чтобы постоянная времени его перезаряда была много больше периода переменной составляющей тока. Категория «много больше» в технических расчетах обычно наступает с разницы на один порядок и более. Определив величину постоянной времени и зная сопротивление нагрузки (оно всегда известно), из (17) находят емкость конденсатора фильтра.

Вполне понятно, что чем больше емкость конденсатора фильтра, тем медленнее процессы его заряда и разряда, а значит и меньше амплитуда пульсаций. Но, с ростом ёмкости растёт и зарядный ток. Если включение выпрямителя придется на момент, когда переменное напряжение будет иметь амплитудное значение, то скорость его нарастания и, следовательно, зарядный ток в соответствии с (7) будут максимальными, по-

сколько конденсатор в момент включения представляет собой, по сути, «закоротку». В этот момент полупроводниковые диоды, входящие в состав выпрямителя и преобразующие переменное напряжение в пульсирующее, могут выйти из строя. Поэтому необходимо защитить диоды от перегрузки по току, если нельзя уменьшить емкость конденсатора из-за недопустимо большой амплитуды пульсаций. Для защиты диодов параллельно им можно включить постоянные неполярные конденсаторы малой ёмкости, которые в момент «броска» тока будут шунтировать диоды.

Вышесказанное объясняет возникновение «бросков» тока при включении силовой кабельной сети. Если длина кабеля велика, то емкость между «фазами» и каждой «фазой» и «нейтралью» или «нулём» имеют достаточно большую величину. Поэтому при включении сети в момент, когда напряжение принимает амплитудное значение, наблюдаются большие броски тока, даже если сеть не нагружена.

В ряде случаев необходимо отделять переменную составляющую пульсирующего сигнала от постоянной его составляющей. Для этого конденсатор (его называют *разделительным* и обозначают как C_p) включают последовательно с нагрузкой – устройством, для которого производится отделение переменной составляющей от постоянной или, как говорят, его фильтрация.

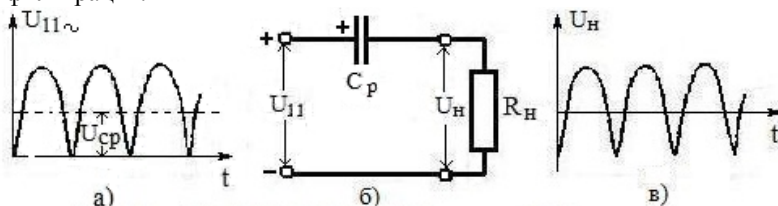


Рис.16. Выделение переменной составляющей из пульсирующего сигнала С-фильтром

На рис.16б приведена схема такого фильтра и осциллограммы сигналов на его входе (рис. 16а) и выходе (рис. 16в). R_n, U_n – сопротивление нагрузки и напряжение на ней соответственно. Конденсатор заряжается до среднего значения входного напряжения, которое вычитается из $U_{11}(t)$. Анализ приведенных на рис.16 осциллограмм напряжений на входе фильтра и его выходе подтверждают факт фильтрации, поскольку график $U_n(t)$ пересекает ось времени, а график $U_{11}(t)$ – нет, т.е. напряжение на входе фильтра является знакопостоянным, а на выходе – знакопеременным [7].

В схеме фильтра используется полярный конденсатор, на что указывает знак «+» на его левой обкладке. Такое его включение обусловлено

полярностью напряжения U_{11} . На рис. 15 изображен конденсатор неполярный.

Разделительные конденсаторы применяют, например, для создания режима «закрытого» входа электронных осциллографов [7].

Если по какому-либо участку электрической цепи протекает пульсирующий ток и сопротивление этого участка незначительно (например, речь идет о соединительных проводах), то незначительным будет и падение напряжения на этом участке. В то же время иногда бывает необходимо получить на рассматриваемом участке цепи чисто переменную составляющую падения напряжения без постоянной его составляющей. Для решения этой задачи в разрыв цепи исследуемого участка включают дроссель - катушку индуктивности с сердечником или без него - в зависимости от частоты пульсаций. При этом падение напряжения на дросселе практически будет чисто переменным, поскольку активное сопротивление катушки - а это сопротивление провода, которым она намотана, - очень мало. Реактивное же ее сопротивление, определяемое по (24), на многие порядки больше, поэтому переменная составляющая падения напряжения на дросселе много больше постоянной его составляющей.

Благодаря указанному обстоятельству дроссели также используют для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в ИВЭП. Их включают последовательно с источником пульсирующего напряжения и нагрузкой. При этом переменная составляющая напряжения выделяется на дросселе, а постоянная - на нагрузке. Для повышения эффективности сглаживания параллельно нагрузке может быть дополнительно включен сглаживающий конденсатор C (как на рис.15а).

Анализ (24) показывает, что с ростом частоты протекающего по катушке тока, ее индуктивность может быть уменьшена пропорционально частоте, притом что реактивное её сопротивление останется неизменным. Уменьшение индуктивности означает уменьшение и массогабаритных показателей дросселя. То есть, небольшой по размерам высокочастотный дроссель может иметь такое же реактивное сопротивление, что и дроссель низкочастотный, но имеющий во много раз большие габариты и массу. Данный прием, позволяющий уменьшить габариты устройства, в котором применяется такой дроссель, использован в осветительных энергосберегающих компактных люминесцентных лампах (КЛЛ). В них дроссель, часто называемый «балластом», используется для уменьшения тока при зажигании газового разряда. В цоколь КЛЛ вмонтировано электронное устройство, в котором низкочастотное напряжение сети 50Гц преобразуется в высокочастотное напряжение (частота - несколько десятков килогерц). Это напряжение и используется для возбуждения разряда в газе. Благодаря высокой частоте существенно уменьшаются размеры дросселя-балласта (размеры - порядка сантиметра), что, в свою оче-

редь, позволяет существенно уменьшить и размеры самой лампы. Подобный прием – повышение частоты питающего напряжения может быть использован и в компактных светодиодных лампах с целью уменьшения размеров трансформатора, понижающего напряжение сети до рабочего напряжения светодиодов. Кроме того, не исключено, что для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения придется использовать вместо конденсатора высокочастотный дроссель, поскольку применение сглаживающих конденсаторов может оказаться менее эффективным из-за значительного рабочего тока светодиодов.

В современных ИВЭП также используют метод преобразования частоты сетевого напряжения, что позволяет уменьшить габариты и массу трансформатора, предназначенного для получения напряжений питания различных устройств – применительно к компьютеру – дисплея, DVD-привода, клавиатуры и др.

2.3. Частотные селекторы

Различного рода селекторы (от англ. select – отбирать, выбирать) находят широкое применение в электронике. Назначение частотных селекторов – выбрать, выделить из широкого частотного спектра электрических сигналов достаточно узкий диапазон частот (в идеале – одну частоту). Например, эфир буквально «забит» сигналами различных радиопередатчиков, используемых в радиовещании, сотовой связи, служебных радиостанциях, станциях гражданского диапазона и т.д. Однако с помощью частотного селектора можно выделить сигнал одного источника информации, настроиться на одну радиостанцию.

В качестве частотных селекторов широко используются *колебательные контуры*, представляющие собой параллельное или последовательное соединение катушки индуктивности и конденсатора. Схема параллельного колебательного контура приведена на рис.17а. На рис.17б изображена векторная диаграмма этого контура для случая подачи на него переменного напряжения U_K ,

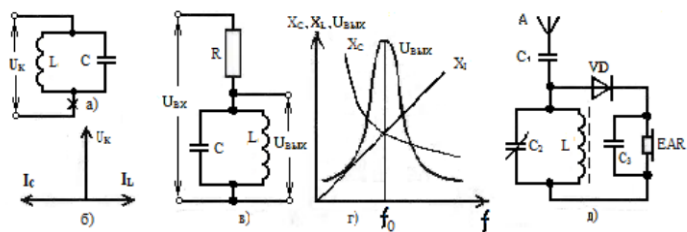


Рис.17. Параллельный колебательный контур как частотный селектор

изменяющегося по гармоническому закону. В соответствие с (8) и (23) векторы протекающих по катушке и конденсатору токов будут сдвинуты по фазе относительно друг друга на 180° , т.е. будут находиться в *противофазе*. При изменении частоты напряжения U_K реактивные сопротивления катушки и конденсатора, также будут изменяться в соответствии с (9) и (24). Например, рост частоты f напряжения U_K , приложенного к контуру, вызовет уменьшение сопротивления конденсатора и рост сопротивления катушки. При этом ток в общей ветви контура (отмечен крестиком на рис.17а) будет иметь вначале индуктивный (ток катушки преобладает), а затем ёмкостный характер. При равенстве этих токов результирующий ток контура, проходящий по общему проводу, станет равным нулю, хотя токи катушки и конденсатора могут быть весьма существенными. Следовательно, сопротивление контура, в данном случае, станет как бы равным бесконечности. Однако, это идеальный случай, не достижимый на практике. Поэтому можно говорить о максимальном сопротивлении контура, которое имеет место при некотором значении частоты f_0 , на которой сопротивления катушки и конденсатора равны.

Данное явление – явление резкого возрастания сопротивления контура на некоторой частоте – называют *резонансом*, а частота f_0 , на которой резонанс наступает – *резонансной частотой*. В параллельном контуре имеет место *резонанс токов*, поскольку напряжение на катушку и конденсатор подаётся одно и то же, а ток у каждого из них свой.

Явление резонанса можно наблюдать, собрав схему согласно рис.17в и подавая на неё переменное напряжение $U_{вх}$ изменяющейся частоты и постоянной амплитуды. Данная схема, по сути, представляет собой делитель этого напряжения, нижним плечом которого является колебательный контур, точнее – его результирующее сопротивление, зависящее от частоты, а верхним – постоянный резистор R . Графики изменения параметров контура и напряжения на нём приведены на рис.17г. График зависимости $U_K = \varphi(f)$ носит название *амплитудно-частотной характеристики* – АЧХ. По этому графику можно определить резонансную частоту, а также такой важный параметр контура как *полоса пропускания* Δf . Для нахождения полосы пропускания на графике проводят горизонтальную линию на уровне $0,707U_{Kmax}$, и точки пересечения её с резонансной кривой $U_K(f)$ проецируют на ось частот. Расстояние между этими проекциями и будет искомой полосой пропускания контура. Чем она уже, тем лучше селективные свойства контура, тем лучше – на примере радиоприёма – отстройка от рядом расположенных (по частоте) станций.

Резонансная частота контура может быть найдена из условия резонанса - $X_L = X_C$:

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}, \quad (29)$$

$$\text{Откуда} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (30)$$

Качество колебательного контура оценивают, главным образом, такими его параметрами как характеристическое (волновое) сопротивление ρ и добротность Q . Волновое сопротивление – это индуктивное или ёмкостное сопротивление контура на резонансной частоте, т.е. $\rho = X_L = X_C$. Умножая обе части (29) на $2\pi f_0 L$, получаем:

$$4\pi^2 f_0^2 L^2 = \frac{1}{C} \quad \text{или} \quad X_L^2 = \frac{L}{C},$$

$$\text{Следовательно} \quad \rho = \sqrt{L/C} \quad (31)$$

Если зарядить конденсатор и подключить его к катушке, то начнется процесс обмена энергиями между конденсатором и катушкой, совершаемый по гармоническому закону. Вначале конденсатор будет терять энергию, разряжаясь на катушку. Проходящий по ней ток создаст вокруг неё магнитное поле, т.е. электрическая энергия конденсатора трансформируется в энергию магнитного поля. После прекращения тока разряда конденсатора, на основе энергии магнитного поля возникнет э.д.с. самоиндукции, и начнется процесс заряда конденсатора, который закончится после того, как будет израсходована вся энергия магнитного поля. Далее процесс повторится, т.е. в контуре возникнут *свободные колебания*, совершаемые на резонансной частоте. У идеального контура этот процесс мог бы протекать вечно, у реального же контура эти колебания *затухают*, т.е. их амплитуда со временем уменьшается до полного прекращения колебаний. Причиной затухания являются потери энергии контура на вышеупомянутом активном сопротивлении катушки, на излучение в окружающую среду, а также из-за утечек в диэлектрике и по изоляции. Потери энергии контура обычно характеризуют *сопротивлением потерь* R . Это активное (в смысле – не реактивное) сопротивление, которое как компонент физически не существует и является своего рода условной характеристикой величины потерь в контуре. Чем оно больше, тем быстрее «затухнут» свободные колебания в контуре. Отношение характеристического сопротивления к сопротивлению потерь называют *добротностью контура* Q :

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{L/C} \quad (32)$$

С величиной добротности контура непосредственно связана его полоса пропускания Δf :

$$\Delta f = f_0/Q \quad (33)$$

Как следует из (33), чем больше добротность, тем меньше полоса пропускания контура, а значит лучше его селективные свойства. На рис.18а изображён последовательный колебательный контур.

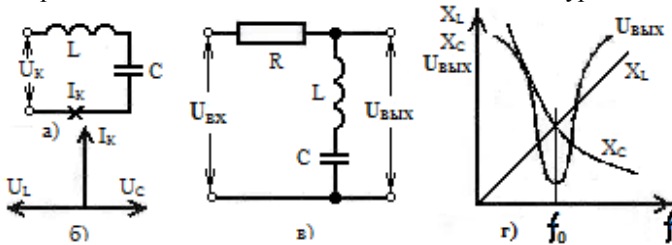


Рис.18. Последовательный колебательный контур как частотный селектор

Как видим, по катушке и конденсатору протекает один и тот же ток I_K (отмечен крестиком), возбуждаемый напряжением U_K , приложенным к контуру. Вектор тока контура на рис.18б ориентирован вертикально, ориентация векторов U_L и U_C определяется выражениями (8) и (23). Как следует из векторной диаграммы, падения напряжения на катушке U_L и конденсаторе U_C , зависящие от величин X_L и X_C , изменяются в противофазе. При равенстве реактивных сопротивлений катушки и конденсатора падения напряжения на них становятся одинаковыми и противофазными (рис.18б), и наступает *резонанс напряжений*, при котором результирующее сопротивление идеального контура принимает нулевое значение, а ток идеального контура теоретически должен быть равен бесконечности. В случае с реальным контуром, имеющем потери, речь может идти о том, что при наступлении резонанса результирующее сопротивление контура, а, следовательно, и падение напряжения на нём, принимают минимальные значения, причем, все указанные ранее отличия реального параллельного контура от идеального применимы и к последовательному контуру.

Для снятия АЧХ контура необходимо использовать источник тока, а не источник напряжения, поскольку при наступлении резонанса контур, являющийся нагрузкой источника, создаёт для него режим почти короткого замыкания, который для источника тока не опасен. Источник тока можно получить, используя источник напряжения, включив последовательно с ним резистор R , имеющий сопротивление много большее, чем сопротивление нагрузки, каковой в данном случае является последовательный контур (рис.18в). Источник генерирует переменное напряжение $U_{вх}$ постоянной амплитуды и изменяющейся частоты. На рис18г приведена АЧХ контура – $U_{вых}(f)$ и графики изменения реактивных сопротив-

лений катушки и конденсатора как функции частоты входного напряжения $U_{\text{вх}}$.

Анализ АЧХ показывает, что, если на контур подается напряжение сигнала широкого спектрального состава, то с помощью последовательного контура из этого спектра «вырезается» (подавляется) сигнал в диапазоне частот примерно равном полосе пропускания контура (методика определения полосы пропускания остаётся такой же, как и для параллельного контура). Таким образом, если параллельный контур подавляет (ослабляет) все спектральные составляющие сигнала, кроме сигнала в диапазоне частот $f_0 \pm \Delta f$, то последовательный контур, напротив, подавляет сигнал, находящийся в указанном частотном диапазоне, блокируя его дальнейшее распространение. Благодаря указанному свойству последовательный контур иногда называют *режекторным фильтром* (от англ. reject – отбрасывать).

Номограммы для расчёта параметров колебательного контура и др. информацию о нём можно найти в [5].

В качестве примера применения колебательного контура на рис.17д приведена схема простейшего детекторного радиоприемника, в котором используется параллельный контур. Конденсатор C_1 уменьшает влияние ёмкости антенны A (он включен с ней последовательно, см. (11)), которая может изменяться вследствие изменения геометрических параметров антенны (длины, высоты подвеса и др.) и тем самым влиять на резонансную частоту. Одновременно C_1 образует с контуром делитель напряжения, наводимого в антенне электромагнитным полем. C_2 - конденсатор переменной ёмкости, предназначенный для изменения резонансной частоты контура. При совпадении резонансной частоты с частотой какого-либо радиопередатчика, сопротивление контура резко возрастает. Как следствие, возрастает и падение напряжения на нём. Оно детектируется диодом VD , преобразуясь из переменного напряжения в пульсирующее, промодулированное сигналом звуковой частоты (модуляция – процесс нанесения низкочастотного звукового сигнала на высокочастотное излучение радиодиапазона). Поскольку частота пульсаций велика, то велико и сопротивление звукоизлучателя (наушников) EAR , имеющего, в основном, индуктивный характер. Следовательно, ток, проходящий по его катушкам, незначителен. Кроме того, на частотах пульсаций определяющим является инерционность мембраны звукоизлучателя, она практически не колеблется. Частоты модулирующих звуковых сигналов на порядки ниже, поэтому звуковые сигналы вызывают на порядки большие токи в наушниках, которые, проходя по катушке излучателя, заставляют мембрану колебаться, создавая акустические сигналы, которые человек слышит. Конденсатор C_3 служит для сглаживания высокочастотных

пульсаций, но, в силу вышеуказанного обстоятельства, без него можно обойтись, если пренебречь небольшим ухудшением качества приёма.

Чем ниже требуемая резонансная частота контура, тем большими должны быть ёмкость конденсатора и индуктивность катушки, как это следует из (30). Следовательно, в этом случае увеличиваются массогабаритные параметры контура, а также потери в нём, что приводит к увеличению полосы пропускания и ухудшению избирательных свойств. Поэтому в диапазоне частот от долей герц до десятков и сотен килогерц применяют частотные селекторы на основе RC -цепей, что позволяет существенно уменьшить габариты устройства. Например, часто используется так называемый *мост Вина*, схема которого приведена на рис.19а.

Как следует из анализа схемы, данное устройство представляет собой частотнозависимый делитель входного напряжения, верхним плечом которого являются компоненты R_1, C_1 , а нижним – R_2, C_2 . Полное сопротивление (импеданс) верхнего плеча Z_1 составляет: $Z_1 = R_1 + X_{C_1} = R_1 + 1/j\omega C_1$, нижнего - $Z_2 = R_2 + j\omega C_2$, где ω – угловая (круговая) частота, $\omega = 2\pi f$, f – частота входного напряжения $U_{вх}$.

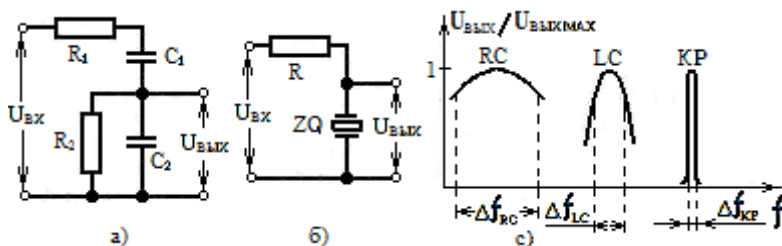


Рис.19. Частотные избиратели RC и ZQ типов

Следовательно, коэффициент передачи делителя (моста Вина):

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (34)$$

Если для простоты положить $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$, то (34) примет вид:

$$K(\omega) = \frac{1}{3 + j\left(\omega CR - \frac{1}{\omega CR}\right)} \quad (35)$$

Анализ (35) показывает, что зависимость $K(\omega)$ имеет экстремум, то есть мост Вина обладает как бы резонансом, подобным резонансу, наблюдаемому в колебательном LC -контуре. Коэффициент передачи делителя будет максимальным и вещественным, если выражение в скобках

станет равным нулю, что возможно при некоторой определенной частоте ω_0 , т.е.

$$\omega_0 CR = 1/(\omega_0 CR) \quad (36)$$

Следовательно, частота квазирезонанса (как бы резонанса)

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/(RC) \quad (37)$$

причём, как следует из (35), на этой частоте $K = \frac{1}{3}$.

Действительно, если частота входного напряжения равна нулю, то сопротивление конденсаторов C_1 , C_2 согласно (9) равно бесконечности. По мере роста частоты растёт проводимость по переменному току C_1 , что вызывает рост выходного напряжения. Одновременно растёт проводимость и C_2 , которая шунтирует выходную цепь делителя, понижая $U_{вых}$. Но, поскольку параллельно конденсатору включен резистор R_2 , то на сравнительно низких частотах шунтирующее действие проявляет себя в меньшей степени, чем рост проводимости C_1 , способствующий росту выходного напряжения. Однако, по мере увеличения частоты $U_{вх}$ шунтирующее действие C_2 становится определяющим, и напряжение $U_{вых}$ начинает уменьшаться. На частоте, равной бесконечности, оба конденсатора имеют нулевое сопротивление X_c , и выходное напряжение также становится равным нулю. Резистор R_1 в данном случае защищает источник $U_{вх}$ от короткого замыкания на его выходе.

Наилучшими избирательными свойствами обладает *кварцевый резонатор* (КР), который имеет самую высокую добротность, и, следовательно, самую «узкую» полосу пропускания. Основным конструктивным элементом КР является пластинка природного или синтетического кварца прямоугольной формы, вырезанная из монокристалла. Кварц обладает ярко выраженной анизотропией, т.е. свойства КР зависят от ориентации вырезанной пластинки относительно кристаллографических осей. Существуют несколько видов таких срезов, позволяющих получить различные параметры КР.

Действие КР основано на хорошо известном физическом явлении *пьезоэффекта*. Он заключается в том, что при приложении к пластинке механического напряжения на противоположных гранях пластинки появляется электрическое напряжение, пропорциональное степени деформации пластинки. Пьезоэффект обратим, т.е. приложенное к пластинке электрическое напряжение вызывает, в свою очередь, деформацию кристалла. Виды деформаций могут быть различными – сжатие, растяжение, изгиб и др. Это зависит от того, как была вырезана пластинка. Поскольку деформации имеют упругий характер, то, после снятия электрического напряжения, возвращаясь в исходное состояние, кристалл «проскакивает» равновесную форму, в результате чего имеет место свободный, зату-

хающий колебательный процесс деформаций с частотой, зависящий от размеров пластинки. Как следствие, на гранях пластинки возникает затухающее электрическое напряжение, изменяющееся по гармоническому закону. Поскольку размеры пластинки постоянны, то эти колебания происходят в очень узкой полосе частот, значительно более узкой, чем у колебательного контура. Следовательно, если к кристаллу прикладывать электрическое напряжение изменяющейся частоты, то наибольшая амплитуда деформаций будет иметь место на частоте свободных колебаний пластинки. Как следствие, на этой частоте будет иметь место и максимальное значение амплитуды напряжения, действующего на её гранях, т.е. возникнет *резонанс*. Отсюда следует, что КР ведет себя подобно колебательному LC -контур, но с гораздо меньшей полосой пропускания, т.е. с более высокой *добротностью* (см. (33)).

При изготовлении КР на его грани наносят проводящие покрытия, к которым приваривают внешние выводы. Сам кристалл устанавливают в кристаллодержатель, и всю конструкцию помещают в корпус для защиты от внешней среды, на котором указывают резонансную частоту (часто в килогерцах). Как элемент электрической цепи КР представляет собой конденсатор, поскольку кварц является диэлектриком, а нанесённые на его грани проводящие покрытия играют роль обкладок. Резонансную частоту КР можно изменять в небольших пределах, включая параллельно или последовательно ему конденсатор. При этом добротность КР несколько снижается.



Рис.20. Кварцевые резонаторы

вого резонатора.

Кварцевые резонаторы (рис. 20) используют в прецизионных (особо точных) и стабильных по частоте генераторах, вырабатывающих сигналы как гармонического, так и импульсного характера. Первые находят применение, например, как задающие генераторы радиовещательных передатчиков, последние - в устройствах отсчета времени, в цифровых измерительных приборах, микропроцессорной технике. Например, точность измерения цифровыми приборами различных электрических величин напрямую зависит от стабильности частоты колебаний КР, в компьютерах «темп» выполнения элементарных операций задаётся именно кварцевым генератором.

На рис.19б изображена схема эксперимента по снятию АЧХ кварцевого резонатора ZQ, а на рис.19с приведены для сравнения амплитудно-частотные характеристики моста Вина, колебательного контура и кварце-

Поскольку размеры кристалла зависят в некоторой степени от температуры окружающей среды, следовательно, от неё зависит и резонансная частота КР. Поэтому в вышеуказанных устройствах эту зависимость минимизируют, создавая вакуум в корпусах некоторых КР. При этом исключается конвекция и уменьшается теплопроводность. В особых случаях КР помещают в термостаты. На основе упомянутого свойства КР построены устройства измерения температуры. Внешний вид кварцевых резонаторов в стеклянном и металлическом корпусах на частоту 1000 и 503,7кГц соответственно представлен на рис. 20.

2.4. Фазосдвигающие устройства

В ряде случаев в электронных устройствах разного назначения возникает необходимость изменения фазы переменных сигналов или, как говорят, - *сдвига фазы*. Устройства, реализующие эту функцию, называют *фазосдвигающими* устройствами – ФСУ. Использование ФСУ необходимо, например, для получения, незатухающих гармонических колебаний в так называемых RC-генераторах, для управления величиной выпрямленного напряжения в ИВЭП, для регулировки действующего значения переменного напряжения в силовых устройствах электроснабжения и так далее. Существуют нерегулируемые и регулируемые ФСУ. Первые являются, по сути, четырехполюсниками и обеспечивают постоянный сдвиг фазы выходного напряжения по отношению к входному, у вторых сдвиг фазы может меняться.

Получить сдвиг фазы можно, используя реактивные элементы. На практике удобнее использовать RC – цепи (такие, как на рис.16б), поскольку промышленность выпускает конденсаторы в широком диапазоне ёмкости $10^{-12} - 10^0 \text{Ф}$, в то время как катушки индуктивности изготавливают под конкретное устройство, и в широкой продаже они отсутствуют.

Если на вход RC-цепи (рис.16б), подать переменное напряжение u_{11} , изменяющееся по гармоническому закону, то по резистору и конденсатору будет проходить один и тот же ток, создавая на них падения напряжения u_R и u_C . В соответствии с (8), падение напряжения на конденсаторе (идеальном) отстаёт от тока (а, следовательно, и от падения напряжения на резисторе, поскольку резистор фазных сдвигов не вносит) на угол 90° . Сумма указанных падений напряжения равна входному напряжению u_{11} . На рис. 21а изображена векторная диаграмма рассматриваемой RC-цепи для произвольной фазы (произвольного положения вектора) входного напряжения u_{11} . На диаграмме – в соответствии с вышесказанным – угол между векторами U_R и U_C составляет 90° . При этом вектор U_C по причине отставания напряжения на конденсаторе от тока, протекающего по нему, повернут относительно вектора U_R по часовой

стрелке. Как следует из графика, выходное напряжение, каковым является падение напряжения на резисторе RC -цепи (рис.16б), опережает напряжение входное, сдвигаясь относительно него на некоторый угол. Величина этого угла зависит от величин R и C и для реальных значений составляет до 60° и более.

Если необходимо получить больший угол, например, 180° , то для этого используют *трёхзвенное* ФСУ, соединяя последовательно три RC -цепи так, как показано на рис.21б.

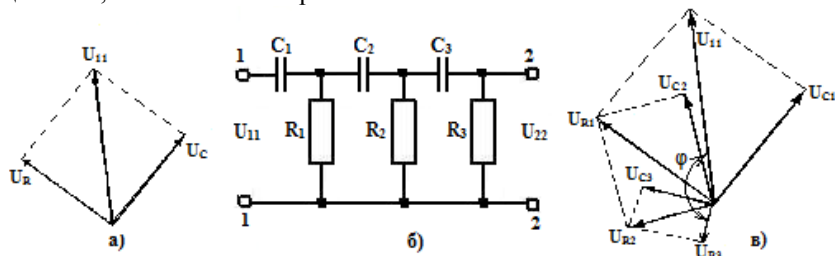


Рис. 21. Нерегулируемая фазосдвигающая RC -цепь

Как видим, выходное напряжение каждой предыдущей RC -цепи (звена) является входным напряжением для последующей цепи. Векторная диаграмма трёхзвенного ФСУ приведена на рис.21в. Для наглядности вектор входного напряжения U_{11} ориентирован так же, как и на рис.21а. Выходным напряжением u_{22} ФСУ является падение напряжения на резисторе R_3 . Это напряжение, как следует из анализа рис.20в, сдвинуто на угол φ относительно входного напряжения u_{11} ФСУ, опережая его, примерно, на 160° (при соответствующих значениях R и C этот угол может быть больше). В качестве R_3 зачастую используют входное сопротивление того устройства, для которого осуществляется сдвиг фазы, поэтому ФСУ может содержать только два резистора.

Необходимо иметь в виду, что наряду со сдвигом фазы происходит уменьшение выходного напряжения относительно входного, поскольку каждая RC -цепь одновременно является и делителем напряжения.

При выделении переменной составляющей из пульсирующего сигнала (рис.16) также имеет место сдвиг фазы. Но, поскольку всегда стремятся, по возможности, получить максимальный коэффициент передачи RC -цепи как четырехполюсника с целью получения максимальной амплитуды переменной составляющей, то ёмкость конденсатора выбирают как можно большей. Как следствие модуль вектора U_C оказывается существенно меньше модуля вектора U_R , поэтому сдвигом по фазе можно пренебречь (см. рис.21а).

В регулируемых ИВЭП выпрямленное и сглаженное выходное напряжение питания может плавно или ступенчато изменяться благодаря

тому, что в состав устройства ИВЭП вводят различного рода регулируемые ФСУ. Один из вариантов такого ФСУ изображён на рис.22а.

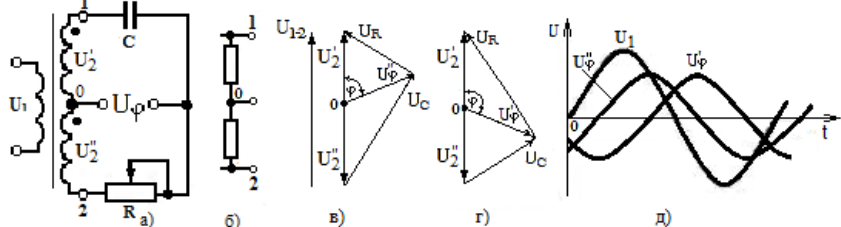


Рис.22. Регулируемое фазосдвигающее устройство

Вторичные обмотки трансформатора, как видно из рисунка, намотаны согласно. Они имеют одинаковое количество витков и соединены последовательно с выводом средней (нулевой) точки. Следовательно, вторичные напряжения $u'_2 = u''_2$ относительно средней точки изменяются *противофазно*, и их векторы должны быть ориентированы так, как показано на векторной диаграмме рис.22в, 22г.

Результирующее вторичное напряжение u_{12} формально равно сумме напряжений u'_2 и u''_2 . Оно уравнивается суммой падений напряжений u_R и u_C , векторы которых ориентированы ортогонально друг другу. При перемещении движка потенциометра R изменяется падение напряжения на нём, а, значит, и модуль вектора U_R . Но, поскольку угол между векторами U_R и U_C должен оставаться неизменным и равным 90° , то при изменении положения движка потенциометра вектор выходного напряжения ФСУ - U_ϕ поворачивается вокруг точки «0». Это означает, что напряжение u_ϕ сдвигается по фазе относительно напряжения u'_2 , которое, в свою очередь (будем так полагать), совпадает по фазе с входным напряжением ФСУ - u_1 (что имеет место в идеальном случае - отсутствии потерь в трансформаторе). На рис.22в и 22г показаны векторные диаграммы напряжений ФСУ для двух положений движка потенциометра R . Как следует из рисунков, максимальный сдвиг по фазе в идеале составляет 180° . На рис.22д приведены осциллограммы (временные графики) входного и выходных напряжений ФСУ, соответствующих векторным диаграммам рис.22в и 22г (напряжение u_1 совпадает по фазе с напряжением u'_2).

Изменять фазу выходного сигнала можно «вручную», вращая движок потенциометра R , но можно и дистанционно, используя вместо потенциометра выходную цепь транзистора. Если его входной сигнал будет изменяться, то изменяться будет и сопротивление транзистора (слово «транзистор» можно перевести как *преобразующий сопротивление* –

transform resistor). Следовательно, изменяться будет и фаза выходного напряжения ФСУ - U_ϕ .

Получить противофазные напряжения (иногда говорят - *парафазные*) можно без трансформатора, используя последовательное соединение двух резисторов с выводом средней точки (рис.22б). Однако, этот вариант ФСУ, в сравнении с предыдущим, имеет ряд недостатков, главный из которых - отсутствие так называемой *гальванической развязки*. Дело в том, что в схеме рис.22а входная и выходная цепи (u_{11} и u_ϕ) не имеют между собой гальванического (омического) контакта, т.е. они *гальванически развязаны*, и соответствующие напряжения могут быть использованы в разных цепях регулируемого ИВЭП. У ФСУ на основе схемы рис.22б такой возможности нет. Достоинством же данного варианта является простота исполнения ФСУ и меньшие его массогабаритные параметры.

В заключение следует отметить ключевую роль конденсаторов, которую они играют в системах в электроснабжения промышленных предприятий. В подавляющем большинстве случаев нагрузка этих систем – а это различного рода двигатели – имеет активно-индуктивный характер. Как следствие, появляется сдвиг по фазе между напряжением и током нагрузки, что приводит к уменьшению главного показателя эффективности использования электроэнергии – коэффициента мощности. Анализ рис.17б показывает, что если параллельно нагрузке подключить конденсатор, то можно существенно уменьшить реактивную составляющую тока нагрузки и, тем самым, увеличить коэффициент мощности.

3. Идентификация и проверка исправности пассивных компонентов

Идентификация (в данном случае - определение вида) компонентов, предназначенных для установки их с помощью внешних проводочных выводов в заранее подготовленные отверстия в печатной плате с последующей пайкой, обычно не встречает затруднений и осуществляется с помощью справочника по маркировке на их корпусах. Подобный подход не всегда возможен для компонентов в миниатюрном исполнении (SMD), поскольку размеры их корпусов не позволяют наносить на них полноценную маркировку.

Решение задачи идентификации и проверка исправности компонентов возможны с помощью средств измерений, в частности, мультиметра. Последний, как известно, включает в себя амперметр, вольтметр и омметр, т.е. с его помощью можно проводить измерения токов, напряжений и сопротивлений. Применимы как электромеханические (стрелочные) приборы, так и электронные цифровые. Первые позволяют получить более наглядные результаты тестирования, у вторых большее разрешение (под разрешением, в данном случае, понимается минимальная измеряемая величина), большее входное сопротивление в режиме вольтметра и более высокие цифры измеряемых сопротивлений.

Чаще всего для решения поставленных задач мультиметр используется в режиме омметра. На *щупах* любого омметра всегда действует постоянное напряжение с известной полярностью. Величину этого напряжения и его полярность можно определить с помощью вольтметра.

Перед проведением измерений устанавливают ожидаемый предел измерения сопротивлений, после чего щупы омметра замыкают накоротко. Дисплей цифрового прибора должен показать нулевое значение сопротивления, стрелку же электромеханического омметра придется устанавливать на «нуль» шкалы, вращая ручку переменного резистора с соответствующей маркировкой (эту процедуру придется повторить при смене предела измерения).

Поскольку сопротивление резистора не должно зависеть от полярности приложенного напряжения, то, для проверки предположения, что данный компонент является резистором, необходимо измерить его сопротивление дважды, поменяв местами щупы омметра. При полном равенстве показаний предположение подтверждается. Правда, есть вероятность того, что данный компонент может оказаться ограничителем напряжения, представляющим собой два встречно-параллельно включенных диода, которые могут открываться напряжением на щупах, однако их прямые сопротивления, хоть и не намного, но будут отличаться. Для

полной ясности, возможно, придется снять ВАХ компонента, у резистора она должна быть линейной для каждого из подключений.

Отказы резисторов чаще всего имеют место при их перегреве. При этом у резисторов с проволочными выводами наблюдается почернение корпуса. Однако, этот признак не всегда свидетельствует о полном отказе. Если необходимо протестировать резистор, установленный на печатную плату и нет возможности его выпаять, то можно перерезать печатный проводник со стороны одного из выводов и осуществить измерение, после чего восстановить соединение посредством пайки.

Индуктивные SMD компоненты при тестировании с помощью омметра должны вести себя как резисторы с весьма малым (доли ома - омы) сопротивлением, величина которого не должна меняться при смене подключаемых к щупам выводов компонента. Данный тест является необходимым, но не достаточным. Окончательный результат может быть получен при измерении сопротивления на переменном токе (такую возможность дают только цифровые приборы) с последующим сравнением его с сопротивлением постоянному току.

Методика тестирования конденсаторов основывается на анализе выражения (7), и анализе рис.10б. Перед проведением тестирования необходимо установить максимальный предел измерения сопротивлений, но надо иметь в виду, что у стрелочных приборов такой предел можно использовать лишь при условии подключения внешних элементов питания. При касании щупами омметра предварительно разряженного конденсатора (разрядить конденсатор можно простым касанием его выводов пинцетом) имеет место «бросок» зарядного тока, что вызывает быстрое отклонение стрелки почти до нулевой отметки шкалы. То есть, создаётся впечатление, что в момент касания выводов конденсатор представляет собой участок короткого замыкания. По мере заряда конденсатора ток заряда уменьшается (рис.10б), т.е. как бы растёт «сопротивление» конденсатора. Стрелка прибора после броска в момент касания выводов начинает отклоняться влево (со скоростью тем меньшей, чем больше ёмкость конденсатора) в сторону увеличения сопротивления, пока не достигнет отметки « ∞ », что соответствует бесконечно большому сопротивлению и нулевому значению зарядного тока. Заметный «бросок» тока имеет место при тестировании конденсаторов ёмкостью не менее 0,01мкФ, при меньшей ёмкости необходимо использовать цифровые приборы, а также – измеритель ёмкости.

Тестирование конденсаторов большой ёмкости – порядка сотен, тысяч микрофард и выше – производят аналогичным образом. Надо только иметь в виду, что процесс их заряда длится гораздо дольше, и их «сопротивление» из-за значительных токов утечки никогда не примет

бесконечно большое значение. Вполне понятно, что предпочтение следует отдавать конденсаторам с минимальными токами утечки.

Отказы конденсаторов встречаются редко и по большей части имеют место у конденсаторов большой ёмкости в виде внутреннего обрыва вывода или уменьшения ёмкости с течением времени. Первая причина легко выявляется омметром либо, если конденсатор установлен в каком-либо устройстве, чьи параметры изменились вследствие отказа, простым подключением параллельно «подозрительному» конденсатору заведомо исправного. Факт уменьшения ёмкости устанавливается с помощью измерителя ёмкости.

Вопросы для самоконтроля

- В чем различие между активными и пассивными компонентами электронных устройств? Приведите примеры компонентов.
- Перечислите параметры резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности с указанием их размерности.
- Чему равно сопротивление SMD-резистора, у которого на корпусе нанесено число 353?
- неполярный конденсатор постоянной ёмкости используется в аппаратуре, находящейся в помещении с постоянной температурой. Какой ТКЕ должен быть у конденсатора – как можно больший, как можно меньший, близкий к нулю, положительный, отрицательный?
- Двигатель автомобиля заводят, подключая к его стартеру предварительно заряженный конденсатор. Какую ёмкость должен иметь конденсатор, если время работы стартера составляет полторы секунды, а средний потребляемый им ток – 160А при напряжении 12В?
- Что называют делителями напряжения, каково их назначение, устройство, принцип действия и применение.
- Что называют сглаживающим фильтром, его назначение, устройство и принцип действия.
- Какова физическая причина появления э.д.с. самоиндукции? Прodelайте выкладки для получения выражений (27), (28).
- Докажите, что постоянные времени $\tau = \frac{L}{R}$ и $\tau = RC$ действительно имеют размерность времени.
- К цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора сопротивлением один мегаом (1М) и конденсатора ёмкостью сто микрофарад (100мк) подключили источник постоянного напряжения сто вольт (100В). До какого напряжения зарядится конденсатор через десять секунд после подключения источника?
- Что называют дросселем?
- Почему конденсатор сглаживающего фильтра включают параллельно нагрузке, а дроссель последовательно?
- Какой должна быть схема сглаживающего фильтра, содержащая полярный конденсатор и низкочастотный дроссель?
- По какому признаку мы судим о том, что сигнал, изображенный на рис.16а является пульсирующим, а сигнал на рис.16в – переменным?
- Каким образом удаётся уменьшить размеры «балласта», используемого в компактных люминесцентных лампах по сравнению с размерами «балласта» в обычных люминесцентных лампах?

- Какова частота напряжения U_k , подаваемого на параллельный колебательный контур (рис.17а) – меньше f_0 или больше, если судить по векторной диаграмме рис.17б?

- Какова частота напряжения U_k , подаваемого на последовательный колебательный контур (рис.18а) – меньше f_0 или больше, если судить по векторной диаграмме рис.18б?

- Докажите, что при резонансе ток последовательного (параллельного) контура становится максимальным (минимальным).

- На каком основании на стр. 40 утверждается, что конденсатор C_1 (рис.17д) уменьшает влияние ёмкости антенны на резонансную частоту колебательного контура?

- Докажите справедливость утверждения о том, что сужение полосы пропускания колебательного контура ведет к потере принимаемой радиоприемником информации. Подсказка: в учебнике физики проработать материал по сложению колебаний и выяснить значение термина «модуляция».

- На стр. 43 сообщается, что резонансную частоту КР можно изменять с помощью конденсатора. Каким требованиям должен отвечать этот конденсатор? Как его необходимо включать по отношению к КР при необходимости уменьшения (увеличения) частоты?

- Каким, примерно, положением движка резистора R на схеме рис.21а соответствуют векторные диаграммы рис.21в, 21г?

Библиографический список

1. Резисторы: Справочник/ В.В. Дубровский и др.- 2-е изд. перераб. и доп.- М.: Радио и связь, 1991.- 527с.
2. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник/ Н.Н. Акимов и др.- Мн.: Беларусь, 1994.- 591с.
3. Конденсаторы: Справочник/ И.И. Четвертков и др.- М.: Радио и связь, 1993.- 392с.
4. Маркировка электронных компонентов.- М.: Додэка, 1999.- 160с.
5. Скрипников Ю.Ф. Колебательный контур.- М.: Энергия, 1970.- 128с.
6. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника.- М.: Высшая школа, 1991.- 622с.
7. Леванов В.В. Одноканальные аналоговые и цифровые осциллографы как средство измерения параметров электрических сигналов.- Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2005.-46с.

Автор: Леванов Вадим Васильевич

**Пассивные RLC компоненты
и функциональные устройства
на их основе**

Учебное пособие

Издается полностью в авторской редакции

г. Магнитогорск, 2011 год
ФГБОУ ВПО «МГТУ»
Адрес: 455000 Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра электроники и микроэлектроники
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru