

Тема 2. Радиокomпоненты радиоэлектронных средств

Лекция 7. Конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы и дроссели

Вопросы:

7.1 Конденсаторы и их основные параметры.

7.2 Катушки индуктивности, трансформаторы и дроссели.

Литература

1. Петров К.С. Радиоматериалы и радиокomпоненты. – М.: Питер, 2003. – 512 с.

7.1 Конденсаторы и их основные параметры.

Конденсатор – устройство для накопления энергии электрического поля, представляющее собой двухполюсник с определенным значением емкости и малой омической проводимости.

Принцип действия конденсатора основан на способности накапливать электрические заряды на металлических обкладках при приложении к ним напряжения.

Количественной мерой способности накапливать заряд является **емкость конденсатора**. В простейшем случае конденсатор представляет собой две металлические пластины, разделенные слоем диэлектрика, как показано на рисунке 7.1.

По назначению конденсаторы подразделяют на контурные, разделительные, блокировочные, фильтровые и т.д., по характеру изменения емкости – на постоянные, переменные и полупеременные (подстроечные).

Постоянные конденсаторы — основной класс конденсаторов, не меняющие своей ёмкости (кроме как в течение срока службы). *Переменные конденсаторы* — конденсаторы, которые допускают изменение ёмкости в процессе функционирования аппаратуры. Управление ёмкостью может осуществляться механически, электрическим напряжением (вариконды, варикапы) и температурой (термоконденсаторы). Применяются, например, в радиоприемниках для перестройки частоты резонансного контура. *Подстроечные конденсаторы* — конденсаторы, ёмкость которых изменяется при ра-

зовой или периодической регулировке и не изменяется в процессе функционирования аппаратуры. Их используют для подстройки и выравнивания начальных ёмкостей сопрягаемых контуров, для периодической подстройки и регулировки цепей схем, где требуется незначительное изменение ёмкости.

На рисунке 7.1 показан внешний вид основных конструкций конденсаторов. При этом на рисунке 7.1,а-в показаны постоянные конденсаторы: металлобумажные, пленочные и электролитические соответственно, на рисунке 7.1,г показан вид ионистора, а на рисунке 7.1,д – подстроечный конденсатор.



Рисунок 7.1 – Внешний вид основных конструкций конденсаторов

По материалу диэлектрика различают три вида конденсаторов: с твердым (стекло, слюда, керамика, тонкие слои неорганической пленки), газообразным и жидким (электролитические и оксидно-полупроводниковые) диэлектриком.

Твердый диэлектрик может быть с помощью твердого неорганического заполнения: стекло, слюда, керамика, тонкие слои неорганической пленки, а также с помощью твердого органического заполнения: бумаги, совокупности металл-бумага, пленки. В качестве жидкого диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это или электролит (в электролитических конденсаторах) или слой полупроводника (в оксидно-полупроводниковых), нанесённый непосредственно на оксидный слой. Анод изготавливается, в зависимости от типа конденсатора, из алюминиевой, ниобиевой или танталовой фольги или спеченного порошка.

Особым классом конденсаторов, разработка которых началась в 1997 году, являются *ионисторы* (супер- или ультра-конденсаторы), представляющие собой конденсаторы с органическим электролитом, «обкладками» в котором служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и

электролита. В связи с тем, что толщина двойного электрического слоя, т.е. расстояние между «обкладками» конденсатора, очень мала, ионисторы имеют большие емкости по сравнению с обычными конденсаторами того же размера. К тому же использование двойного электрического слоя вместо обычного диэлектрика позволяет намного увеличить площадь поверхности электрода, например, путем использования так пористых материалов, как активированный уголь или вспененные материалы. Типичная емкость ионистора – несколько фарад при номинальном напряжении 2..10 В. Для сравнения электролитические конденсаторы имеют емкость порядка сотен пикофарад.

С появлением ионисторов стало возможным использовать конденсаторы в электрических цепях не только как преобразующий элемент, но и как источник тока. Такие элементы имеют несколько преимуществ над обычными химическими источниками тока – гальваническими элементами и аккумуляторами. В частности, они имеют высокие скорости зарядки и разрядки, малую деградацию даже после сотен тысяч циклов заряда/разряда, малый вейм, низкую токсичность материалов, высокую эффективность (более 95%), неполярность. Все эти достоинства делают возможным их использование в сотовых телефонах и ПКП.

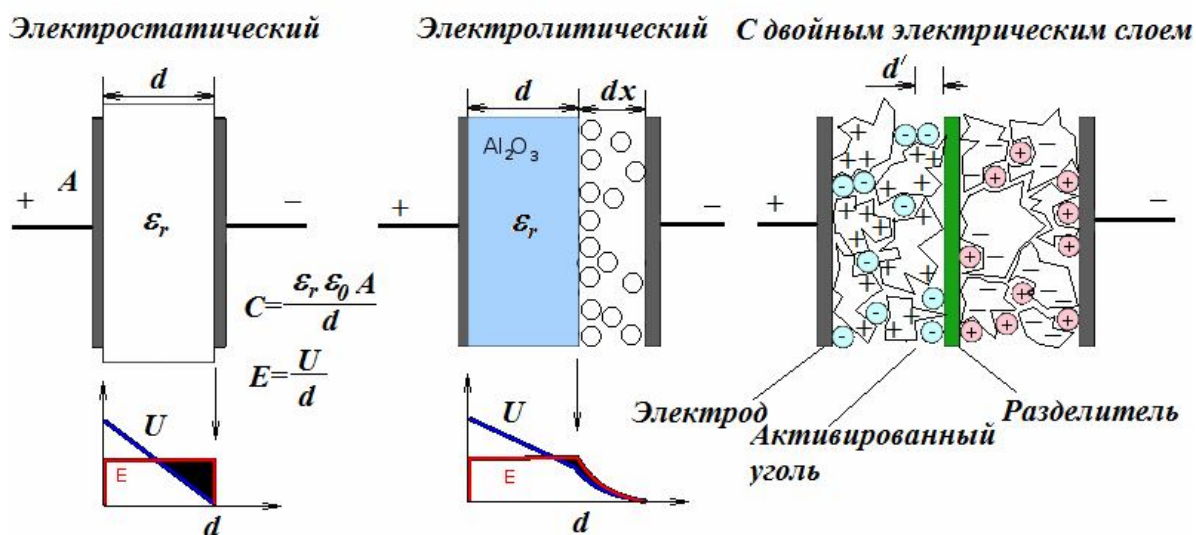





Рисунок 7.2 – Сравнение конструктивных схем трех конденсаторов: электростатического, электролитического и ионистора

В России условные графические обозначения конденсаторов на схемах должны соответствовать либо ГОСТ 2.728-74 либо международному стандарту IEEE 315-1975. УГО конденсаторов приведены в Таблице 7.1.

Т а б л и ц а 7.1 – Обозначения конденсаторов на схемах по ГОСТ 2.728-74

Обозначение	Описание
	Конденсатор постоянной ёмкости
	Поляризованный конденсатор
	Подстроечный конденсатор переменной ёмкости

Основными параметрами конденсаторов являются ёмкость и рабочее напряжение. Кроме того, свойства конденсатора характеризуют рядом паразитных параметров.

Ёмкость простейшего конденсатора, измеряемая в пФ, определяется соотношением:

$$C = 0,885 \frac{\varepsilon S}{d}, \quad (7.1)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S - площадь обкладок конденсатора (см^2); d - расстояние между обкладками (см).

На электрических принципиальных схемах номинальная ёмкость конденсаторов обычно указывается в микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 10^6 \text{ пФ}$) и пикофарадах, но нередко и в нанофарадах. При ёмкости не более $0,01 \text{ мкФ}$, ёмкость конденсатора указывают в пикофарадах, при этом допустимо не указывать единицу измерения, т.е. постфикс «пФ» опускают. При обозначении номинала ёмкости в других единицах указывают единицу измерения (пикоФарад). Для электролитических конденсаторов, а также для высоковольтных конденсаторов на схемах, после обозначения номинала ёмкости, указывают их максимальное рабочее напряжение в вольтах (В) или киловольтах (кВ). Например так: « $10 \text{ мк} \times 10 \text{ В}$ ». Для переменных конденсаторов указывают диапазон

изменения ёмкости, например, так: «10 – 180». В настоящее время изготавливаются конденсаторы с номинальными ёмкостями из десятично логарифмических рядов значений E3, E6, E12, E24, т.е. на одну декаду приходится 3, 6, 12, 24 значения, так, чтобы значения с соответствующим допуском (разбросом) перекрывали всю декаду.

По допустимым отклонениям от номинала $\pm \Delta C$ конденсаторы разделяют на классы, как показан в Таблице 7.2.

Т а б л и ц а 7.2 – Классы точности конденсаторов

Класс	0,01	0,02	0,05	00	0	I	II	III	IV	V	VI
Допуск, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	-10 +20	-20 +30	-20 +50

Электрическая прочность конденсатора характеризуется значением напряжения пробоя и зависит в основном от изоляционных свойств диэлектрика. В технической документации указывают номинальное напряжение, т.е. такое максимальное напряжение, при котором конденсатор может работать длительное время при соблюдении условий, указанных в технической документации.

Стабильность ёмкости определяется ее изменением под воздействием внешних факторов. Наибольшее влияние оказывает температуры. Ее влияние оценивают **температурным коэффициентом ёмкости (ТКЕ)**:

$$\alpha_C = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta T}. \quad (7.2)$$

У высокочастотных конденсаторов величина ТКЕ не зависит от температуры и указывается на корпусе конденсатора окраской корпуса в определенный цвет с нанесением цветной метки. У низкочастотных конденсаторов температурная зависимость ёмкости носит нелинейный характер и оценивается величиной **температурной нестабильности** (предельное отклонение ёмкости при крайних значениях температуры).

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники. Основными из них являются:

- построение совместно с катушками индуктивности и/или резисторами различных цепей с частотно-зависимыми свойствами (фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т.п.);
- получение импульсов большой емкости (при быстром разряде конденсатора) в фотовспышках, импульсных лазерах с оптической накачкой, генераторах Маркса и т.д.;
- выполнение элемента памяти или устройства хранения электрической энергии (на основе способности длительное время сохранять заряд);
- применение для компенсации реактивной мощности и в фильтрах высших гармоник;
- выполнение измерительного преобразователя для измерения малых перемещений (изменение расстояния приводит к изменению емкости), измерения влажности (изменение влажности отражается в изменении относительной диэлектрической проницаемости);
- реализация логики работы некоторых защит.

7.2 Катушки индуктивности, трансформаторы и дроссели.

Катушка индуктивности — винтовая, спиральная или винтоспиральная катушка из свёрнутого изолированного проводника, обладающая значительной индуктивностью при относительно малой ёмкости и малом активном сопротивлении. Такая система способна запасать магнитную энергию при протекании электрического тока.

Применяются для создания фильтров, элементов задержки сигналов, запоминающих элементов, осуществления связи между цепями через магнитный поток и т.д.

В отличие от резисторов и конденсаторов они не являются стандартизованными изделиями, а



Рисунок 7.3 – Катушка индуктивности на материнской плате компьютера

изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или иных преобразований электрических сигналов, токов и напряжений. Для увеличения индуктивности применяют сердечники из ферромагнитных материалов: электротехнической стали, пермаллоя, карбонильного железа, ферритов. Также сердечники используют для изменения индуктивности катушек в небольших пределах. Пример катушки индуктивности на материнской плате компьютера показан на рисунке 7.3.

На электрических принципиальных схемах катушки индуктивности обозначаются символом, показанным на рисунке 7.4.



Рисунок 7.4 – Обозначение катушки индуктивности

Разновидностями катушек индуктивности являются:

- *контурные катушки индуктивности*. Используются совместно с конденсаторами для получения резонансных контуров. Они должны иметь высокую стабильность, точность и добротность;
- *катушки связи*. Применяют для обеспечения индуктивной связи между отдельными цепями и каскадами. Такая связь позволяет, например, разделить по постоянному току цепи базы и коллектора и т.д.;
- *вариометры*. Катушки, индуктивность которых можно изменять в процессе эксплуатации для перестройки колебательных контуров. Они состоят из двух катушек, соединённых последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая располагается внутри первой и вращается (ротор). При изменении положения ротора относительно статора изменяется величина взаимной индукции, а, следовательно, индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4..5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника;

- *дроссели*. Катушки индуктивности с одной обмоткой, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Обычно включаются в цепях питания усилительных устройств. Предназначены для защиты источников питания от попадания в них высокочастотных сигналов. На низких частотах они используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют металлические или ферритовые сердечники. Конструкция дросселя с ферритовым сердечником показана на рисунке 7.5;

- *сдвоенные дроссели*. Две намотанных встречно катушки индуктивности, используются в фильтрах питания. За счёт встречной намотки и взаимной индукции более эффективны при тех же габаритных размерах;

- *катушки индуктивности для гибридных интегральных схем (ГИС)*. Предназначены для работы на частотах 10..100 МГц и выполняются в виде тонкопленочных спиральных катушек. На площади 1 см² располагается не более 10 витков. Добротность таких катушек не превышает 20..30. Предпочтителен второй вариант исполнения – в виде торроидальной катушки на ферритовых сердечниках.

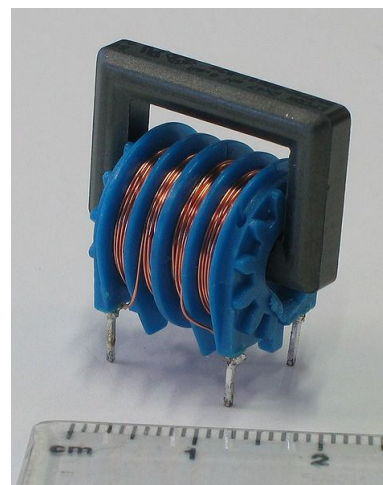


Рисунок 7.5 – Электрический дроссель с ферромагнитным сердечником

В последнее время наметилась тенденция замены катушек индуктивности специальными схемами на транзисторах (гираторы) и электромеханическими, пьезоэлектрическими и акустоэлектрическими фильтрами, основанными на принципе механических упругих колебаний и механического резонанса. Скорость распространения упругих колебаний в твердом теле примерно в 100 тыс. раз меньше скорости распространения электромагнитных волн, что позволяет создавать очень компактные механические резонаторы с распределенными параметрами, обладающими добротностью порядка 1000. Развитие микроэлектроники привело к появлению фильтров на приборах с заря-

довой связью и фильтров на поверхностных акустических волнах. В ИМС находят широкое применение активных RC-фильтры, в которых используют операционные усилители с глубокой частотно-зависимой обратной связью.

Основным параметром катушки индуктивности является ее **индуктивность**, которая определяет, какой поток магнитного поля создаст катушка при протекании через нее тока силой 1 А:

$$L = L_0 W^2 D \cdot 10^{-3}, \quad [\text{мкГн}] \quad (7.3)$$

где W – число витков в катушке; D – диаметр катушки (см); L_0 – коэффициент, зависящий от отношения длины катушки l к ее диаметру D . Для однослойных катушек

$$L_0 = \frac{1}{0,1(l/D + 0,45)}. \quad (7.4)$$

Оптимальным в этом случае является отношение $l/D = 0,6..1,0$, а диаметр катушки – от 1 до 2 см. При расчете диаметр катушки принимается равным диаметру каркаса. Типичные значения индуктивностей катушек – от десятых долей мкГн, до десятков Гн.

В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным. Наличие паразитных эффектов ведёт к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь $R_{\text{пот}}$.

Потери складываются из потерь в проводах, диэлектрике, сердечнике и экране.

Потери в проводах вызваны тремя причинами:

- провода обмотки обладают омическим сопротивлением.
- сопротивление провода обмотки переменному току возрастает с ростом частоты, что обусловлено скин-эффектом, суть которого состоит в том, что ток протекает не по всему сечению проводника, а по кольцевой части поперечного сечения.

- в проводах обмотки, свитой в спираль, проявляется эффект близости, суть которого состоит в вытеснении тока под воздействием вихревых токов и магнитного поля к периферии провода, прилегающей к каркасу, в результате чего сечение, по которому протекает ток, принимает серповидный характер, что ведёт к дополнительному возрастанию сопротивления провода.

Потери в диэлектрике обусловлены тем, что между соседними витками катушки существует паразитная ёмкость, что приводит к утечкам переменного тока между витками.

Потери в сердечнике складываются из потерь на вихревые токи, потерь на гистерезис и начальных потерь.

Потери в экране обусловлены тем, что ток, протекающий по катушке, индуцирует ток в экране.

С сопротивлениями потерь тесно связана другая характеристика - **добротность**. Добротность катушки индуктивности определяет отношение между активным и реактивным сопротивлениями катушки. Добротность равна:

$$Q = \frac{\omega L}{R_{nom}}. \quad (7.5)$$

Практически величина добротности лежит в пределах от 30 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями, намоткой вида "универсаль", применением посеребренного провода, применением многожильного провода вида "литцендрат".

Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ) – это параметр, характеризующий зависимость индуктивности катушки от температуры. Температурная нестабильность индуктивности обусловлена целым рядом факторов: при нагреве увеличивается длина и диаметр провода обмотки, увеличивается длина и диаметр каркаса, в результате чего изменяются шаг и диаметр витков; кроме того при изменении температуры изменяются диэлек-

трическая проницаемость материала каркаса, что ведёт к изменению собственной ёмкости катушки.

Применение катушек индуктивности:

- (совместно с конденсаторами и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.;

- в импульсных стабилизаторах как элемент, накапливающий энергию и преобразующий уровни напряжения;

- применение в качестве источника высокого напряжения небольшой мощности в слаботочных схемах, когда создание отдельного высокого питающего напряжения в блоке питания невозможно или экономически нецелесообразно. При этом катушка индуктивности питается импульсным током от транзисторного ключа. На катушке из-за самоиндукции возникают выбросы высокого напряжения, которые можно использовать в схеме, например, выпрямив и сгладив;

- изготовление электромагнитов;

- источник энергии для возбуждения индуктивно-связанной плазмы;

- применение в качестве антенн для излучения и приема электромагнитных волн (рамочные антенны);

- для разогрева электропроводящих материалов в индукционных печах;

- применение в качестве датчика перемещения (изменение индуктивности катушки может изменяться в широких пределах перемещением (вытаскиванием) сердечника);

- для построения трансформатора из двух и более индуктивно связанных катушек.

По определению ***трансформатор*** – электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно-связанных обмоток и предназначенные для изменения значений переменного напряжения и тока.

Трансформатор состоит из ферромагнитного магнитопровода (сердечника) и расположенных на нем обмоток. При конструктивном исполнении производитель выбирает между двумя базовыми конструкциями: стержневой и броневой. Схемы данных конструкций приведены на рисунке 7.6. Причем на рисунке с индексом «а» показана конструкция стержневого типа, а на рисунке с индексом «б» - броневого типа. На рисунках использованы следующие обозначения: 1 – обмотка высокого напряжения; 2 – обмотка низкого напряжения; 3 – сердечник.

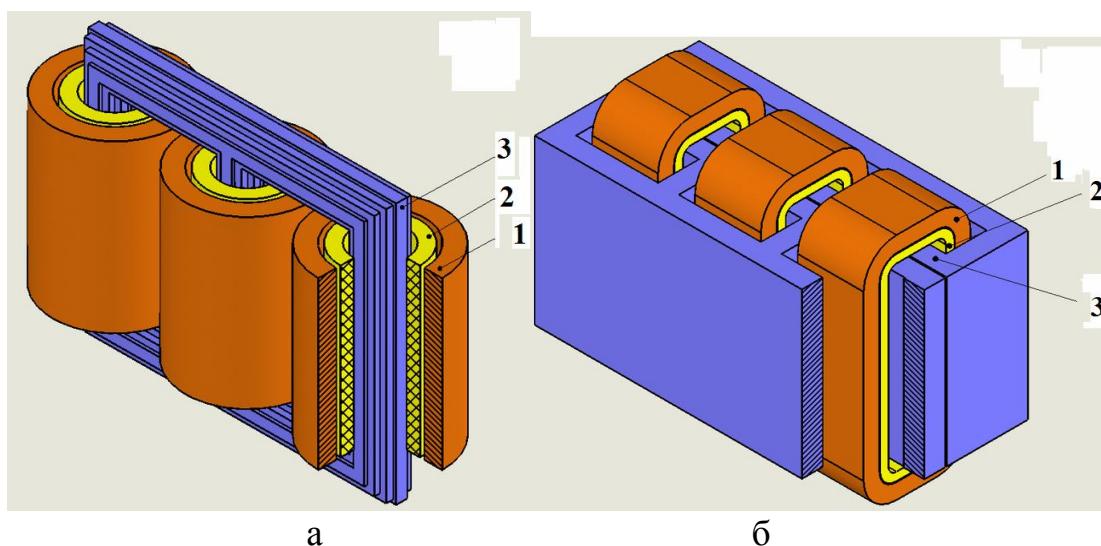


Рисунок 7.6 – Конструкции трехфазного трансформатора

Различия данных конструкций заключаются в процессе их изготовления: во-первых, обмотки стержневого типа заключают в себе сердечник, сердечник броневого типа заключает в себе обмотки; во-вторых, ось обмоток стержневого типа, как правило, имеет вертикальное положение, в то время как в броневой конструкции она может быть горизонтальной или вертикальной.

Работа трансформатора. На одну из обмоток, называемую *первичной обмоткой* подаётся напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создаёт переменный магнитный поток в магнитопроводе, сдвинутый по фазе, при синусоидальном токе, на 90° по отношению к току в первичной обмотке. В результате электромагнитной индукции, переменный магнитный поток в магнитопроводе создаёт во всех об-

мотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции пропорциональную первой производной магнитного потока, при синусоидальном токе сдвинутой на 90° в обратную сторону по отношению к магнитному потоку.

Виды трансформаторов:

- ***трансформаторы питания***. Применяют в блоках питания радиоустройств и служат для получения переменных напряжений, необходимых для нормального функционирования аппаратуры. Например, в телевизоре используются напряжения от 5 вольт, для питания микросхем и транзисторов, до 20 киловольт, для питания анода кинескопа. Все эти напряжения получают с помощью трансформаторов (напряжение 5 вольт с помощью сетевого трансформатора, напряжение 20 кВ с помощью строчного трансформатора). В блоке питания персонального компьютера обычно также применяется трансформатор, на который подаётся переменный ток от специального управляемого электронного генератора. Управление генератором производится так, чтобы выпрямленные напряжения были равны 5 и 12 вольтам. Блоки питания в устройствах, которые используют несколько различных напряжений, зачастую содержат трансформаторы со многими вторичными обмотками;

- ***согласующие трансформаторы***. Предназначены для изменения уровня напряжений (токов) электрических сигналов, несущих полезную информацию. Вместе с активными элементами (транзисторами, лампами) входят в состав устройств, усиливающих электрические колебания в широкой полосе частот;

- ***импульсные трансформаторы***. Предназначены для формирования и трансформации импульсов малой длительности.

Обозначение трансформатора на схемах показано на рисунке 7.7. Следует отметить, что число полуокружностей в каком-то грубом приближении символизирует число витков обмотки (больше витков — больше полуокружностей, но без строгой пропорциональности).

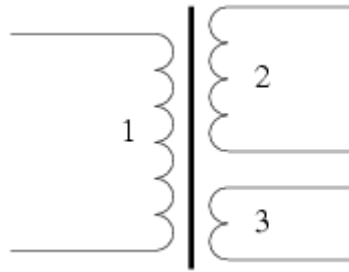


Рисунок 7.7 Условно-графическое обозначение трансформатора:
1 – первичная обмотка (обычно слева); 2, 3 – вторичные обмотки.

Для оценки параметров трансформатора используется Т-образная схема замещения, показанная на рисунке 7.8. На данном рисунке эквивалентная схема замещения трансформатора с подключенной нагрузкой показана со стороны первичной обмотки. На рисунке введены следующие обозначения: T – коэффициент трансформации; L_{12} – «полезная» индуктивность первичной

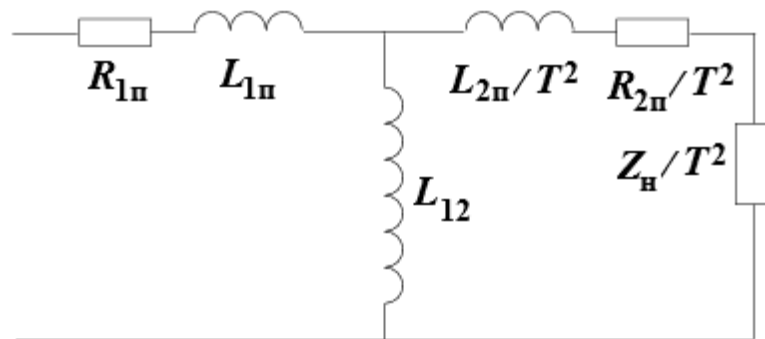


Рисунок 7.8 – Эквивалентная схема трансформатора

обмотки; $L_{1п}$, $L_{2п}$ – паразитные индуктивности первичной и вторичной обмоток (связанные между собой рассеянием); $R_{1п}$, $R_{2п}$ – паразитные сопротивления первичной и вторичной обмоток; $Z_{н}$ – импеданс нагрузки.

Потери в трансформаторе зависят, главным образом, от качества, конструкции и материала трансформаторного железа и за счёт нагрева проводов. Потери в трансформаторе, где «железо» монолитное значительно больше, чем в трансформаторе, где оно составлено из многих секций (так как в этом случае уменьшается количество вихревых токов). Для снижения потерь магнитопровод изготавливается из специальных сортов трансформаторной стали с добавлением кремния, который повышает удельное сопротивление

ние железа электрическому току, а сами пластины лакируются для изоляции друг от друга.

Режимы работы трансформатора:

1. *Режим холостого хода.* Характеризуется разомкнутой вторичной цепью трансформатора, вследствие чего ток в ней не течёт. С помощью опыта холостого хода можно определить КПД трансформатора, коэффициент трансформации, а также потери в стали.

2. *Нагрузочный режим.* Характеризуется замкнутой на нагрузке вторичной цепи трансформатора. Основной рабочий режим.

3. *Режим короткого замыкания.* Получается в результате замыкания вторичной цепи накоротко. С его помощью определяются потери полезной мощности на нагрев проводов в цепи трансформатора.

Эксплуатация. Срок службы трансформатора может быть разделен на две категории:

1. *Экономический срок службы* — экономический срок службы заканчивается, когда капитализированная стоимость непрерывной работы существующего трансформатора превысит капитализированную стоимость нового капиталовложения. На практике это обычно означает, что стоимость общих потерь старого трансформатора становится слишком высокой. Увеличивается доля косвенных рисков и убытков, связанных со временем простоя электрооборудования.

2. *Технический срок службы.*

Работа в параллельном режиме. Поскольку при малой нагрузке мощный трансформатор имеет большие потери холостого хода, то вместо него подключают несколько трансформаторов меньшей мощности, которые отключаются, если в них нет необходимости.

Особенности подключения:

1. параллельно могут работать только трансформаторы, имеющие одинаковую угловую погрешность между первичным и вторичным напряжениями;

2. полюса с одинаковой полярностью на сторонах высокого и низкого напряжения должны быть соединены параллельно;
3. трансформаторы должны иметь примерно тот же самый коэффициент передачи по напряжению;
4. напряжение полного сопротивления короткого замыкания должно быть одинаковым, в пределах $\pm 10\%$;
5. отношение мощностей трансформаторов не должно отклоняться более чем 1:3;
6. переключатели числа витков должны стоять в положениях, дающих коэффициент передачи по напряжению как можно ближе. Отклонение от вышеприведенных требований возможны при условии, что имеются в наличии соответствующие знания.

Частота. Трансформатор, разработанный для частоты 50 Гц, может использоваться для частоты 60 Гц, но не наоборот. При этом необходимо принять во внимание, что возможно потребуется заменить навесное электрооборудование. При частоте меньше номинальной реактивное сопротивление обмоток падает, что ведёт к увеличению токов через них и, как следствие, их перегрев с вытекающими последствиями.

Перенапряжение трансформаторов. В процессе использования трансформаторы могут подвергаться напряжению, превосходящему рабочие параметры. Данные перенапряжения классифицируются по их продолжительности на две группы:

- *кратковременное перенапряжение* - колебания в пределах от менее 1 секунды до нескольких часов;
- *переходное перенапряжение* - перенапряжение в пределах от наносекунд до нескольких миллисекунд. Обычно имеют однонаправленное действие.

Трансформатор также может быть подвергнут комбинации кратковременных и переходных перенапряжений. Кратковременные перенапряжения могут следовать сразу за переходными перенапряжениями.

По происхождению перенапряжения различаются на:

- *вызванные атмосферными воздействиями.* Чаще вследствие грозových разрядов вблизи высоковольтных линий передач, подсоединенных к трансформатору, однако иногда грозовой импульс может поразить трансформатор или саму линию передачи. Пиковая величина напряжения зависит от тока грозowego импульса и является статистической переменной. В соответствии с измерениями в 50 % случаях пиковая величина токов грозowego импульса находится в пределах от 10 до 20 кА;

- *сформированные внутри силовой системы.* Обусловлены изменением условий эксплуатации и обслуживания силовой системы. Могут быть вызваны нарушением процесса коммутации или поломкой. Временные перенапряжения вызваны коротким замыканием на землю, сбросом нагрузки или феноменом низкочастотного резонанса. Могут возникнуть при возгорании внешней изоляции.