

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА “АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЯ”



По дисциплине

“ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА”

Навои -2018

Электротехника и электроника - дисциплина, объединяющая знания двух взаимосвязанных отраслях науки и техники: Электротехники и электроники. Объединение двух дисциплин позволяет глубже понять их взаимосвязь и более грамотно использовать изучаемые в электротехники физические основы электромагнитных явлений и методы расчета электрических цепей при анализе и синтезе схем электроники, в которых используются как линейные, так и нелинейные электронные приборы, компоненты.

Текст лекции посвящен студентам технических ВУЗ +ов 5311000 – «Автоматизация и управление технологическими процессами», А также учащимся, обучающимся в технологическом направлении, учителей и студентов профессиональных колледжей.

Рецензенты:

Ботиров Тулкин Вафокуловия – Доцент кафедры «Автоматизация и управления» НГГИ

Товбаев Акрамжон Нурмонович – Доцент кафедры «Электро-энергетика» НГГИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Введение. Электротехнические устройства и цепи. Элементы и параметры электрических цепей.....	5
2. Основные законы электрических цепей.....	13
3. Методы расчетов электрических цепей.....	18
4. Однофазный переменный ток.....	24
5. Основные элементы электрической цепи переменного тока.....	34
6. С последовательно и параллельно соединением элементов.....	40
7. Трехфазные электрические цепи.....	54
8. Способы соединения фаз трехфазного источника питания.....	58
9. Переходные процессы в электрических цепях.....	64
10. Электроизмерительные приборы и электрические измерения.....	72
11. Магнитные цепи.....	88
12. Трансформаторы.....	98
13. Электрические машины постоянного тока.....	113
14. Асинхронные и синхронные машины.....	119
15. Полупроводниковые приборы.....	125
16. Выпрямители.....	135
17. Электронные усилители.....	147
18. Динамические характеристики электронных усилителей.....	151
Список использованных литератур	155

Введение

Все области деятельности общества развиваются на базе все более широкого применения электротехники. Электрификация—это широкое развитие производства электроэнергии и ее внедрение во все области человеческой деятельности. Началом развития науки об электричестве является 1600г, когда Гильберт опубликовал результаты исследования электрических и магнитных явлений. Важным этапом были исследования атмосферного электричества, выполненные Ломоносовым, Рихманом и Франклином. Современная электротехника началась с открытия М. Фарадеем (1831г) закона электромагнитной индукции. В развитие теории электротехники большой вклад внесли Вольт, Ампер, Эрстед, Ленц, Максвелл, Герц, Лебедев, Попов и другие. Электроэнергия начала использоваться с 1838 г. Вначале это был химический источник, затем генератор постоянного тока и затем генератор переменного тока. Проблему централизованного производства электроэнергии, ее распределения решил М. О. Доливо-Добровольский. Он же создал простой и надежный двигатель.

В Узбекистане созданы крупные тепловые и гидроэлектрические электростанции, продолжается строительство ряда крупных ГРЭС (государственных районных электростанций). Рост потребления электроэнергии обусловлен ее широким применением в промышленности, сельском хозяйстве, развитием автоматизации - общим научно-техническим прогрессом в Узбекистане.

Электротехника является областью знаний, в которой рассматриваются электрические и магнитные явления и их практическое использование. Электроэнергия вырабатывается на станциях электрическими генераторами, преобразовывается на подстанциях и распределяется по линиям и сетям. Применяется электроэнергия практически во всех областях человеческой деятельности. Производственные установки имеют в большинстве электрический привод. Для измерения наиболее широко используются электрические приборы и устройства. Современные автоматические системы управления в основном выполняются на базе электрических элементов. ЭВМ также строятся на базе электрических элементов.

Лекция № 1
Введение. Электротехнические устройства и цепи
Элементы и параметры электрических цепей.

План:

1. Введение.
2. Электрическая цепь.
3. Сопротивление, индуктивность, ёмкость.
4. Положительные направления тока и напряжения.
5. Источники напряжения и источники тока.

Производство электрических машин, трансформаторов, аппаратов, реле и других электротехнических устройств представляет собой одну из наиболее крупных областей промышленности. Радиотехника и электроника имеют общую базу с электротехникой и так далее. Все вышеперечисленное обуславливает необходимость знания специалистами всех областей науки и техники основных понятий об электрических, магнитных и электромагнитных явлениях и их практическом использовании.

Развитие электроэнергетики сегодня является основным условием научно-технического прогресса и технического совершенствования производства. Это обусловлено следующим.

1. В электрическую энергию легко преобразуются любые виды энергии (тепловая, атомная, механическая, химическая, лучистая, энергия водного потока), и, наоборот, электрическая энергия легко может быть преобразована в любой другой вид энергии.
2. Электроэнергию можно передавать практически на любое расстояние.
3. Ее можно легко дробить на любые части (мощность электроприемников может быть от долей ватта до тысяч киловатт)
4. Управление процессами, в которых используется электроэнергия, обычно очень простое (нажатие кнопки)
5. Использование электрической энергии способствует созданию комфортных условий труда.

Единственным недостатком электроэнергии является отсутствие «склада годовое продукции». Запасы электроэнергии в аккумуляторах, гальванических элементах и конденсаторах достаточны лишь для работы сравнительно маломощных установок, причем сроки хранения этих запасов ограничены.

Электрическая цепь

Электрической цепью называется совокупность устройств предназначенных для прохождения электрического тока электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий напряжения и тока. В общем случае электрическая цепь состоит из источников и приемников электрической энергии и промежуточных звеньев (проводов, аппаратов), связывающих источники с приемниками.

Источниками электрической энергии являются гальванические элементы, аккумуляторы, термоэлементы, генераторы и другие устройства, в которых происходит процесс преобразования химической, молекулярно-кинетической, тепловой, механической или другого вида энергии в электрическую. К источникам можно отнести и приемные антенны в которых в отличие от перечисленных выше устройств, не происходит изменения вида энергии.

Приемниками электрической энергии, или ток называемой нагрузкой, служат электрические лампы, электронагревательные приборы, электрические двигатели и другие устройства, в которых электрическая энергия превращается в световую, тепловую, механическую и другие. К нагрузкам относятся и передающие антенны.

В теории электрических цепей различают активные и пассивные элементы.

Активными элементами считаются источники электрической энергии: источники напряжения и источники тока. К пассивным элементам электрических цепей относятся сопротивления, индуктивности и емкости соответственно различают активные пассивные цепи.

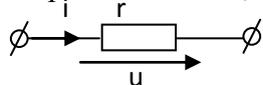
Сопротивление

Сопротивлением: называется идеализированный элемент цепи, приближенного заменяющий резистор, в котором происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в

тепловую. Сопротивления r применяются как для обозначения самого элемента цепи, так и для количественной оценки величины, равной отношению напряжению на данном элементе цепи току, проходящему через него:

$$r = \frac{u}{i}$$

Здесь предполагается, что положительные направления тока и напряжения совпадают: при этом



знак u и i одинаково и $r > 0$. Величина $g = \frac{1}{r}$, обратная сопротивлению, называется проводимостью. В системе СИ сопротивление r измеряется в Омах (Ом), а проводимость g - в сименсах (сим).

Мгновенная мощность, поступающая в сопротивления, равна произведению мгновенных значений напряжения и тока:

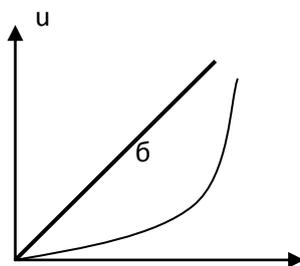
$$P_r = ui = ri^2 = qu^2$$

Следовательно, параметр r может быть численно определён как отношение мгновенной мощности к квадрату мгновенного значения тока, проходящего через сопротивление

$$r = P_r / i^2$$

Электрическая энергия, поступающая в сопротивления r и превращённая в тепло, начиная с некоторого момента времени, например $t=0$, до рассматриваемого момента t , равна

$$W = \int_0^t P_r dt = \int_0^t ri^2 dt = \int_0^t qu^2 dt$$



В случае постоянного тока ($i=I=const$) $w_2=rI^2 t$.

Параметр r общий случае зависит от тока, i (например, вследствие нагрева сопротивления током). Вольтамперная характеристика в общем случае не линейна, если сопротивление r не зависит от величины и направления тока, то имеет место прямое, пропорциональное между напряжением и током, выражающая закон Ома. В этом случае сопротивление называется линейным. На рис. 1.2. показано вольтамперные характеристики сопротивления – нелинейная (кривая а.) и линейная (прямая б).

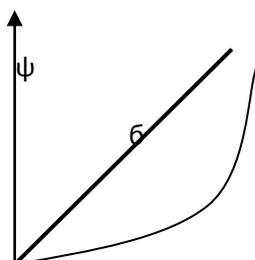
Индуктивность

Индуктивностью называется идеализированный элемент электрической цепи, приближающейся по свойствам к индуктивной катушке, в которой накапливается энергия магнитного поля. Термин “индуктивность” условное обозначения L применяются как для обозначения с малого элемента цепи, так и для количественной оценки отношения потокосцепления самоиндукции к току в данном элементе.

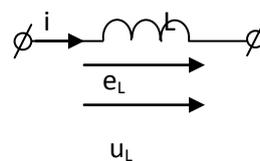
$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1.1)$$

Потокосцеплением самоиндукции цепи называются сумма произведения магнитных потоков, обусловленных только током в этой цепи, на числа витков, с которыми они сцеплены. Если все витки пронизываются одним и тем же магнитным полем, то потокосцепление равно произведению магнитного потока на число витков.

В международной системе единиц Ψ измеряется в веберах (вб), L -в генри (гн). При этом всегда потокосцепления и ток имеет одинаковый знак, тот что $L > 0$.



б



Зависимость потокосцепления от тока в общий случае нелинейная, и параметр L зависит от тока.

В случае когда характеристика $\psi(i)$ прямолинейна, индуктивности L постоянно (линейная индуктивность). На рис. 1.3. показаны линейная и нелинейная зависимость потокосцепления от тока. На основании закона электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла изменения потокосцепления самоиндукции вызывает Электродвижущую силу (э.д.с.) самоиндукции которая выражается формулой:

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1.2)$$

По закону Ленца, выражающему принцип электромагнитной инерции, эта э.д.с. противодействует изменению потокосцепления, что и учитывается знаком минус в (1.2.), поскольку положительное направление для e_L выбрано совпадающее с положительным направлением i .

Условное графическое изображение индуктивности с указанием выбранных положительных направлений тока и э.д.с. самоиндукции приведено на рис.1.4. Если L не зависит от i , то предыдущая формула примет вид:

$$e_L = -L\frac{di}{dt} \quad (1.3)$$

Величина $U_L = -e_L = L\frac{di}{dt}$ называется падением напряжения в индуктивности или, напряжения на индуктивности. Положительное направление u_L совпадает с положительным направлением i (рис.1.4).

$$i = \frac{1}{L} \int u_L dt$$

На основании (1.4.) ток в индуктивности

Мгновенная мощность, поступающая в индуктивность, равна произведению мгновенных значений тока и напряжений:

$$P_L = u_L i = Li\frac{di}{dt}$$

Она связана с процессом нарастания или убывания энергии магнитного поля. Энергия магнитного поля в произвольный момент времени определяется по

$$W_L = \int P_L dt = \int_0^L L di = \frac{Li^2}{2} = \frac{\psi^2}{2L}$$

формуле :

Емкость

Емкостью называется идеализированный элемент электрической цепи, приближенно заменяющий конденсатор, в котором накапливается энергия электрического поля.

$$C = \frac{q}{U_c} \quad (1.4)$$

Если q и u_c измеряются в кулонах (К) и вольтах (В) то C измеряется в фарадах (Ф). При этом всегда заряд и напряжение имеет одинаковый знак, так что $C > 0$.

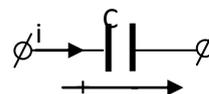
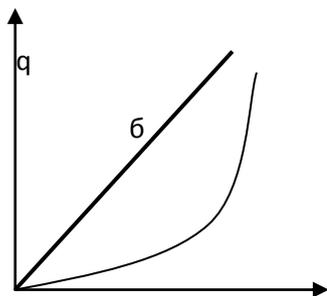
Зависимость заряда от напряжения в общем случае нелинейно, и, следовательно параметр C зависит от напряжения.

В случае, когда характеристика $q(u)$ прямолинейна, емкость C постоянно (линейная емкость). На рис.1.5 показаны нелинейная и линейная зависимости заряда от напряжения.

Предположим, что ёмкость образована двумя пластинами, разделенными диэлектриком. Под влиянием приложенного напряжения на пластинах сосредоточатся равные количества электричества противоположных знаков, пластина с более высоким потенциалом зарядится положительным электричеством, а пластина с более низким потенциалом – отрицательным.

Ток равен производной электрического заряда по времени. По этому с изменением напряжения на ёмкости в присоединённой к ней последовательно электрической цепи создаётся ток, величина которого определяется скоростью изменения заряда на ёмкости:

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (1.5)$$



Здесь знак заряда q соответствует знаку пластины, и которой направлен ток i .

Этот ток рассматривается как ток проводимости в проводниках, присоединённых к ёмкостному элементу (ток, обусловленных движением заряженных частиц под действием электрического поля в ветви, обладает электропроводностью), переходящий в ток смещения в диэлектрике ёмкостного элемента.

Напряжённость электрического поля определяется силой, действующей на электрический заряд, равный единицы.

Ток смещения имеет размерность тока. Благодаря введению этого понятия ток в цепи с ёмкостью представляется замкнутым через диэлектрик.

Согласно (1.5) ток положителен, когда q и соответственно напряжение u_c возрастают.

На основании (1.5) напряжение на ёмкости

$$U_c = \frac{1}{C} \int idt \quad \text{или} \quad U_c = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt$$

Мгновенная мощность, поступающая в ёмкость, равна $P_c = u_c i = C u_c \frac{du_c}{dt}$. Она связано с процессом накопления или убывания электрического заряда в ёмкости.

Когда заряд положителен и возрастает, ток положителен и в ёмкость поступает электрическая энергия из внешней цепи. Когда заряд положителен но убывает то ток отрицателен, энергия, ранее накопленная в электрическом поле в ёмкости, возвращаются во внешнюю цепь.

Допустим к ёмкости C приложено некоторое напряжение u_c . Энергия электрического поля произвольный момент времени определяется по формуле

$$W_c = \int_{-\infty}^t p_c dt = \int_0^{u_c} C U_c du_c = \frac{C u_c^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$

Здесь учтено, что при $t = -\infty$ напряжение на емкости $U_c(-\infty) = 0$.

Положительные направления тока и напряжения

Электрический ток в проводящей среде есть упорядоченное движение электрических зарядов. Известно, что электрический ток проводимости в металлах, так же как ток переноса в электровакуумных приборах, представляет собой перемещение отрицательно заряженных частиц (электронов), а ток проводимости в электролитах и газах-перемещение как положительно, так и отрицательно заряженных частиц (ионов).

Электрическому току приписывается направление. Хотя в общем случае ток представляет собой движение электрических зарядов того и другого знаков в разные стороны. Однако за направление тока принимают направления перемещения положительных зарядов, это направление противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

Численно ток как предел отношения количества электричества, переносимого заряженными частицами сквозь рассматриваемое поперечное сечение проводника за некоторый промежуток времени, к этому промежутку времени, когда он стремится к нулю. Следовательно если обозначить через q количество электричества прошедшего через рассматриваемое сечение проводника за время t , то мгновенное значение тока, т.е. значение его в любой момент времени t , определится как производная q по t ;

$$i = dq / dt$$

Здесь $q = q^+ + q^-$,

где q^+ и q^- - положительный и отрицательный заряды, переместившиеся в противоположные стороны за время t .

В международной системе единиц i измеряется в амперах (А), q - в кулонах (К) или ампер-секундах (а сек), t - в секундах (сек).

Электрический ток может быть постоянным (не изменяющимся) или переменным, т.е. изменяющимся в зависимости от времени.

Направление тока характеризуется знаком тока. Положительное направление тока выбирается произвольно: оно обычно указывается стрелкой. Если в результате расчёта тока, выполненного с учётом выбранного положительного направления, ток имеет знак плюс ($i > 0$), то это означает, что его направление совпадает с выбранным положительным направлением. В противном случае, когда ток отрицательно ($i < 0$), он направлен противоположно.

Таким образом, выбранное для тока положительное направление само по себе не означает направления, в котором перемещаются электронные заряды; оно точно придаёт определенный смысл знаку тока.

Разность электрических потенциалов точек 1 и 2 представляет собой напряжение на отдельном участке цепи.

Напомним, что разность электрических потенциалов определяется работой, затрачиваемой на перенос положительного единичного заряда из точки 1 в точку 2.

Значение напряжения в любой текущий момент времени обозначается через u ; оно может быть постоянным или переменным. В системе СИ напряжение измеряется в вольтах (в).

Для придания определённого смысла знаку напряжения, также как ток, произвольно выбирается положительное направление. Чаще всего его выбирают совпадающими в положительном направлении тока и указывают стрелкой.

Для уяснения выбранного направления в место стрелки пользоваться обозначением индексов. Когда потенциал в точке 1 выше потенциала в точке 2, $u > 0$ в противном случае $u < 0$. Напряжение, отсчитываемое в обратном направлении, или в противоположный знак $u_{21} = -u_{12}$

Источники напряжения и источники тока

В теории электрических цепей пользуются идеализированными источниками электрической энергии: источником напряжения и источником тока. Им приписываются следующие свойства.

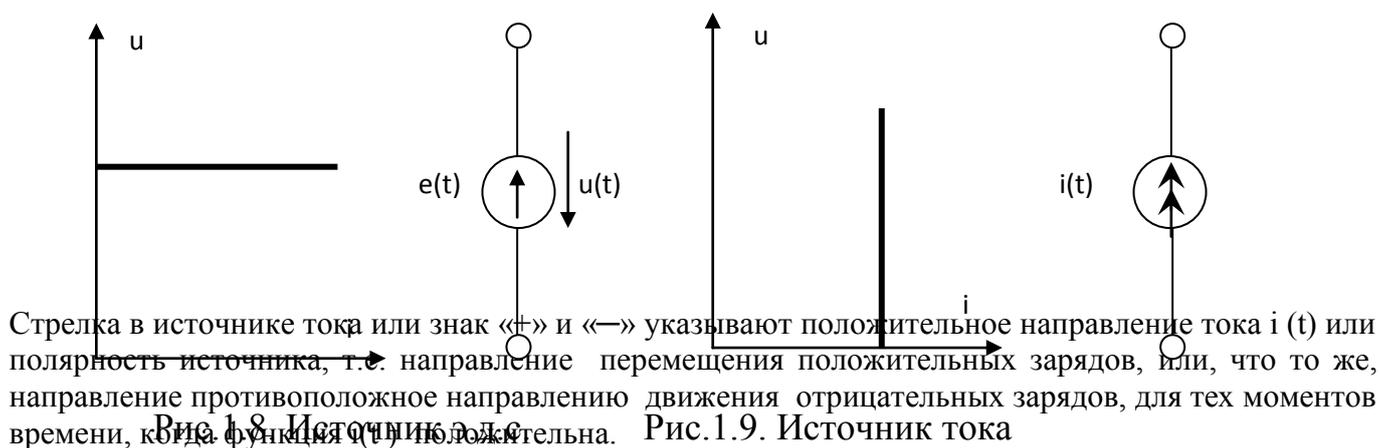
Источники э.д.с. (или источник напряжения) представляет собой активный элемент с двумя зажимами, напряжение на которых не зависит от тока, проходящего через источник. Предполагается, что внутри такого идеального источника пассивные элементы (r , L , C) отсутствуют и поэтому прохождение через него тока не вызывает в нём падения напряжения.

Упорядоченное перемещение положительных зарядов в источнике от меньшего потенциала к большему возможно за счёт присущих источнику сторонних сил. Величина работы затрачиваемой сторонними силами на перемещение единицы положительного заряда от зажима «-» к зажиму «+», называется электродвижущей силой (э.д.с.) источника и обозначается $e(t)$.

В соответствии со сказанным выше напряжение на зажимах рассматриваемого источника равно его э.д.с., т.е. $u(t) = e(t)$.

Величина тока в пассивной электрической цепи, подключённой к источнику напряжения, зависит от параметров этой цепи и э.д.с. $e(t)$. Если зажимы идеального источника напряжения замкнуть накоротко, то ток теоретически должен быть бесконечно велик. Поэтому такой источник рассматривается как источник бесконечной мощности (теоретическое понятие). В действительности при замыкании зажимов реального источника электрической энергии - гальванического элемента, аккумулятора, генератора и т.п. - ток может иметь только конечное

значение, т.к. э.д.с. источника уравновешивается падением напряжения r , индуктивности L . Источник напряжения конечной мощности изображается в виде э.д.с. с подключённым к ней последовательно пассивным элементом, который характеризует внутренние параметры источника и ограничивает мощность отдаваемую во внешнюю электрическую цепь. Обычно внутренние параметры источника конечной мощности незначительны по сравнению с параметрами внешней цепи; они могут быть отнесены к последней или в некоторых случаях могут вовсе не учитываться. Источник тока представляет собой активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах. Предполагается, что внутреннее сопротивление такого идеального источника бесконечно велико и поэтому параметры внешней электрической цепи, от которой зависит напряжение на зажимах источника, не влияют на ток источника.



По мере неограниченного увеличения сопротивления внешней электрической цепи, присоединённой к идеальному источнику тока, напряжение на его зажимах и соответственно мощность, развиваемая им, неограниченно возрастает. Поэтому идеальный источник тока, так же как и идеальный источник напряжения, рассматривается как источник бесконечной мощности. Источник тока конечной мощности изображается в виде идеального источника тока с подключённым к его зажимам пассивным элементом, который характеризует внутренние параметры источника и ограничивает мощность, отдаваемую во внешнюю электрическую цепь (рис. 1.9)

Некоторым подобием источника тока может служить устройство, состоящее из аккумулятора, соединённого с дополнительным большим сопротивлением. Другим примером источника тока может являться пятиэлектродная усилительная лампа, имея внутреннее сопротивление, несоизмеримо больше, чем сопротивление внешней электрической цепи, эти устройства отдают ток, почти не зависящий от изменения внешней нагрузки в широких пределах, и именно в этом отношении они аналогичны источнику тока.

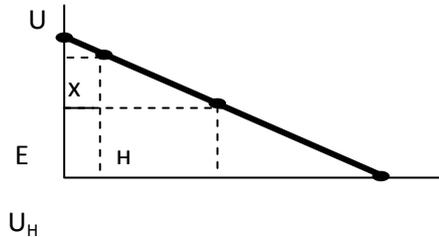
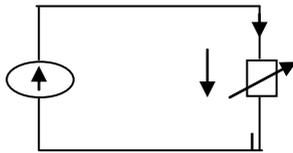
Вольт-амперные характеристики идеальных источников напряжения и тока представляются прямыми, параллельными осями i и u (рис. 1.8 и 1.9.)

Реальные источники электрической энергии по своим вольт-амперным характеристикам могут приближаться к идеальным источникам напряжения или тока.

Режимы работы электрической цепи

Элементами электрической цепи являются конкретные электротехнические устройства, которые могут работать в различных режимах. Режимы работы, как отдельных элементов, так и всей электрической цепи характеризуются значениями тока и напряжения. Поскольку ток и напряжение в общем случае могут принимать любые значения, то режимов может быть бесчисленное множество.

Рассмотрим наиболее характерные режимы работы электрической цепи с источником э.д.с. к которому подключен электроприемник с регулируемым сопротивлением R (рис.1.16). Пусть источник характеризуется постоянной э.д.с. E и внутренним сопротивлением $r = const$. Так в цепи изменяется при изменении сопротивления R электроприемника, который является линейным элементом.



Из уравнения (1.5) получаем

$$U = E - r_0 I \quad (1.6)$$

Это уравнение, описывающее зависимость напряжения внешней характеристики источника э.д.с. (рис. 1.17). При условии, что зависимость $U(I)$ является линейной. Характерные режимы удобнее всего рассматривать, пользуясь внешней характеристикой.

Режим холостого хода—это режим при котором ток в $I=0$, что имеет место при разрыве цепи, как следует из уравнения (1.6), при холостом ходе напряжение на зажимах источника э.д.с. $U=E$. На внешней характеристике точка холостого хода обозначена x .

Номинальный режим имеет место тогда, когда источник э.д.с. или любой элемент цепи работает при значениях тока, напряжения и мощности, указанных в паспорте данного электротехнического устройства. Номинальные значения тока $I_{ном}$, напряжение $U_{ном}$, и мощности $R_{ном}$, соответствует на выгоднейшим условиям работы устройства с точки зрения экономичности, надежности, долговечности и т.п. На внешней характеристике точка, соответствующая номинальному режиму, обозначена $н$.

Режим короткого замыкания- это режим, когда сопротивление приемника равно нулю, что соответствует соединению разно потенциальных зажимов источника э.д.с. проводником с нулевым сопротивлением.

Из уравнения (1) следует, что ток в цепи в любом из режимов:

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1.7)$$

$$I_k = \frac{E}{r_0}$$

При коротком замыкании цепи, когда $R=0$, ток достигает максимального значения ограниченного внутренним сопротивлением источника э.д.с, а напряжение на зажимах источника э.д.с. $U=RI=0$. Значение тока I и напряжение $U=0$, соответствует точка $к$ на внешней характеристике источника э.д.с. Ток короткого замыкания может достигать больших значений, во много раз превышая номинальный ток. Поэтому режим короткого замыкания для большинства электроустановок является аварийным режимом.

Согласованный режим источника э.д.с. и внешней цепи имеет место, когда сопротивление внешней цепи $R = r_0$. В согласованном режиме ток в цепи

$$I = \frac{E}{2r_0} = 0,5I_k \quad (1.8)$$

т.е. в два раза меньше тока короткого замыкания. Э.д.с. источника E уравнивается двумя равными по значению падениями напряжения, обусловленными сопротивлением внешней цепи и внутренним сопротивлением, т.е. $U=0,5E$. Точка, соответствующая согласованному режиму, на внешней характеристике обозначена $с$.

Лекция № 2
Основные законы электрических цепей.

План:

1. Напряжение на участке цепи
2. Закон Ома для участка цепи.
3. Компонентные уравнения
4. Законы Кирхгофа. Топологические уравнения
5. Положительные направления тока и напряжения
6. Составление уравнений для расчёта токов в схемах с помощью законов Кирхгофа.
7. Энергетический баланс в электрических цепях.

Напряжение на участке цепи

В соответствии с определением $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \Rightarrow U_{ab} = IR$. Под напряжением на некотором участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка. Пусть ток течет от точки а к точке b (от более высокого потенциала к более низкому).

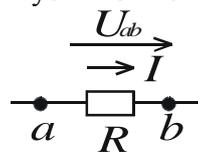


Рис.2.1.

Следовательно, потенциал точки а (φ_a) выше потенциала точки b (φ_b) на величину, равную произведению тока I на сопротивление $\varphi_a = \varphi_b + IR$.

В дальнейшем разность потенциалов на концах сопротивления, т.е. произведение IR, будем именовать падением напряжения.

Выразим потенциал точки а через потенциал точки с.

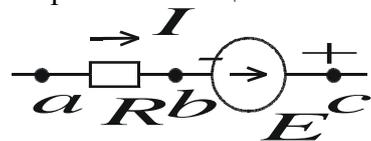


Рис. 2.2.

При перемещении от точки с к точке b встречно направлению э.д.с. E потенциал точки b оказывается ниже, чем потенциал точки с, на величину э.д.с. E

$$\varphi_b = \varphi_c - E; \quad \varphi_c = \varphi_b + E$$

Т.к. ток течет от более высокого потенциала к более низкому, то $\varphi_a = \varphi_b - IR$. $\Rightarrow \varphi_a = \varphi_c - E + IR$ или $U_{ac} = IR + E$. (2.1)

Закон Ома для участка цепи

Не содержащего источника э.д.с.

Устанавливает связь между током и напряжением на участке.

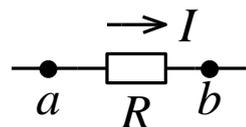


Рис. 2.3

$$U_{ab} = IR \text{ или } I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}$$

Содержащего источник э.д.с.

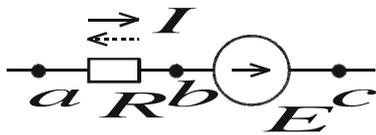


Рис. 2.4

Из уравнения (2.1)

$$I = \frac{U_{ac} - E}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R}$$

Уравнение математически выражает закон Ома для участка цепи, содержащего э.д.с.

Пример:

Если ток $I=10A$ течет от а к с, то $U_{ac}=-18B$, если $I=10A$ течет от с к а, то $U_{ac}=-20B$.

$R=? E=?$

$$\left. \begin{aligned} U^1_{ac} &= IR - E = 10R - E = -18 \\ U^2_{ac} &= -IR - E = -10R - E = -20 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} 10R = -18 + E \\ -10R - E = -20 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} R = \frac{18 - E}{10} \\ -10\left(\frac{18 - E}{10}\right) - E = -20 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R = \frac{18 - E}{10} \\ -2E = -38 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E = 19B \\ R = 0,1 Ом \end{cases}$$

Компонентные уравнения

Компонентные уравнения (уравнения ветвей) представляют собой математические модели соответствующих ветвей и выражают ток или напряжение каждой ветви через параметры элементов этой ветви. Число этих уравнений равно числу ветвей, а вид каждого из них зависит только от состава ветви, т.е. от входящих в нее идеализированных элементов. Компонентные уравнения составляются на основании закона Ома.

По виду компонентных уравнений ветви электрической цепи делятся на вырожденные и невырожденные. Компонентные уравнения невырожденной ветви устанавливают связь между её током и напряжением и могут быть записаны в двух формах:

- 1) ток ветви определяется через напряжение ветви;
- 2) напряжение ветви находится через ток. Компонентное уравнение вырожденной ветви задает напряжение или ток ветви, но не позволяет по известному напряжению ветви найти её ток или по заданному току определить напряжение.

Ветви, составленные только из идеализированных пассивных элементов, а также ветви, состоящие из идеализированных пассивных элементов и источников напряжения, являются невырожденными. Ветви, составленные только из идеальных источников напряжения, и ветви, содержащие источник тока, являются вырожденными.

Законы Кирхгофа

Все электрические цепи подчиняются первому и второму законам Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа можно сформулировать двояко:

1. Алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю;
2. Сумма подтекающих к любому узлу токов равна сумме утекающих от узла токов.

Так применительно к рис. 2.5., если подтекающие к узлу токи считать положительными, а утекающие - отрицательными, то согласно первой формулировке: $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$

а согласно второй: $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$

Физически первый закон Кирхгофа означает, что движение зарядов в цепи происходит так, что ни в одном из узлов они не скапливаются.

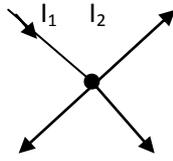


Рис.2.5

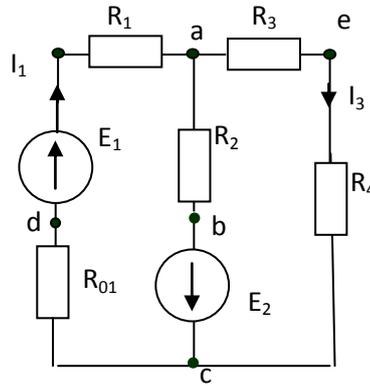


Рис.2.6

Второй закон Кирхгофа также можно сформулировать двояко:

1. Алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической

сумме э.д.с. вдоль того контура: $\sum IR = \sum E$

(в каждую из сумм соответствующие слагаемые входят со знаком «+», если они совпадают с направлением контура, и со знаком «-», если они не совпадают с ним);

2. Алгебраическая сумма напряжений (не падений напряжения) вдоль любого замкнутого контура

равна нулю: $\sum U_{\kappa} = 0$

Так для периферийного контура схемы рис.1.11

$$U_{ae} + U_{ec} + U_{cd} + U_{da} = 0$$

Законы Кирхгофа справедливы для линейных и нелинейных цепей при любом характере изменения во времени токов и напряжений.

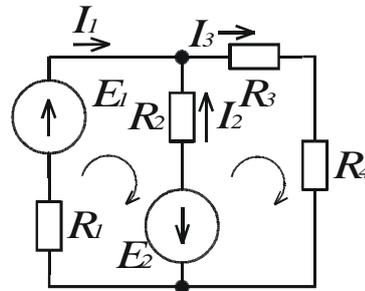
Задача

Определить значения токов I_1 , I_2 , I_3

$$\begin{cases} I_1 + I_2 = I_3 \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 + E_2 \\ I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) = -E_2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} E_1 &= 80 \text{ В} & R_1 &= 6 \text{ Ом} \\ E_2 &= 64 \text{ В} & R_2 &= 4 \text{ Ом} \\ R_3 &= 3 \text{ Ом} & R_4 &= 1 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис. 2.7



Топологические уравнения

Топологические уравнения устанавливают связь между токами или напряжениями различных ветвей, причем вид и число топологических уравнений не зависит от того, какие именно элементы входят в состав ветвей цепи. К топологическим уравнениям относятся, в частности, уравнения, составленные на основании первого и второго законов Кирхгофа.

Для контуров, в которых есть источники тока, уравнения баланса напряжений составляют по общему правилу, причем напряжение источника тока учитывается в левой части уравнения.

Так как вид и число уравнений, составленных на основании законов Кирхгофа, не зависят от того, какие элементы входят в состав цепи, а определяются только её топологическими особенностями, то уравнение баланса токов и напряжений можно принять для математического описания процессов в цепях, составленных из элементов любого типа (как линейных, так и нелинейных) при любой форме токов и напряжений независимых источников.

Положительные направления тока и напряжения

Электрический ток в проводящей среде есть упорядоченное движение электрических зарядов.

Известно, что электрический ток проводимости в металлах, так же как ток переноса в электровакуумных приборах, представляет собой перемещение отрицательно заряженных частиц (электронов), а ток проводимости в электролитах и газах-перемещение как положительно, так и отрицательно заряженных частиц (ионов).

Электрическому току приписывается направление. Хотя в общем случае ток представляет собой движение электрических зарядов того и другого знаков в разные стороны. Однако за направление тока принимают направления перемещения положительных зарядов, это направление противоположно направлению движения отрицательных зарядов.

Численно ток как предел отношения количества электричества, переносимого заряженными частицами сквозь рассматриваемое поперечное сечение проводника за некоторый промежуток времени, к этому промежутку времени, когда он стремится к нулю. Следовательно если обозначить через q количество электричества прошедшего через рассматриваемое сечение проводника за время t , то мгновенное значение тока, т.е значение его в любой момент времени t , определится как производная q по t ;

$$i = dq / dt$$

Здесь $q = q^+ + q^-$,

где q^+ и q^- - положительный и отрицательный заряды, переместившиеся в противоположные стороны за время t .

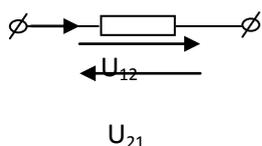
В международной системе единиц i измеряется в амперах (А), q - в кулонах (К) или ампер-секундах (а сек), t - в секундах (сек).

Электрический ток может быть постоянным (не изменяющимся) или переменным, т.е. изменяющимся в зависимости от времени.

Направление тока характеризуется знаком тока. Положительное направление тока выбирается произвольно: оно обычно указывается стрелкой. Если в результате расчёта тока, выполненного с учётом выбранного положительного направления, ток имеет знак плюс ($i > 0$), то это означает, что его направление совпадает с выбранным положительным направлением. В противном случае, когда ток отрицательно ($i < 0$), он направлен противоположно.

Таким образом, выбранное для тока положительное направление само по себе не означает направления, в котором перемещаются электронные заряды; оно точно придаёт определенный смысл знаку тока.

Разность электрических потенциалов точек 1 и 2 представляет собой напряжение на отдельном участке цепи.



Напомним, что разность электрических потенциалов определяется работой, затрачиваемой на перенос положительного единичного заряда из точки 1 в точку 2.

Значение напряжения в любой текущий момент времени обозначается через u ; оно может быть постоянным или переменным. В системе СИ напряжение измеряется в вольтах (в).

Для придания определённого смысла знаку напряжения, также как ток, произвольного выбирается положительное направление. Чаще всего его выбирают совпадающими в положительном направлении тока и указывают стрелкой.

Для уяснения выбранного направления в место стрелки пользоваться обозначением индексов.

Когда потенциал в точке 1 выше потенциала в точке 2, $u > 0$ в противном случае $u < 0$. Напряжение, отсчитываемое в обратном направлении, или в противоположный знак $u_{21} = -u_{12}$

Составление уравнений для расчёта токов в схемах с помощью законов Кирхгофа

Законы Кирхгофа используют для нахождения токов в ветвях схемы. Обозначим число всех ветвей схемы v , число ветвей, содержащих источники тока - вит и число узлов - y . В каждой ветви схемы течёт свой ток. Так как токи в ветвях с источниками тока известны, то число неизвестных токов равняется v -вит.

Перед тем как составлять уравнения, необходимо произвольно выбрать:

- положительные направления токов в ветвях и обозначить их на схеме;
- положительные направления обхода контуров для составления уравнений по второму закону Кирхгофа.

С целью единообразия рекомендуется для всех контуров положительные направления обхода выбирать одинаковыми, например, по часовой стрелке.

Чтобы получить линейно независимые уравнения, по первому закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу узлов без единицы, т.е. $y-1$.

По второму закону Кирхгофа составляют число уравнений, равное числу ветвей без источников тока (v -вит), за вычетом уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, т.е. $(v$ -вит) - $y-1 = v$ -вит - $y + 1$

Составляя уравнения по второму закону Кирхгофа, следует охватить все ветви схемы, исключая лишь ветви с источниками тока. При записи линейно независимых уравнений по второму закону Кирхгофа определяется, чтобы в каждый новый контур, для которого составляют уравнение, входила хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры, для которых уже записаны уравнения по второму закону Кирхгофа. Такие контуры условимся называть независимыми.

Пример: Найти токи в ветвях схемы рис. 2.6 в которой $E_1=80$ В, $E_2=64$ В, $R_1=6$ Ом, $R_2=4$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=1$ Ом.

Решение: Произвольно выбираем положительные направления токов в ветвях. В схеме $v=3$, вит = 0, $y=2$. Следовательно, по первому закону Кирхгофа можно составить одно уравнение

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (a)$$

Нетрудно убедиться, что для второго узла получили бы аналогичное уравнение. По второму закону Кирхгофа составим v -вит - $y-1 = 3-0-(2-1)=2$ уравнения. Положительные направления обхода контуров выбираем по часовой стрелке.

$$\text{Для первого контура } I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 + E_2 \quad (б)$$

$$\text{Для второго контура } I_2 R_2 + I_3 (R_3 + R_4) = -E_2 \quad (в)$$

Совместное решение уравнений (а), (б), (в), даёт $I_1=14$ А, $I_2=-15$ А, $I_3=-1$ А

Положительные направления токов выбирает произвольно, в результате расчёта какой-либо один или несколько токов могут оказаться отрицательными. В рассмотренном примере отрицательными оказались токи I_2 и I_3 , из этого следует понимать: направления токов I_2 и I_3 не совпадают с направлениями, принятыми для них на схеме 1.15 за положительные, т.е. в действительности токи I_2 и I_3 проходят в обратном направлении.

Энергетический баланс в электрических цепях.

При протекании токов по сопротивлениям в последних выделяется тепло.

На основании закона сохранения энергии количество теплоты, выделяющееся в единицу времени в сопротивлениях схемы, должно равняться энергии, доставляемой за тоже время источниками питания.

Если направления тока I , протекающего через источник ЭДС, E , совпадает с направлением ЭДС, по источнику ЭДС. доставляет в цепь энергию в единицу времени (мощность), равную $E I$, и произведение $E I$ входит с положительным знаком в уравнения энергетического баланса.

Если же направление тока I встречно направлению ЭДС, E , то источник ЭДС. не поставляют энергию, а потребляют её (например, заряжается аккумулятор), и произведения $E I$ войдёт в уравнение энергетического баланса с отрицательным знаком.

Уравнение энергетического баланса при питании только от источников ЭДС имеет вид

$$\sum I^2 R = \sum E I$$

Когда схема питания не только от источников ЭДС, но и от источников тока, т.е. к отдельным узлам схемы подтекают и от них утекают токи источников тока, при составлении уравнения энергетического баланса необходимо учесть и энергию, доставляющий источниками тока. Допустим, что к узлу а схемы подтекает ток I_k от источника тока, а от узла в этом ток утекает. Поставляется источником тока мощность равна $U_{ab}I_k$. Напряжение U_{ab} и токи в ветвях схемы должны быть подсчитаны с учётом тока, подтекающего от источника тока.

Общий вид уравнения энергетического баланса

$$\sum I^2 R = \sum E I + \sum U_{ab} I_k$$

Контрольные вопросы.

1. Как сформулируется Закон Ома.

Первый закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа.

4. Энергетический баланс в электрических цепях.

Лекция № 3.
Методы расчетов электрических цепей.

План:

1. Неразветвленные и разветвленные линейные электрические цепи с одним источником питания
 - 1.1. Последовательное соединение элементов.
 - 1.2. Параллельное соединение элементов.
 - 1.3. Смешанное соединение элементов.
2. Преобразование звезды в треугольник и треугольника в звезду.
 - 2.1. Соединение вида «треугольник» и «звезда»
 - 2.2. Преобразование треугольника сопротивлений в звезду.
 - 2.3. Преобразование звезды сопротивлений в треугольник.
3. Метод контурных токов

Неразветвленные и разветвленные линейные электрические цепи с одним источником питания

Многие электрические цепи имеют лишь один источник энергии и то или иное число пассивных элементов. Это могут быть приемники электрической энергии и различные вспомогательные элементы.

Расчет и анализ неразветвленных и некоторых разветвленных цепей с одним источником и пассивными элементами производятся с помощью закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа. Во многих случаях расчет и анализ осуществляется путем замены отдельных участков, а затем всей цепи одним элементом с эквивалентным сопротивлением и последующего перехода в процессе расчета к заданной цепи. В некоторых случаях целесообразно воспользоваться методом эквивалентного генератора.

Если большое число пассивных элементов вместе с источником э.д.с. образуют электрическую цепь, то их взаимное соединение может быть выполнено различными способами. Существуют следующие характерные схемы таких соединений.

Последовательное соединение элементов. Последовательным называется такое соединение элементов, когда условный конец первого элемента соединяется с условным началом второго, конец второго с началом третьего и т. д. При таком соединении во всех элементах цепи протекает один и тот же ток. При этой схеме могут быть соединены или все пассивные элементы цепи и тогда цепь будет одноконтурной неразветвленной (рис 3.1а), или может быть соединена только часть элементов многоконтурной цепи.

Если последовательно соединены n элементов, в которых протекает один и тот же ток I , то напряжение на зажимах цепи будет равно сумме падений напряжения на n , последовательно включенных элементах, т.е.,

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$$

или

$$U = R_1 I + R_2 I + R_3 I + \dots + R_n I = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) I = R_{\text{эк}} I \quad (3.1)$$

где $R_{\text{эк}} = \sum R_k$ - эквивалентное сопротивление цепи.

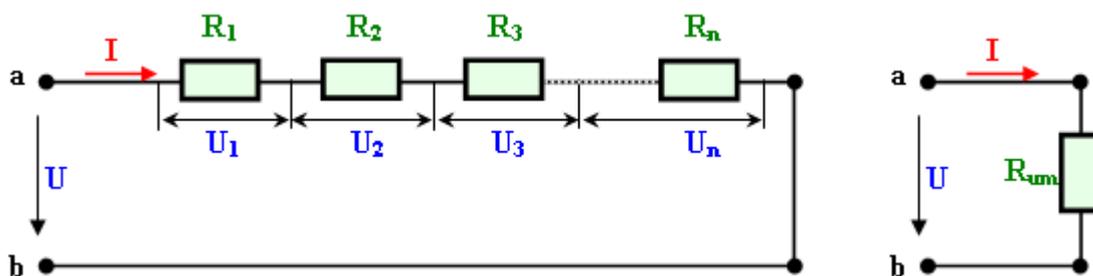


Рис 3.1.

Таким образом, эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов равно сумме сопротивлений этих элементов.

Схема электрической цепи (рис 3.1а), может быть представлена эквивалентной схемой, (рис 3.1б), состоящей из одного элемента, с эквивалентным сопротивлением R. Для такой схемы $U = R_{эк}I$, что совпадает с уравнением (3.1).

При расчете цепи с последовательным соединением элементов при заданном напряжении источника питания и сопротивлениях элементов ток в цепи рассматривают по закону Ома: $I = U / R_{эк}$

Падение напряжения на k - м элементе $U = R_{эк}I = R_k \times (U/R_{эк})$ зависит не только от сопротивления этого элемента $R_{эк}$, но и от эквивалентного сопротивления других элементов цепи. В этом заключается существенный недостаток последовательного соединения элементов. В предельном случае когда, сопротивление какого либо элемента цепи становится равным бесконечности (разрыв цепи), ток во всех элементах цепи становится равным нулю.

Так как при последовательном соединении то во всех элементах цепи один и тот же, то отношение падений напряжения на элементах равно сопротивлений этих элементов: $U_k/U_n = R_k/R_n$

Параллельное соединение элементов. Параллельным называется такое соединение резистивных элементов, элементов, при котором соединяются между собой как условные начала всех элементов, так и их концы (рис 3.2а). Характерным для параллельного соединения является одно и тоже напряжение U на выводах всех элементов.

Каждый параллельно включенный элемент образует отдельную ветвь. Поэтому цепь с параллельным соединением элементов изображенная на (рис 3.2а) хотя и является простой цепью (так содержит два узла), в то же время разветвления.

В каждой параллельной ветви ток

$$I_k = \frac{U}{R_k} = G_k \cdot U \quad (3.2)$$

$$G_k = \frac{1}{R_k}$$

где G_k - проводимость k- й ветви. По первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \text{ или } I = G_1U + G_2U + G_3U + \dots + G_nU = (G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_n)U = G_{эк}U,$$

где $G_{эк} = \sum G_k$ - эквивалентная проводимость цепи.

Таким образом, при параллельном соединении пассивных элементов их эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей этих элементов. Эквивалентная проводимость всегда больше проводимости любой части параллельных ветвей. Эквивалентной проводимости G соответствует эквивалентное сопротивление $R_{эк} = 1/G_{эк}$.

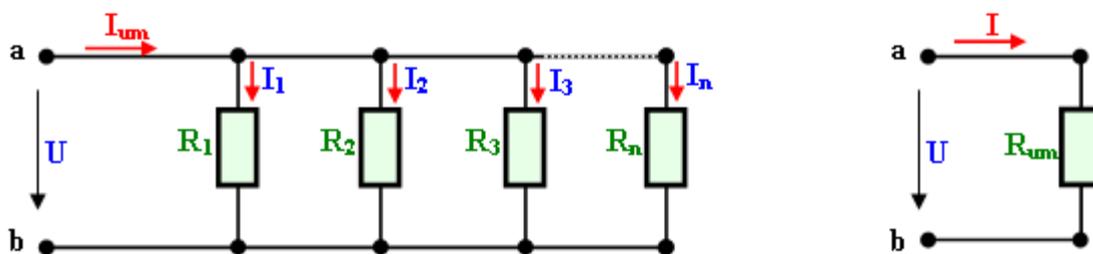


Рис. 3.2

Ток в неразветвленной части цепи с параллельным соединением элементов может быть определен из этой схемы по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R_{эк}} = G_{эк} \cdot U$$

Следовательно, если напряжение источника питания постоянно, то при увеличении числа параллельно включенных элементов (что приводит к увеличению эквивалентной проводимости) ток в неразветвленной части цепи (ток источника питания) увеличивается. Из формулы (3.2) видно, что ток в каждой ветви зависит только от проводимости данной ветви и не зависит от проводимости других ветвей. Независимость режимов параллельных ветвей друг от друга это важное преимущество параллельного соединения пассивных элементов. В промышленных

установках параллельное соединение электроприемников применяют в большинстве случаев. Самым наглядным примером является включение электрических осветительных ламп. Так как при параллельном соединении ко всем элементам приложено одно и тоже напряжение, а ток в каждой ветви пропорционален проводимости этой ветви, то отношение токов в параллельных ветвях равно отношению проводимостей этих ветвей или обратно пропорционально отношению их сопротивлений

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{G_k}{G_n} = \frac{R_n}{R_k}$$

Смешанное соединение элементов. Смешанным соединением или последовательно-параллельным, называется такое соединение пассивных элементов, при котором на одних участках электрической цепи они соединены параллельно, а на других последовательно.

Такая цепь может иметь различное число узлов и ветвей. Пример смешанного соединения приведен на схеме (рис 3.3 а).

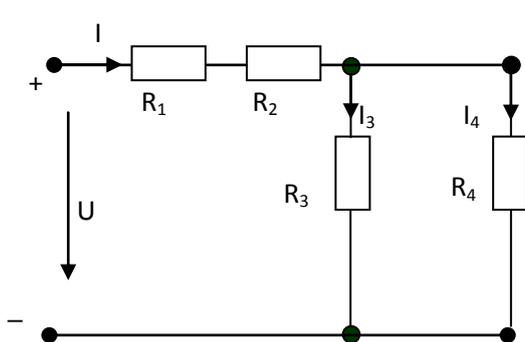


Рис.3.3а

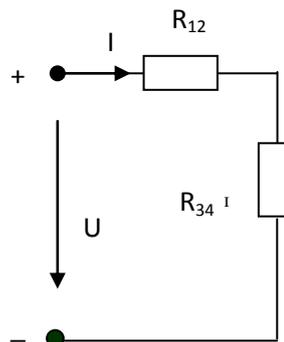


Рис.3.3б

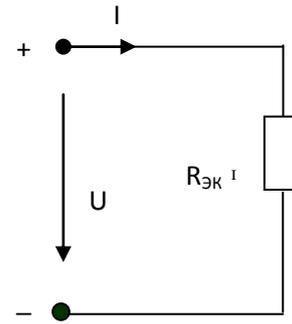


Рис. 3.3в

Для расчета такой цепи необходимо последовательно определять эквивалентные сопротивления для тех частей схемы, которые представляют собой только последовательное или только параллельное соединение.

В рассматриваемой схеме имеется последовательное соединение элементов с сопротивлениями R1 и R2. Эквивалентное сопротивление последовательно соединенных элементов $R_{12} = R_1 + R_2$

Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных элементов R3 и R4

$$R_{34} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{1/R_3 + 1/R_4} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

Эквивалентная схема с сопротивлениями элементов R12 и R34 изображена на (рис. 3.3б). Для этой схемы последовательного соединения R12 и R34 эквивалентное сопротивление $R_{эк} = R_{12} + R_{34}$, а соответствующая эквивалентная схема представлена на (рис.3.3в). Найдем ток в этой цепи:

$$I = \frac{U}{R_{эк}} = G_{эк} \cdot U$$

Это ток источника питания и ток в элементах R1 и R2 цепи. Для расчета токов I3 и I4 определяют напряжение на участке цепи с сопротивлением R34 (рис. 3.3б)

$$U_{34} = R_{34} I = R_{34} \frac{U}{R_{эк}}$$

тогда токи I3 и I4 определяют по закону Ома:

$$I_3 = \frac{U_{34}}{R_3} \quad I_4 = \frac{U_{34}}{R_4}$$

Подобным образом можно рассчитать и ряд других схем электрических цепей со смешанным соединением пассивных элементов.

Преобразование звезды в треугольник и треугольника в звезду

Соединение вида «треугольник» и «звезда». В электрических цепях можно встретиться с соединениями пассивных элементов, которые не приводятся к сочетанию последовательных и параллельных соединений. Наиболее распространенными примерами таких соединений являются мостовые схемы, получившие широкое применение на практике и особенно в автоматике и измерительной технике.

Соединение трех сопротивлений, имеющие вид трех-лучевой звезды (рис.3.4), называют соединением - звезда, а соединение трех сопротивлений так, что они образуют собой стороны треугольника (рис. 3.5),-соединением треугольник. В узлах 1,2,3 (потенциалы их ϕ_1 ϕ_2 и ϕ_3) и треугольник и звезда соединяются с остальной частью схемы (не показанной на рисунках). Если преобразование выполнить следующим образом, что при одинаковых значениях потенциалов (напряжениях между внешними выводами) одноименных точек треугольника и звезды подтекающие к этим точкам токи одинаковы, то вся внешняя схема «не заметит» произведенной замены.

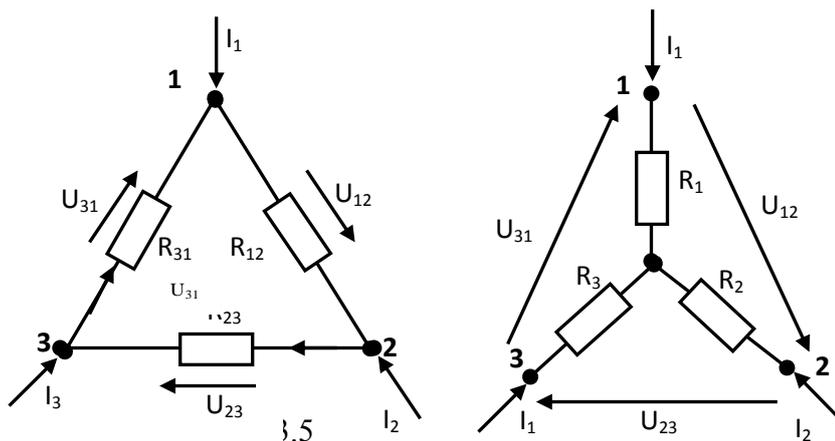


Рис. 3.4

Преобразование треугольника сопротивлений в звезду. В схемы треугольника выразим напряжение U_{12} через токи I_1 – I_3 , протекающие к узлам 1-3, и сопротивления сторон треугольника.

На основании второго закона Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений в контуре из сопротивлений треугольника равна нулю (так как в ней нет э.д.с):

$$R_{12} I_{12} + R_{23} I_{23} + R_{31} I_{31} = 0$$

По первому закону Кирхгофа при выбранных положительных направлениях токов для узла 1 имеем:

$$I_{31} = - I_1 + I_{12} ,$$

а для узла 2 имеем $I_{23} = I_{12} + I_2$

При установке двух узловых уравнений в контурной записи:

$$R_{12} I_{12} + R_{23} (I_{12} + I_2) + R_{31} (-I_1 + I_{12}) - R_{31} I_1 = 0$$

Выражая из этого уравнения ток:

$$I_{12} = (R_{31} I_1 - R_{23} I_2) / (R_{12} + R_{23} + R_{31})$$

получаем для ветви треугольника напряжение

$$U_{12} = R_{12} I_{12} = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \cdot I_1 - \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \cdot I_2$$

Это же напряжение U_{12} в схеме звезды (рис.3.4) выразится (по второму закону Кирхгофа) как:

$$U_{12} = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

Для эквивалентности треугольника и звезды сопротивлений напряжение U_{12} должно быть одинаковым в схемах (рис.3.4) и (рис.3.5), а значит и одинаковы и коэффициенты при токах I_1 и I_2 .

Следовательно,

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (3.4)$$

Аналогично (например, рассматривая выражения U23) можно получить перестановкой индексов:

$$R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (3.5)$$

И так, сопротивление луча эквивалентной звезды равно произведению сопротивлений прилегающих сторон треугольника, делимому на сумму сопротивлений сторон треугольника. Преобразование звезды сопротивлений в треугольник. При необходимости перейти от сопротивлений звезды к сопротивлению эквивалентного треугольника, расчетные формулы можно получить решив приведенную систему уравнений (3.3), (3.4), (3.5), считая сопротивления лучей звезды известными, а сопротивления сторон треугольника искомыми. При этом получим:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3} \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1} \quad R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2} \quad (3.6)$$

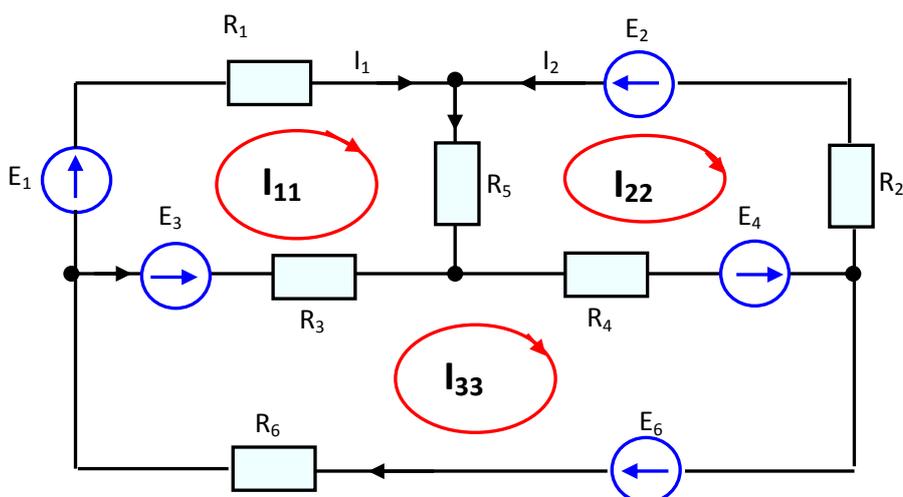
Таким образом, сопротивление стороны треугольника равно сумме сопротивлений прилегающих лучей звезды и их произведения, деленного на сопротивление третьего луча.

На основании последних выражений часть схемы, содержащую трех лучевую звезду сопротивлений, можно заменить треугольником сопротивлений, при этом токараспределение и распределение напряжений в остальной части схемы сохраняются.

Часто преобразования треугольника сопротивлений в звезду или обратный переход звезды сопротивлений к треугольнику позволяют преобразовать сложную электрическую схему в одноконтурную.

Метод контурных токов

Особенности метода. При расчёте сложной электрической цепи с известными ЭДС и сопротивлением по узловым и контурным уравнениям решением получается громоздким из-за большого числа уравнений. Это число может быть сокращено, если ввести в рассмотрение так называемые контурные токи, обтекающие независимые контуры, как это показано для цепи рис.3.6, где три ячейки схемы имеют контурные токи I_{11} , I_{22} , I_{33} . При этом число неизвестных контурных токов (на рис.3.6 три тока) равно числу независимых контуров. В данном случае для расчёта цепи потребуется три контурных уравнения, составленных по второму закону Кирхгофа, и надобность в составлении уравнений по первому закону Кирхгофа отпадает.



Контурные токи и токи ветвей. Контурный ток представляет величину, являющуюся одинаковой для всех ветвей рассматриваемого контура. Чтобы отличить контурные токи от токов ветвей, часто их индексация проводится двойными цифрами, как это сделано на рис. 3.6.

Для удобства составления уравнений направления контурных токов выбираем для всех контуров единым (по часовой стрелке), а обход контуров будем осуществлять по направлению контурных

токов. В данной схеме контурные токи, проходящие по внешним ветвям являются для этих ветвей реально существующими:

$$I_1 = I_{22}; I_2 = -I_{22}; I_6 = I_{33};$$

Токи внутренних ветвей, относящихся к двум смежным контурам, находим как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих по этим ветвям:

$$I_5 = I_{11} - I_{22}; I_3 = I_{33} - I_{22}; I_4 = I_{33} - I_{22}$$

Контурные ЭДС. Контурный ЭДС называют алгебраическую сумму всех ЭДС данного контура. В нашем примере в 1-контур входят две ЭДС – E_1 и E_3 . Осуществляя обход контура по направлению контурного тока, имеем:

$$E_{11} = E_1 - E_3.$$

Аналогично для 2- контура :

$$E_{22} = - E_2 - E_4,$$

а для 3- контура : $E_{33} = E_3 + E_4 + E_6$

Собственное и общие сопротивления контуров. Сумма сопротивлений ветвей, образующих контуров, называются собственным сопротивлением контура. Собственные сопротивления контуров обозначают также двойными одинаковыми индексами (в отличие от сопротивлений ветвей) Для схемы рис.1 собственные сопротивления контура :

$$R_{11} = R_1 + R_3 + R_5 ; R_{22} = R_2 + R_4 + R_5 ; R_{33} = R_3 + R_4 + R_6.$$

Собственное сопротивление R_{11} может рассматриваться как сопротивление первого контура к первому контурному току. Также могут рассматриваться и другие собственные сопротивления контуров.

Сопротивление ветви, принадлежащие двум смежным контурам, называют общим сопротивлением (или сопротивления смежной ветви между контурами) контуров. Их обозначают двойными индексами (по номерам смежных ветвей контуров). В нашем примере сопротивлением R_5 , расположенное на границе первого и второго контура, является общим сопротивлением этих контуров $R_{12} = R_{21} = R_5$. Аналогично общие сопротивления первого и третьего контура: $R_{13} = R_{31} = R_3$, а второй и третий связанные сопротивлением: $R_{23} = R_{32} = R_4$. Если контуры не имеют общих ветвей, то их общие сопротивления равны нулю.

Структура контурных уравнений. Составление уравнений. Структура контурных уравнений для каждого независимого контура отражает равенство контурных ЭДС падением напряжения на собственных и общих сопротивлений контуров при протекании контурных токов:

Теперь для независимых контуров (ячеек) составим три уравнения по второму закону Кирхгофа. С учетом введенных понятий и обозначений:

$$E_{11} = R_{11} I_{11} - R_{12} I_{22} - R_{13} I_{33}$$

$$E_{22} = -R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} - R_{23} I_{33}$$

$$E_{33} = -R_{31} I_{11} - R_{32} I_{22} + R_{33} I_{33}$$

где R_{11} – полное или собственное сопротивление первого контура.

R_{12} – сопротивление смежной ветви (общее сопротивление) между первым и вторым контурам взятое со знаком минус.

E_{11} – контурная ЭДС первого контура.

Контрольные вопросы и задачи

1. Какие необходимые условия должны быть для эквивалентности треугольника и звезды сопротивлений напряжений?
2. Какие изменения наблюдаются при эквивалентной замене?
3. Как определяется общее сопротивление при смещенном соединении?

Лекция № 4
Однофазный переменный ток

План:

1. Получение синусоидальной э.д.с.
2. Эффективное и среднее значение синусоидального переменного тока, напряжения и э.д.с.
3. Изображение синусоидальных э.д.с. напряжений и токов в прямоугольных координатах
4. Векторное изображение синусоидальных э.д.с. напряжений и токов.
5. Комплексный метод расчета

Широкое применение в электрических цепях электро, радио- и других установок находят периодические э.д.с., напряжения и токи. Периодические величины изменяются во времени по значению и направлению, причем эти изменения повторяются через некоторые равные промежутки времени T называемые периодом.

На практике все источники энергии переменного тока (генераторы электростанций) создают э.д.с., изменяющуюся по синусоидальному закону (рис 4.1).

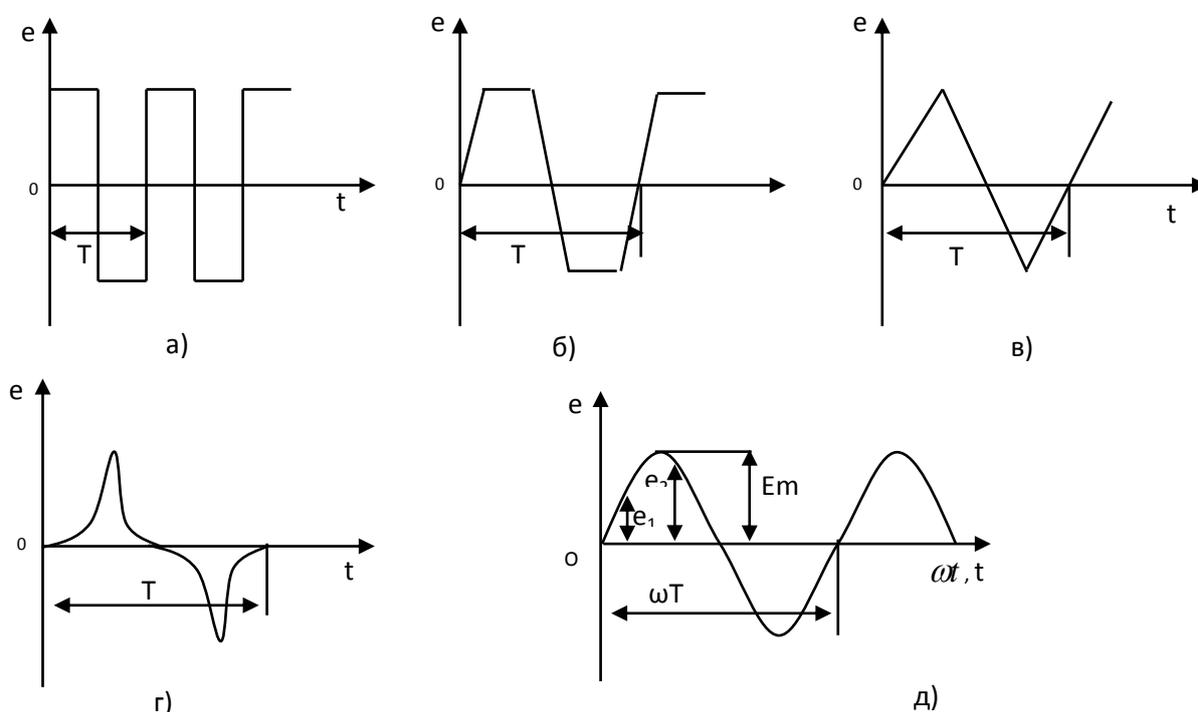


Рис.4.1.Переменные периодические э.д.с. различной формы

Ос
про
ист

а) прямоугольный; б) трапециальной; в) треугольной; г) произвольной,

Г
ая

зависимость напряжения остается неизменной, т. е. синусоидальной. Любая периодическая величина имеет ряд характерных значений. Максимальное значение или амплитуду э.д.с., напряжения и тока обозначают соответственно E_m , U_m , I_m . Значение периодически изменяющейся величины в рассматриваемый момент времени называют мгновенное ее значения и обозначают e , u , i – э.д.с., напряжения и ток соответственно, максимальное значение – частный случай мгновенного значения

Величина обратная периоду, т.е. число полных изменений периодической величины за 1с, называется частотой.

$$f = \frac{1}{T} \quad \Gamma\text{ц} = \frac{1}{\text{сек}} \quad (4.1)$$

Во всех энергосистемах СНГ и других европейских стран в качестве стандартной промышленной частоты принята $f=50$ Гц, в США и Японии $f=60$ Гц. Это обеспечивает получение оптимальной частоты вращения электродвигателей переменного тока и отсутствия заметного для глаза мигания

осветительных ламп накаливания. Некоторые электротехнические устройства работают при более высокой частоте. Повышенная частота (обычно 175-200 Гц) позволяет снизить вес электродвигателей, применяемых для привода электроинструмента и средств автоматики. В установках сквозного нагрева металлов для горячей штамповки иковки применяют частоту от 300 до 10000 Гц, а в установках поверхностного нагрева металлов – от 2000 до 106 Гц. В радиотехнических устройствах применяют частоту от 105 до 3·10¹⁰ Гц. Находят применение синусоидальные токи пониженной частоты. Частоту $f=5\div 10$ Гц применяют в металлургической промышленности. В некоторых странах для электропечи на

$$16\frac{2}{3} \text{ Гц} \left(\frac{50}{3} = 16\frac{2}{3} \right)$$

железных дорогах применяют частоту

Получение синусоидальной э.д.с.

Синусоидальная э.д.с. в линейных цепях, где содержатся активные сопротивления, индуктивности и емкости, возбуждает ток, изменяющийся по закону синуса. Возникающие при этом э.д.с. в катушках и напряжения на конденсаторах, как это вытекает из выражений

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad i = C \frac{du_c}{dt}$$

также изменяется по закону синуса, так как производная синусоидальной функции есть функция синусоидальная. Напряжение на сопротивление будет также изменяться по синусоидальному закону так как

$$u = ir$$

Целесообразность технического использования синусоидального тока обусловлена так, что коэффициент полезного действия генераторов, двигателей, трансформаторов и линий электропередач при синусоидальной форме э.д.с., напряжения и тока получается наивысшим по сравнению с несинусоидальным током. Важную роль играет и тот факт, что расчет цепей, где э.д.с., напряжение и ток изменяются по закону синуса, значительно проще чем расчет цепей, где указанные величины изменяются по несинусоидальному закону.

Рассмотрим механизм возникновения и основные соотношения, характерные для синусоидальной э.д.с.. Для этого удобно использовать простейшую модель – рамку, вращающуюся с постоянной угловой скоростью и в равномерном магнитном поле.

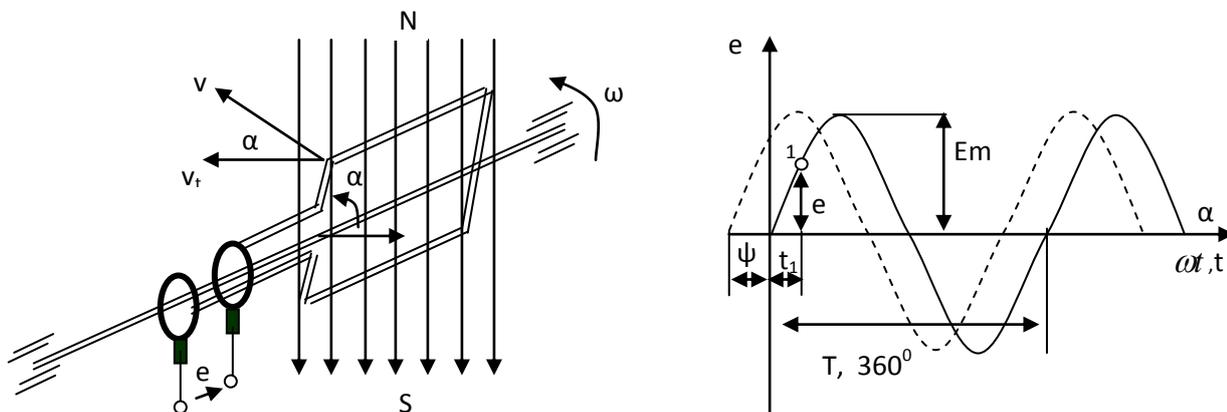


Рис.4.2. Принципиальная схема простейшего генератора синусоидальной э.д.с. (а) временная диаграмма (б)

мка
ьна

магнитной индукции B , длине проводника l , скорости перемещения проводника относительно поля v_t .

Выразив скорость v_t через окружную скорость и угол α , получим v

$$e = Blv_t, \quad e = Blv \sin \alpha \quad (4.2)$$

Коэффициент перед синусом представляет собой наибольшее значение э.д.с., которое возникает в рамке при $\alpha=90^\circ$.

Угол α равен произведению угловой скорости вращения рамки на время t . $\alpha = \omega t$. Таким образом, э.д.с., возникающая в рамке, будет равна

$$e = E_m \sin \alpha = E_m \sin \omega t$$

За один оборот рамки происходит полный цикл изменения э.д.с. Если при $t=0$ э.д.с. не равно нулю, то выражение э.д.с. записывается в виде

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad (4.3)$$

где e - мгновенное значение э.д.с. в любой момент времени;

E_m - максимальное значение э.д.с. или ее амплитуда;

$(\omega t + \psi)$ - аргумент синуса или фаза, характеризующая значение э.д.с. в данный момент времени;

ψ - начальная фаза, определяющая значение э.д.с. при $t = 0$.

Эффективное и среднее значение синусоидального переменного тока, напряжения и э.д.с.

Как постоянный, так и синусоидальный токи используются для совершения какой-либо работы, в процессе которой электроэнергия преобразуется в другие виды энергии.

Для количественной оценки синусоидального тока (э.д.с. и напряжения), который в течении времени непрерывно периодически изменяется, используют значение постоянного тока по совершенной работе. Такое значение будет действующим для синусоидального тока.

Исходя из этого условия, действующим значением синусоидального тока называется такое значение постоянного тока, при прохождении которого в одном и том же резисторе с сопротивлением R за время одного периода T выделяется столько же теплоты, сколько и при прохождении синусоидального тока.

При синусоидальном токе $i = I_m \sin \omega t$ количество теплоты Q выделенное в резисторе R за время T .

$$Q_{\sim} = \int_0^T i^2 R dt \quad (4.4)$$

а при постоянном токе

$$Q = RI^2 T \quad \text{согласно определению, } Q = Q_{\sim} \text{ тогда}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (4.5)$$

Таким образом, действующее значение синусоидального тока является его среднеквадратичным значением.

Чтобы найти соотношение между максимальным и действующим значениями синусоидального тока надо вычислить интеграл в (4.5).

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \frac{dt}{2} - I_m^2 \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt \quad \text{так как } \int_0^T \cos 2\omega t dt = 0 \quad \text{получаем}$$

$$\int_0^T i^2 dt = I_m^2 \int_0^T dt = \frac{I_m^2 T}{2}$$

подставляя это выражение в формулу (4.5) получим

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m \quad (4.6)$$

Аналогично

$$E = E_m / \sqrt{2} = 0,707 E_m \quad (4.7)$$

$$U = U_m / \sqrt{2} = 0,707 U_m \quad (4.8)$$

Действующие значения синусоидальных величин в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений.

В большинстве электроизмерительных приборов, измеряющих ток и напряжение, используется принцип теплового или электродинамического эффекта. Поэтому они всегда показывают действующее значение, зная которое можно вычислить амплитуду. Так например, если вольтметр показывает 220 В синусоидального напряжения, то амплитуда этого напряжения равна $\sqrt{2} \cdot 220 = 311$ В.

Под средним значением синусоидальной величины понимают ее среднеарифметическое значение. Если определять среднее значение синусоидальных величин за период, то оно будет равно нулю, так как положительная и отрицательная половина синусоидальных кривых совпадают по форме. Поэтому среднее значение синусоидального тока, э.д.с. и напряжения определяют за полупериода. За среднее значение синусоидального тока можно принять такое значение постоянного тока, при котором за полпериода переносится такой же электрический заряд, что и при синусоидальном токе.

Согласно этому можно написать

$$I_{cp} \frac{T}{2} = \int_0^{T/2} i dt \quad (4.9)$$

где I_{cp} - среднее значение тока для синусоидального тока $i = I_m \sin \omega t$

$$\int_0^{T/2} i dt = I_m \int_0^{T/2} \sin \omega t dt = \frac{I_m T}{\pi}$$

подставляя это выражение во (4.8) имеем

$$I_{cp} = 2I_m / \pi = 0,637 I_m$$

$$E_{cp} = 2E_m / \pi = 0,637 E_m$$

Аналогично

$$U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi} = 0,637 U_m$$

отношение действующего значения к среднему называется коэффициентом формы периодической кривой. Для синусоидальной кривой коэффициент формы

$$K_\phi = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m \pi}{2\sqrt{2}I_m} = 1,11$$

Изображение синусоидальных э.д.с. напряжений и токов в прямоугольных координатах

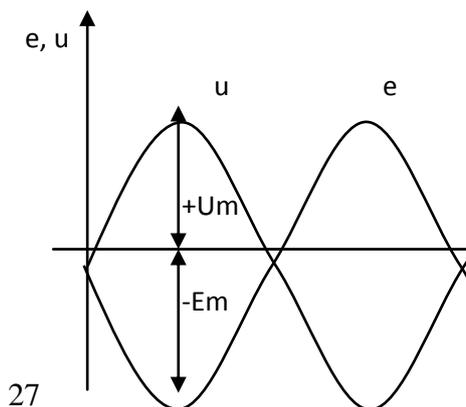
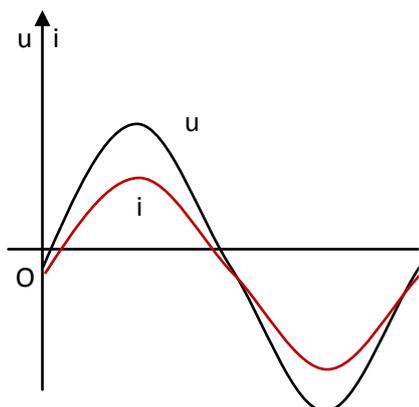
Синусоидальное э.д.с. напряжения и токи могут быть записаны в виде уравнений.

$$e = E_m \sin \omega t \quad u = U_m \sin \omega t \quad i = I_m \sin \omega t \quad (4.10)$$

В общем случае аргумент синусоидальной функции, называемый фазовым углом или просто фазой, равный $\omega t + \psi = 0$ или $\omega t - \psi = 0$ может отличаться от 0 при $t=0$. Тогда мгновенное значение можно записать так:

$$e = E_m \sin(\omega t \pm \psi_e) \quad u = U_m \sin(\omega t \pm \psi_u) \quad i = I_m \sin(\omega t \pm \psi_i)$$

значение фазового угла при $t=0$ называется начальной фазой (ψ_e, ψ_u, ψ_i)



Графическое изображение синусоидальной э.д.с. в прямоугольных координатах было показано ранее. Аналогично этому изображают напряжение и ток, описываемые уравнениями (4.10), когда начальные фазы равны нулю (рис.4.3). В этом случае синусоидальные величины одновременно проходят через нулевые и максимальные значения. О таких величинах говорят, что они совпадают по фазе. Синусоидальные величины будут также совпадать по фазе, если их начальные фазы равны.

Если две синусоидальные величины одновременно проходят через нулевые значения и одновременно принимают максимальные значения противоположных знаков, то такие величины находятся в противофазе или сдвинуты по фазе на угол π (рис.4.4).

На практике чаще всего имеют место случаи, когда э.д.с. напряжения и тока не совпадают по фазе, т.е. через нулевые значения проходят не одновременно (рис.4.5)

Если такие э.д.с. описываются уравнениями

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1}), \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_{e_2}),$$

то при $\psi_{e_2} > \psi_{e_1}$ э.д.с. e_2 опережает по фазе э.д.с. e_1 или э.д.с. e_1 отстает по фазе от э.д.с. e_2 . Разность фазовых углов

$$\psi_e = \psi_{e_2} - \psi_{e_1} \quad (4.11)$$

называют разностью или сдвигом фаз.

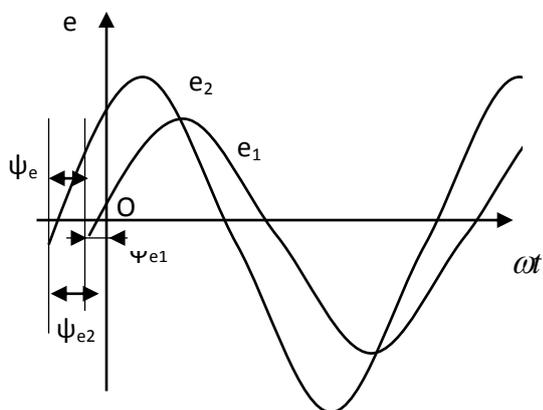


Рис.4.5. Синусоидальные э.д.с. не совпадающие по фазе

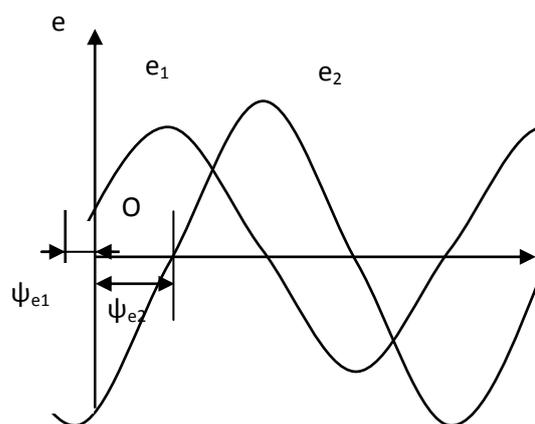


Рис.4.6. Синусоидальные э.д.с. положительной и отрицательной начальными фазами

С помощью графического изображения в прямоугольных координатах можно находить опережающую и отстающую синусоидальные величины. При этом пользуются таким правилом. Отстает по фазе та из двух синусоидальных величин, которая при переходе от отрицательных значений к положительным позже (правее) пересекает ось абсцисс. На рис.4.5 э.д.с. e_1 отстает по фазе от э.д.с. e_2 . Фазовый угол, определяемый отрезком оси абсцисс, заключенными между точками пересечения ее синусоидальными кривыми является углом сдвига по фазе (угол ψ_e).

Таким образом, можно сделать вывод: если синусоидальная величина при переходе от отрицательных значений к положительным пересекает ось абсцисс левее оси ординат, то она имеет положительную начальную фазу, а если правее – то отрицательную

Изображения на рис.6.6 э.д.с. описываются уравнениями

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1}) \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \psi_{e_2})$$

Особое значение в электротехнике и электроэнергетике имеет угол сдвига по фазе ϕ между напряжением и током.

$$\phi = \psi_u - \psi_i$$

где ψ_u и ψ_i – начальные фазы напряжения и тока.

Если начальную фазу тока выразить через начальную фазу напряжения $\psi_i = \psi_u - \phi$, то напряжение и ток будут описываться формулами

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \phi)$$

Если $\psi_u = 0$, то

$$u = U_m \sin \omega t \quad i = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

Эти уравнения показывают, что если угол ϕ положительный, то ток отстает по фазе от напряжения на этот угол (рис.4.7), и наоборот.

При сложении синусоидальных величин, изображенных в прямоугольных координатах, надо сложить ординаты для ряда значений угла ωt и по точкам построить синусоиду суммарной величины. Чем больше точек берут для построения, тем точнее сложение. На рис.4.8 показано сложение двух токов i_1 и i_2 . Суммарный ток; $i = I_m \sin(\omega t + \psi_u)$, причем $I_m \neq I_{1m} + I_{2m}$, а $\psi_i = \psi_{i2} - \psi_{i1}$.

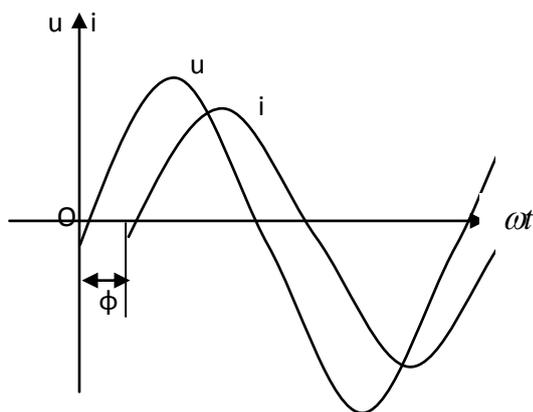


Рис.4.7. Синусоидальные напряжение и ток, сдвинутые по фазе на ϕ

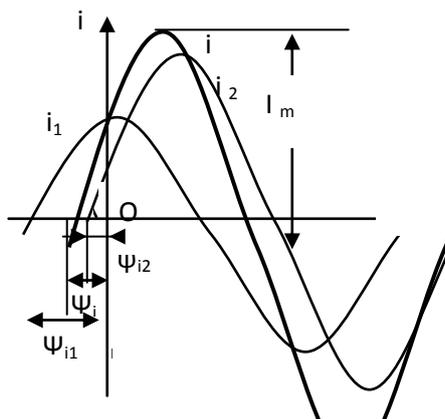


Рис.4.8. Графическое сложение синусоидальных токов

Векторное изображение синусоидальных э.д.с. напряжений и токов.

Графическое построение синусоидальных величин в прямоугольных координатах является довольно трудоемкой операцией.

В плоскости с осями координат Ox и Oy (рис.4.9 а) рассмотрим вращающийся с постоянной скоростью, равной угловой частоте ω , вектор OA , длина которого равна амплитуде

$$\text{синусоидальной э.д.с. } e = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \text{ т.е. } |OA| = E_m$$

Проекция на ось Oy вектора вращающегося с постоянной скоростью ω и имеющего длину, равную амплитуде э.д.с., изменяется по синусоидальному закону, т.е. представляют собой мгновение значения синусоидальной э.д.с. следовательно, справедливо и обратное: любую синусоидально изменяющуюся во времени величину можно изображать вращающимся вектором, длина которого равна амплитуде, а угловая скорость вращения – угловой частоте этой синусоидальной величины. Начальное положение вращающегося вектора определяется углом,

равным начальной фазе синусоидальной величины и откладываемым от положительного направления оси OX в сторону, противоположную вращению часовой стрелки.

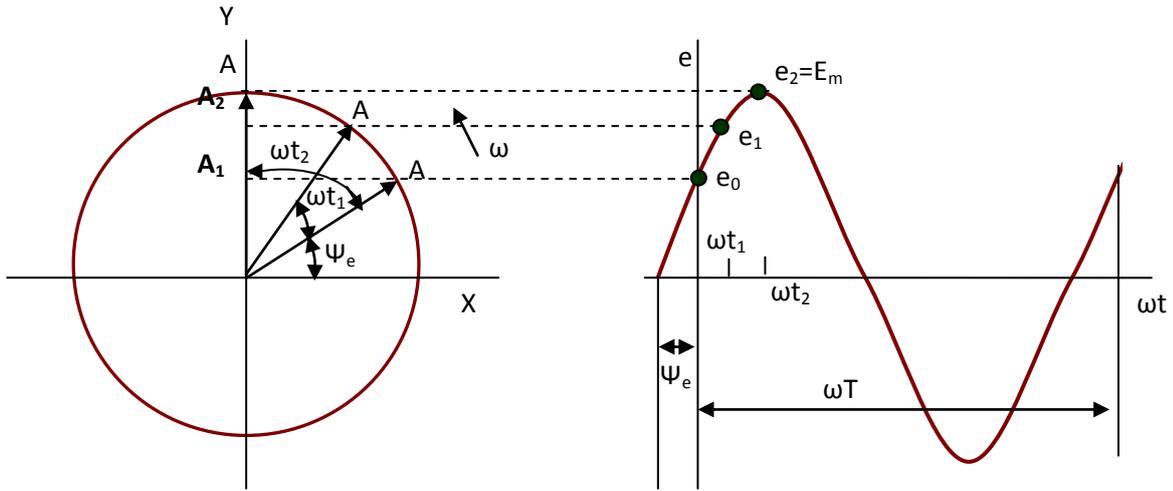


Рис.4.9. Векторное изображение синусоидальных э.д.с.

Векторами можно изображать синусоидальные э.д.с. напряжения, потенциалы и токи. Так как все э.д.с. напряжения и токи имеют одинаковую частоту, то изображающие их векторы вращаются с одинаковой угловой скоростью.

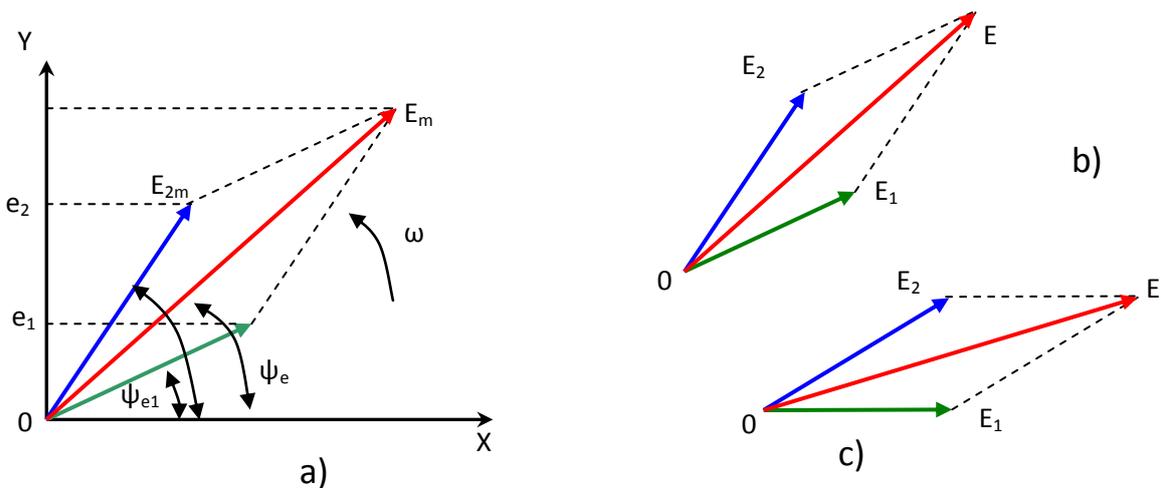


Рис.4.10. Геометрическое сложение вращающихся векторов.

а - максимальных значений э.д.с., б - действующих значений э.д.с. при произвольном расположении векторов, в - действующих значений э.д.с. при произвольном расположении векторов. Их взаимное положение на плоскости остается постоянным. Поэтому векторы на практике не вращают, а строят их, соблюдая углы сдвига фаз. Отказавшись от вращения векторов, можно строить векторы не только максимальных, но и действующих значений.

Сумму двух э.д.с., имеющих разные амплитуды и начальные фазы:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1}) \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_{e_2})$$

$$\text{мгновенное значение суммарной э.д.с.} \quad e = e_1 + e_2 \quad e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$$

Так как слагаемые э.д.с. имеют одинаковую частоту ω , то такую же частоту будет иметь и суммарная э.д.с.

Если несколько векторов, э.д.с. напряжений и токов, построенных с учетом их правильного взаимного расположения на плоскости, является изображением э.д.с., напряжений и токов, действующих в какой-то электрической цепи, то такая совокупность векторов называется векторной диаграммой.

Для простейшей электрической цепи, состоящей из одного элемента, на запись которой действует напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и ток в котором $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = I_m(\omega t + \psi_u - \psi)$ остается по фазе на ψ от напряжения, векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис.4.11.

Начальные фазы напряжения ψ_u и тока ψ_i на векторной диаграмме никак не изображаются, так как взаимное положение векторов полностью определяется разностью фаз $\psi = \psi_u - \psi_i$.

Комплексный метод расчета

Все графические методы расчета электрических цепей синусоидального тока, в том числе и метод векторных диаграмм, не могут обеспечить высокой точности или очень сложны и трудоемки.

Комплексный метод расчета, основанный на теории комплексных чисел, довольно прост и позволяет добиваться высокой точности.

Любой вектор на плоскости, проведенный из начала координат и изображающий действующее значение э.д.с., напряжения или тока, однозначно определяются точной, соответствующей концу этого вектора (точка А на рис.4.12).

На плоскости комплексных чисел А соответствует одно комплексное число \dot{A} .

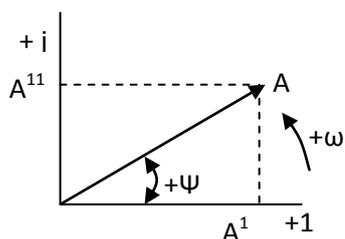


Рис.4.12. Составляющие комплексного числа на комплексной плоскости

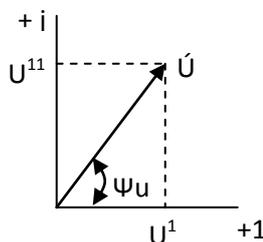
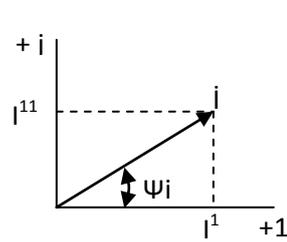


Рис.4.13. Изображение векторов напряжения (а) и тока (б) на комплексной плоскости



Таким образом, любой вектор, изображенный на комплексной плоскости, соответствует концу этого вектора. Благодаря такому символическому изображению этот метод называют иногда символическим. Комплексный метод расчета применим только к цепям с синусоидальным э.д.с., напряжениями и токами, так как только синусоидальные величины можно изображать векторами.

Комплексное число \dot{A} имеет вещественную и мнимую составляющие:

$$\dot{A} = A' + jA'' \quad (4.12)$$

где A' - координата точки А на вещественной оси;

A'' - координата точки А на мнимой оси; $j = \sqrt{-1}$.

Умножение какого-то числа на j означает поворот его на угол $\frac{\pi}{2}$, по отношению к положительному направлению вещественной оси в направлении против часовой стрелки.

Координаты точки А могут быть выражены через длину вектора $|OA| = A$

и угол ψ : $A' = A \cos \psi$, $A'' = A \sin \psi$. Тогда комплексное число можно записать следующим образом:

$$\dot{A} = A(\cos \psi + j \sin \psi) \quad (4.13),$$

где $A = \sqrt{(A')^2 + (A'')^2}$ - модуль комплексного числа, равный длине вектора ОА;

$\psi = \arctg(A'' / A')$ - аргумент комплексного числа, т.е. угол, на который вектор

ОА повернут по отношению к положительному направлению вещественной

оси. Угол ψ положителен, если он отсчитывается в направлении, противоположном вращению часовой стрелки.

Используя формулу Эйлера $\cos \psi + j \sin \psi = e^{j\psi}$, из (4.13) получим

$$\dot{A} = Ae^{i\psi}, \quad (4.14)$$

где $e^{i\psi}$ - поворотный множитель, указывающий на какой угол по отношению к вещественной оси должен быть повернут вектор, длина которого равна $|A|$. При этом $e^{\pm j\pi/2} = \pm j$, $e^{\pm j\pi} = -1$, $e^{\pm j2\pi} = 1$.

Таким образом, поворот вектора OA на угол $\pm j\pi/2$ соответствует умножению его на -1 и т.д.. Над комплексными числами, можно производить все алгебраические Действия. При сложении и вычитании удобнее пользоваться алгебраической формой записи (4.12), а при умножении, делении, возведении в степень и извлечении из корней – показательной формой записи (2.14) комплексного числа.

Синусоидальное напряжение $u = u_m \sin(\omega t + \psi_u)$ можно представить комплексным числом \dot{U}_m или \dot{U} (\dot{U}_m - комплексная амплитуда напряжения, \dot{U} -комплексное действующее значение, которое будем называть комплексным напряжением). При этом

$$\dot{u}_m = u_m e^{j\psi_u}; \quad \dot{u} = u e^{j\omega t + j\psi_u} \quad (4.15)$$

Амплитуда напряжения – модуль, а угол ψ_u , являющийся начальной фазой – аргумент комплексного напряжения (рис.4.15).

Комплексное число $u_m e^{j(\omega t + \psi_u)}$, аргумент которого изменяется во времени, так как вектор вращается со скоростью ω , изображает мгновенное значение напряжения $u = u_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Таким образом, в общем случае аргументом комплексного числа является аргумент синусоидальной функции.

Синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ можно представить комплексным числом

$$\dot{i}_m = I_m e^{i\psi_i}; \quad \dot{i} = I e^{i\omega t + i\psi_i} \quad (4.16)$$

где \dot{i}_m - комплексная амплитуда тока;

\dot{i} - комплексное действующее значение тока (комплексный ток).

Модуль и аргумент комплексного числа, изображающего ток, определяется так же, как и для напряжения.

Режим электрической цепи переменного тока описывается уравнениями, членами которых могут быть производные и интегралы синусоидальных функций. Эти члены уравнений также должны быть изображены комплексными числами.

Для примера рассмотрим ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, который изображается комплексным числом:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = \dot{i}_m e^{j\omega t}$$

Производная тока $\frac{di}{dt} = \omega \dot{i}_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2})$ будет изображаться комплексным числом

$$\omega I_m e^{j(\omega t + \psi_i + \pi/2)} = \omega \dot{i}_m e^{j\omega t} e^{j\pi/2} = j\omega \dot{i}_m e^{j\omega t}$$

где $\omega \dot{i}_m$ - модуль комплексной производной.

Таким образом, комплексное число, изображающее производную синусоидальной функции, равно комплексному числу, изображающему саму синусоидальную функцию $\dot{i}_m e^{j\omega t}$, умноженному на $j\omega$.

Интеграл от тока $\int i dt = \frac{I_m}{\omega} \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2})$ будет изображаться комплексным числом

$$\frac{I_m}{\omega} e^{j(\omega t + \psi_i - \pi/2)} = \frac{I_m}{\omega} e^{j\omega t} e^{-j\pi/2} = \frac{\dot{i}_m e^{j\omega t}}{j\omega}$$

где I_m/ω - модуль комплексного интеграла;

$$e^{-j\pi/2} = -j = \frac{1}{j}.$$

Таким образом, комплексное число, изображающее интеграл синусоидальной функции, равно комплексному числу, изображающему саму синусоидальную функцию $I_m e^{j\omega t}$, деленному на $j\omega$. Следовательно, изображение синусоидальных функций комплексными числами позволяет заменить дифференцирование умножением на $j\omega$, а и интегрирование – делением на $j\omega$.

Вопросы

1. Переменный ток и его основные параметры.
2. Основные величины синусоидального тока
3. Эффективное и среднее значение синусоидального переменного тока, напряжения и э.д.с.
4. Электрические цепи с однофазным источником электрической энергии.
4. Векторное и комплексное представление однофазного переменного напряжения

Лекция № 5

Основные элементы электрической цепи переменного тока

План:

1. Законы Кирхгофа для электрической цепи синусоидального тока.
2. Электрическая цепь с активным сопротивлением.
3. Электрическая цепь с индуктивностью.
4. Электрическая цепь с емкостью.

Законы Кирхгофа для электрической цепи синусоидального тока

Для цепей синусоидального тока также справедливы законы Кирхгофа, сформулированные ранее для цепей постоянного тока. Но так как синусоидальные величины (э.д.с. напряжение, ток) характеризуются мгновенными, максимальными и действующими значениями, то для каждого из них существуют свои формулировки законов Кирхгофа.

Для мгновенных значений законы Кирхгофа справедливы в алгебраической форме.

Первый закон состоит в том, что алгебраическая сумма мгновенных значений токов в узле равна 0.

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

По второму закону алгебраическая сумма э.д.с. в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n u_k$$

Для максимальных и действующих значений законы Кирхгофа справедливы только в векторной или комплексной форме. Согласно первому закону, сумма комплексных токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (5.1)$$

Второй закон Кирхгофа может быть сформулирован иначе сумма мгновенных или комплексных значений падений напряжений на всех элементах контура, включая источники э.д.с., равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad \text{или} \quad \sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (5.2)$$

При составлении уравнений законов Кирхгофа в цепях синусоидального тока необходимо указать условное положительное направление э.д.с., задать угловое положительное напряжение токов в ветвях и положительное направление падений напряжений на участках цепи, совпадающее с положительным напряжением тока. Знак слагаемых в уравнениях определяется также как в цепях постоянного тока. Это относится как к мгновенным значениям синусоидальных величин, так и к комплексным.

Электрическая цепь с активным сопротивлением

Электрический ток проводимости в металлах представляет собой направленное движение свободных электронов, скорость и направление которого определяются значением и полярностью приложенного к проводнику напряжения. При движении электроны сталкиваются с атомами проводящего вещества и кинетическая энергия электронов запасенная ими при ускорении, превращается в тепловую энергию, затрачиваемую на нагрев проводника. Это необратимый активный процесс определяется сопротивлением R называют его активным сопротивлением. Активным сопротивлением обладают практически все материалы, проводящие электрический ток—элементы электрической цепи, обладающие только активным сопротивлением R , называют резисторами. При рассмотрении электрических цепей постоянного тока сопротивление R называют просто сопротивлением. В теории цепей синусоидального тока его называют активным сопротивлением. С одной стороны это вызвано тем, что необходимо с названиями других по характеру сопротивлений (индуктивное, емкостное, реактивное, полное) характеризующих цепь

синусоидального тока с другой – тем, что один и тот же проводник оказывает большее сопротивление движению электронов при синусоидальном токе, чем при постоянном. Пусть к зажимам цепи с активным сопротивлением R (рис.5.1) приложено напряжение источника питания $u = u_m \sin \omega t$. Для простоты принимаем, что начальная фаза напряжения равна 0, так как для установившегося режима начальная фаза не имеет никакого значения.

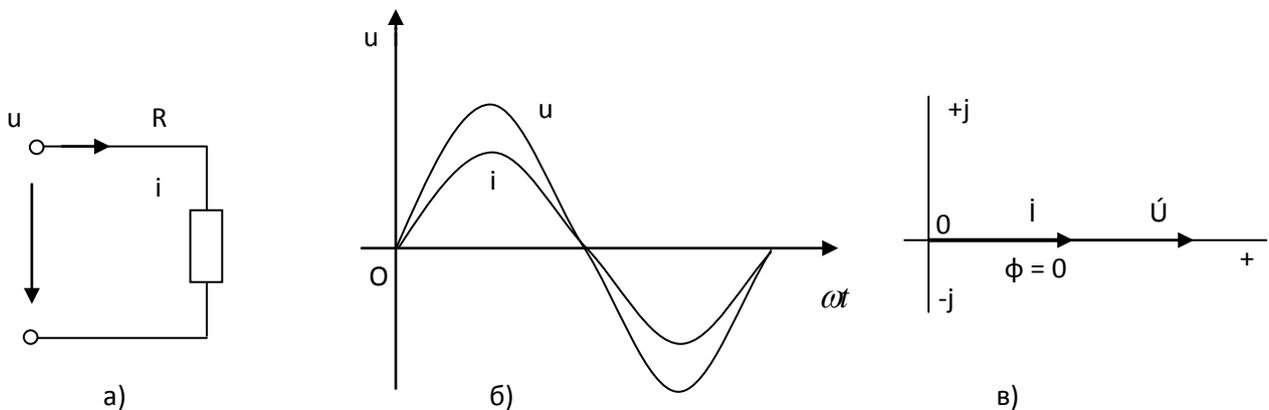


Рис. 7.1. Электрическая цепь с активным сопротивлением R .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенных значений напряжения имеем $u = Ri$. Решая это уравнение относительно тока i и заменяя u на $u_m \sin \omega t$, получаем

$$i = \left(\frac{u_m}{R}\right) \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (5.3)$$

Причем амплитуда тока в цепи

$$I_m = \frac{u_m}{R} \quad (5.4)$$

Из уравнения (5.3) видно, что ток в элементе с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением на этом элементе (рис.5.1, б).

Действующие значения синусоидальных напряжений и тока связаны между собой законом Ома

$$I = \frac{U}{R}$$

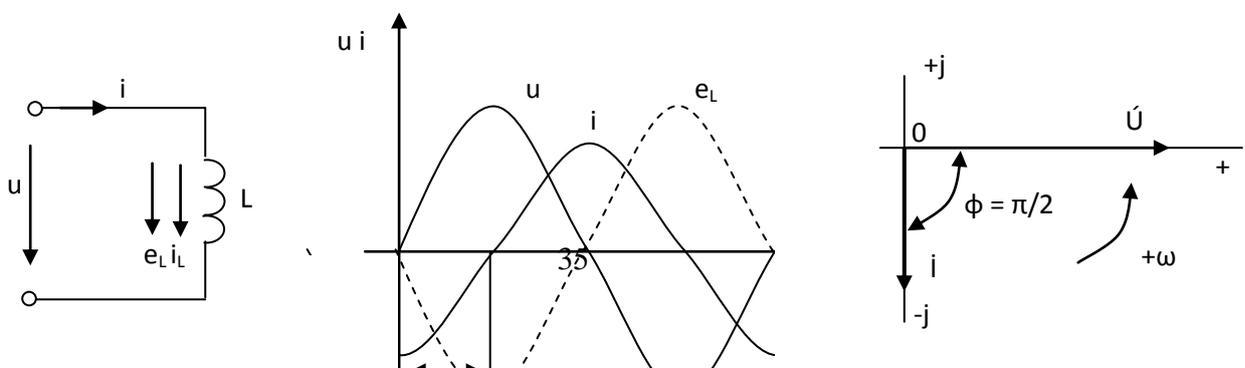
также, как постоянные напряжения и ток

На векторной диаграмме (рис.5.1, в) комплексные значения напряжений \dot{U} и тока \dot{i} в цепи представлены векторами на комплексной плоскости. Начала векторов совмещены с началом координат, длины векторов в соответствующем масштабе равны действующим значениям напряжения и тока.

Начальный вектор совмещен с положительным направлением вещественной оси. Для цепи с активными сопротивлениями векторы напряжения и тока совпадают по направлению.

Электрическая цепь с индуктивностью

Индуктивностью L теоретически обладают все проводники с током. но в некоторых случаях эта индуктивность так мала, что ею вполне можно пренебречь. Значительна индуктивность у обмоток или катушек, состоящих из большого числа витков провода. Индуктивность возрастает, если созданный током обмотки магнитный поток замыкается по пути с полным магнитным сопротивлением (например, по стальному сердечнику), в последствии чего магнитный поток увеличивается.



Рассмотрим идеальную катушку с постоянной индуктивностью L , т.е. такую катушку, активное сопротивление которой равно нулю).

Пусть к цепи с индуктивностью L приложено синусоидальное напряжение $u = u_m \sin \omega t$. Под действием этого напряжения в цепи индуктивной катушки возникает ток i . Этот ток создает магнитный поток Φ , который согласно закону электромагнитной индукции индуцирует в катушке Э.д.с. самоиндукции

$$e_L = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (5.5)$$

где ω - число витков катушки.

Знак минус согласно принципу электромагнитной индукции, указывает на то, что Э.д.с.

самоиндукции e_L всегда имеет такое направление. При котором она препятствует изменению магнитного потока или тока в цепи.

На рис.5.2, а показаны условия положительного направления тока i в цепи и падения напряжения u_L на элементе с индуктивностью L . Условное положительное направление Э.д.с. e_L выбирают из условия, что ее действительное направление в любой момент времени противоположно направлению u_L ($u_L = -e_L$). По второму закону Кирхгофа имеем $u - u_L$, а с учетом того, что $u_L = -e_L$, получим

$$u + e_L = 0 \quad (5.6)$$

Чтобы получить это уравнение по первому закону Кирхгофа, условное положительное направление e_L следует всегда принимать совпадающим с положительным направлением тока.

Так как $u = u_m \sin \omega t$, а e_L определяется из (5.5), уравнение (5.6) принимает вид

$$u_m \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{di}{dt} = \frac{u_m}{L} \sin \omega t$$

Решая это уравнение, получим выражение для тока в цепи

$$i = \frac{u_m}{L} \int \sin \omega t dt = -\frac{u_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{u_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

Так как амплитуда тока

$$I_m = \frac{u_m}{\omega L} \quad (7.7)$$

то окончательное выражение для тока имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (7.8)$$

Видно, что в цепи с индуктивностью ток также изменяется по синусоидальному закону и отстает

по фазе от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 5.2,б).

В формуле (5.7) знаменатель ωL в первой части имеет размерность сопротивления. Это индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (5.9)$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте и индуктивности.

С учетом формулы (5.9) получаем

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}$$

Для действующих значений напряжения и тока

$$I = \frac{U}{X_L} \quad (5.10)$$

Так согласно (7.6) э.д.с. самоиндукции численно равно напряжению на элементе с индуктивностью, то используя формулу (5.10) имеем

$$X_L I = U = E_L \quad (5.11)$$

Видно, что индуктивное сопротивление является коэффициентом пропорциональности между током и э.д.с. самоиндукции, что $\psi_u = 0$, комплексное напряжение $\dot{U} = U$, комплексный ток $\dot{I} = I e^{-j\pi/2} = -jI$.

На векторной диаграмме (рис.5.2, в) вектор напряжения, имеющий начальную фазу, равную нулю,

отложен по вещественной оси, а вектор тока, имеющий начальную фазу $\psi_i = -\frac{\pi}{2}$ в отрицательном направлении мнимой оси. Угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи с индуктивностью

$$\psi = \frac{\pi}{2}$$

Если модуль напряжения и тока связаны соотношением (5.11) то их комплексные значения связаны соотношением

$$\dot{U} = U = X_L I = X_L I e^{j\pi/2} = jX_L I$$

Электрическая цепь с емкостью

Элементом электрической цепи, обладающим значительной емкостью, является конденсатор. Конструктивно конденсатор представляет собой две пластины с большой поверхностью, выполненные проводящего материала и разделенные диэлектриком. Емкость C конденсатора определяет тот электрический заряд, который накапливается на пластинах при разности потенциалов.

Хотя пластины конденсатора и разделены диэлектриком, при переменном напряжении ток в цепи с конденсатором существует. Это связано с тем, что синусоидальное напряжение непрерывно меняется по значению и направлению, а, следовательно, и заряд на пластинах конденсатора непрерывно меняется. Это изменение заряда и связанное с ним движение электронов и есть электрический ток в цепи.

Емкостью обладают любые два проводника, расположенные недалеко друг от друга. Но при малой поверхности их емкость невелика и ею обычно пренебрегают. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника питания и конденсатора емкостью C (рис. 5.3,а). Будем считать, что конденсатор имеет идеальный диэлектрик, т. е. его активное сопротивление равно нулю. К цепи с конденсатором подведено синусоидальное напряжение $U = U_m \sin \omega t$, под действием которого в

цепи возникает ток i и на каждой пластине конденсатора скапливается заряд $Q = C \cdot u_c$, где u_c - падение напряжения на конденсаторе.

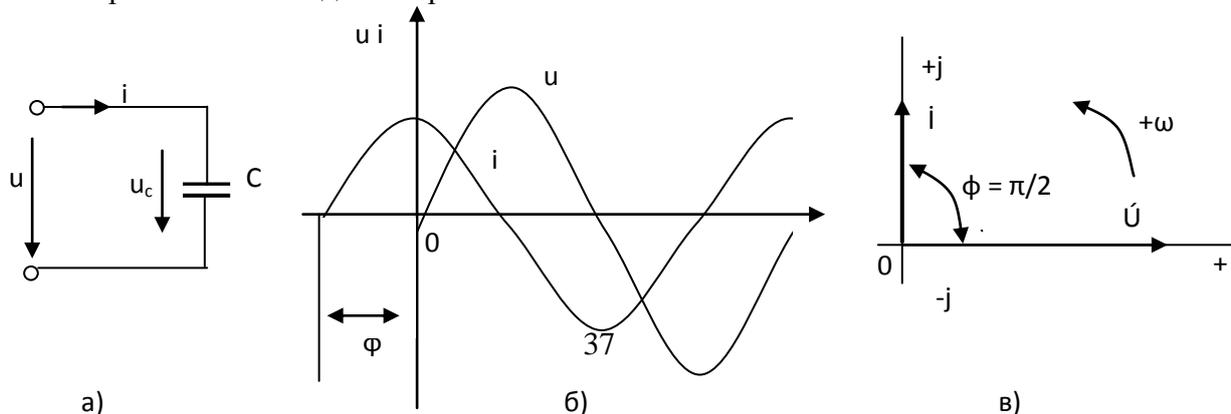


Рис 5.3. Электрическая цепь с емкостью C : а) схема б) изменение

По второму закону Кирхгофа для данной цепи имеем $u = u_c$. Тогда заряд на конденсаторе:
 $Q = C \cdot u = C \cdot U_m \sin \omega t$.

Ток в цепи, представляющий собой изменение заряда во времени

$$i = \frac{dQ}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = \omega C U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

или

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.12)$$

где амплитуда тока

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/\omega C} \quad (5.13)$$

Из формулы (5.12) видно, что ток в цепи с емкостью является синусоидальным и опережает

напряжение по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 5.3,б)

Рассмотрим процесс протекания тока в цепи с емкостью подробнее. Под действием приложенного напряжения происходит поляризации диэлектрика, т.е. смещение заряженных частиц, входящих в состав молекул его вещества, в противоположных направлениях. Электрические нейтральные при отсутствии внешнего электрического поля молекулы диэлектрика превращаются в электрические диполи, т.е. системы двух противоположных по знаку точечных зарядов. В процессы поляризации в диэлектрике происходит движение элементарных частиц в пределах молекулы, образующие ток поляризации или ток смещения.

На рис. 5.4, б, в показаны действительные мгновенные значения потенциалов точек а и d. В первую четверть периода ($0 < t < T/4$) потенциал точки а (рис. 5.4, б) положительный и

увеличивается от 0 до $+U_m$. Поляризации диэлектрика пропорциональны скорости изменения потенциала точки а. Ток в цепи направлен в точки а, имеющей в данный промежуток времени

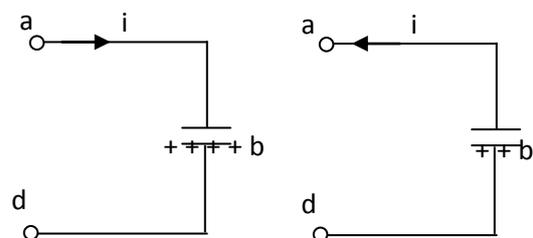
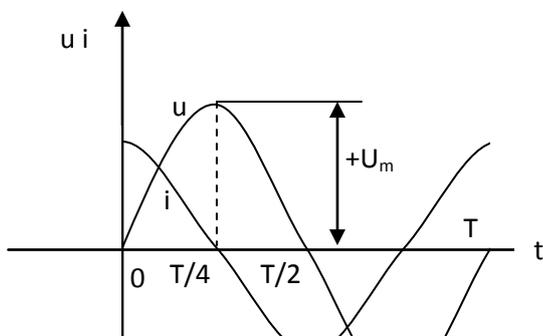
$$t = \frac{T}{4}$$

большой потенциал, и совпадает по направлению с напряжением. В момент времени

потенциал точки а достигает значения $+U_m$ и в течении $\Delta t \rightarrow 0$ не изменяется, в следствии чего $i = 0$ (рис. 5.4, б).

Во вторую четверть периода ($\frac{T}{4} < t < \frac{T}{2}$) потенциал точки а остается положительным, но уменьшается от $+U_m$ до нуля. Пластина *b* конденсатора, заряженная до потенциала $+U_m$, оказывается в таких условиях, когда ее потенциал больше потенциала точки а. Напряжение тока изменяется на противоположное (рис. 5.4, в), т.е. ток становится отрицательным. Наибольшая

разность потенциалов имеет при $t = \frac{T}{2}$. В этот момент времени ток достигает отрицательного максимума. Далее процесс повторяется.



Величина $\frac{1}{\omega c}$, обозначается X_c и называется емкостным сопротивлением:

$$X_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{2\pi f c}$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте и емкости конденсатора.

Таким образом, $I_m = \frac{U_m}{X_c}$,

Поделив обе части уравнения $\sqrt{2}$, получим выражение закона Ома для действующих тока и напряжения:

$$I = \frac{U}{X_c}$$

Комплексный ток на основании выражения (5.12)

$$I = I e^{j\frac{\pi}{2}} = j \cdot I \quad (5.14).$$

С учетом выражения (7.14) можно найти соотношение между комплексным напряжением и током в цепи с емкостью:

$$U = X_c \cdot I = X_c \cdot I \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_c \bar{I}$$

Векторная диаграмма комплексных значений напряжения и тока представлена на рис. 5.3 в.

Вопросы

1. Первый закон Кирхгофа для синусоидального тока.
2. Второй закон Кирхгофа для синусоидального тока.
3. Электрическая цепь с активным сопротивлением.
4. Электрическая цепь с индуктивностью.
5. Электрическая цепь с емкостью.

Лекция № 6

Цепи с последовательно и параллельно соединением элементов

План:

1. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов R, L и C.
2. Фазовые соотношения между токами и напряжениями. Треугольник напряжений и сопротивлений
3. Резонанс напряжения в цепи переменного тока и его применение.
4. Электрическая цепь при параллельном соединении элементов с R, L и C.
5. Параллельное соединение нескольких электроприемников
6. Резонанс тока в цепи переменного тока и его применение.

Схеме электрической цепи, изображенной на рис.6.1. а может соответствовать цепь последовательно соединенных индуктивной катушки с активным сопротивлением R и индуктивностью L и конденсатора с емкостью C.

Активное сопротивление может также соответствовать сопротивлению какого-либо резистора. Во всяком случае, R, L и C – это параметры электрической цепи, причем активное сопротивление R характеризует активный (необратимый) процесс преобразования электрической энергии в другие виды энергии, а индуктивность L и емкость C – обратимый процесс преобразования энергии электромагнитного поля.

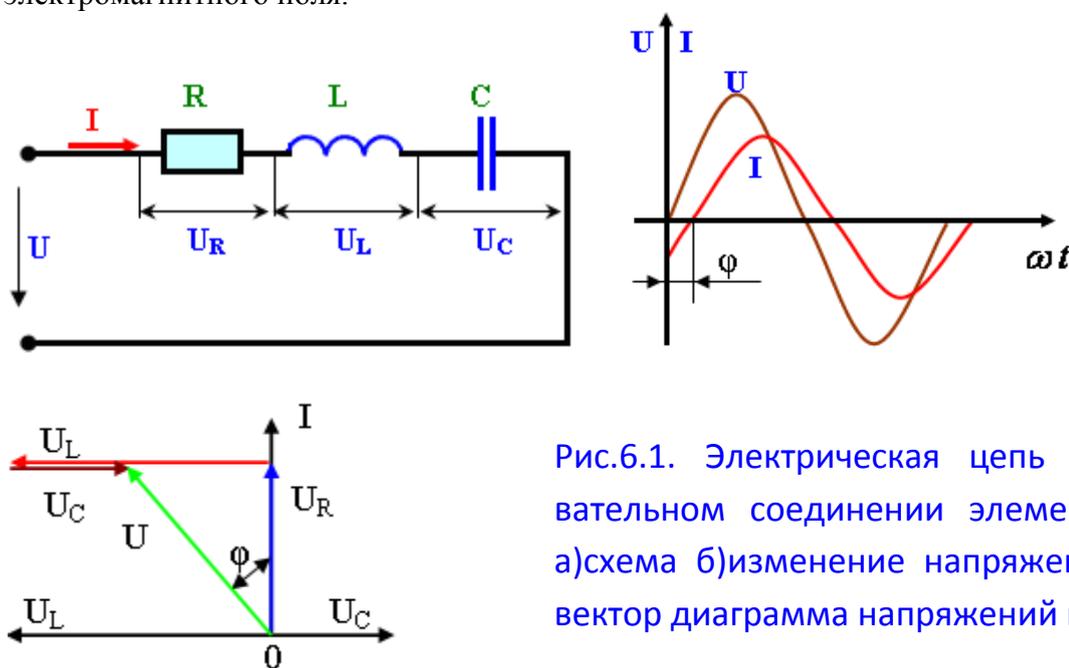


Рис.6.1. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов R,L и C. а)схема б)изменение напряжение и тока, в) вектор диаграмма напряжений и тока

Под действием напряжения $U = U_m \sin \omega t$ в цепи возникает ток i . Ток создает падение напряжения на электрической цепи: $U_m = R \cdot i$ - на элементе с активным сопротивлением.

$U_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$ - на элементе с индуктивностью; $U_C = \frac{q}{c} = \frac{1}{c} \int i dt$ - на элементе емкостью

По второму закону Кирхгофа для данной цепи запишем

$$U = U_R + U_L + U_C \quad \text{или} \quad R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int i dt = U_m \sin \omega t \quad (6.1).$$

В результате решения уравнения (6.1) найдем $i(t)$. Полным решением линейного дифференциального уравнения (6.1) с постоянными коэффициентами является сумма частного решения этого уравнения и общего решения однородного дифференциального уравнения

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (6.2)$$

Уравнение (6.2) записано по второму закону Кирхгофа для цепи с последовательным соединением элементов R, L и C, когда напряжение источника питания равно нулю, т.е. когда электрическая цепь замкнута накоротко и электрическая энергия извне в цепь не поступает. В этих условиях ток в цепи может существовать только за счет запасов энергии в магнитном поле катушки или в

электрическом поле конденсатора. При протекании тока через элемент с сопротивлением R происходит преобразование электроэнергии в тепловую и рассеяние ее в окружающей среде. Поэтому через некоторое время запасы электроэнергии будут израсходованы. Иными словами, ток, найденный в результате решения уравнения (6.2), через некоторое время будет равен нулю. Время, в течение которого существует этот ток, является временем переходного процесса в цепи и обычно исчисляется долями секунды. Так как на данном этапе нас интересует только установившийся, стабильный, режим цепи, существующий сколь угодно долго, то общего решения уравнения (6.1) искать не будем.

Найдем частное решение уравнения (6.1), т.е. ток установившегося режима. Так как правая часть этого уравнения – синусоидальная функция, то и частное решение следует искать в виде синусоидальной функции

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (6.3)$$

Функция $i(t)$ полностью определена, если известны амплитуда тока I_m и угол сдвига фаз φ между напряжением и током. Найдем эти величины.

Как было показано ранее, напряжение $U = U_m \sin \omega t$ изображается комплексным числом

$$U_m e^{j(\omega t + \psi_U)} = U_m e^{j\omega t}, \text{ ток } i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \text{ - комплексным числом}$$

$$I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m e^{j\omega t}; \text{ производная } \frac{di}{dt} \text{ - комплексным числом } j\omega I_m e^{j\omega t}; \text{ интеграл } \int i dt \text{ -}$$

$$\text{комплексным числом } I_m e^{j\omega t} / (j\omega).$$

Перейдем от дифференциального уравнения (6.1) к алгебраическому уравнению в комплексной форме

$$RI_m e^{j\omega t} + j\omega LI_m e^{j\omega t} + I_m e^{j\omega t} / (j\omega C) = U_m e^{j\omega t}$$

После преобразования имеем

$$(R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}) I_m = U_m \quad (6.4)$$

а разделив обе части уравнения (6.4) на $\sqrt{2}$, получим линейное алгебраическое уравнение для комплексных действующих значений

$$(R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}) \cdot \dot{I} = \dot{U} \quad (6.5)$$

коэффициент

$$R + j(\omega L - \frac{j}{\omega C}) = R + j(x_L - x_C) = R + jx = \underline{Z} \quad (6.6)$$

является полным сопротивлением цепи в комплексной форме. Вещественная составляющая R полного сопротивления равна активному сопротивлению цепи, а мнимая составляющая X называется ее реактивным сопротивлением. Реактивное сопротивление цепи равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений:

$$X = X_L - X_C$$

С учетом (6.6) уравнения (6.4) и (6.5) принимает вид

$$\underline{Z} \dot{I}_m = \dot{U}_m; \quad \underline{Z} \dot{I} = \dot{U},$$

откуда комплексное полное сопротивление

$$\underline{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_m}{I_m e^{-j\varphi}} = Z e^{j\varphi} \quad (6.7),$$

где модуль полного сопротивления

$$\underline{Z} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} \quad (6.8).$$

Таким образом из (6.7) и (6.8) следует, что модуль полного сопротивления цепи равен отношению модулей действующих значений напряжения и тока, а аргумент комплексного сопротивления – сдвигу фаз φ между вектором напряжения и тока.

Модуль полного сопротивления цепи на основании (6.6)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6.9).$$

т.е. полное сопротивление цепи равно корню квадратному из суммы квадратов активного и реактивного сопротивлений.

Итак, из (6.8) можно найти амплитуду тока, определяющую функцию $i(t)$ в уравнении (6.3)

$$I_m = U_m / Z$$

Теперь, если воспользоваться равенством

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} = R + jX$$

можно определить угол сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (6.10).$$

Таким образом, значение угла φ зависит от соотношения между реактивным X и активным R сопротивлениями, чем больше реактивное сопротивление, тем больше угол φ . Знак угла φ зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. Если $X_L > X_C$, то угол φ положительный, что ток отстает по фазе от напряжения, если $X_L < X_C$, то угол φ отрицательный и ток $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, то есть опережает по фазе напряжение на угол φ .

На рис.6.1, б показано, как изменяются напряжение и ток в цепи, представленной на рис.6.1, а при условии $X_L > X_C$.

При построении векторной диаграммы рис.(6.1,в) в качестве начального удобно выбрать вектор тока, так как при последовательном соединении ток во всех элементах один и тот же. Как было условлено, начальный вектор совмещали с положительным направлением вещественности оси.

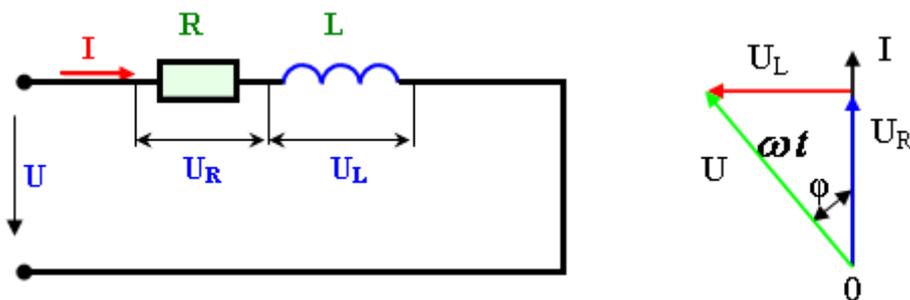


Рис 6.2. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов с R и L: а) схема; б) векторная диаграмма

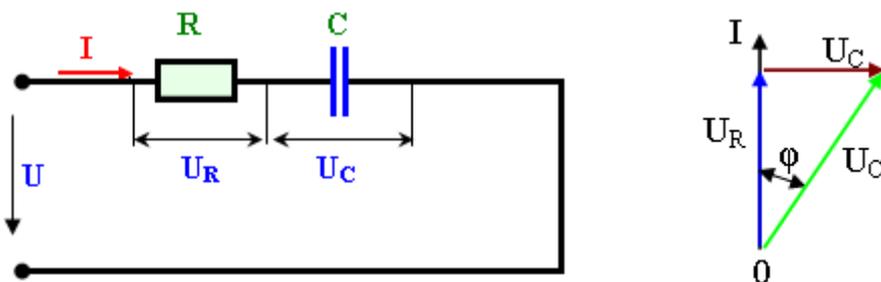


Рис 6.3. Электрическая цепь при последовательном соединении элементов с R и C: а) схема; б) векторная диаграмма

Падение напряжения в комплексной форме на участке цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями соответственно

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} \quad \dot{U}_L = jX_L \dot{I} \quad \dot{U}_C = -jX_C \dot{I}$$

Вектор \dot{U}_R на участке с активным сопротивлением совпадает по фазе с вектором \dot{I} , и на векторной диаграмме его проводим в направлении вектора тока. Падение напряжения \dot{U}_L на участке с индуктивностью опережает ток по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$, причем поворачивать вектор надо против направления вращения часовой стрелки по отношению к вектору \dot{I} . Падение напряжения \dot{U}_C на участке с емкостью отстает от тока на угол $\frac{\pi}{2}$, причем \dot{U}_C следует повернуть на угол 90° по направлению вращения часовой стрелки по отношению к вектору \dot{I} .

По второму закону Кирхгофа можно написать уравнение

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

Для нахождения вектора \dot{U} полного напряжения цепи к концу вектора \dot{U}_R пристраиваем вектор \dot{U}_L путем параллельного переноса, а к концу вектора \dot{U}_L пристраиваем вектор \dot{U}_C . Вектор полного напряжения \dot{U} соединяет начало ординат с концом вектора \dot{U}_C (последнего слагаемого вектора).

Поскольку векторная диаграмма построена для случая, когда $X_L > X_C$ (следовательно, и $U_L > U_C$), ток в цепи отстает по фазе на угол φ от полного напряжения, комплексное значение которого $\dot{U} = Z \dot{I}$.

Аналогично проводят анализ для электрических цепей с последовательным соединением элементов с R и L или R и C. В первом случае (рис. 8.2, а) имеем:

$$X_C = 0 \quad X = X_L \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

На рис.8.2,б представлена векторная диаграмма, соответствующая этому случаю. Ток в цепи отстает по фазе от напряжения на угол φ .

При последовательном соединении элементов с R и C (рис. 8.3,а), имеем:

$$X_L = 0 \quad X = -X_C \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{-X_C}{R} \right) \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

На рис.6.3,б построена векторная диаграмма для такой цепи, ток в ней опережает напряжение по фазе на угол φ .

Треугольник напряжений и сопротивлений

Если электрическая цепь состоит из последовательно соединенных элементов с активным и реактивным сопротивлением, то векторная диаграмма напряжений имеет вид прямоугольного треугольника (рис.6.1в; 6.2 б, 6.3 б). Гипотенуза этого треугольника равна полному напряжению

U , а катеты треугольника-активной $U_a = RI$ и реактивной U_p составляющие полного напряжения, причем

$$U_p = U_L - U_C = I(X_L - X_C) = I \cdot X \quad (6.11)$$

Из треугольников напряжений OAB, (рис. 6.2б, 6.3б) можно получить ряд важных соотношений между напряжениями:

$$U_a = U \cos \varphi \quad (6.12)$$

$$U_p = U \cdot \sin \varphi \quad (6.13)$$

где

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_p}{U_a}\right) = \arctg\left[\frac{(U_L - U_C)}{U_a}\right]$$

Если начальный вектор U_a расположен вертикально, то при $X_L > X_C$, треугольник напряжений находится слева от него (рис. 6.2,б) и справа при $X_L < X_C$ (рис. 6.3,б). После деления всех сторон треугольника напряжений на ток I и получим треугольник сопротивлений, подобный треугольнику напряжений

$$\frac{U_a}{I} = R, \quad \frac{U_p}{I} = X, \quad \frac{U}{I} = Z$$

Из треугольника сопротивлений можно получить соотношение, аналогичные (6.12) и (6.13)

$$R = Z \cos \varphi \quad (6.14)$$

$$X = Z \sin \varphi \quad (6.15)$$

а также

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}$$

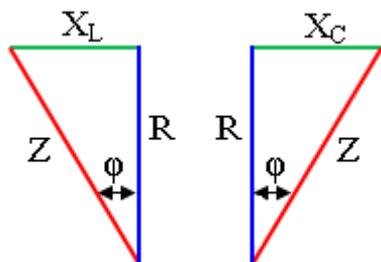


Рис. 6.4. Треугольник сопротивлений. а) при $X_L > X_C$, б) при $X_L < X_C$

Резонанс напряжений

Известно, что в механической системе резонанс наступает при равенстве собственной частоты колебаний и частоты колебаний возмущающей силы, действующей на систему.

В цепях переменного тока, где одновременно есть индуктивность и емкость, могут возникнуть явления резонанса, которые по своей сути аналогичны явлению резонанса в механической системе.

При последовательном соединении элементов с $R-L-C$ (см. рис.6.1,а) ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Из всех возможных соотношений между индуктивным X_L и емкостным X_C сопротивлениями особый интерес представляет случай, когда эти сопротивления равны, т.е. $X_L = X_C$. В этом случае реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C = 0$ полное сопротивление $Z = R$ минимально.

Тогда ток в цепи $I = \frac{U}{R}$ и при $U = const$, $R = const$ значение его максимально.

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах в комплексной форме $\dot{U}_L = -\dot{U}_C$, а по значению $U_L = X_L I = X_C I = U_C$, следовательно,

$$U_L = X_L I = X_L \frac{U}{R} \quad U_C = X_C I = X_C \frac{U}{R}$$

Таким образом, напряжения на индуктивном и емкостном элементах могут превышать

напряжение сети в $\frac{X_L}{R}$ раз, если $X_L > R$. Сдвиг по фазе между напряжениями \dot{U}_L и \dot{U}_C равен π , т.е. эти напряжения находятся в противофазе.

Такой режим цепи при последовательном соединении элементов с R, L и C, когда $X_L = X_C$, а напряжения на индуктивном (\dot{U}_L) и емкостном (\dot{U}_C) элементах, находящиеся в противофазе, равны по значению и могут превышать напряжение всей цепи, носит название режима резонанса напряжений.

Векторная диаграмма напряжений для режима резонанса представлена на рис. 6.5. Реактивная составляющая напряжения (6.11) равна нулю, следовательно, полное напряжение $\dot{U} = U_a$, а угол сдвига фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$; $\cos \varphi = 1$.

Активная мощность цепи $P = UI \cos \varphi = UI = S'$, а реактивная $Q = UI \sin \varphi = 0$,

$Q = Q_L - Q_C$. Реактивная же мощность индуктивной катушки ($Q_L = X_L I^2$) и конденсатора ($Q_C = X_C I^2$) не равны нулю, их мгновенные значения в любой момент времени равны между собой, но обратные по знаку. Происходит непрерывный обмен энергией между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора.

Равенства индуктивного и емкостного сопротивлений

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

можно добиться, изменяя угловую частоту ω , индуктивность L или емкость C. Угловая частота, при которой наступает резонанс напряжений

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

При этой, резонансной частоте ток в цепи достигает максимального значения. При уменьшении частоты увеличивается сопротивление $X_C = 1/(\omega C)$, а следовательно, и реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C$ становится не равным нулю. Ток $I = U / \sqrt{R^2 + X^2}$ уменьшается. При частоте $\omega=0$, что формально соответствует напряжению постоянного тока, ток в цепи равен нулю ($X_C = \infty$). При увеличении угловой частоты ($\omega > \omega_0$), реактивное сопротивление цепи также становится больше нуля и ток начинает уменьшаться (рис.6.5). Падение напряжения на элементе с активным сопротивлением $U_R = RI$ изменяется так же, так как $R = const$. При этом $U_R = U$ при $\omega = \omega_0$ равны между собой по значению. Но своих максимальных значений они достигают при частоте, отличной от резонансной. Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{\omega C \sqrt{R^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}} = \frac{U}{\sqrt{\omega^2 R^2 C^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}}$$

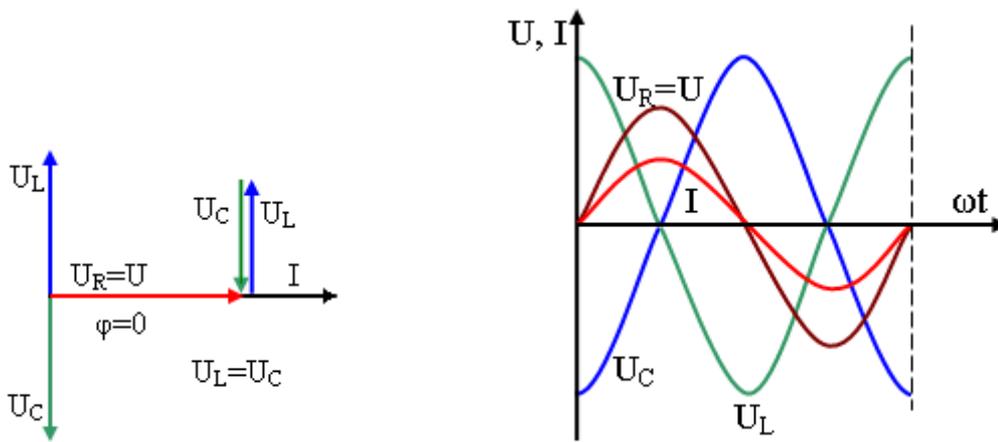


Рис 6.5. Векторная диаграмма для режима резонанса напряжений

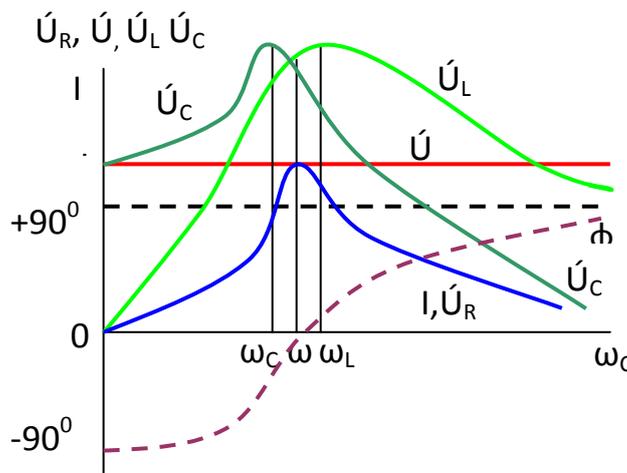


Рис 6.6. Зависимость напряжений и тока от частоты

1В

Напряже
первую п

максимум имеет место при $\omega = \infty$). Частота, при которой напряжение \dot{U}_L достигает максимума,

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{1 - R^2 C / (2L)}}$$

т.е. $\omega > \omega_0$.

Явление резонанса широко используют в устройствах радиотехники, телевидения, автоматики и других электро устройствах. Если электрическая цепь имеет параметры L и C такие, что

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

резонансной цепи является частота $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то ток этой частоты будет иметь максимальное значение. Токи других частот (если к цепи приложено несколько напряжений разной частоты) будут меньше. Изменяя индуктивность L или емкость C, можно настраивать контур на ту или иную резонансную частоту и усиливать в цепи ток той или иной частоты.

Поскольку резонансные явления связаны со значительным увеличением напряжения на элементах с L и C, это может привести к пробоев их изоляции.

Электрическая цепь при параллельным соединении элементов R, L и C.

Вначале рассмотрим графо-аналитический метод расчета цепи с параллельным соединением потребителей (рис. 6.7). Для такой цепи характерно то, что напряжения на каждой ветви одинаковы, общий ток равен общей сумме токов ветвей.

Ток в каждой ветви определяется по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}} \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}} \quad I_3 = \frac{U}{\sqrt{R_3^2 + (X_{L3} - X_{C3})^2}}$$

Общий ток в цепи, как следует, из первого закона Кирхгофа равен геометрической сумме токов ветвей $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$. Значение общего тока определяют графически из векторной диаграммы (рис.6.7б).

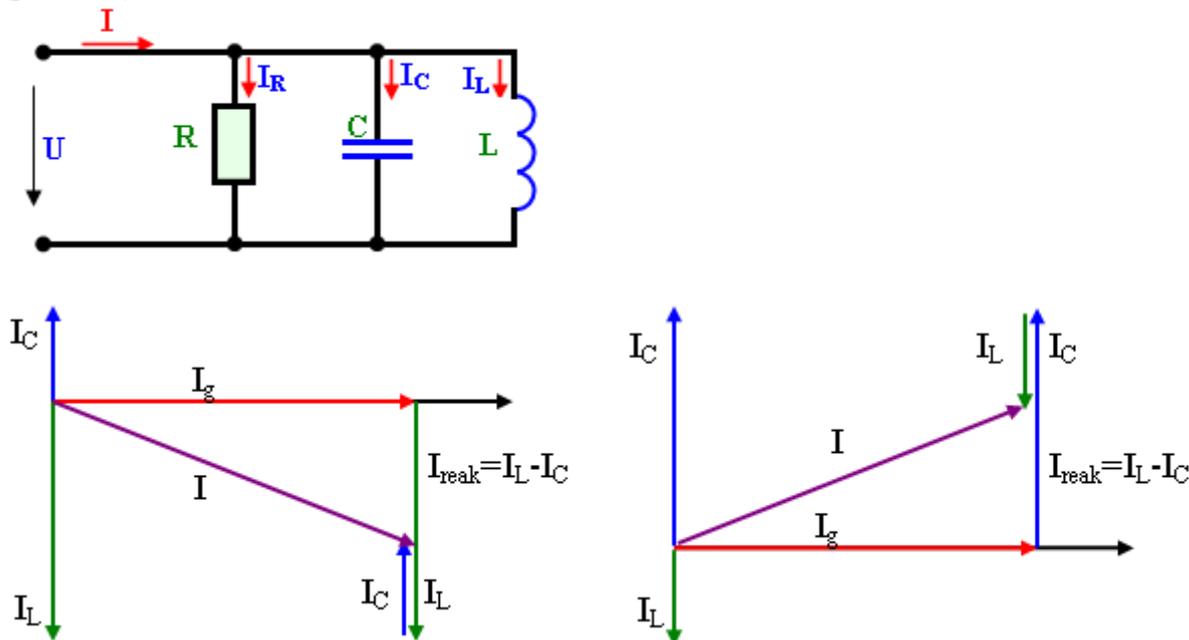


Рис. 6.7. Схема электрической цепи при параллельном соединении элементов R, L и C (а), векторная диаграмма токов.

Реактивная мощность цепи равна сумме реактивных мощностей всех ветвей:

$$Q = Q_{L1} + (-Q_{C2}) + (Q_{L3} - Q_{C3})$$

Полная мощность цепи $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Угол сдвига φ между общим током и напряжением определяют из векторной диаграммы или из

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

выражения. Графо-аналитический метод не удобен для расчета разветвленных цепей: он отличается громоздкостью и невысокой степенью точности. Для анализа и расчета разветвленных цепей переменного тока используют проводимости, с помощью которых разветвленную цепь можно преобразовать в простейшую цепь и аналитически рассчитать токи и напряжения всех ее участков. В цепях постоянного тока проводимостью называется величина, обратная сопротивлению участка

цепи: $g = \frac{1}{R}$ и ток в цепи выражается как произведение напряжения на проводимость $I = Ug$.

В цепях переменного тока существует при проводимости –полная, активная и реактивная, причем только полная проводимость является величиной, обратной полному сопротивлению последовательного участка цепи.

Выражение проводимостей в цепях переменного тока можно получить следующим образом.

Ток в каждом неразветвленном участке цепи раскладывают на два составляющих, одна из которых есть проекция на вектор напряжения (активная составляющая тока I_a), а другая – на линию, перпендикулярную к вектору напряжения (реактивная составляющая тока).

Активная составляющая тока определяет активную мощность $P = UI \cos \varphi = UI_a$ реактивная

составляющая тока–реактивную мощность $Q = UI \sin \varphi = UI_p$.

Из векторной диаграммы цепи изображенной на рис. 6.7 б, следует, что активная составляющая

тока I_1 равна: $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{R}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = Ug_1$, $g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ - активная проводимость.

Реактивная составляющая тока I_1 равна: $I_{1p} = U_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{X_L}{Z_1} = U \frac{X_L}{Z_1^2} = Ub_1$, $b_1 = \frac{X_L}{Z_1^2} = b_{L1}$ - реактивная проводимость.

Аналогично определяют g_2 и b_2 второй ветви цепи $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U_2}{Z_2} \cdot \frac{R_2}{Z_2} = Ug_2$, $g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$,

$$I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{X_C}{Z_2} = Ub_2, \quad b_2 = b_C = \frac{X_C}{Z_2^2}.$$

Вектор тока первой ветви равен геометрической сумме векторов активной и реактивной

составляющих тока $\vec{I}_1 = \vec{I}_{1a} + \vec{I}_{1p}$, а его величина $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$.

Выразив составляющие тока через напряжения и проводимости получили:

$I_1 = \sqrt{(Ug_1)^2 + (Ub_{L1})^2} = U \sqrt{g_1^2 + b_{L1}^2} = Uy_1 = \frac{U}{Z_1}$, где $y_1 = \frac{1}{Z_1} = \sqrt{g_1^2 + b_{L1}^2}$ - полная проводимость ветви.

$$y_2 = \frac{1}{Z_2} = \sqrt{g_2^2 + b_{C2}^2}.$$

Аналогично определяют полную проводимость второй ветви:

Эквивалентные активную, реактивную и полную проводимости цепи получают следующим образом.

Вектор общего тока цепи равен геометрической сумме векторов токов \vec{I}_1 и \vec{I}_2 : $\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$ и может быть выражен через активную и реактивную составляющие тока и эквивалентные проводимости

всей цепи: $\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_p = \vec{U}g_{\Sigma} + \vec{U}b_{\Sigma} = Uy_{\Sigma} = \frac{U}{Z_{\Sigma}}$.

Активная составляющая общего тока (рис. 6.7б) равна арифметической сумме активных составляющих токов ветвей:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = Ug_1 + Ug_2 = U(g_1 + g_2) = Ug_{\Sigma},$$

а реактивная составляющая – арифметической разности реактивных составляющих этих токов:

$$I_p = I_{1p} + I_{2p} = Ub_{L1} - Ub_{C2} = U(b_{L1} - b_{C2}) = Ub_{\Sigma}.$$

Эквивалентная активная проводимость цепи равна арифметической сумме активных

проводимостей параллельно включенных ветвей: $g_{\Sigma} = g_1 + g_2 + \dots + g_n$, а эквивалентная

реактивная проводимость – алгебраической сумме реактивных проводимостей параллельно

включенных ветвей: $b_{\Sigma} = b_{L1} - b_{C2} + \dots + b_n$.

$$y_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} = \sqrt{g_{\Sigma}^2 + b_{\Sigma}^2}.$$

Полная эквивалентная проводимость цепи:

Эквивалентные активное, реактивное и полное сопротивления цепи определяют с помощью

выражений: $Z_{\Sigma} = \frac{1}{y_{\Sigma}}$, $R_{\Sigma} = g_{\Sigma} Z_{\Sigma}^2$, $X_{\Sigma} = b_{\Sigma} Z_{\Sigma}^2$.

К цепи с параллельным соединением элементов с R, L, C (рис. 6.7 а) подводят напряжение

$U = U_m \sin \omega t$, под действием которого в ветвях создаются токи $i_R = I_{Rm} \sin \omega t$ (в ветви с R),

$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ (в ветви с L), $i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ (в ветви с C).

Соответственно действующие значения токов в ветвях:

$$I_R = \frac{U}{R} = gU, \quad I_L = \frac{U}{X_L} = b_L U, \quad I_C = \frac{U}{X_C} = b_C U \quad (6.16)$$

а действующие значения полного тока

$$I = \frac{U}{Z} = yU \quad (6.17)$$

По первому закону Кирхгофа для данной цепи

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C \quad (6.18)$$

При построении векторной диаграммы токов за начальный удобен вектор напряжения (рис.6.7 б).

Векторы комплексных токов \dot{I}_R , \dot{I}_L и \dot{I}_C в ветвях с учетом их сдвига по фазе по отношению к вектору напряжения. В соответствии с уравнением (9.3) производят геометрическое сложение векторов токов на комплексной плоскости и находят вектор полного комплексного тока \dot{I} .

На рис. 6.7 в построили треугольник токов OAB, катеты которого равны активной I_a и реактивной I_p составляющие тока, гипотенуза – полному току I . Активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением. Реактивная составляющая тока $I_p = I_L - I_C$ сдвинута по фазе относительно

напряжения на $\frac{\pi}{2}$, а полный ток – на φ ($0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$). Если $I_L < I_C$, то I_p отражает напряжение на

угол $\frac{\pi}{2}$, а полный ток - на φ ($-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq 0$).

Из треугольника токов следует соотношения:

$$I_a = I \cos \varphi, \quad I_p = I \sin \varphi, \\ I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{I_a^2 - (I_L - I_C)^2} \quad (6.19),$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a} = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_a}$$

Подставляя (6.16) и (6.17) в (6.19), получаем

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (6.20)$$

Таким образом, полная проводимость цепи равна корню квадратному из суммы квадратов активной g и реактивной $b = b_L - b_C$ проводимостей.

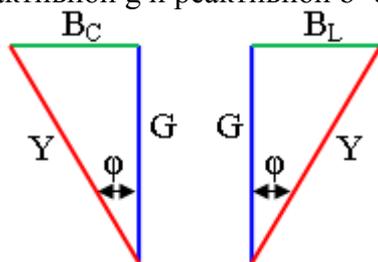


Рис 6.8.Треугольники проводимостей а)- $B_L < B_C$ б)- $B_L > B_C$

Полный ток в цепи при параллельном соединении элементов с R, L и C:

$$I = yU = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} U \quad (6.21)$$

Поделив стороны треугольника токов а напряжение U :

$$\frac{I_a}{U} = g \quad \frac{I_p}{U} = b \quad \frac{I}{U} = y$$

построим треугольник проводимостей (рис. 6.8 а) из которого можно получить следующие соотношения:

$$g = y \cos \varphi = \frac{\cos \varphi}{Z}, \quad b = y \sin \varphi = \frac{\sin \varphi}{Z},$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g} = \arctg \frac{b_L - b_C}{g}$$

Полная проводимость цепи в комплексной форме

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Ze^{j\varphi}} = ye^{-j\varphi} = g - jb \quad (6.22).$$

где g и b – активная и реактивная проводимости соответственно.

Как видно из (6.22) если угол φ положительный, т.е. полный ток имеет индуктивную реактивную составляющую, то реактивная проводимость в комплексной форме отрицательна, и наоборот.

Другими словами, если в цепи преобладает индуктивная проводимость ($b_L > b_C$), то реактивная проводимость в комплексной форме отрицательна, а если преобладает емкостная проводимость ($b_C > b_L$) то-положительна.

Активная и реактивная мощности цепи:

$$P = UI \cos \varphi = UI_a = RI_a^2 = gU^2 \quad (6.23)$$

$$Q = UI \sin \varphi = UI_p = XI_p^2 = bU^2 \quad (6.24)$$

причем реактивная мощность отдельных ветвей:

$$Q_L = b_L U^2 \quad Q_C = b_C U^2$$

Полная мощность цепи: $S = UI = YU^2 = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$

Параллельное соединение нескольких электро приемников

Рассмотрим схему параллельного соединения электро приемников, обладающих активным и реактивным сопротивлениями, а также электро приемника только с активным сопротивлением. (рис 6.8, а). Подводимое к цепи напряжение \dot{U} и параметры параллельных ветвей, как правило, являются заданными.

Комплексный ток в ветви k можно определить по закону Ома:

$$\dot{I}_k = \dot{U} / Z_k = \dot{I}_k e^{-j\varphi_k} = \dot{I}_{ka} - \dot{I}_{kp} \quad (6.25)$$

где угол сдвига фаз $\varphi_k = \arctg (X_k / R_k)$.

Определив комплексные токи во всех ветвях, строят векторную диаграмму напряжений и токов (рис.6.8 б), по которой находят ток в неразветвленной части цепи $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ и угол φ .

Ток в цепи \dot{I} и угол φ можно найти алгебраического сложения составляющих токов. Определив по (6.25) все комплексные токи в ветвях, активную:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3}$$

и реактивную составляющую:

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{L1} - \dot{I}_{C2}$$

Тогда согласно диаграмме (рис.6.8, в) ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

а угол сдвига фаз $\varphi = \arctg (I_p / I_a)$.

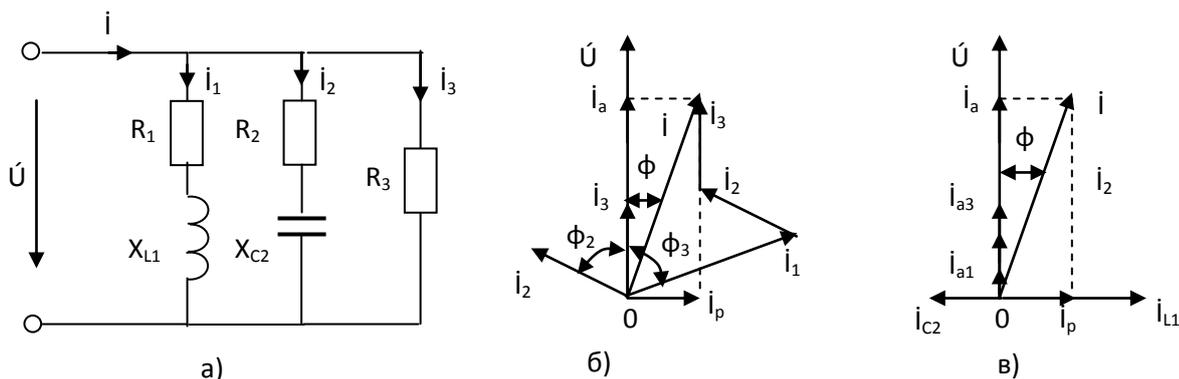


Рис. 6.8. Электрическая цепь при параллельном соединении нескольких электро приемников: а-схема; б-векторная диаграмма полных токов;в- векторная

В общем случае, когда параллельно соединяют n электроприемников,

$$I_a = \sum_{k=1}^n I_{ak} \quad I = \sum_{k=1}^n I_{Lk} - \sum_{k=1}^n I_{Ck}$$

Рассчитать токи и углы сдвига фаз рассматриваемой цепи можно, заменив последовательное соединение элементов с активным и реактивным сопротивлениями эквивалентным параллельным соединением элементов с активной и реактивной проводимостями (рис.6.9), которые определяют по формулам (6.23) и (6.24).

Для такой схемы токи в ветвях с активными проводимостями

$$I_{a1} = G_1 U \quad I_{a2} = G_2 U; \quad I_{a3} = G_3 U$$

а в ветвях реактивными проводимостями

$$I_{L1} = B_{L1} U; \quad I_{C2} = B_{C2} U.$$

Активная составляющая тока всей цепи

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a3} = (G_1 + G_2 + G_3) U = GU$$

а реактивная

$$\dot{I}_P = \dot{I}_{L1} - \dot{I}_{C2} = (B_{L1} - B_{C2}) U = BU$$

где G и B – эквивалентные активная и реактивная проводимости всей цепи.

В общем случае когда параллельно соединено n электроприемников, эквивалентная проводимость цепи

$$G = \sum_{k=1}^n G_k$$

эквивалентная реактивная проводимость цепи

$$B = \sum_{k=1}^n B_{Lk} - \sum_{k=1}^n B_{Ck}$$

полная проводимость цепи

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Складывать модули полных проводимостей нельзя.

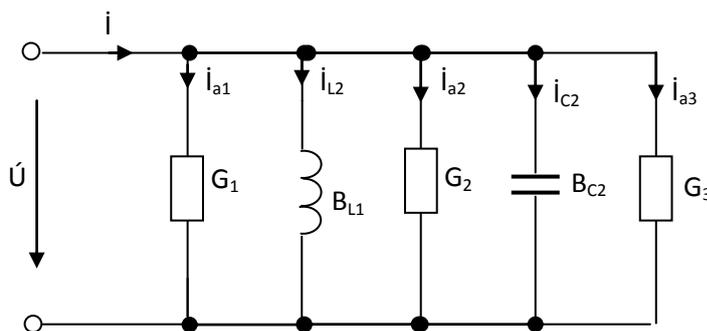


Рис. 6.9. Схема электрической цепи при параллельном

Резонанс токов **соединении нескольких элементов с проводимостями G и B**

В электрической цепи при параллельном соединении ветвей с $R(g)$, $L(b_L)$ и $C(b_C)$ (рис.6.7 а) ток

определяется по формуле $I = yU = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \cdot U$.

Особый интерес представляет случай, когда индуктивная и емкостная реактивные проводимости

равны друг другу. Тогда полная проводимость цепи $y = g$, так как $b = b_L - b_C = 0$, а полный ток

$$I = gU \quad (6.26)$$

имеет минимальное значение и только активную составляющую $I = I_a$, следовательно $\cos\varphi = 1$.

Токи в ветвях с проводимостями B_L и B_C с учетом (6.26)

$$I_L = b_L U = \frac{b_L I}{g} \quad I_C = b_C U = \frac{b_C I}{g},$$

т.е. равны по значению ($I_L = I_C$) и могут превышать полный ток в цепи $\frac{b_L}{g}$ раз, если $b_L = b_C > g$. Векторная диаграмма для рассмотренного случая представлена на рис. 6.10.

Режим цепи при параллельном соединении элементов с R, L, C , когда $b_L = b_C$, а токи в ветвях с реактивными проводимостями I_L и I_C равны по значению и могут превышать полный ток цепи, называется режимом резонанса токов. Для этого режима характерно $I_L = I_C > I$, если $b_L = b_C > g$, $I_a = \min$, $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$.

$$P = UI \cos\varphi = UI = S$$

$$Q_L = b_L U^2 > 0 \quad Q_C = b_C U^2 > 0 \quad Q = Q_L - Q_C = 0.$$

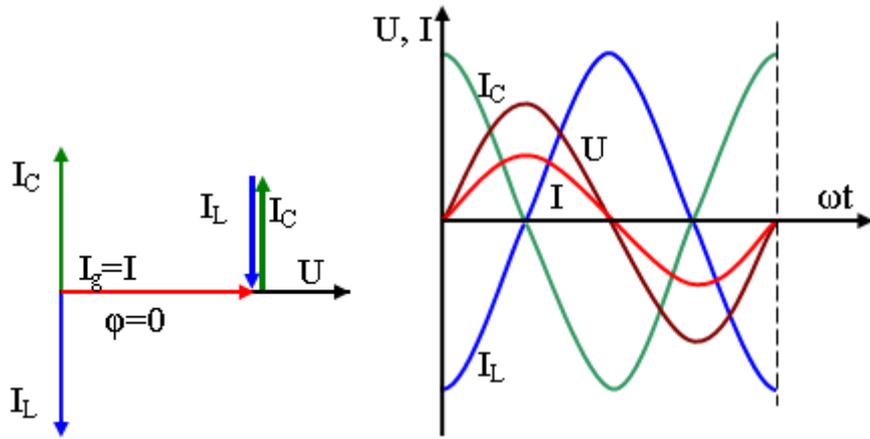


Рис. 6.10. Векторная диаграмма и график для режима резонанса токов

В режиме резонанса токов рассматриваемая цепь ведет себя по отношению к источнику питания так, как будто она состоит только из элементов с активной проводимостью. В действительности же в параллельных ветвях с L и C могут пробежать токи, даже превышающие полный ток, протекающий в источнике питания. Но эти токи всегда противоположны по фазе друг другу. Это означает, что через каждую четверть периода происходит обмен энергии между магнитным полем индуктивной катушки и электрическим полем конденсатора, который поддерживается напряжением U источника питания.

В частном случае, когда активная проводимость $g = 0$, полный ток $I = gU = 0$. В замкнутом LC -контуре протекает ток $I_L = I_C = b_C \cdot U > 0$.

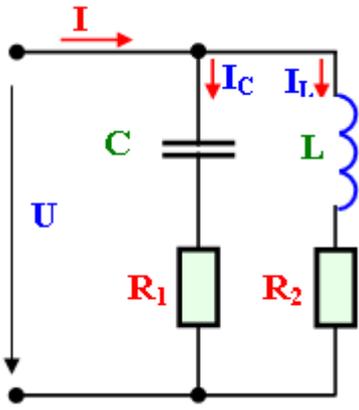


Рис. 6.11

Так как реальные индуктивная катушка и конденсатор обладают и активным сопротивлением, схему цепи можно представить в виде, показанном на рис. 6.11. Резонанс токов в такой цепи имеет место, если $b_L = b_C$, где

$$b_L = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}, \quad b_C = \frac{X_C}{Z_2^2} = \frac{X_C}{R_1^2 + X_L^2}.$$

Так как при резонансе токов $b_L = b_C$, то реактивные составляющие токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 равны по значению и противоположны по знаку. Поэтому $\dot{I}_p = \dot{I}_L + \dot{I}_C = 0$.

Таким образом, полный ток имеет только активную составляющую, как и при резонансе токов в цепи с идеальными индуктивной катушкой и конденсатором. Это видно из векторной диаграммы токов (рис. 6.5):

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = \dot{I}_a = \dot{I}.$$

Вопросы

1. Фазовые соотношения между токами и напряжения при последовательном соединении элементов с R, L и C.
2. Как построится треугольник напряжения и сопротивления.
3. Резонанс напряжения в цепи переменного тока и его применение.
4. Условия возникновения резонанса.
5. Кривые резонанса.
6. Фазовые соотношения между токами и напряжения при параллельном соединении элементов с R, L и C.
7. Как построится треугольник токов и проводимости.
8. Резонанс токов в цепи переменного тока и его применение.
9. Условия возникновения резонанса.
10. Кривые резонанса.

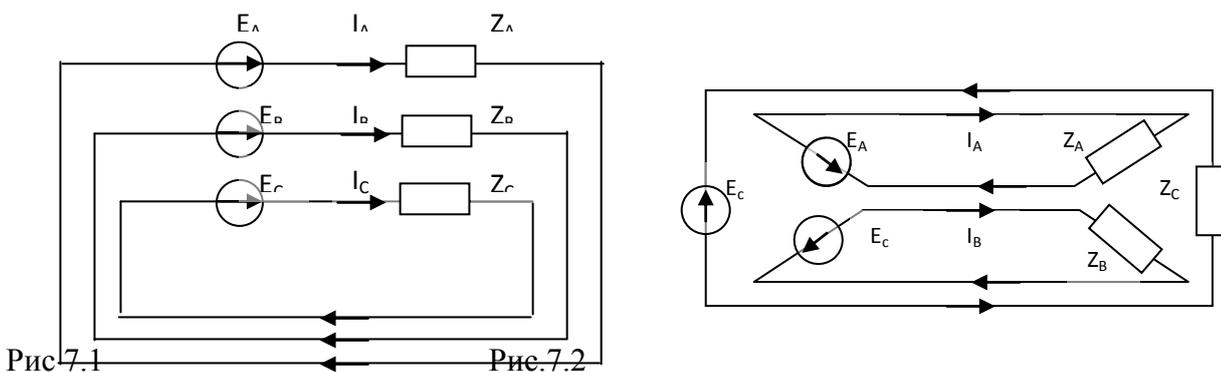
Лекция № 7
Трёхфазные электрические цепи.

План:

1. Понятия о многофазных электрических цепях.
2. Получение трёхфазной системы э.д.с.
3. Трёхфазный генератор.

Электрификация промышленности, сельского хозяйства, транспорта поставила ряд требований, которые подчас невыполнимы при наличии одного источника синусоидальной ЭДС. Так, для приводов станков, механизмов и машин желательно постоянство вращающего момента. Электрические двигатели, питаемые от одного источника синусоидального ЭДС, этого обеспечить не могут. Это и ряд других требований вызвали использование трёхфазных электрических цепей. Трёхфазные цепи 1) Обеспечивают наименьший расход проводниковых материалов ЛЭП; 2) Создают возможность применения наиболее дешёвого, надёжного, не имеющего нормально искрящихся узлов асинхронного двигателя, что особенно важно для тяжёлых условий эксплуатации в горном деле, тем более в шахтах, опасных по взрыву допускает не только трёхфазных, но и однофазных приёмников, т.е. делают ненужным создание обособленных однофазных систем электроснабжения переменного тока.

Трёхфазной системой электрических цепей называется совокупность трех электрических цепей (рис. 7.1) в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.



Если все три э.д.с. равны по значению и сдвинуты по фазе на 120° по отношению друг к другу, то такая система э.д.с. называется симметричной (рис. 7.3, а).

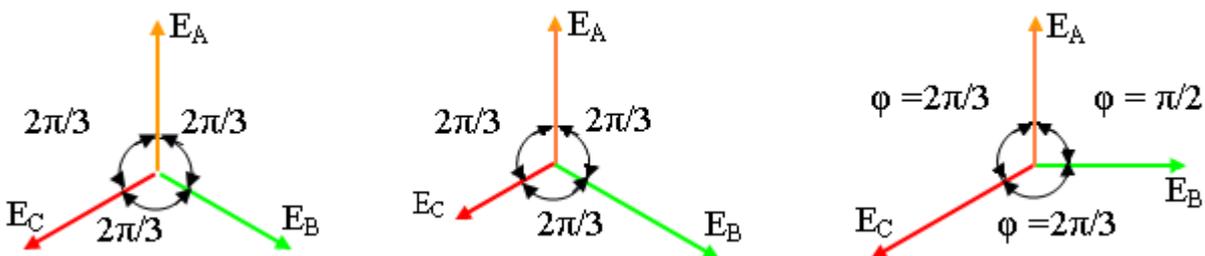


Рис. 7.3. Трёхфазная система э.д.с. а) симметричная; б, в) несимметричная

Если э.д.с. не равны по значению (рис.7.3,б) или сдвинуты друг относительно друга на угол, неравный 120° (рис.7.3,в), то такая система э.д.с. называется несимметричной. Аналогично определяются трёхфазные системы напряжений и токов.

Три источника, генерирующие синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, но со сдвигом по фазе на 120° , способны обеспечить постоянство суммарной мгновенной мощности приёмника и, в частном случае, вращающего момента двигателя. Так как три источника вырабатывают ЭДС с одинаковой частотой и амплитудой, то единственным отличием является начальная фаза этих ЭДС. Поэтому три составные части трёхфазной цепи названы фазами. Термин «фаза», следовательно, имеет двойной смысл. Во-первых, фазой называется аргумент синусоидальных

электрических токов, напряжений и ЭДС. Во-вторых, в трехфазных электрических цепях фазой называется часть трехфазной системы электрических цепей, например фаза А, в которой может существовать один из токов трехфазной системы токов IА и которая включает источник ЭДС. ЕА и соединенную с ним нагрузку (приёмник ZА). (рис.7.2).

В трехфазной системе (рис.7.1) один из проводов каждой фазы (так называемый обратный провод) выполняет одну и ту же функцию- соединяет концы фаз источника и нагрузки. Это позволяет объединить три обратных провода в один, что превращает трехфазную систему электрически не связанных цепей в связанную. При другом способе соединения - попарно объединении прямых и обратных проводов фаз несвязанной системы (рис.7.2)- ветви с источниками ЭДС могут быть попарно соединены друг с другом, образуя замкнутый треугольник.

Трехфазная система электрических цепей, в которой отдельные фазы электрически соединены друг с другом, называется трехфазной цепью.

В современной электроэнергетике используются только связанные трехфазные цепи, обеспечивающие значительную экономию материала соединительных проводов, упрощающие конструкцию многих аппаратов и агрегатов.

Изобретение М.О.Доливо-Добровольского. Изобретение, конструктивное исполнение и внедрение в электроэнергетику трехфазных цепей -это важнейшие достижения в электротехнике.

Впервые трехфазную связанную электрическую цепь осуществил и в 1889 г. публично

продемонстрировал выдающейся русский инженер и ученый М.О.Доливо-Добровольский. Им

были предложены и разработаны все основные звенья генерирования, г распределения и потребления электроэнергии трехфазных систем: трех трансформатор и асинхронный двигатель. Принцип работы и основные этих устройств по существу остались без изменения и до настоящего времени. Асинхронный двигатель, который изобрел М.О.Доливо-Добровольский самым дешевым двигателем переменного тока и породил обширное семейство модификаций, ставших основой современной электрификации и автоматизации.



и, передачи, гор, ле элементы

и простим и бразных

Получение трехфазной системы э.д.с.

Трехфазная система э.д.с. создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° (рис.7.4). Это фазные обмотки, или фазы, которые обозначают А, В и С. Этими же буквами обозначают начало обмоток фаз генератора. Концы обмоток обозначают соответственно X, Y и Z. На рис. 7.4, б показано, как изображают на схемах обмотки генератора с условными положительными направлениями э.д.с.

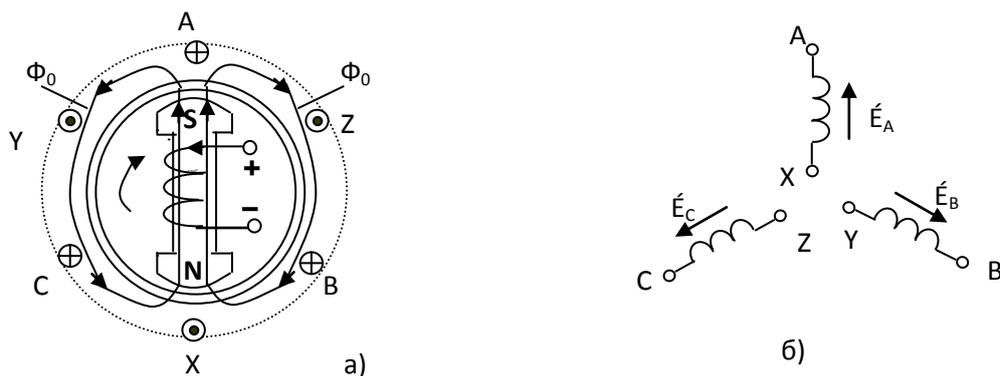


Рис. 11.4. Принципиальная схема трехфазного генератора (а) и изображение фазных обмоток генератора на схемах (б)

Каждая фазная обмотка генератора изображена на рис.7.4, а одним витком (у реальных генераторов каждая обмотка имеет множество витков, расположенных в нескольких соседних пазах, занимающих некоторую дугу внутренней окружности статора). На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку возбуждения, которая питается от источника постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ним с частотой p . Вращение ротора осуществляется каким-либо двигателем.

Благодаря конструктивным приемам магнитный поток Φ_0 в воздушном зазоре между статором и ротором распределяется по синусоидальному закону по окружности. Поэтому при вращении ротора вращающийся вместе с ним магнитный поток пересекает проводники обмоток статора (А – Х, В – Y и С – Z) и индуцирует в них синусоидальные э.д.с. В момент времени, которому соответствует изображенное на рисунке взаимное положение статора и ротора, в обмотке фазы А индуцируется максимальная э.д.с. E_m , так как плоскость этой обмотки совпадает с осевой линией полюсов ротора и проводники обмотки пересекаются магнитным потоком максимальной плотности. Через промежуток времени $T/3$, соответствующий $1/3$ оборота ротора, осевая линия его полюсов совпадает с плоскостью обмотки фазы В и максимальная э.д.с. E_m индуцируется в фазе В. Еще через $1/3$ оборота ротора максимальная э.д.с. индуцируется в фазе С. При следующих оборотах ротора процесс повторяется.

Таким образом, э. д.с. в каждой последующей фазе будет отставать от э.д.с. в предыдущей фазе на $1/3$ периода, т. е. на угол $2\pi/3$. Если принять, что для фазы А начальная фаза равна нулю, то э.д.с. фазы А

$$e_A = E_m \sin \omega t$$

а э.д.с. фаз В и С соответственно

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3).$$

Максимальные (амплитудные) значения всех э.д.с. и их частоты будут одинаковыми, так как число витков фазных обмоток одинаково и э.д.с. индуцируются одним потоком Φ_0 . Изменение фазных э. д. с e_A , e_B , и e_C показано на рис. 7.5.

Действующее значение фазной э.д.с. трехфазной системы определяется по формуле (7.1). При равных амплитудах действующие значения э.д.с. всех фаз равны. При сдвиге по фазе на $2\pi/3$ они образуют симметричную систему. Если при условном положительном направлении вращения векторов (против часовой стрелки) вектор э.д.с.

\vec{E}_B отстает по фазе от вектора э.д.с. \vec{E}_A , а вектор э.д.с. \vec{E}_C отстает по фазе от вектора э.д.с. \vec{E}_B , то такая система векторов э. д. е. образует прямое чередование фаз (рис 7.6, а). Если за вектором э.д.с. \vec{E}_A следует сначала вектор э.д.с. \vec{E}_C , а затем вектор э.д.с. \vec{E}_B , то такая система векторов э.д.с. образует обратное чередование фаз (рис. 7.6, б).

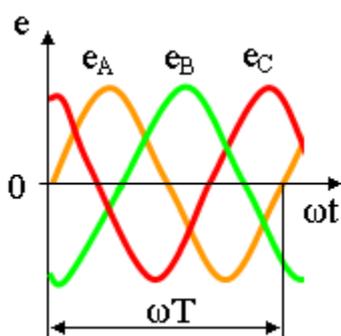


Рис. 7.5 . Изменение мгновенных значений трехфазной системы

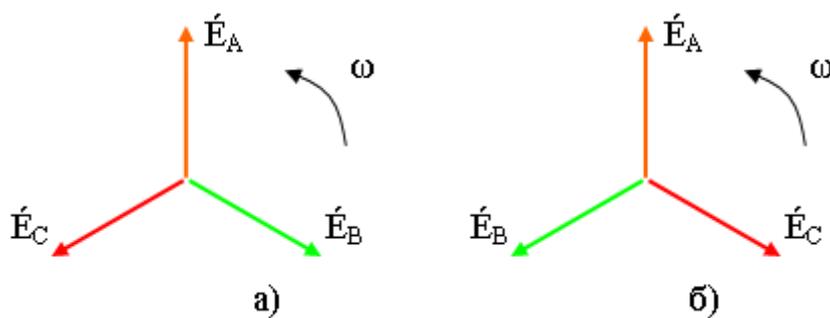


Рис. 7.6. Векторы трехфазной системы э.д.с. при прямом (а) и обратном (б) чередовании

При представлении трехфазной системы э.д.с. комплексными числами принято э.д.с. фазы А совмещать с положительным направлением вещественной оси (рис. 7.7.). Тогда при прямом чередовании фаз

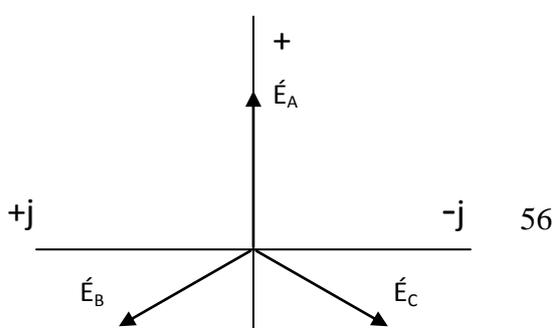


Рис. 7.7. Изображение

$$\vec{E} = \dot{E}_A; \quad (7.1)$$

$$\vec{E}_B = E e^{-j2\pi/3} = (-0,5 - j\sqrt{3}/2)E; \quad (7.2)$$

$$\vec{E}_C = E e^{-j4\pi/3} = (-0,5 + j\sqrt{3}/2)E, \quad (7.3)$$

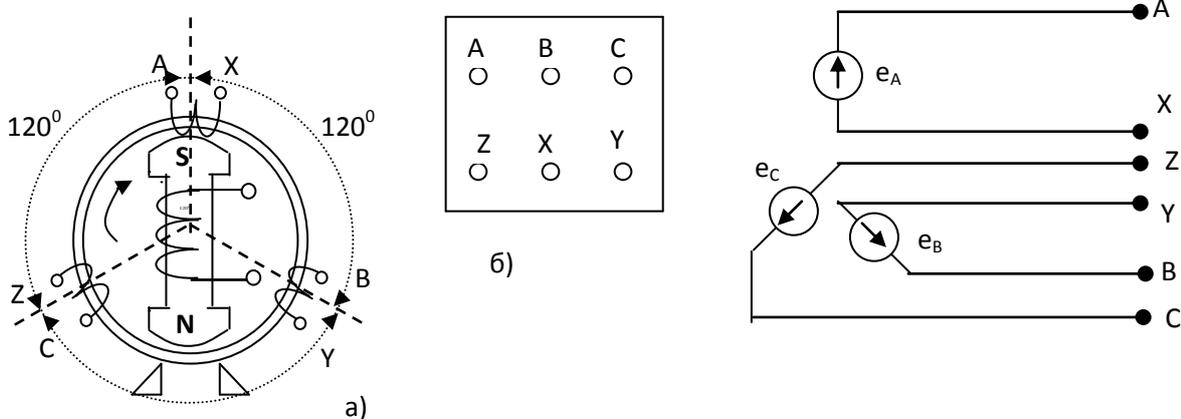
где E - действующее значение э.д.с.

Наиболее характерным, основным свойством симметричной трехфазной системы ЭДС (1) является равенство нулю суммы их мгновенных значений в любой момент времени:

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

Трехфазный генератор

Первичным источником электроэнергии в трехфазной цепи является трехфазный генератор, вырабатывающий три ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, смещенные относительно друг друга по фазе на угол 120° . Принцип устройства и работы такого генератора можно пояснить с помощью упрощенной схемы (рис. 7.8 а). Генератор имеет ротор, приводимый во вращение с круговой частотой ω паровой турбиной или каким-либо способом. На роторе генератора размещена обмотка постоянного тока, создающая постоянный относительно ротора магнитный поток. На статоре размещены три обмотки, в пространстве смещенные относительно друг друга на угол 120° . При равномерном вращении ротора создаваемый в нём магнитный поток пересекает обмотки статора.



По закону электромагнитной индукции в этих обмотках наводятся ЭДС, сдвинутые по времени на треть периода, то есть по фазе на угол 120° . Для обеспечения строго синусоидальной формы ЭДС, наводимых в обмотках, используется совокупность конструктивных приёмов: специальное размещение обмоток в фазах по окружности статора, специальный профиль ротора и т.д. Для определённости обмотки трех фаз маркируются буквами (цветом): А (жёлтым), В (зелёным), С (красным). Концы этих трех обмоток маркируются буквами X, Y, Z соответственно.

Вопросы

1. Чем отличается многофазный системы от однофазного?
2. Какую систему называем симметричной
3. Какую систему называем несимметричной?
4. Что обозначает термин «фаза»

Лекция № 8
Способы соединения фаз трехфазного источника питания

План:

1. Трех проводная и четырех проводная цепи трехфазного тока.
2. Фазное и линейное напряжения.
3. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником
4. Классификация и способы включения приемников в трехфазную цепь.

Каждая фаза трехфазного генератора может являться источником питания для однофазного приемника. В этом случае схема электрической цепи имеет вид, изображенный на рис. 12.1., т. е. каждая фаза работает отдельно от других, хотя в целом цепь является трехфазной. Это трехфазная несвязанная система.

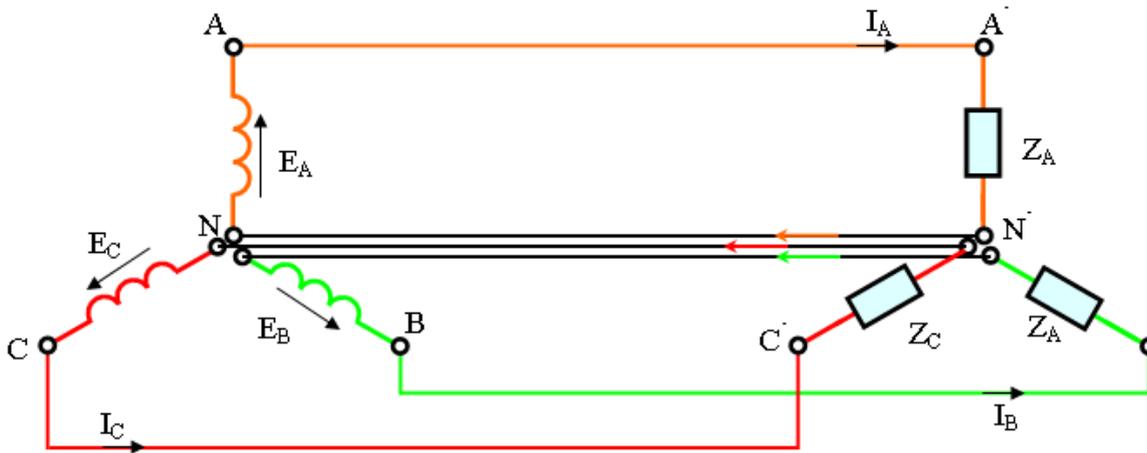


Рис. 8.1. Схема трехфазной несвязанной электрической цепи

Э.д.с. любой обмотки генератора представляет собой разность потенциалов начала и конца этой обмотки. При этом потенциал одной какой-либо точки (или начала, или конца обмотки) можно считать, равным нулю. Тогда комплексный потенциал другой точки будет иметь точно определенное значение.

Принимая равными потенциалы точек, соответствующих концам X, Y и Z обмоток фаз генератора, можно объединить их в одну точку N (рис. 8.2). Концы фаз приемников (Z_A , Z_B и Z_C) также соединяем в одну точку n. Такое соединение обмоток генератора называется соединением звездой. Звездой можно соединять также фазы приемника. Точки N и n называются нейтральными, а провод, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, - нейтральным. Провода A-A', B-B' и C-C', соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными.

Напряжение между началом и концом фазы - фазное напряжение U_{Φ} . Таким образом, имеется три фазных напряжения - U_A , U_B и U_C . Обычно за условное положительное направление э.д.с. генератора принимают направление от конца к началу фазы (см. рис. 8.1 и 8.2). Положительное направление тока в фазах совпадает с положительным направлением э.д.с., а положительное направление падения Напряжения (напряжение) на фазе приемника совпадает с положительным направлением тока в фазе. Положительным направлением напряжения на фазе генератора, как и на фазе приемника, является направление от начала фазы к ее концу, т. е. противоположное положительному направлению э.д.с.

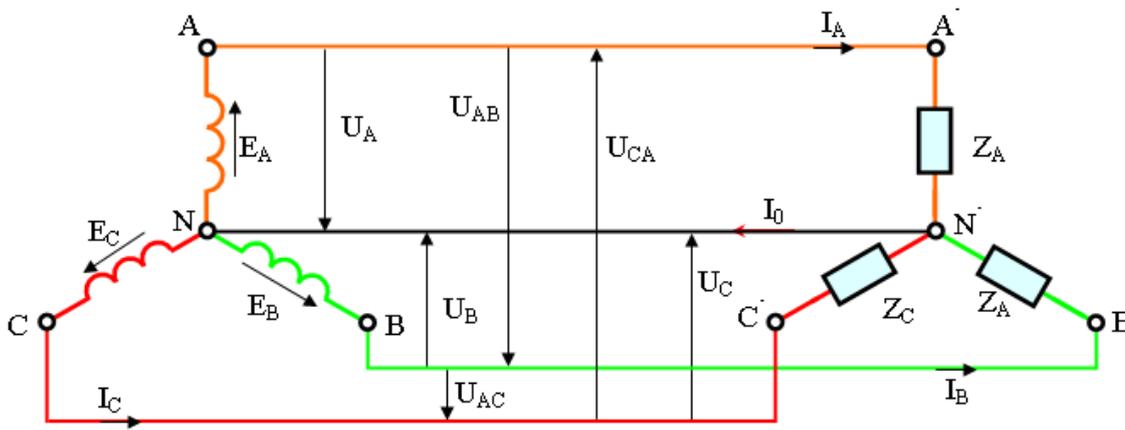


Рис. 8.2. Схема связанной четырехпроводной трехфазной цепи

Напряжение между линейными проводами - линейное напряжение $U_{\text{л}}$. Таким образом, имеется три линейных напряжения - U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} , условные положительные направления которых приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам, соответствующим второму индексу. Линейные напряжения определяются через известные фазные напряжения. Это соотношение может быть получено из уравнения, написанного по второму закону Кирхгофа для контура $ANBA$, если принять направление обхода контура от точки A к точке N и т. д.: $U_A - U_B - U_{AB} = 0$. Отсюда

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B$$

и, аналогично,

$$\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C$$

(8.1)

$$\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A$$

Таким образом, действующее значение линейных напряжений равно векторной разности соответствующих фазных напряжений.

При построении векторных диаграмм напряжений удобно принимать потенциалы нейтральных точек N и N' равными нулю, т. е. совпадающими с началом координатных осей комплексной плоскости (рис. 8.3). Таким образом, на векторной диаграмме удобно направить векторы фазных напряжений от точки N к точкам A , B и C , т. е. противоположно условному положительному направлению напряжений на схемах.

Для нахождения вектора линейного напряжения U_{AB} , как следует из (8.1), необходимо к вектору напряжения U_A прибавить вектор напряжения U_B с противоположным знаком. После переноса вектора U_{AB} параллельно самому себе он соединит точки A и B на векторной диаграмме фазных напряжений.

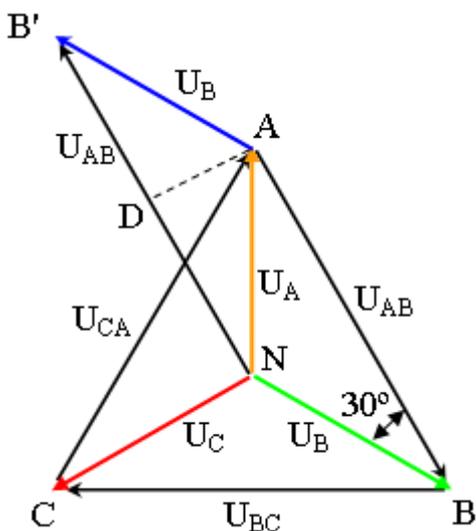


Рис. 8.3. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении фаз звездой

Аналогично строят векторы линейных напряжений UBC и UCA.

На векторной диаграмме напряжений векторы фазных напряжений образуют звезду, а векторы линейных напряжений - замкнутый треугольник. Вследствие этого векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю, т. е.

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0 \quad (8.2)$$

Так как при симметричной системе треугольник линейных напряжений равносторонний, то, чтобы найти соотношение между линейными и фазными напряжениями, надо опустить перпендикуляр из точки N на вектор напряжения UAB. Тогда $AB = U_{AB} = 2U_{\Phi} \cos 30^\circ$. Так как $U_{AB} = U_{\text{л}}$, а $U_{\Phi} = U_{\Phi}$, то

$$U_{\text{л}} = 2\sqrt{3} U_{\Phi} / 2 = \sqrt{3} U_{\Phi}.$$

Таким образом, если система напряжений симметрична, то при соединении звездой линейное напряжение в $\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазного напряжения.

Предусмотренные ГОСТом и применяемые на практике напряжения переменного тока 127, 220, 380 и 660 В как раз и отличаются друг от друга в 1,73 раза. Если $U_{\text{л}} = 220$ В, то $U_{\Phi} = 127$ В, что обозначают как 220/127 В. Кроме того, применяют системы 380/220 и 660/380 В.

В четырехпроводной трехфазной цепи имеется два уровня напряжения, различающихся в 1,73 раза, что позволяет использовать приемники с различным номинальным напряжением.

При подключении приемников к трехфазному генератору, обмотки которого соединены звездой, ток протекает по обмоткам генератора, линейным проводам и фазам приемника. Ток в фазах генератора или приемника называется фазным током I_Ф. Ток в линейных проводах называется линейным током I_Л. Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, соединяются последовательно, то при соединении звездой линейный ток равен фазному:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{Ф}}$$

Линейные и фазные токи на рис. 8.2 обозначены I_A, I_B и I_C.

Ток в нейтральном проводе I_N может быть определен по первому закону Кирхгофа, на основании которого для точки n можно записать уравнение

откуда

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C - \vec{I}_N = 0$$

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \quad (8.3)$$

Следовательно, ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме фазных токов.

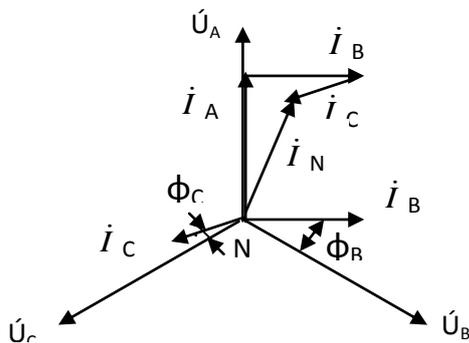


Рис. 8.4. Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при несимметричной нагрузке

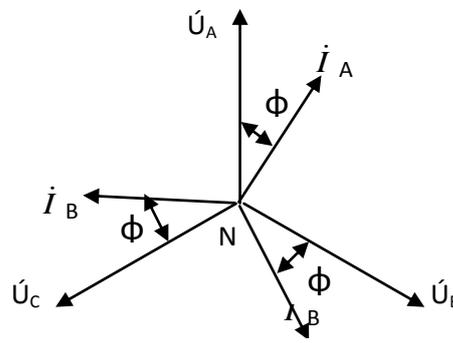


Рис. 8.5. Векторная диаграмма фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке

Ток в каждой фазе может быть определен по закону Ома для цепи синусоидального тока. Так, для фазы А

$$I_A = U_A / Z_A = I_A e^{-i\varphi_A},$$

где $I_A = U_A / Z_A; \varphi_A = \arctg(X_A / R_A)$

Аналогично определяют фазные токи IB и IC.

Зная модули IA, IB и IC и сдвиги фаз φA, φB и φC между векторами соответствующих фазных напряжений и токов, можно построить векторную диаграмму (рис. 8.4). При построении принято, что система фазных напряжений симметрична (что на практике почти всегда имеет место), а сопротивления фаз приемников различны. В результате фазные токи оказываются различными по значению и сдвинутыми по фазе на различные углы. Геометрическим сложением фазных токов находят вектор тока IN. Чем больше различие в фазных токах, тем больше ток в нейтральном проводе.

При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда $Z_A = Z_B = Z_C$, т.е. когда $R_A = R_B = R_C$ и $X_A = X_B = X_C$, фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi;$$

$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi.$$

Итак, фазные токи при симметричной нагрузке образуют симметричную систему, вследствие чего ток IN в нейтральном проводе равен нулю;

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0 \quad (8.4)$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для симметричной нагрузки показана на рис. 8.5.

При симметричной нагрузке создается такой режим трехфазной цепи, при котором в нейтральном проводе тока нет. Следовательно, можно отказаться от нейтрального провода и перейти к трехпроводной трехфазной цепи, изображенной на рис. 8.6.

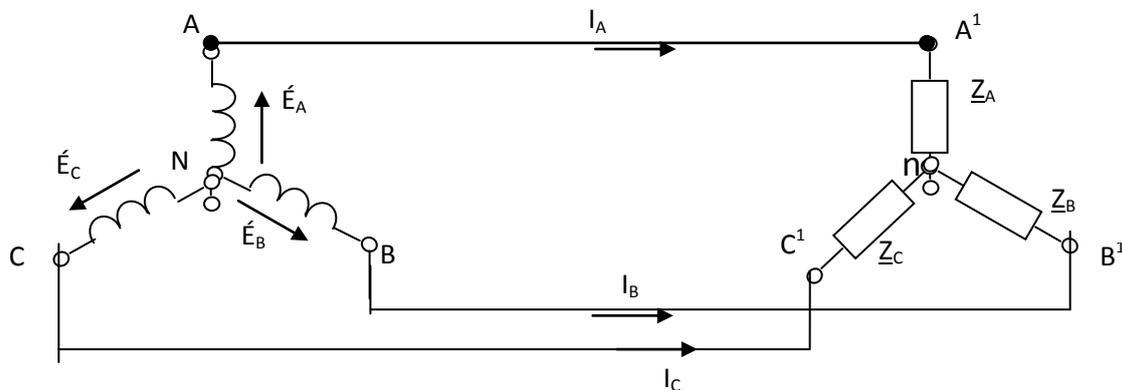


Рис. 8.6. Схема связанной трехпроводной трехфазной цепи

Изменение мгновенных значений симметричной системы токов аналогично изменению мгновенного значения э.д.с. (см. рис. 8.5). При $t = 0$ ток $i_A = 0$, ток i_C положителен, а ток i_B отрицателен, причем $i_C = -i_B$. Это значит, что действительное направление тока в фазе C совпадает с условным положительным направлением, указанным на рис. 4.11, а в фазе B противоположно ему. Провод B в данный момент времени является обратным проводом для фазы C. При $t = T/2$ токи i_A и i_C положительны, причем $i_A = i_C = 0,5 I_m$ а ток i_B отрицателен, причем $i_B = -I_m$. Провод B является обратным проводом для фаз A и C. Преимущество трехфазной системы в том и состоит, что не требуется специальных обратных проводов, их функции поочередно выполняют прямые провода.

Обмотки современных трехфазных генераторов, которые устанавливают на электростанциях, соединяются всегда звездой, что позволяет выполнять изоляцию обмоток на фазное напряжение, которое меньше линейного в 1,73 раза. При соединении обмоток генератора звездой фазы приемника могут быть соединены как звездой, так и треугольником.

Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником

Соединение обмоток генератора или фаз приемника, при котором начало одной фазы соединяется с концом другой, образуя замкнутый контур, называется соединением треугольником. Начало фазы А источника питания соединяют с концом фазы В (Y) и точку соединения обозначают А (рис. 8.7). Далее соединяют точки В и Z (точка В) и точки С и X (точка С). Положительные направления э.д.с. в обмотках те же, что и на рис. 8.7.

Подобным образом соединяют треугольником и фазы приемника, сопротивления которых обозначены двумя индексами, соответствующими началу и концу фазы. По фазам приемника протекают фазные токи I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} . Условное положительное направление фазных токов приемника принято от точки первого индекса к точке второго индекса. Условное положительное направление фазных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов I_A , I_B и I_C принято от источника питания к приемнику.

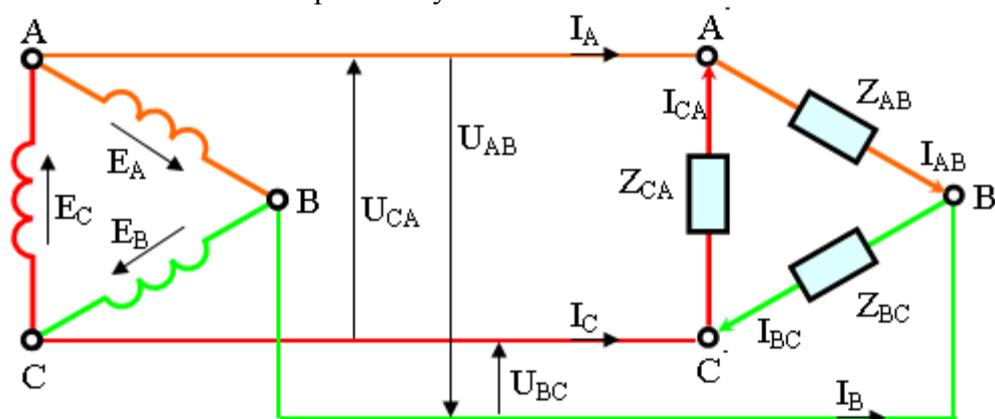


Рис. 8.7. Схема трехпроводной трехфазной цепи при соединении фаз треугольником

При отключенном приемнике, когда токи I_A , I_B и I_C равны нулю, в замкнутом контуре обмоток источника питания ток равен нулю, так как система э.д.с. симметрична и суммарная э.д.с. в контуре равна нулю ($e_A + e_B + e_C = 0$). Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т. е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная э.д.с. в контуре треугольника отлична от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источника питания, и поэтому он недопустим.

Напряжение между началом и концом фазы при соединении треугольником - это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению:

$$U_L = U_\phi.$$

При подключении приемника, соединенного треугольником, к источнику питания по фазам приемника протекает фазный ток, который определяется по закону Ома:

$$\vec{I}_\phi = \vec{U}_\phi / \underline{Z} = I_\phi e^{-j\varphi},$$

где $\underline{Z} = \underline{Z} e^{j\varphi} = R + jX$ — комплексное сопротивление фазы приемника.

Например, $\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB} = I_{AB} e^{-j\varphi_{AB}}$, где $I_{AB} = U_{AB} / Z_{AB}$; $\varphi_{AB} = \arctg(X_{AB} / R_{AB})$.

Линейные токи можно определить из уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа: для точки А' $\dot{I}_A + \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{AB} = 0$; для точки В' $\dot{I}_B + \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{BC} = 0$; для точки С' $\dot{I}_C + \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{CA} = 0$.

Таким образом, получаем:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA} \quad (8.5)$$

$$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB} \quad (8.6)$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC} \quad (8.7)$$

Итак, линейные токи при соединении треугольником равны векторной разности фазных токов тех фаз, которые соединены с данным линейным проводом.

Как следует из уравнений (8.5) - (8.7), векторная сумма линейных токов всегда равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0;$$

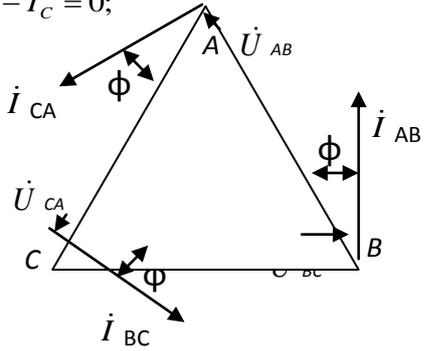


Рис. 8.8. Векторная диаграмма напряжений и фазных токов при соединении фаз треугольником

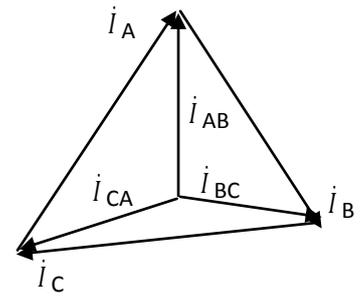
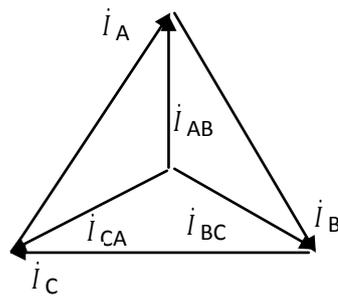


Рис. 8.9. Векторная диаграмма фазных и линейных токов при соединении фаз треугольником:

а- при симметричной нагрузке; б-

Сист
обра:

IAВ, IBC, и ICA при симметричной нагрузке равны по значению и сдвинуты отношению к векторам напряжений на одинаковый угол φ.

Для определения линейных токов на рис. 8.9 а построена векторная диаграмма тех же фазных токов, что на рис. 8.8. Так как линейные токи определяются через фазные так же, как и линейная напряжения через фазные при соединении звездой, то можно сразу построить векторы линейных токов, соединив концы векторов фазных токов. Векторы линейных токов образуют замкнутый треугольник. Поскольку при симметричной нагрузке системы фазных и линейных токов симметричны, сравнивая векторные диаграммы ток (рис. 8.9 а) и напряжений (см. рис. 8.3), можно заключить, что линейные токи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником, в $\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазных:

$$I_l = \sqrt{3}I_\phi.$$

В общем случае, когда нагрузка несимметрична, системы фазных и линейных токов также несимметричны (рис. 8.9, б).

Схема соединения фаз приемника (звезда или треугольник) не зависит от схемы соединения обмоток источника питания. Электроприемник присоединяют к источнику питания, имеющему три или четыре зажима. При трех зажимах (А, В и С) обмотки источника питания могут быть соединены как звездой без вывода нейтральной точки, так и треугольником. При четырех зажимах (А, В, С и N) обмотки источника питания соединены звездой с выведенной нейтральной точкой. Фазы приемника могут быть соединены звездой с нейтральным проводом только в этом случае. В заключение отметим, что помимо рассмотренных соединений «звезда - звезда» и «треугольник - треугольник» на практике также применяются схемы «звезда - треугольник» и «треугольник - звезда».

Вопросы

1. Чем отличается трехфазная несвязанная система с связанного?
2. Что такое фазное напряжение?
3. Какую систему называем симметричной?
4. Какую систему называем несимметричной?
5. Какое соотношение между фазным и линейным напряжением.
6. Какой принцип действия у трехфазного генератора?
7. В чем заключаются основные преимущества трехфазных систем?
8. Какие системы обладают свойством уравновешенности, в чем оно выражается?
9. Какие существуют схемы соединения в трехфазных цепях?
10. Какие соотношения между фазными и линейными величинами имеют место при соединении в звезду и в треугольник?

11. Что будет, если поменять местами начало и конец одной из фаз генератора при соединении в треугольник, и почему?

Лекция № 9
Переходные процессы в электрических цепях

План:

1. Основные понятия и принципы анализа переходных процессов
2. Переходные процессы при подключении источнику постоянного напряжения цепи с последовательным соединением элементов R и L.
3. Переходные процессы при зарядке и разрядке конденсатора.
4. Переходные процессы при подключении к источнику синусоидального напряжения цепи с последовательным соединением элементов с R и L.
5. Переходные процессы при подключении к источнику синусоидального напряжения цепи с последовательным соединением элементов с R и C.

Основные понятия и принципы анализа переходных процессов

$$I = \frac{U}{R}$$

Если к цепи приложено постоянное напряжение U, то в цепи протекает постоянный ток, а если в цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то в цепи с постоянными параметрами протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Такие токи устанавливаются лишь через некоторое время после включения цепи или после изменения ее параметров и могут существовать все время, пока в ней приложено напряжение и параметры остаются неизменными. Эти токи называются установившимися токами, а соответствующие напряжения на отдельных участках цепи – установившимися напряжениями.

Каждому установившемуся режиму электрической цепи соответствует строго определенное энергетическое состояние, т.е. определенные значения энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля индуктивной катушки:

$$W_{\text{э}} = \frac{Cu_c^2}{2} \quad W_M = \frac{Li_L^2}{2}$$

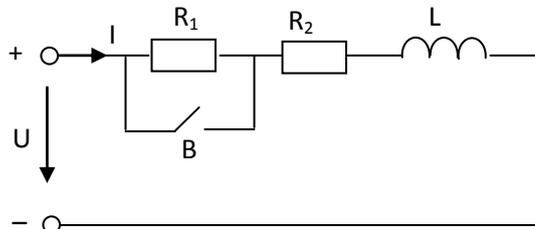


Рис.9.1. Схема для анализа влияния изменения параметров цепи

Любое изменение состояния электрической цепи (включение, выключение, изменение параметров цепи и т.п.) называется коммутацией. Будем считать, что процесс коммутации осуществляется мгновенно. Энергетическое же состояние цепи не может изменяться мгновенно.

Пусть, например, в цепи (рис.9.1) при разомкнутом выключателе B протекает установившийся ток $I_1 = U / (R_1 + R_2)$, определяемый только сопротивлением R цепи. При замыкании выключателя, т.е.

при шунтировании резистора R1, установившийся ток в цепи $I_2 = U / R_2 > I_1$

Если предположить, что ток в цепи изменяется мгновенно от I_1 до I_2

то это будет означать, что в этот момент времени переменным током индуцируется э.д.с. самоиндукции

$$e_L = -L \Delta i / \Delta t = \infty$$

Но любая э.д.с. самоиндукции препятствует изменению тока в цепи. Поэтому предположение о мгновенном изменении тока в цепи неверно. В этом случае, когда $L \neq 0$, можно рассматривать изменение тока как мгновенное.

Таким образом, ток в цепи с индуктивностью не может изменяться скачком. В этом заключается первый закон коммутации.

Согласно второму закону коммутации, напряжение на зажимах конденсатора или другого емкостного элемента не может изменяться скачком.

Индуктивные и емкостные элементы являются инерционными, вследствие чего для изменения энергетического состояния электрической цепи требуется некоторый промежуток времени, в течение которого происходит переходный процесс. Длительность переходного процесса зависит от параметров цепи. Хотя такой процесс обычно длится несколько секунд или даже доли секунды, токи и напряжения в это время на отдельных участках цепи могут достигать больших значений, иногда опасных для электроустановок. Поэтому нужно уметь рассчитывать токи и напряжения переходных процессов и на основании этих расчётов разрабатывать меры защиты электрической цепи.

Как любой динамический процесс в материальных системах, так и переходный процесс в электрических цепях описывается линейным дифференциальным уравнением. Режим линейных электрических цепей с постоянными параметрами R , L и C описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Так, режим цепи синусоидального тока при последовательном соединении R , L и C и напряжении источника питания $u=U\sin\omega t$ описывается уравнением

$$Ri + \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt = U\sin\omega t$$

Полное решение такого неоднородного линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами ищут в виде

$$i = i' + i''$$

где i' – частное решение данного неоднородного уравнения, i'' – общее решение однородного дифференциального уравнения.

Ток i' поддерживается в цепи напряжением источника питания и является установившимся током. Ток i'' находят при решении уравнения без свободного члена. Физически это означает, что приложенное к цепи напряжение равно нулю, т.е. цепь представляет замкнутый контур, состоящий из последовательно соединенных R , L и C . Ток в такой цепи может поддерживаться только за счёт запасов энергии в магнитном поле индуктивной катушки или в электрическом поле конденсатора. Так как эти запасы ограничены и при протекании тока i'' по элементам с сопротивлением R происходит рассеяние энергии в виде теплоты, то через некоторое время этот ток становится равным нулю.

Ток i'' называется свободным, так как его определяют в свободном режиме цепи.

Таким образом, полное решение дифференциального уравнения позволяет определить ток i в цепи в переходном режиме или напряжение на элементах цепи $u = u' + u''$.

Переходные процессы при подключении к источнику постоянного напряжения цепи с последовательным соединением элементов R и L .

Все катушки и обмотки электрических аппаратов и машин имеют сопротивление R и индуктивность L . Поэтому исследуемую электрическую цепь, изображенную на рис. 9.2, можно считать эквивалентной схемой индуктивной катушки или обмотки, включаемой на постоянное напряжение.

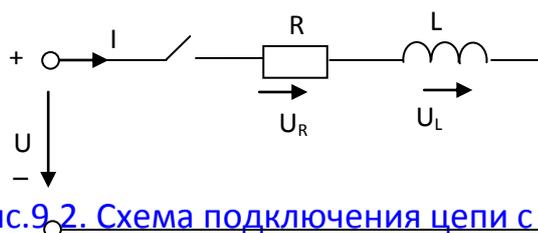


Рис.9.2. Схема подключения цепи с последовательным соединением с R и L к источнику постоянного напряжения

В начальный момент времени тока в цепи нет и энергия магнитного поля индуктивной катушки равна нулю. После подключения цепи к источнику постоянного напряжения U в установившемся режиме в ней протекает ток I и энергия магнитного поля $LI^2/2 > 0$. Следовательно, в то время, когда происходит изменение энергии магнитного поля индуктивной катушки (от 0 до $LI^2/2$), в цепи протекает переходный процесс и существует переменный ток i .

Переходный процесс в такой цепи описывается дифференциальным уравнением (по второму закону Кирхгофа)

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U$$

Ток в установившемся режиме $i_{ст} = I = U/R$. Свободный ток $i_{св}$ находят, решая дифференциальное уравнение

$$L \frac{di''}{dt} + Ri'' = 0 \quad (9.1)$$

Решение этого уравнения ищут в виде

$$i'' = Ae^{pt}$$

где коэффициент p - корень характеристического уравнения $Lp + R = 0$.

Таким образом, $p = -R/L$, а ток в переходном режиме

$$i = U/R + Ae^{-Rt/L} \quad (9.2)$$

Постоянную интегрирования A определяем с учетом первого закона коммутации из начальных условий: при $t=0$ ток в цепи равен нулю.

Получаем $A = -U/R$.

В результате

$$i = I(1 - e^{-t/\tau}) \quad (9.3)$$

Величина $\tau = L/R$ имеет размерность времени и называется постоянной времени цепи. Она характеризует скорость переходного процесса. Чем больше τ (больше L), тем дольше протекает ток i тем длительнее переходный процесс.

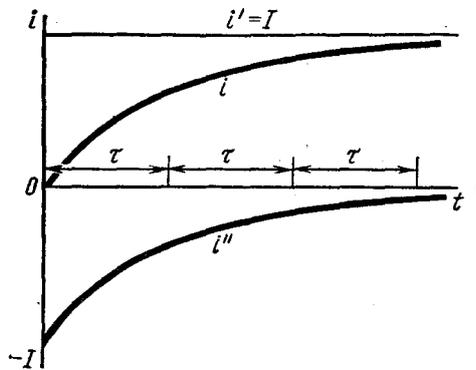


Рис.9.3.Изменение токов в цепи с последовательным соединением элементов с R и L при включении на

Как име

Это означает, что постоянная времени цепи равна такому промежутку времени, в течение которого свободный ток уменьшается в e раз.

В момент времени $t=kt$ значения свободного тока $i'' = I/e^k$ по отношению к значению установившегося тока соответственно составляет (%); 36,00 (при $t=\tau$); 13,50 ($t=2\tau$); 5,00 ($t=3\tau$); 1,80 ($t=4\tau$); 0,67 ($t=5\tau$); 0,25 ($t=6\tau$).

Из этих данных следует, что уже при $t=5\tau$ ток в цепи отличается от тока I менее чем на 1%, поэтому его можно считать установившимся. Падение напряжения на резисторе $u_R = Ri$ изменяется по такому же закону, что и ток. Падение напряжения на индуктивной катушке

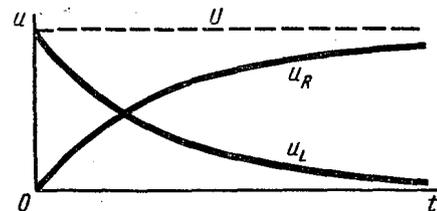


Рис.9.4.Изменение напряжения на резисторе и индуктивной катушке при включении цепи на

ен по этот ток уменьшается до нуля. Общий ток в цепи изменяется от нуля до установившегося значения по экспоненциальному закону. При $t = \tau$

$i'' = -Ie^{-1}$

$$UL=L \frac{di}{dt} =L \frac{I}{\tau} e^{-t/\tau}=L \frac{IR}{L} e^{-t/\tau}=Ue^{-t/\tau} \quad (9.4)$$

т.е. убывает с течением времени от значения напряжения источника питания до нуля (рис. 9.4).

Переходные процессы при зарядке и разрядке конденсатора

Рассмотрим схему (рис.9.5), в которой путем включения переключателя П в положение 1 замыкают источник постоянного напряжения U на конденсатор емкостью C . На обкладках конденсатора начинают скапливаться заряды и напряжение u_C увеличивается до значения, равного U . Это процесс зарядки конденсатора – процесс увеличения энергии электрического поля конденсатора, которая в конце процесса достигает значения $CU^2/2$.

Чтобы зарядить конденсатор до напряжения $u_C=U$, ему надо сообщить заряд $Q=CU$. Этот заряд не может быть сообщен мгновенно, т.к. для этого потребовался бы ток $i=dQ/dt=Q/0=\infty$.

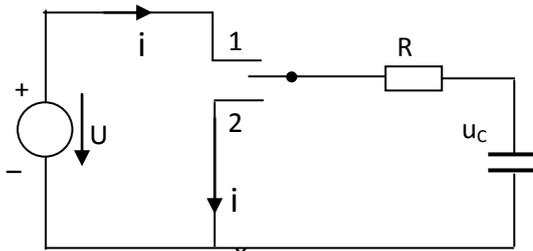


Рис.9.5. Схема для анализа переходных процессов при зарядке и разрядке

В действительности зарядный ток в цепи ограничен сопротивлением R и в первый момент не может быть больше U/R . Поэтому процесс зарядки конденсатора растянут во времени и напряжение u_C на конденсаторе нарастет постепенно.

Для переходного процесса зарядки конденсатора, включенного по рассматриваемой схеме, можно записать

$$Ri+u_C=U \quad (9.5)$$

Ток в такой цепи

$$i = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (9.6)$$

Подставляя выражение (9.6) в формулу (9.5) получим

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U$$

Найдем напряжение на конденсаторе

$$u_C = u'_C + u''_C$$

Свободное напряжение u''_C находят, решая однородное дифференциальное уравнение

$$RC \frac{du''_C}{dt} + u''_C = 0 \quad (9.7)$$

которому соответствует характеристическое уравнение $RCp+1=0$ откуда

$p = -1/(RC)$. Тогда свободное напряжение

$$u''_C = Ae^{pt} = Ae^{-t/(RC)} = Ae^{-t/\tau}$$

где $\tau=RC$ - постоянная времени цепи.

Таким образом, напряжение на конденсаторе в переходном режиме

$$u_C = u'_C + Ae^{-t/\tau} \quad (9.8),$$

а ток

$$i = i' - \frac{A}{R} e^{-t/\tau} \quad (9.9)$$

причем

$$i' = C \frac{du'_C}{dt} \quad i'' = C \frac{du''_C}{dt} = -\frac{A}{R} e^{-t/\tau}$$

В уравнение (9.8) и (9.9) постоянную А находят с учетом второго закона коммутации и начальных условий режима работы цепи, которые различны для процессов зарядки и разрядки конденсатора.

Зарядка конденсатора. Рассмотрим конденсатор который до включения переключателя П в положение 1 (рис.9.5) не был заряжен. По окончании процесса зарядки напряжение на конденсаторе равно напряжению источника питания U , что следует из уравнения (9.5) если учесть, что в установившемся режиме $i=i'=0$. Таким образом, установившееся напряжение на конденсаторе $u_C=U$. Постоянную А в уравнение (9.8) определяют полагая, что при $t=0$ $u_C=0$. Тогда $A=-U$.

Итак, напряжение в переходном режиме при зарядке конденсатора изменяется по закону $u_C=U(1-e^{-t/\tau})$ (9.10)

Для определения тока в цепи в (9.9) необходимо принять $i'=0$ и $A=-U$, после чего получим $i=Ue^{-t/\tau}/R$ (9.11)

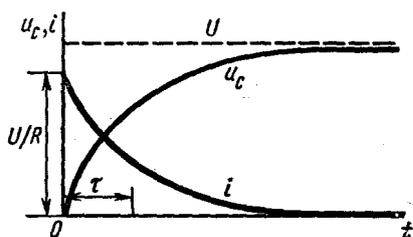


Рис.9.6.Изменение напряжения на конденсаторе и тока в цепи при зарядке конденсатора

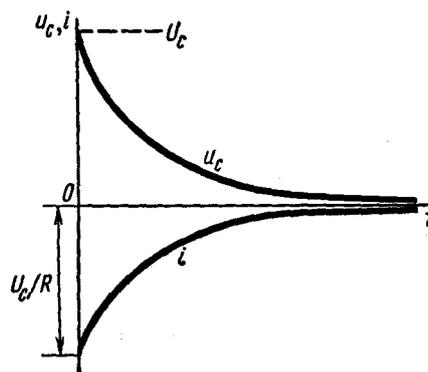


Рис.9.7.Изменение напряжения на конденсаторе и тока в цепи при разрядке конденсатора

На рис.9.6 показано изменение тока в цепи и напряжения конденсатора и тока в цепи при зарядке. В начальный момент процесса зарядки ток в цепи ограничен только сопротивлением и при малом значении R может достигать больших значений $I_0=U/R$. Переходный процесс протекающий при зарядке конденсатора, используют в различных устройствах автоматики, например в электронных реле времени.

Постоянная времени $\tau=RC$ характеризует скорость зарядки конденсатора. Чем меньше R и C, тем быстрее заряжается конденсатор. Например, если емкость конденсатора $c=10$ мкФ, а сопротивление цепи

$R=100\text{ Ом}$, то $\tau=10 \times 10^{-6} \times 100=0,001$ сек; если увеличить R до 10^6 Ом то $\tau=10 \times 10^{-6} \times 10^6=10$ сек.

Разрядка конденсатора. Если переключатель П включить в положение 2 (см. рис. 5), то заряженный до напряжения U_C конденсатор начнет разряжаться через резистор R. Энергия электрического поля конденсатора будет постепенно расходоваться на нагревание резистора и окружающей среды. По истечению некоторого времени установиться режим, при котором напряжение на конденсаторе будет равно нулю (конденсатор полностью разряжен), а тока в цепи не будет.

Принимая $u_C=0$ и находя из начальных условий (при $t=0$ $u_C=U_C$) $A=U_C$, получаем, что напряжение на конденсаторе при разрядке описывается формулой (9.8),

$$u_C=U_C e^{-t/\tau}$$

а ток в цепи, описываемый формулой (9), с учетом $i'=0$

$$i=-U_C e^{-t/\tau}/R.$$

Итак, напряжение и ток убывает по экспоненциальному закону (рис. 9.7). Ток в цепи отрицательный, т.е. направлен противоположно току во время процесса зарядки. Скорость разрядки конденсатора определяется постоянной во времени $\tau=RC$

В начальный момент ток разрядки $I_0=U_C/R$. Если бы ток оставался постоянным, то конденсатор полностью разрядился бы через

$$t_{разр} = Q / I_0 = CU_C / (U_C / R) = RC = \tau$$

Поэтому постоянную времени можно определить как промежуток времени, в течение которого конденсатор полностью зарядился (или разрядился) бы, если бы ток зарядки (или разрядки) оставался постоянным и равным начальному значению U/R (или UC/R).

Переходные процессы при подключении к источнику синусоидального напряжения цепи с последовательным соединением элементов с R и L .

Рассмотрим процессы, протекающие в цепи (см.рис.9.2) при подключении ее к источнику синусоидального напряжения.

В момент включения мгновенное значение синусоидального напряжения источника питания $u=U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда режим цепи описывается уравнением

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (9.12)$$

Ток переходного режима $i=i'+i''$. При этом установившемся значении тока, найденное как частное решение уравнения (12),

$$i' = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) \quad (9.13)$$

где $I_m = \frac{U_m}{Z}$ $Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$ $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

Свободный ток i'' находят, решая однородное дифференциальное уравнение (2)

$$i'' = A e^{-t/\tau}$$

Следовательно

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + A e^{-t/\tau} \quad (9.14)$$

Постоянная времени τ не зависит напряжения источника питания и определяется параметрами цепи. В данном случае $\tau = L/R$.

До включения цепи ток в ней был равен нулю, поэтому для $t=0$ уравнение (9.14) принимает вид $I_m \sin(\psi - \varphi) + A = 0$ откуда $A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$

Таким образом, ток в цепи в переходном режиме изменяется по закону

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \quad (9.15)$$

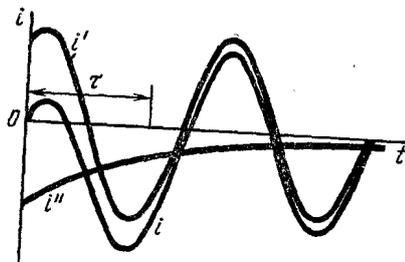


Рис.9.8. Изменение токов в цепи с последовательным включением

Установившийся ток изменяется по синусоидальному закону, а свободный ток — по экспоненциальному закону уменьшается до нуля (рис.9.8). В момент включения цепи мгновенные значения токов i' и i'' равны по значению, но противоположны по знаку.

В момент времени, когда токи i' и i'' совпадают по направлению, мгновенное значение тока в цепи i превосходит амплитуду установившегося тока I_m . Как видно из формулы (9.15), начальное значение свободного тока зависит от начальной фазы ψ напряжения. Если включение цепи происходит в момент, когда начальная фаза напряжения $\psi = \varphi \pm \pi/2$, то начальное значение свободного тока равно амплитуде установившегося тока, т.е. имеет наибольшее из возможных значений. Ток в цепи в конце первого полупериода достигнет значения, превышающего амплитуду установившегося тока почти в два раза.

При включении цепи в момент когда $\psi = \varphi$ или $\psi = \varphi \pm \pi$, свободный ток равен нулю и в цепи сразу же устанавливается установившийся режим.

Таким образом, значение тока в переходном режиме зависит не только от параметров цепи R и L, но и от начальной фазы напряжения источника питания. Но в любом случае ток i в цепи в начальный момент времени равен нулю. Длительность переходного процесса определяется постоянной времени $\tau=L/R$. Чем больше τ , тем длительнее переходный процесс, тем больше значение тока i в конце первого полупериода.

Переходные процессы при подключении к источнику синусоидального напряжения цепи с последовательным соединением элементов с R и C.

Пусть к электрической цепи (рис.9.10) подведено синусоидальное напряжение, мгновенное значение которого $U=U_m \sin(\omega t + \psi)$.

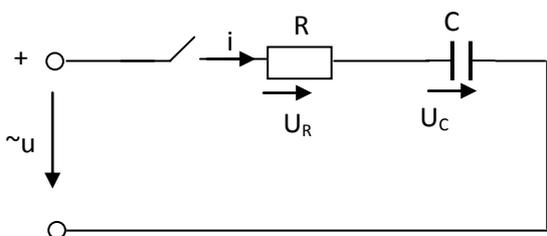


Рис.9.9. Схема цепи с последовательным соединением с R и C, подключенной к источнику

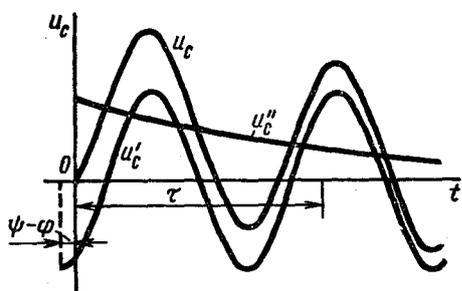


Рис.9.10. Изменение напряжений на конденсаторе при включении цепи с последовательным соединением

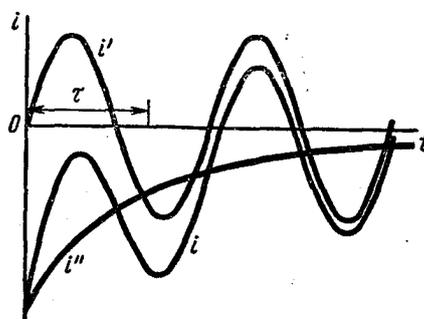


Рис.9.11. Изменение тока в цепи с последовательным соединением элементов с R и C при включении

По второму закону Кирхгофа для данной цепи можно записать

$$Ri + u_C = u,$$

где u_C — напряжение на конденсаторе. Принимая во внимание, что мгновенное значение тока в цепи $i = dQ/dt$, имеем

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U_m \sin(\omega t + \psi)$$

Поскольку во время переходного режима напряжение на конденсаторе $u_C = u'_C + u''_C$, а свободное напряжение находится при решении однородного дифференциального уравнения (9.7) как $u''_C = Ae^{-t/\tau}$, где $\tau = RC$ — постоянная времени цепи, получаем

$$u_C = u'_C + Ae^{-t/\tau} \quad (9.16)$$

Для определения установившегося напряжения u'_C можно воспользоваться выражением (9.13) для установившегося тока в цепи при последовательном соединении элементов с R и L, в котором $I_m = U/Z$;

$$Z = \sqrt{R^2 + [1/(\omega C)]^2}; \quad \varphi = \arctg[-1/(\omega CR)]$$

Тогда

$$u'_C = \frac{1}{C} \int i' dt = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) \quad (9.17)$$

Так как до включения цепи конденсатор не был заряжен ($u_C = 0$ при $t = 0$), то из (9.16) и (9.17)

$$A = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi)$$

Следовательно

$$u_c'' = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$$

а окончательно напряжение на конденсаторе в переходном режиме

$$u_c = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}.$$

На рис. 9.10 показан характер изменения напряжений на конденсаторе, соответствующий рассмотренному случаю.

В момент включения

$$u_c'' = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\psi - \varphi) = -u_c'.$$

Поэтому напряжение на конденсаторе при включении цепи нулевое. Скорость протекания переходного процесса определяется постоянной времени $\tau = RC$.

Изменение напряжения на конденсаторе зависит от начальной фазы ψ . Если в момент включения $\psi = \varphi \pm \pi/2$, то $u_c'' = 0$ и на зажимах конденсатора сразу же устанавливается установившийся режим.

При $\psi = \varphi$ или $\psi = \varphi \pm \pi$ начальное значение u_c'' является максимальным и в конце первого полупериода при больших τ близко к двойному амплитудному значению установившегося напряжения.

Свободный ток

$$i_c'' = C \frac{du_c''}{dt} = -\frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$$

$$a \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$$

В момент включения установившейся ток $i' = I_m \sin(\psi - \varphi)$ не равен свободному току $i'' = \frac{I_m}{\omega CR} \cos(\psi - \varphi) e^{-t/\tau}$ ни по значению, ни по направлению.

При начальной фазе $\psi = \varphi \pm \pi/2$ свободный ток в момент включения цепи, как и свободное напряжение, равен нулю и в цепи сразу же возникает установившейся ток, мгновенное значение которого равно амплитудному значению. Таким образом, в отличие от цепи с последовательным соединением R и L в цепи с последовательным соединением R и C в начальный момент ток имеет любое конечное значение и только в частном случае, когда $1/(\omega CR) = 1$ и

$\psi - \varphi = 45^\circ \pm \pi$, $\sin(\psi - \varphi) = \cos(\psi - \varphi)$ и ток $i = i' + i'' = 0$.

Если в момент включения цепи $\psi = \varphi$ (рис. 11) или $\psi = \varphi \pm \pi$, то установившийся ток начинает изменяться от нуля, а свободный ток имеет максимальное значение $I_m / (\omega CR) = UC_m / R$.

Амплитуда установившегося в цепи тока

$$I_m = UC_m / X_c = \omega C U C_m$$

Поэтому, если $X_c > R$, то начальное значение свободного тока может превышать амплитудное в $X_c / R = 1/(\omega CR)$ раз. Это имеет место только при малых значениях C, т.е. при малых значениях постоянной времени. Вследствие этого большой ток может протекать в цепи в течение короткого времени, значительно меньшего периода T.

Вопросы

1. Почему при отключении ёмкостной нагрузки от источника на размыкаемых контактах нет искры, а при индуктивной нагрузке есть?

Лекция № 10

Электроизмерительные приборы и электрические измерения

План:

1. Общие сведения. Погрешности приборов. Классификация приборов
2. Общие элементы электроизмерительных приборов непосредственной оценки.
3. Знаки на шкалах и щитках приборов.
4. Измерение в цепях постоянного тока
5. Измерения в однофазных цепях синусоидального тока.
6. Измерение в трёхфазных цепях.
7. Измерение сопротивлений
8. Измерение частоты.

Общие сведения

Измерения - это нахождения значений физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

Технические средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателей, называются электроизмерительными приборами.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями изменения измеряемых величин, называются аналоговыми. Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называются цифровыми.

Если электроизмерительный прибор допускает только считывание показаний, то его называют показывающим, а если возможны и считывание и регистрация (или только регистрация) показаний, то прибор называют регистрирующим. Если показания прибора можно записать в форме диаграммы, то его называют самопишущим.

В практике часто применяют интегрирующие приборы, в которых значения измеряемой величины суммируются по времени или по другой независимой переменной. Из интегрирующих приборов всем хорошо известен счётчик электрической энергии.

Электроизмерительные приборы подразделяют на приборы непосредственной оценки, в которых подвижная часть измерительного механизма реагирует на значения измеряемой величины, и приборы сравнения, в которых измеряемая величина сравнивается с величиной, значение которой известно. (измерительные мосты потенциометры)

Погрешности приборов

Действительное значение измеряемой величины может отличаться от полученного из опыта значения. Это может быть обусловлено несовершенством технологии изготовления прибора, конструктивными недостатками, неправильной градуировкой, влиянием различных внешних факторов.

Разность между показанием прибора X и истинным значением X_0 измеряемой величины называется абсолютной погрешностью измерительного прибора:

$$\Delta = X - X_0$$

Относительная погрешность измерения определяется обычно в процентах к истинному значению X_0 , но так как отклонение X от X_0 сравнительно малы, то

$$\delta = \pm \Delta / X_0 \approx \pm \Delta / X$$

Оценить качество прибора по значению абсолютной и относительной погрешностей измерений невозможно, так как X во время измерения может принимать любые значения в пределах от 0 до X_N , где X_N – нормирующее значение прибора, т.е. верхний предел его диапазона измерений или арифметическая сумма двух верхних значений диапазона (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений)

Поэтому было введено понятие приведенной погрешности

$$\gamma = \pm \Delta / X_N$$

Значение предела приведенной погрешности, выраженной в процентах :

$$\gamma = \pm \Delta \cdot 100 / X_N$$

Определяет класс точности прибора.

В зависимости от изменения во времени измеряемой величины, различаются следующие погрешности средств измерений:

- 1) статическая погрешность - погрешность при измерении постоянной во времени величины;
- 2) динамическая погрешность-разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью, соответствующей значению измеряемой величины в данный момент времени.

В зависимости от характера изменения погрешностей средств измерений различают:

- 1) систематическую погрешность - погрешность, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся;
- 2) случайную погрешность-погрешность, изменяющуюся случайным образом.

В зависимости от условий возникновения погрешностей различают.

- 1) основную погрешность -погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях;
- 2) дополнительную погрешность-погрешность средства измерений, вызванную отклонением одной из влияющих величин от нормального значения или выходом за пределы нормальных значений.

Классификация приборов

В соответствии с ГОСТ 22261-76 «Приборы электроизмерительные. Общие технические требования» приборы классифицируются по следующим признакам:

1. По виду измеряемой величины, когда классификация производится по наименованию единицы измеряемой величины. Например, амперметр- А, вольтметр- V, ваттметр-W и т. д.

Для многофункциональных приборов эти обозначения указывают у переключающих устройств и сочетают с наименованием прибора, например, вольтамперметр. К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение кратности основной единицы миллиамперметр- mA, киловатт- kV, мегаватт- MW и т.д.

2. По физическому принципу действия измерительного механизма прибора. Такая классификация определяется способом преобразования электрической величины в механические действия подвижной части прибора (табл. 1)

3. По роду тока. Эта классификация позволяет определить, в цепях какого тока можно применить данный прибор. Это обозначают условными знаками на шкале прибора, приведёнными в табл. 1.

На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты, или диапазон частот, при которых их применяют, например, 20-50-120 Гц; 45-550 Гц; при этом подчёркнутое значение является номинальным для данного прибора.

Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, то он предназначен для работы в установках с частотой 50 Гц.

4. По классу точности. Класс точности прибора обозначают цифрой, равной допускаемой приведённой погрешности, выраженной в процентах. Выпускают приборы следующих классов точности: 0,05; 1,0; 2,0; 2,5. Цифра, обозначающая класс точности, указывается на шкале прибора. Класс точности прибора определяет основную погрешность прибора, которая обусловлена его конструкцией, технологией изготовления и имеет место при нормальных условиях эксплуатации (температура, влажность, отсутствие внешних электрического и магнитных полей и вибрации, правильная установка и т. д.) Если условия эксплуатации

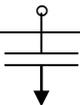
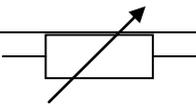
отличаются от нормальных, то возникают дополнительные погрешности, которые могут иметь как отрицательное, так и положительное значение и которые влияют на точность измерения.

Класс точности прибора является его обобщенной метрологической характеристикой. Но истинная точность измерения определяется не только классом точности, так как, согласно определению класса точности, допускается абсолютная погрешность данного прибора

$\Delta = \gamma X_N / 100$ одинакова для всех точек шкалы (где γ - приведённая погрешность, X_N – нормирующее значение) Следовательно, допускается относительная погрешность меньше в точках шкалы, ближайших к нормирующему значению. Поэтому при использовании многодиапазонных приборов нормирующее значение надо выражать так, чтобы

№	Наименование прибора	Услов. обозначение	№	Наименование прибора	Услов. обозначение
1.	Прибор постоянного тока	—	12.	Напряжение испытательное 500 В	
2.	Прибор переменного тока (однофазный)	~	13.	Напряжение испытательное выше 500 В например 2 кВ	
3.	Прибор постоянного и переменного тока	12	14.	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежи	
4.	Прибор трехфазного тока		15.	Осторожно! Прибор или вспомогательная часть высоким напряжением	
5.	Ток трехфазный переменный при неравномерной нагрузке фаз		16.	Ориентирование прибора по внешнем магнитном поле.	
6.	Прибор с одним изм. механизмом для четырехпровод. сети		17.	Прибор класса точности 1,5	1,5
7.	Рабочее положение шкалы вертикальное		18.	Корректор	
8.	Рабочее положение шкалы вертикальное		19.	Логометр магнитоэлектрический	
9.	Рабочее положение шкалы вертикально под углом 800 до 1000		20.	Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
10.	Рабочее положение шкалы наклонное, под углом 600 к горизонту		21.	Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
11.	Рабочее положение шкалы горизонтально под углом 800 до 1000		22.	Прибор электромагнитным	
№	Наименование прибора	Услов. обозначение	№	Наименование прибора	Услов. обозначение
23.	Логометр магнитоэлектрический с подвижным магнитом		34.	Прибор электромагнитный поляризованный	



24.	Прибор ферродинамический		35.	Термопреобразователь неизолированный	
25.	Логометр электродинамический		36.	Термопреобразователь изолированный	
26.	Логометр ферродинамический		37.	Преобразователь электронный измерительной цепи	
27.	Прибор биметаллический		38.	выпрямитель	
28.	Логометр электромагнитный		39.	фотодиод	
29.	Прибор электродинамический		40.	Предохранитель вплывающие	
30.	Прибор индукционный		41.	Сопротивление (активное)	
31.	Логометр индукционный		42.	Преобразователь (шунт)	
32.	Прибор тепловой с нагреваемой шитью		43.	Добавочное сопротивление	
33.	Прибор вибрационный		44.	реостат	
№	Наименование прибора	Услов. обозначение	№	Наименование прибора	Услов. обозначение
45.	Прибор		56.	Переменные	

	электростатическая			сопротивление	
46.	Экран электростатический		57.	Лампа накаливания	
47.	Экран магнитный		58.	Звонок	
48.	Прибор астатический		59.	Громкоговоритель	
49.	Зажим для соединения корпуса		60.	Элемент гальванические или батарея	
50.	Зажим для заземления		61.	Элемент гальванические или сборник батарее	
51.	Термопара		62.	Добавочное индуктивное сопротивление	
52.	Конденсатор		63.	Катушка индуктивная	
53.	Меняемее емкостные конденсатор		64.	Ссылка на соответствующий документ	
54.	Нагреватель		65.	Фотосопротивление	
55.	Двигатель или генератор		66.	микрофон	

прибор давал наибольшие показания.

5. По типу отсчётного устройства. Отсчётное устройство прибора состоит из шкалы и указателя.

Шкалы могут быть проградуированные в единицах измеряемой величины (их применяют в однодиапазонных приборах), или те условные, которые имеют 75, 100 или 150 делений (их применяют в многодиапазонных приборах)

В качестве указания применяются стрелки или световое пятно с чертой.

6. По исполнению в зависимости от условий эксплуатации. Класс прибора определяется пятью группами по диапазону рабочих температур и относительной влажности. Предельные значения определяют условия при хранении и перевозки. Группу прибора указывают на шкале соответствующей буквой. Группа А знака на шкале не имеет. В пределах диапазона рабочих температур дополнительная погрешность лежит в пределах класса точности приборов.
7. По устойчивости к механическим воздействиям приборы подразделяют на группы в зависимости от значения максимального ускорения при тряске или вибрации (m/c^2): обыкновенное с повышенной точностью (ОП), нечувствительные к вибрации (ВН), вибропрочные (ВП), нечувствительные к тряске (ТН), тряскопрочные (ТП) и ударопрочные (У). Обыкновенные с повышенной механической прочностью приборы для всех классов точности от 0,5 до 4,0 выдерживают ускорение до 15 m/c^2 и выпускаются для одного заданного ускорения. Переносные приборы выпускаются по трём группам: обыкновенные с повышенной прочностью, вибропрочные и тряскопрочные.
8. По степени защиты от внешних магнитных и электрических полей приборы делятся на категории I и II. От воздействия внешних полей приборы защищают экранированием измерительного механизма.

Общие элементы электроизмерительных приборов непосредственной оценки

Опоры. Подвижная часть измерительного механизма в приборе всегда располагается вертикально или горизонтально. Так как на щит и пультах управления для удобства наблюдения приборы устанавливают под некоторым углом наклона к горизонтали, то опорную их часть выполняют с учетом этого угла наклона. Это приводит к снижению класса точности таких приборов до 1,0 В зависимости от установки выполняется и опорная часть.

Для приборов, у которых подвижная часть укрепляется на оси, важную роль играют опорные подпятники и керны (наконечники) осей. В подпятниках цилиндрической формы с коническим кратером применяют либо опорные камни (обычно агат, корунд), либо бронзу (в приборах классов 1,5; 2,5 и 4,0). Подпятник с пружинящей опорой используют для переносных приборов, опору с шариковыми подшипниками (3-4 шарика) - для приборов с высокой степенью тряскоустойчивости.

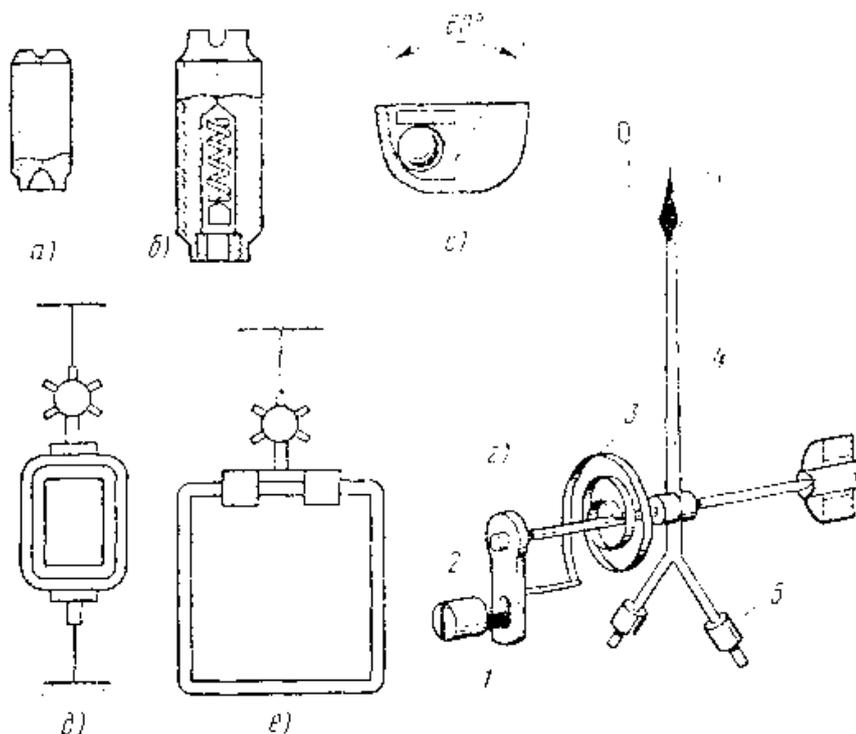
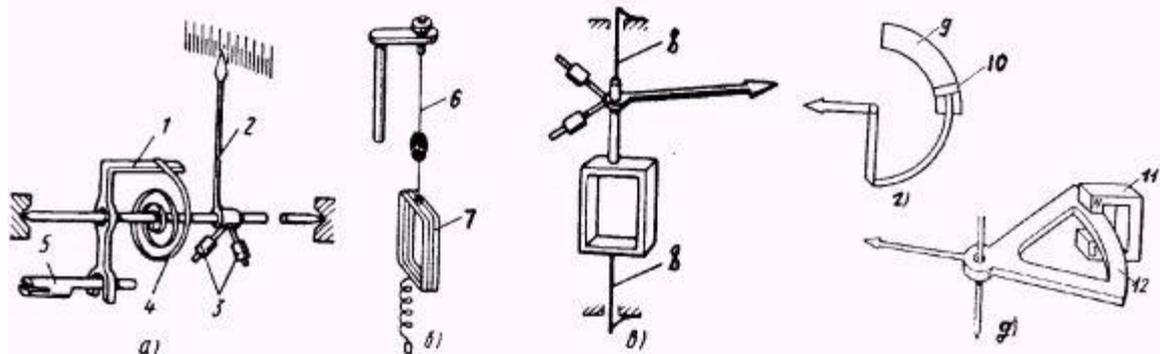


Рис. 10.1. Крепление подвижных частей измерительных механизмов и конструкция общих узлов приборов с использованием:

Ось прибора обычно изготавливают из стали серебрянки, немагнитной и нержавеющей стали. Наконечник оси конический, в некоторых конструкциях в торцовую часть оси запрессовывают керн из специальных твердых сплавов (рис. 10.1, г).

Принцип действия и устройство некоторых электроизмерительных приборов прямого отсчёта



Устройство измерительного механизма с механическим противодействующим моментом (а, б, в) и воздушным (г) или магнитоиндукционным (д) демпфером: 1-поводок; 2-стрелка; 3-балансирующие грузики; 4-противодействующая спиральная пружина; 5-корректор установки "нуля" по шкале; 6-подвес (упругая металлическая лента); 7-подвижная система прибора; 8 -растяжки (у гальванометра); 9-закрытая камера; 10-лёгкий поршень; 11-постоянный магнит; 12-металлический полудиск.

Большое распространение получили приборы на растяжках и на подвесе (рис. 10.1, д, е). Приборы на подвесе снабжают уровнем. Растяжки употребляются и на щитовых приборах. В большинстве конструкций приборов растяжки являются одновременно и токоподводами к вращающимся элементам прибора (для магнитоэлектрических и электродинамических систем).

Пружина. Спиральную пружину (3 на рис. 10.1, г) изготавливают из немагнитных сплавов (бронза). Одним концом она крепится к оси подвижной части прибора, а другим -к одной из деталей корпуса. Пружина создает момент, направленный противоположно вращающему моменту, под действием которого поворачивается ось подвижной части. Чем больше угол поворота оси, тем больше момент упругих сил пружины.

Корректор. Для установки стрелки 4 (рис. 10.1, г) на нулевую отметку шкалы при отключенном состоянии прибора необходимо провести корректировку упругого действия спиральной пружины или растяжек. Стрелка может смещаться при изменении температуры окружающей среды, из-за старения материала пружины и др.

Успокоитель. Для большинства приборов при выводе из равновесия подвижной части измерительного механизма стрелка должна достигать установившегося положения не более чем через 4 с. Для этого в приборах устанавливают успокоители.

В настоящее время наиболее широко применяют магнитоиндукционные успокоители, представляющие собой группу цилиндрических магнитов вставленных в пластину из мягкой стали и совместно с ней залитые алюминиевым сплавом. На оси подвижной части прибора закрепляют алюминиевое крыло.

Уравновешивающие грузы. Для того чтобы центр тяжести подвижной части прибора совпадал с осью вращения, на специальных держателях жестко связанных со стрелкой и осью, устанавливают противовесы 5 (рис 10.1, г)- грузики с внутренней нарезкой. Изменение центра тяжести подвижной системы производится перемещением противовесов на нарезной части держателей. Уравновешенная система сохраняет положение стрелки на нулевой отметке при любых положениях прибора.

Знаки на шкалах и щитках приборов

Основные технические и эксплуатационные характеристики прибора показывают условными знаками на лицевой стороне прибора. Если их невозможно разместить со стороны шкалы, они

выносятся на табличку, устанавливаемую на крышке прибора или боковых поверхностях корпуса.

Например, узкопрофильные приборы имеют на шкале только знак измеряемой величины.

В соответствии со стандартом для электроизмерительных приборов на лицевой стороне должны быть указаны с помощью условных знаков:

- 1) Наименование прибора (А, или амперметр; V, или вольтметр и т. д.)
- 2) Знак системы прибора (см. табл.)
- 3) Обозначение рода тока и числа фаз (см. табл.);
- 4) Класс точности прибора;
- 5) ГОСТ, которому соответствует данный прибор;
- 6) Класс прибора по условиям эксплуатации;
- 7) Категория защищённости от влияния внешних магнитных и электрических полей;
- 8) Рабочее положение прибора (см. табл.);
- 9) Испытательное напряжение прочности электрической изоляции токоведущих частей прибора относительно его корпуса (табл.);
- 10) Номинальная частота или диапазон частот, в которых может работать прибор (если она отличается от промышленной частоты 50 Гц);
- 11) Шифр (или тип) прибора, например, Э330 и т. д.;
- 12) Год выпуска и заводской номер;
- 13) Марка завода-изготовителя.

Измерение в цепях постоянного тока

Включение электроизмерительных приборов в электрическую сеть не должно изменять её параметров. Однако это не возможно, так как любой измерительный прибор потребляет энергию, которая расходуется на приведение в движение измерительного механизма, а также на нагрев обмоток и других токопроводящих деталей прибора.

В цепях постоянного тока для измерения тока и напряжения чаще применяют приборы магнитоэлектрической системы и реже электромагнитной и электродинамической систем. Для измерения мощности и энергии чаще всего применяют приборы электродинамической системы.

Для измерения тока амперметр включают в цепь последовательно. Чтобы он оказывал меньше влияния на параметры цепи, сопротивление его должно быть небольшим. При измерении токов свыше 10А применяют приборы с наружным шунтом, падение напряжения на котором составляет 75мВ и который присоединяется к амперметру калиброванными проводами (рис.10.2)

Для измерения напряжения на каком либо участке цепи вольтметр включают параллельно этому участку. Чтобы не произошло заметного изменения параметров цепи и увеличения тока в ее неразветвленной части, сопротивление вольтметра должно быть большим. Для расширения пределов измерения последовательно с вольтметром включают добавочный резистор R_d .

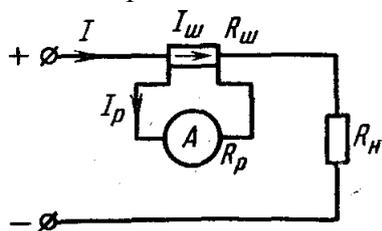


Рис.10.2. Схема подключения шунта к магнитоэлектрическому прибору

При измерении тока I , который в n раз больше тока

I_p в рамке прибора сопротивление шунта (рис.10.2) рассчитывают из условий равенства делит напряжения:

$$R_p I_p = R_{ш} I_{ш} \quad (10.1),$$

где R_p – сопротивление обмотки рамки; $R_{ш}$ – сопротивление шунта.

$I_{ш} = I - I_p$ – ток в шунте. Так как измеряют ток $I = n I_p$, то с учетом (1), получим

$$R_{ш} / R_p = I_p / I_{ш} = I_p / (n I_p - I_p) = 1 / (n - 1)$$

откуда

$$R_{ш} = R_p / (n - 1) \quad (10.2)$$

Для измерения тока $I = 5A$ прибором с $I_p = 5A$ сопротивлении $R_p = 100\Omega$, $R_{ш} \approx 0,01\Omega$.

Шунты встраивают в прибор (в один и тот же корпус и измерительным механизмом) или выполняют отдельными от прибора. Изготавливают шунты из, обладающим таким температурным коэффициентом электрического сопротивления.

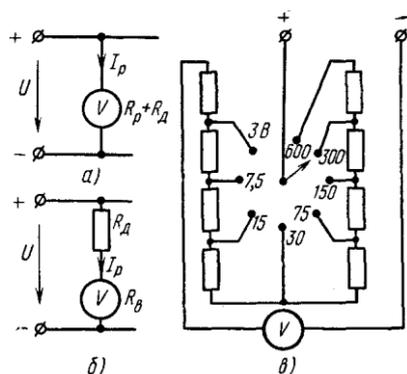


Рис.10.3. Схемы включения вольтметра в сеть (а,б) и схема много диапазонного вольтметра магнитоэлектрической системы (в)

Для измерения напряжения на каком-либо участке цепи вольтметр включают параллельно этому участку. Чтобы не произошло заметного изменения параметров цепи и увеличения тока в её не разветвлённой части, сопротивление вольтметра должно быть большим. Для расширения пределов измерения приборов последовательно с вольтметром включают добавочный резистор R_d когда необходимо расширить в n раз предел измерения вольтметра, меняют наружные добавочные резисторы (рис. 10.3 б) Значение добавочного резистора вычисляют по формуле $R_d = (n-1)R_v$, где R_v – сопротивление внутренней измерительной цепи вольтметра. Верхний предел измерения многодиапазонного вольтметра можно расширить, изменяя сопротивление R_d с помощью переключателя (рис.10.3в).

Измерения в однофазных цепях синусоидального тока

Измерение тока и напряжения в цепях синусоидального тока мало чем отличается от измерения в цепях постоянного тока. Как уже указывалось, верхний предел измерения амперметров можно увеличить с помощью специальных шунтов. С этой же целью для амперметров применяют трансформаторы тока, а для вольтметра – трансформаторы напряжения (рис.10.4). Схему с использованием измерительных трансформаторов напряжения применяют при измерениях в сетях напряжением выше 1000 В.

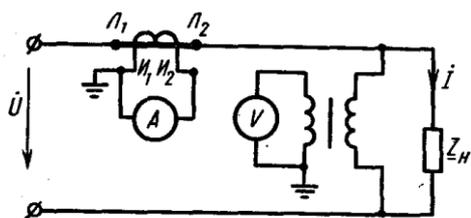


Рис.10.4. Схемы включения амперметра и вольтметра в однофазную цепь синусоидального тока с помощью измерительных трансформаторов

При применении измерительных трансформаторов необходимо следить, чтобы их нагрузка не превосходила номинальных значений, указанных в паспорте. Для обеспечения более высокой точности измерения выбирают измерительные трансформаторы с классом точности выше, чем класс измерительных приборов (табл.).

Класс точности измерительных приборов	Класс точности шунта или добавочного резистора	Класс точности измерительного трансформатора
0.5	0.2	0.2
1.0	0.5	0.5
1.5	0.5	0.5
2.5	0.5	1.0

Для измерения активной мощности используют однофазные ваттметры (обычно электродинамической системы). Схема включения обмоток ваттметра показана на рис.4

Измененная ли мощность,
 $P = c_w N$,

где $c_w = U_{НОМ} I_{НОМ} / \alpha_N$ - цена деления шкалы ваттметра Вт/дел
 N – число делений шкалы прибора, отсчитанное указателя,
 αN – число делений всей шкалы прибора.

Если напряжение сети или на зажимы приёмника превышает номинальное напряжение $U_{НОМ}$ параллельной обмотки ваттметра, то последовательно с ней включают наружный добавочный резистор R_d (рис.4) и цена деления ваттметра

$$c_w = \frac{U_{НОМ} I_{НОМ}}{\alpha_N} (1 + R_U / R_d)$$

где R_U – сопротивление параллельной обмотки ваттметра.

При включении обмоток ваттметра через измерительные трансформаторы (рис.5) цена деления ваттметра делятся с учетом коэффициентов трансформации k_I трансформатора тока и k_U трансформатора напряжения:

$$c_w = U_{НОМ} I_{НОМ} k_I k_U / \alpha_N$$

При этом надо следить за правильным включением начал и концов обмоток трансформаторов и генераторных зажимов обмоток ваттметра (Л1-Л2- зажимами первичной, а И1 и И2 - зажимы вторичной обмоток трансформатора тока).

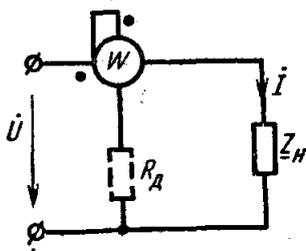


Рис.10.5. Схемы включения однофазного ваттметра с наружным добавочным резистором

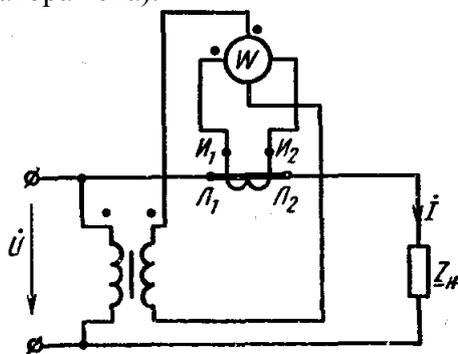


Рис.10.6. Схемы включения однофазного ваттметра с помощью измерительных трансформаторов

Коэффициент мощности цепи можно включить по показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра по формуле $\cos \varphi = P/S$, а также измерить с помощью фазометра. Схемы включения фазометра такие же как схемы включения ваттметра.

По таким же схемам включают счетчик активной энергии.

Измерение в трёхфазных цепях

Схемы включения амперметра и вольтметра для измерения токов и напряжения в трёхфазных цепях те же, что и для измерения в однофазных цепях.

Схема включения ваттметров для измерения мощности определяется схемой сети (трёх или четырёхпроводная), схемой соединения фаз приёмника (звезда или треугольник), и характером нагрузки (симметричная или несимметричная).

При несимметричной нагрузке активную мощность измеряют тремя ваттметрами (рис.6), каждый из которых измеряет мощность одной фазы-фазную мощность. Для этого ваттметры включают так, чтобы по последовательным обмоткам протекали фазные токи, а на параллельные обмотки были поданы фазные напряжения. Тогда фазные мощности $P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$; $P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$; $P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$, а мощность трехфазного приёмника равна сумме фазных мощностей:

$$P = P_A + P_B + P_C$$

Измерение мощностей тремя ваттметрами возможно при любых условиях.

При симметричной нагрузке фазные мощности равны, поэтому в этом случае можно, измерив одним ваттметром мощность одной фазы, найти мощность трёхфазового приёмника, как $P=3P_{\Phi}$. Схема включения ваттметра та же что на рис.10.7

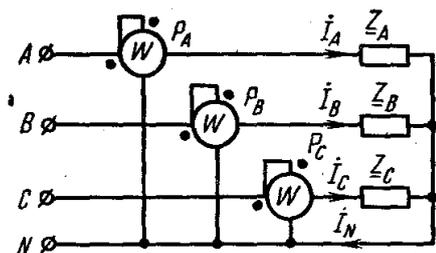


Рис.10.7. Схемы включения однофазных ваттметров для измерения активной мощности в ...

У большинства стационарных симметричных электроприёмников имеется только три зажима для присоединения его к трёхфазной трёхпроводной сети. В этих случаях применяют схему включения ваттметра с искусственной нейтральной точкой (рис.10.8). Искусственную нейтральную точку n' создают, включая звездой два резистора с сопротивлением R и параллельную обмотку ваттметра с сопротивлением RU. При соединении приёмника звездой $I_l=I_{\Phi}$ и так как на параллельную обмотку ваттметра подано фазное напряжение, ваттметр измеряет фазную мощность. Соединение приёмника треугольником всегда может быть преобразовано в эквивалентную звезду. Следовательно, для получения искомой трёхфазной мощности показание ваттметра надо умножить на три или отградуировать шкалу прибора с учетом этого сомножителя. Мощность трёхфазового приёмника при любой схеме соединения фаз, при симметричной и несимметричной нагрузках, в трёхпроводной цепи может быть измерена с помощью двух ваттметров. Мгновенное значение мощности трёхфазного приёмника.

$$p=p_A+p_B+p_C=u_Ai_A+u_Bi_B+u_Ci_C$$

Поскольку для трёхпроводной цепи

$$i_A+i_B+i_C=0 \quad (10.3)$$

а следовательно $i_B=-(i_A+i_C)$, то мгновенное значение мощностит

$$p=(u_A-u_B)i_A+(u_C-u_B)i_C$$

Так как разность фазных напряжений является линейным напряжением, то есть $u_A-u_B=u_{AB}$; $u_C-u_B=u_{CB}$, то

$$p=u_{AB}i_A+u_{CB}i_C=P_1+P_{11}$$

Среднее значение мощности синусоидального тока (активная мощность P) равно произведению действующих значений напряжения и тока, определяющих мгновенное значение мощности, и косинуса угла между их векторами. Поэтому средние значения мощности

$$P_1=U_{AB}I_C \cos(\dot{U}_{AB} \wedge \dot{I}_A)=U_{AB}I_C \cos \alpha$$

$$P_{11}=U_{CB}I_C \cos(\dot{U}_{CB} \wedge \dot{I}_C)=U_{CB}I_C \cos \beta$$

а мощность трёхфазного приёмника

$$P=P_1+P_{11}=U_{AB}I_C \cos \alpha + U_{CB}I_C \cos \beta \quad (10.4)$$

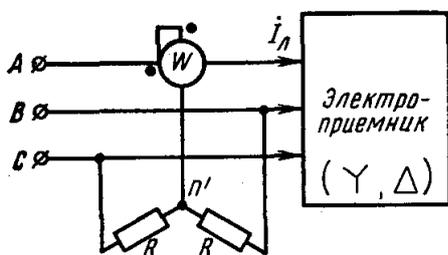


Рис.10.8. Схемы включения ваттметра в трехпроводную цепь с искусственной нейтральной

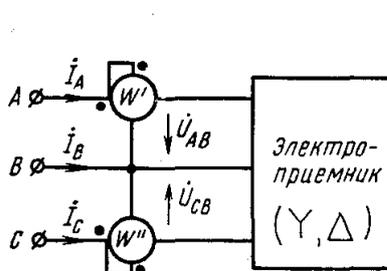


Рис.10.9. Схемы включения двух ваттметров для измерения

Это выражение показывает, что для измерения мощности трёхфазового приёмника необходимо иметь два ваттметра, которые должны быть включены так, чтобы по их последовательным обмоткам пртекали токи I_A и I_C , а на параллельной обмотки были поданы напряжения U_{AB} и

УСВ соответственно (рис.10.9). В общем случае последовательные обмотки могут быть включены в любые два линейного провода, но концы параллельных обмоток всегда подключаются к свободному проводу.

При симметричной нагрузке, когда $I_A=I_B=I_C$ и $\varphi_A=\varphi_B=\varphi_C=\varphi$ а углы β в формуле (10.4) можно выразить через угол φ . Для этого рассмотрим векторную диаграмму напряжений и токов (рис.10.10), из которой можно определить, что $\alpha=\varphi+30^\circ$; $\beta=\varphi-30^\circ$. Тогда показания ваттметров $P_1=U_{AB}I_B \cos(\varphi+30^\circ)$; $P_{11}=U_{CB}I_C \cos(\varphi-30^\circ)$ (10.5)

Так как угол φ изменяется в пределах от $-\pi/2$ до $\pi/2$, то, как следует из (3), значения P_1 и P_{11} могут быть как положительными так и отрицательными даже при симметричной нагрузке.

Значения P_1 и P_{11} равны друг другу только при активной нагрузке ($\varphi=0$), когда $P_1=P_{11}=0,5P$. При активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi=60^\circ$ $P=0$, а мощность трёхфазного приёмника $P=P_{11}$. При дальнейшем увеличении угла φ значение мощности P_1 становится отрицательным и мощность трёхфазного приёмника $P=P_{11}+(-P_1)$. При активно емкостной нагрузке $P_{11}=0$, если $\varphi=-60^\circ$, а при дальнейшем увеличении емкостной составляющей тока значение мощности P_{11} становится отрицательным.

Отрицательные значения одной из мощностей (P_1 или P_{11}) могут иметь место и при несимметричной нагрузке. Поэтому при суммировании мощностей P_1 и P_{11} надо всегда учитывать их знак.

Так как уравнение (10.3) справедливо только для трёхпроводной цепи, то при наличии нейтрального провода, в котором в общем случае ток $I_N > 0$, не разрешается применять схему измерения мощности двумя ваттметрами.

Реактивную мощность трёхфазового приёмника можно также измерить ваттметром. Реактивная мощность фазы

$$Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \gamma = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi$$

где $\gamma = (\pi/2) - \varphi$; I_{Φ} – реактивная составляющая фазного тока.

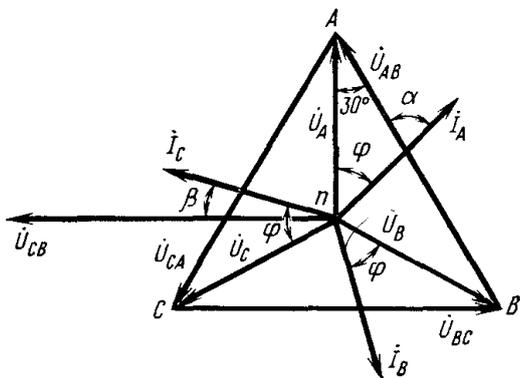


Рис.10.10. Векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке

При измерении активной мощности отклонение стрелки ваттметра было пропорционально произведению напряжения и активной составляющей тока, совпадающих по фазе. Исходя из этого можно сказать, что если на обмотку напряжения ваттметра подать напряжение, совпадающее по фазе с реактивной составляющей тока, то отклонение стрелки ваттметра будет пропорционально реактивной мощности.

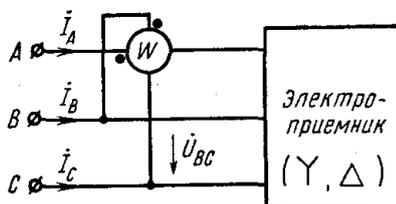
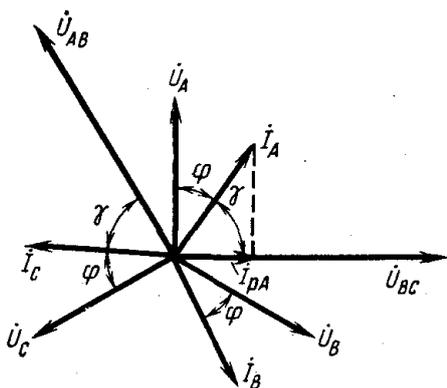


Рис.10.11. Векторная диаграмма напряжений и токов, поясняющая возможность использования

ваттметров для измерения реактивной

Из векторной диаграммы напряжения и токов при симметричной нагрузке (рис.10.11) видно, что реактивная составляющая I_A совпадает по фазе с линейным напряжением U_{BC} . Поэтому, если включить ваттметр так, как показано на рис.10.12, то его показание $Q' = U_{BC} I_A = U_{ЛЛ} I \sin \varphi$,

что в $\sqrt{3}$ раз меньше реактивной мощности $Q = \sqrt{3} U_{ЛЛ} I \sin \varphi$ трехфазного симметричного приёмника. Следовательно, для определения реактивной мощности трёхфазного приёмника показание прибора надо умножить на $\sqrt{3}$.

При несимметричной нагрузке требуется включить три ваттметра по аналогичной схеме. Тогда

$$Q = (Q_{A'} + Q_{B'} + Q_{C'}) / \sqrt{3},$$

где $Q_{A'}$ $Q_{B'}$ $Q_{C'}$ - показания, последовательные обмотки которые включены в фазы А, В и С соответственно.

Для измерения электрической энергии применяют счетчики, схемы включения которых те же, что схемы включения ваттметров.

Измерение сопротивлений

Сопротивление R различных элементов электрических цепей изменяется в очень широком диапазоне. Условно сопротивление можно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 до 100 КОм) и большие (более 100 кОм). Для измерения сопротивлений используют следующие методы: косвенный метод (с помощью амперметра и вольтметра), метод непосредственной оценки (с помощью омметра), метод сравнения (с помощью мостов и потенциометров).

В косвенном методе измерения по показаниям вольтметра U и амперметра I вычисляют сопротивление:

$$R_X = U / I \quad (10.6)$$

при этом схема включения приборов зависит от значения измеряемого сопротивления. При малых значениях сопротивления, соизмеряемых с сопротивлением амперметра, измерения производят по схеме рис.12,а. Если ток I_U в обмотке вольтметра с сопротивлением R_U много меньше тока I в цепи ($I_U \leq 0,01 I$), то ошибка в определении R_X по формуле (10.6) не превысит 1%. Более точное значение R_X находят по формуле $R_X = U / (I - I_U)$.

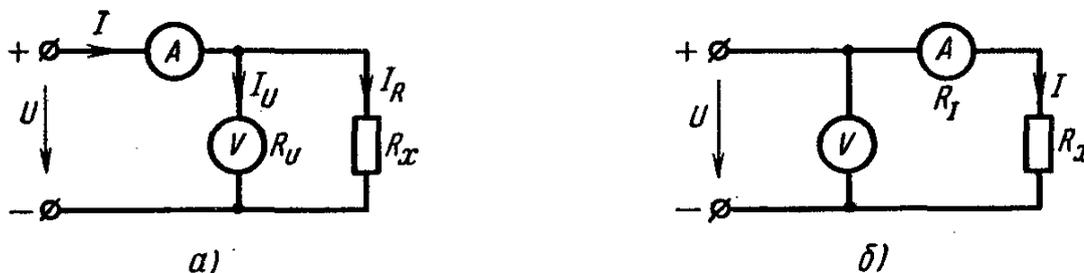


Рис.10.13. Схемы измерения сопротивления косвенном методом а- для малых сопротивлений; б- для средних сопротивлений

Схема (рис.12б) применяется при измерении больших сопротивлений ($R_X \gg R_I$ – сопротивление обмотки амперметра). Если $R_I \leq 0,01 U$, то ошибка в вычислении сопротивления R_X по (4) не превысит 1%. Точное значение сопротивления вычисляют по формуле $R_X = (U - R_I I) / I = (U / I) - R_I$

Для непосредственного измерения сопротивлений применяют омметры – приборы, у которых шкала проградуирована в Омах. Обычно омметры – это приборы, объединяющие в одном корпусе миллиамперметр магнитоэлектрической системы (или магнитоэлектрический логометр), источник питания (сухой гальванический элемент) и ограничивающий ток добавочный резистор R_D (рис.10.14).

При замкнутом ключе K регулирует напряжение U источника питания так, чтобы стрелку прибора установить на нулевую отметку шкалы прибора, которая находится в правом краю шкалы. При этом ток в приборе $-I_0$. При размыкании ключа K ток в приборе

$$I = U / (R_I + R_D + R_X) < I_0,$$

где R_I – сопротивление измерительного механизма I . С уменьшением тока в приборе стрелка отклоняется влево, так как $U = \text{const}$ и $R_U + R_D = \text{const}$, то значения тока в приборе зависит только от R_X . Шкала прибора, отградуированная в Омах, неравномерная. Значение $R_X = \infty$ соответствует левый край шкалы.

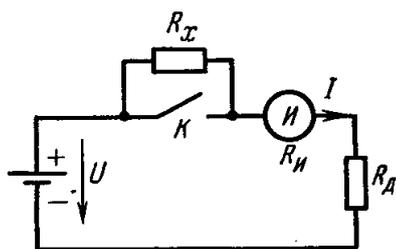


Рис.10.14. Схема омметра

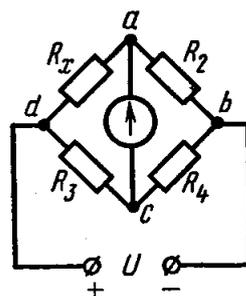


Рис.10.15. Схема одинарного моста постоянного тока

Для измерения больших сопротивлений (сопротивления изоляции электрических машин, аппаратов, приборов и электрической сети напряжения до 1000В) применяются омметры с магнитоэлектрическим логометром–мегомметры.

Для измерения сопротивления широко применяются мосты постоянного тока (рис.10.15). Мосты изготавливаются в виде переносных приборов. В одно плечо моста включают резистор, сопротивление которого необходимо измерить. Как известно, мост будет уравновешенным, если потенциалы точек a и c одинаковы и ток в магнитоэлектрическом гальванометре, включенном в одну из диагоналей моста, будет равен нулю. При этом

$$R_X = R_2 R_3 / R_4$$

При любом значении измеряемого сопротивления R_X этого равенство можно добиться путем изменения сопротивления других плеч моста. Такой мост называется уравновешенным. Если сопротивления плеч моста не регулируются, а шкала гальванометра отградуирована в Омах, то такой мост называется неуравновешенным.

Измерение частоты

Измерение частоты переменного тока можно производить при помощи электромеханических приборов-частотомеров. Наиболее простым является электромагнитный резонансный частотомер.

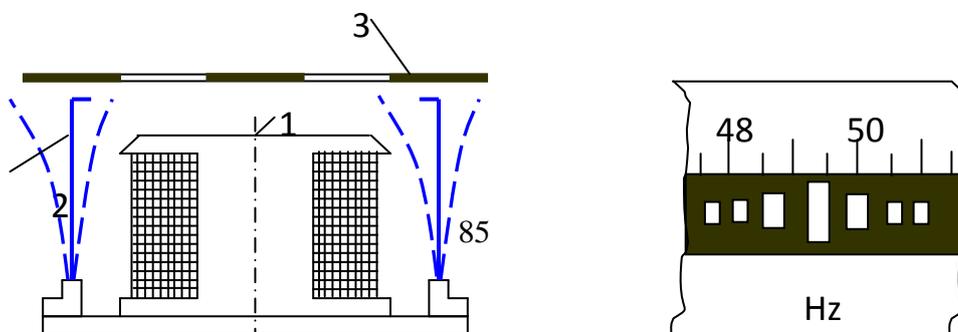


Рис.10.16. Схематическое устройство (а) и внешний вид шкалы (б) резонансного электромагнитного частотомера.

Применяется две конструкции таких частотомеров: с непосредственным и косвенным возбуждением. Для измерения частоты переменного тока обмотка электромагнита 1 прибора с непосредственным возбуждением включается в цепь подобно вольтметру. В поле электромагнита располагаются стальные пластинки 2, у которых один конец закреплен не подвижно, а второй может перемещаться. Этот конец обычно загнут и окрашен светлой краской для наблюдения за его колебаниями со стороны шкалы 3. Пластинки подобраны так, что каждая из них обладает различной частотой собственных колебаний. Под действием переменного магнитного поля пластинки дважды за период будут притягиваться к электромагниту, т.е. будут совершать колебательные движения. С наибольшей амплитудой будет колебаться та пластинка, частота собственных колебаний которой равна двойной частоте тока. Со стороны шкалы это будет видно так, как показано на рис.

Обычно резонансные частотомеры выполняются на небольшие пределы измерения частоты (от 45 до 55 Гц или от 450 до 550 Гц). Погрешность измерений в большинстве случаев составляет $\pm(1,5\div 2,5)\%$. Недостаток приборов такого типа заключается в том, что они неприменимы на подвижных установках в связи с возможностью возникновения механического резонанса пластинок с внешними вибрациями.

Электромеханический частотомер может быть осуществлен на основе электро- или ферродинамического логометра.



Вопросы.

Основные виды погрешности.

Что такое абсолютная погрешность

Что вы знаете о классе точности измерительного прибора.

Основными единицами СИ.

Принцип работы электромагнитного резонансного частотомера?

Лекция № 11
Магнитные цепи

План:

1. Магнитные цепи постоянного потока.
2. Магнитные цепи с воздушным зазором. Дроссель в насыщенном магнитном состоянии
3. Устройство и принцип действия магнитного усилителя

Магнитный поток

В пространстве, окружающем проводники, по которым протекает электрический ток, а также окружающем постоянные магниты, существует ряд физических явлений, проявляющихся в возникновении ЭДС в движущихся проводниках, механическом воздействии на постоянные магниты и проводники с током, находящиеся в этом пространстве и др.

Пространство, в котором происходят эти явления, называется магнитным полем.

Для определения количественных характеристик магнитного поля можно использовать любое его проявление, однако обычно используют явление электромагнитной индукции и механическое воздействие со стороны поля.

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении ЭДС проводниках. Причем, условия, при которых она возникает могут быть самыми различными. Это может происходить, например, при движении проводника в однородном магнитном поле или в неподвижном проводнике, находящемся в переменном магнитном поле.

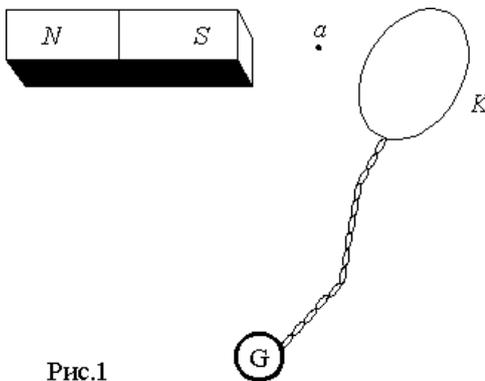


Рис.1

Определить основные соотношения для этого явления можно с помощью устройства показанного на рис. 11.1. Оно представляет собой тонкий проводник, изогнутый в виде кольца К и подключенный гибким витым проводом к баллистическому гальванометру G. Отклонение стрелки баллистического гальванометра пропорционально количеству зарядов q, протекших через него.

Если центр кольца К помещать в разные точки пространства вокруг постоянного магнита, а затем быстро относить на значительное расстояние, то гальванометр будет фиксировать разные значения q. Расстояние, на которое

нужно удалять кольцо теоретически должно быть бесконечным для того, чтобы все проявления поля были сведены к нулю.

При повторении опыта из одной и той же точки пространства мы будем получать одинаковые значения q, но если изменить сопротивление цепи r, по которой протекают заряды, то величина q изменится обратно пропорционально r. Отсюда можно сделать заключение, что каждая точка пространства вокруг постоянного магнита обладает некоторым свойством, определяющим количество зарядов q, протекающих через гальванометр при удалении кольца К на значительное

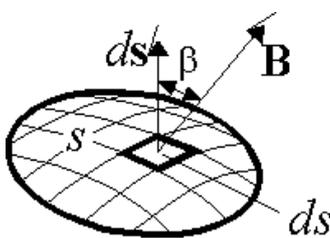


Рис.2

расстояние от магнита. Обозначим это свойство символом Φ и назовем его магнитным потоком, оставляя пока смысловое обоснование термина.

Тогда можно записать отмеченную выше связь в виде выражения:

$$q = \Phi/r \text{ или } \Phi = qr \quad (11.1)$$

Повторим опыты с кольцом в одной и той же точке пространства постоянного магнита, например, в точке а рис. 11.1, при неизменном сопротивлении цепи и положении плоскости кольца. При этом будем постепенно изменять площадь кольца. Если площадь кольца достаточно малая, то изменения количества зарядов Δq будут в точности

пропорциональны изменению площади кольца Δs . Но количество зарядов пропорционально величине магнитного потока, поэтому и изменения магнитного потока пропорциональны изменению площади, т.е.

$$\Delta \Phi = B \Delta s \text{ или, переходя к бесконечно малым,}$$

$$d\Phi = B ds, \quad (11.2)$$

где величина B_a не зависит от размеров кольца и определяется только положением точки a , следовательно, она характеризует магнитное поле в данной точке пространства и называется магнитной индукцией.

Если опыты в точке a продолжить, изменяя положение плоскости кольца в начальный момент, то можно установить, что существует такое его положение, при котором количество зарядов будет максимальным и всякое отклонение от этого положения будет приводить к их уменьшению пропорционально косинусу угла отклонения. Включая это условие в выражение (2) получим $d\Phi = B \cos \alpha ds$, (12.3)

где α - угол между направлением нормали к плоскости пробного витка и направлением, при котором количество зарядов, протекающих через виток максимально.

Выражение (11.3) показывает, что магнитная индукция B является векторной величиной и ее направление совпадает с направлением нормали к плоскости пробного витка, при котором количество зарядов, протекающих через виток при его удалении на значительное расстояние, максимально.

Опыты с пробным витком (кольцом) можно проводить также и в пространстве катушки, подключенной к источнику постоянного тока. При этом вместо удаления витка можно просто выключать ток, т.к. в обоих случаях магнитный поток будет уменьшаться до нуля.

Если в пространстве выделить некоторую поверхность s , то магнитный поток через эту поверхность определится из выражения (11.3) в виде

$$\Phi = \int_s B \cos \beta ds = \int_s \mathbf{B} ds \quad (11.4)$$

где ds - вектор численно равный поверхности ds и имеющий направление нормали к этой поверхности (рис 11.2.).

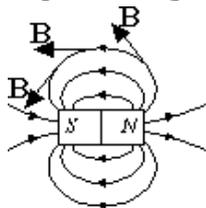


Рис. 3

Из выражения (11.4) следует, что магнитный поток является потоком вектора магнитной индукции через некоторую поверхность. Единицей магнитного потока является **вебер** ($1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{м}^2$).

Если поверхность ds нормальна к вектору B , то $\cos \alpha = 1$ и из выражения (3)

$$d\Phi = B ds \Rightarrow B = \frac{d\Phi}{ds} \quad (11.5)$$

т.е. магнитная индукция является плотностью магнитного потока в данной точке поля. Единицей магнитной индукции является **тесла** ($1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб}/\text{м}^2$).

Возвращаясь к полученному ранее **выражению (11.1)**, можно количественно определить магнитный поток через некоторую поверхность как произведение величины заряда, протекающего через проводник совмещенный с границей этой поверхности при полном исчезновении магнитного поля, на сопротивление электрической цепи, по которой протекают эти заряды.

В описанных выше опытах с пробным витком (кольцом), он удалялся на такое расстояние, при котором исчезали всякие проявления магнитного поля. Но можно просто перемещать этот виток в пределах поля и при этом в нем также будут перемещаться электрические заряды. Перейдем в выражении (11.1) к приращениям

$$\Phi + \Delta \Phi = r(q \Delta q) \quad \Delta \Phi = r \Delta q \Delta q = \Delta \Phi / r \quad (11.6)$$

где $\Delta \Phi$ и Δq - приращения потока и количества зарядов. Разные знаки приращений объясняются тем, что положительный заряд в опытах с удалением витка соответствовал исчезновению поля, т.е. отрицательному приращению магнитного потока.

С помощью пробного витка можно исследовать все пространство вокруг магнита или катушки с током и построить линии, направление касательных к которым в каждой точке будет соответствовать направлению вектора магнитной индукции B (рис. 11.3)

Эти линии называются линиями вектора магнитной индукции или магнитными линиями.

Пространство магнитного поля можно мысленно разделить трубчатыми поверхностями, образованными магнитными линиями, причем, поверхности можно выбрать таким образом, чтобы магнитный поток внутри каждой такой поверхности (трубки) численно был равен единице и изобразить графически осевые линии этих трубок. Такие трубки называют единичными, а линии их осей - единичными магнитными линиями. Картина магнитного поля изображенная с помощью

единичных линий дает не только о качественное, но и количественное представление о нем, т.к. при этом величина вектора магнитной индукции оказывается равной количеству линий, проходящих через единицу поверхности, нормальной вектору B , а количество линий, проходящих через любую поверхность равно значению магнитного потока.

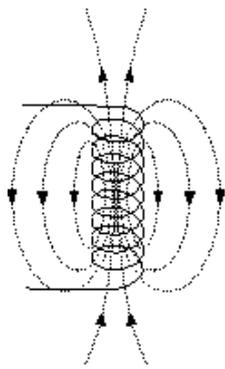


Рис. 4

Магнитные линии непрерывны и этот принцип можно математически представить в виде

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{s} = 0 \quad (11.7)$$

т.е. магнитный поток, проходящий через любую замкнутую поверхность равен нулю.

Выражение (11.4) справедливо для поверхности s любой формы. Если рассматривать магнитный поток проходящий через поверхность, образованную витками цилиндрической катушки (рис. 4), то ее можно разделить на поверхности, образованные отдельными витками, т.е. $s=s_1+s_2+\dots+s_8$. Причем через поверхности разных витков в общем случае будут проходить разные магнитные потоки. Так на рис. 12.4, через поверхности центральных витков катушки проходят восемь единичных магнитных линий, а через поверхности крайних витков только четыре.

Для того, чтобы определить полный магнитный поток, проходящий через поверхность всех витков, нужно сложить потоки, проходящие через поверхности отдельных витков, или, иначе говоря, сцепляющиеся с отдельными витками. Например, магнитные потоки, сцепляющиеся с четырьмя верхними витками катушки рис. 11.4, будут равны: $\Phi_1=4$; $\Phi_2=4$; $\Phi_3=6$; $\Phi_4=8$.

Общий магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки, называется потокоцеплением и численно равен сумме потоков, сцепляющихся с отдельными витками, т.е.

$$\square = 2(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4) = 48 \quad (11.8)$$

Часто реальное распределение потокоцепления по виткам катушки неизвестно, но его можно принять равномерным и одинаковым для всех витков, если реальную катушку заменить эквивалентной с другим числом витков $w_э$, сохраняя при этом величину потокоцепления $\square = w_э \Phi_m$, где Φ_m - поток, сцепляющийся с внутренними витками катушки, а $w_э$ - эквивалентное или эффективное число витков катушки. Для рассмотренного на рис. 11.4 случая $w_э = \square / \Phi_4 = 48/8 = 6$. Можно также произвести замену реальной катушки на эквивалентную с сохранением числа витков $\square = w \Phi_n$. Тогда для сохранения потокоцепления необходимо принять, что со всеми витками катушки сцепляется магнитный поток $\Phi_n = \square / w$.

Первый вариант замены катушки эквивалентной сохраняет картину магнитного поля, изменяя параметры катушки, второй - сохраняет параметры катушки, изменяя картину магнитного поля.

Дроссель в насыщенном магнитном состоянии

Дросселем называют электротехническое устройство переменного тока, состоящее из обмотки и стального магнитопровода с регулируемым воздушным зазором δ (рис. 11.5).

Наличие зазора позволяет изменять магнитное сопротивление магнитной цепи, а следовательно, и

индуктивность L обмотки. При этом полное сопротивление дросселя $Z_{др} = \sqrt{R_{др}^2 + (\omega L_{др})^2}$ также меняется, что приводит к изменению тока в цепи и напряжения UZ на элементе с сопротивлением Z .

Магнитное сопротивление цепи и индуктивность обмотки можно изменять и при замкнутой магнитной цепи. С этой целью на магнитопроводе размещают дополнительную обмотку постоянного тока, подмагничивающую стальной сердечник. Это устройство называется дросселем насыщения (рис. 11.6).

Рассмотрим подробнее процессы, протекающие в дросселе насыщения. Обмотку ωP , на которую подается синусоидальное напряжение $\dot{U}_~$, называют рабочей обмоткой. Последовательно с ней включается нагрузка (электроприемник) с сопротивлением Z_H . По цепи рабочей обмотки протекает рабочий ток \dot{I}_P . Обмотку ωY , которая питается от источника постоянного тока

напряжением U_y , называют обмоткой управления. По ней протекает ток управления I_y , значение которого можно изменять с помощью сопротивления R_y .

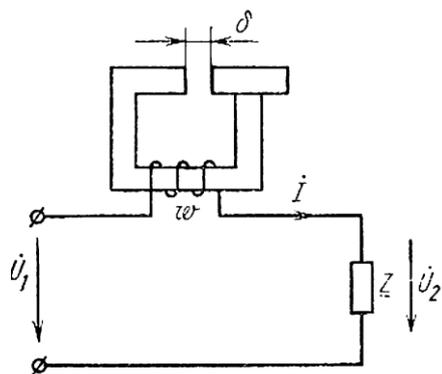


Рис. 11.5. Схема дросселя с

переменным воздушным

При отсутствии тока в обмотке управления режим работы дросселя насыщения аналогичен режиму холостого хода трансформатора, когда магнитный поток в магнитопроводе определяется только магнитодвижущей силой первичной обмотки. Поэтому по рабочей обмотке течет ток холостого хода i_{p0} , значение которого мало. Если пренебречь активным сопротивлением рабочей обмотки R_p , то

$$i_{p0} = U_- / Z = U_- / \sqrt{R_H^2 + (X_H + X_p)^2},$$

где R_H — активное сопротивление нагрузки; X_H , X_p — индуктивное сопротивление нагрузки и рабочей обмотки соответственно.

Сопротивление $X_p = \omega L_p$ определяется индуктивностью L_p рабочей обмотки, прямо пропорциональной магнитной проницаемости μ . Так как магнитопровод работает в режиме, соответствующем начальной (линейной) части кривой намагничивания, то его магнитная

проницаемость и сопротивление X_p велики. При этом $X_p \gg Z_H, Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$. Ток в рабочей обмотке и потребляемая нагрузкой мощность $P_H = I_{p0}^2 R_H$ очень малы. На рис. 11.7 показано

изменение синусоидального магнитного потока Φ_{-1} , создаваемого рабочей обмоткой в этом режиме, и тока холостого хода $i_{p0} = i_{p1}$, найденное с помощью кривой намагничивания. Ток i_{p1} изменяется по синусоидальному закону, так как дроссель работает в начальной линейной части кривой намагничивания.

Обмотку управления выполняют из большого числа витков, чтобы При небольшом токе управления I_y создать достаточный магнитный поток. Таким образом, если обмотка управления включена и по ней протекает ток I_y , в магнитопроводе дросселя создается постоянный магнитный поток подмагничивания Φ_- . Магнитное состояние магнитопровода, обусловленное магнитодвижущей силой обмотки управления, может определяться любой точкой на кривой намагничивания (рис. 11.7) от точки 0 до точки 2.

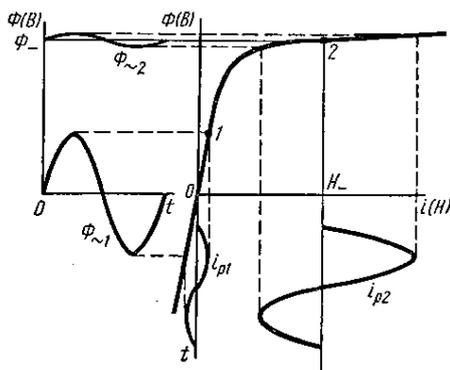


Рис. 11.7. Изменение магнитного потока в дросселе насыщения и тока в рабочей обмотке

Если обмотка управления создает такую напряженность магнитного поля H , что магнитное состояние магнитопровода определяется точкой 2, расположенной на участке насыщения кривой намагничивания, то магнитная проницаемость $\mu = B/H$ магнитопровода резко падает (рис. 11.8,а). С уменьшением магнитной проницаемости уменьшаются индуктивность рабочей обмотки и ее индуктивное сопротивление. При неизменном сопротивлении нагрузки Z_H происходит перераспределение падений напряжения:

$$\dot{U}_{\sim} = \dot{U}_P + \dot{U}_H,$$

где $U_P = j X_P I_P$ – падение напряжения на рабочей обмотке дросселя насыщения;

$\dot{U}_H = Z_H \dot{I}_P$ — падение напряжения на нагрузке

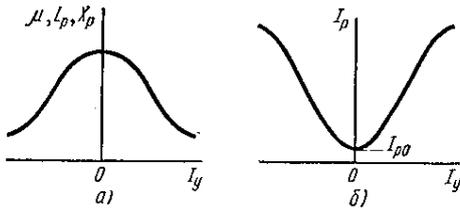


Рис. 11.8. Характеристики дросселя насыщения

В режиме постоянного уменьшением p , имеет место соотношение $X_P \ll Z_H$. Поэтому падение напряжения на рабочей обмотке при $\dot{U}_{\sim} = const$ становится незначительным, а $\dot{U}_H \cong \dot{U}_{\sim}$. Для рабочей обмотки (при $R_P=0$) можно считать, что $U_P = E_P = 4,44 f \omega_p \Phi_m$. Так как напряжение U_P резко уменьшается, то уменьшается и магнитный поток Φ , создаваемый рабочей обмоткой (на рис.

11.7 он обозначен как $\Phi_{\sim 2}$ и сложен с потоком Φ_{\sim} обмотки управления). Ток i_{p2} в рабочей обмотке в этом режиме может быть найден графическим построением (см. рис. 11.7).

Из $i_{p2} = f(t)$ видно, что ток в рабочей обмотке и в нагрузке значительно увеличивается и становится несинусоидальным, причем степень несинусоидальности зависит от характера кривой намагничивания. Если увеличивать I_y (рис. 11.8,б) от нуля до номинального значения, то действующее значение эквивалентного синусоидального тока I_P в рабочей обмотке увеличивается от значения тока холостого хода I_{P0} до максимального значения, определяемого соотношением

$$I_P = U_{\sim} / Z_H.$$

Таким образом, меняя небольшой ток в обмотке управления, можно изменять большой по значению рабочий ток или напряжение на нагрузке.

Устройство и принцип действия магнитного усилителя

Простейший магнитный усилитель. Итак, дроссель насыщения выполняет функцию усилителя тока и мощности нагрузки. При этом ток управления I_y играет роль входной величины, а рабочий ток I_P — выходной. Однако дроссель насыщения имеет существенный недостаток: переменная составляющая магнитного потока рабочей обмотки, замыкающаяся по магнитопроводу, индуцирует в обмотке управления, как и во вторичной обмотке трансформатора, переменную э.д.с. Эта э.д.с. создает переменный ток в цепи управления, что приводит к искажению процессов, рассмотренных ранее, к искажению входного сигнала.

Для устранения этого недостатка простейший магнитный усилитель делают с двумя магнитопроводами (рис. 11.9). Обмотка управления ω_u охватывает внутренние сердечники, поэтому магнитный поток подмагничивания Φ_{\sim} в обоих магнитопроводах всегда одинаков. Рабочая обмотка разделена на две равные части, каждая из которых размещена на одном магнитопроводе. Эти части включены между собой последовательно таким образом, чтобы создаваемые ими переменные магнитные потоки Φ_{\sim} в каждый момент времени во внутренних сердечниках были направлены в противоположные стороны. Тогда суммарный переменный

магнитный поток, сцепленный с обмоткой управления, равен нулю и в обмотке управления не наводится переменная э. д. с.

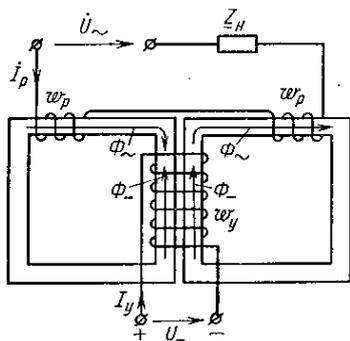


Рис. 11.9. Схема включения обмоток простейшего магнитного усилителя

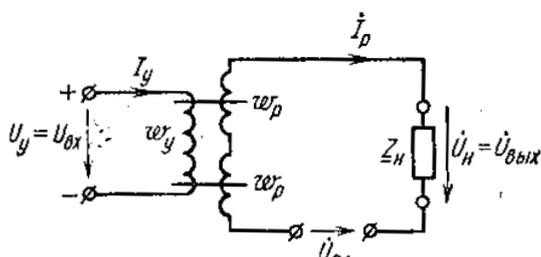


Рис. 11.10. Принципиальная схема простейшего магнитного усилителя

На рис. 11.10 приведена принципиальная схема простейшего магнитного усилителя. Как и в дросселе насыщения, здесь изменение рабочего тока при изменении тока управления определяется зависимостью (см. рис. 11.8,б), которая называется нагрузочной характеристикой магнитного усилителя.

Коэффициентом усиления магнитного усилителя по мощности называется отношение приращения мощности выхода к приращению мощности входа:

$$k_{м\text{у}} = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}} = (P_H - P_{H0}) / P_y \quad (11.9)$$

где P_H — мощность нагрузки при токе управления $I_y > 0$; P_{H0} — мощность нагрузки при $I_y = 0$; P_y — мощность, потребляемая обмоткой управления.

Магнитный усилитель имеет ряд достоинств по сравнению с другими видами усилителей. К ним относятся высокая надежность работы, большой срок службы, отсутствие движущихся частей.

Простейший магнитный усилитель, изображенный на рис. 11.9 имеет недостатки. Одним из основных недостатков такого усилителя является небольшой коэффициент усиления (обычно $k_{м.у} = 20 \div 30$). При постоянных напряжениях обмотки управления $U_y = U_{ВХ}$ и нагрузки $U_H = U_{ВЫХ}$ коэффициент усиления (11.9) по мощности пропорционален коэффициенту усиления по току, который тем больше, чем больше угол наклона нагрузочной характеристики к оси абсцисс (см. рис. 11.8). К другим недостаткам относятся независимость рабочего тока от полярности тока управления (см. рис. 11.8) и наличие тока холостого хода I_{p0} (тока в рабочей обмотке при отсутствии тока в обмотке управления).

Все недостатки простейшего магнитного усилителя можно устранить, применяя дополнительные обмотки и видоизменяя схему усилителя.

Магнитный усилитель с обмоткой смещения. Обмотку смещения $w_{см}$ располагают на внутренних сердечниках магнитопровода аналогично обмотке управления (рис. 11.11). На нее подается

постоянное напряжение $U_{см}$, и по обмотке протекает постоянный ток $I_{см}$. В результате обе обмотки (управления и смещения) создают постоянное подмагничивание, причем безразлично, какой из обмоток это подмагничивание создается. Изменение тока в рабочей обмотке

определяется суммарным магнитным потоком $\Phi_{-} = \Phi_y \pm \Phi_{см}$, где Φ_y - магнитный поток обмотки управления; $\Phi_{см}$ — магнитный поток обмотки смещения.

При наличии обмотки смещения нагрузочная характеристика магнитного усилителя будет иметь такой же вид, как показано на рис. 11.8,б, если по оси абсцисс будет отложен суммарный ток

подмагничивания $I_{-} = I_y \pm I'_{см}$, где $I'_{см} = I_{см} \omega_{см} / \omega_y$ - ток обмотки смещения, приведенный к току обмотки управления.

Из этого следует, что при $I_y = 0$ и при $I_{см} > 0$ суммарный ток подмагничивания $I_{-} = I'_{см}$ и создает магнитный поток подмагничивания $\Phi_{см}$ того же направления, что и Φ_y . Ток $I_p > I_{p0}$ определяется точкой правой ветви нагрузочной характеристики (см. рис.11.8, б).

Следовательно, зависимость $I_p = f(I_y)$ при наличии тока смещения и согласном включении обмоток управления и смещения имеет тот же вид, что и при отсутствии этого тока, но смещена влево на значение $I_{см}$ (рис. 11.12, а). Если ток обмотки смещения создает поток, противоположный по направлению потоку обмотки управления, то $I_{-} = - I_{см}$ и нагрузочная

характеристика смещается вправо на $I'_{см}$ (рис. 11.12,б).

При рассмотрении нагрузочных характеристик становится ясно, что если есть обмотка смещения, то рабочий ток (ток нагрузки) зависит от полярности тока управления. При одном и том же значении, но при разной полярности тока управления рабочий ток изменяется по значению.

Обычно выбирают такое значение $I'_{см}$, чтобы при $I_y=0$ рабочая точка размещалась около середины прямолинейной части одной ветвей нагрузочной характеристики. В этом случае коэффициент усиления постояен.

Магнитный усилитель с обратной связью. Под обратной связью понимают процесс дополнительного подмагничивания магнитопровод, создаваемого рабочим током, причем подмагничивание тем больше, чем больше рабочий ток. В магнитных усилителях обмотка управления – это «вход», а рабочая обмотка и нагрузка - «выход». Поэтому для создания обратной связи рабочий ток, преобразованный в постоянный, направляют обратно на вход. Обратная связь называется положительной, если поток обратной связи $\Phi_{ос}$ совпадает по направлению с потоком Φ_y обмотки управления, и отрицательной, если эти потоки противоположны. Положительная обратная связь увеличивает коэффициент усиления магнитного усилителя, а отрицательная — уменьшает его. Обратная связь может быть внешней или внутренней.

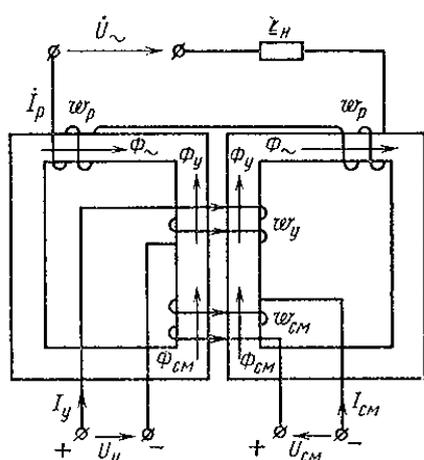


Рис.11.11. Схема магнитного усилителя с обмоткой смещения

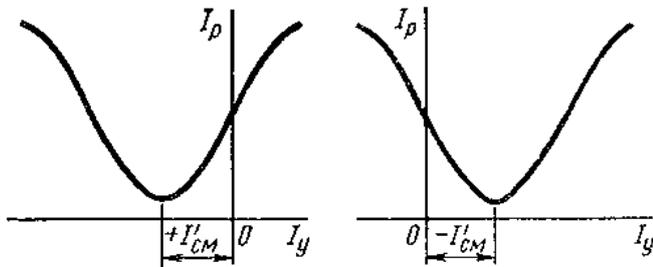


Рис. 11.12. Нагрузочные характеристики магнитного усилителя при наличии обмотки смещения: а—при согласном включении обмоток управления и смещения; б — при встречном включении обмоток управления и смещения

Внешняя обратная связь обеспечивается специальной обмоткой обратной связи ω_{oc} расположенной, так же как и обмотка управления, на внутренних сердечниках магнитопровода. По обмотке обратной связи протекает ток, пропорциональный рабочему току. Внутренняя обратная связь обеспечивается рабочей обмоткой.

На рис. 11.13 представлена схема магнитного усилителя с внешней обратной связью. Обмотка ω_{oc} включена последовательно с рабочей ω_r через выпрямительное устройство В. Поэтому по обмотке ω_{oc} протекает постоянный по направлению ток I_{oc} значение которого пропорционально амплитуде переменного

тока в рабочей обмотке. Изменением сопротивления резистора R_w , включенного параллельно обмотке обратной связи, в ней можно регулировать ток:

$$I'_{oc} = k_{oc} I_p,$$

где $I'_{oc} = I_{oc} \omega_{oc} / \omega_y$, — ток обмотки обратной связи, приведенный к обмотке управления; k_{oc} — коэффициент обратной связи; I_p — действующее значение рабочего тока. Коэффициент обратной связи зависит от числа витков ω_{oc} и шунтирующего сопротивления R_w .

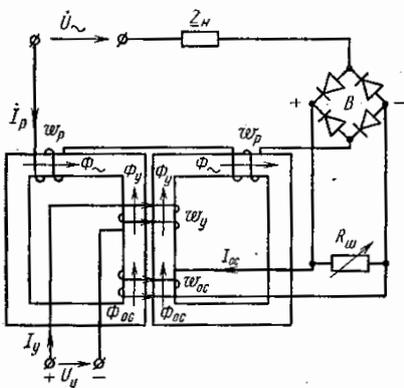


Рис. 11.13. Схема магнитного усилителя с внешней обратной связью

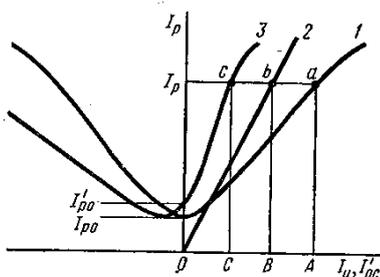


Рис. 11.14. Характеристики магнитного усилителя с внешней обратной связью

При отсутствии обратной связи нагрузочная характеристика магнитного усилителя имеет вид, представленный на рис. 11.14 кривой 1. Поскольку безразлично, какой из обмоток создается

постоянное подмагничивание, изменение рабочего тока всегда определяется суммарным магнитным потоком Φ_{\sim} и, если отключить обмотку управления ($I_y = 0$), постоянное подмагничивание будет создаваться обмоткой обратной связи, а зависимость $I_p = f(I'_{oc})$ при $k_{oc} = const$ будет линейной (2 на рис. 11.14): $I_p = I'_{oc} / k_{oc}$.

В общем случае, когда включены обмотка управления и обмотка обратной связи, суммарный магнитный поток подмагничивания равен алгебраической сумме потоков ФУ и Фос, т.е.

$\Phi_{\sim} = \Phi_U \pm \Phi_{oc}$. Так как магнитные потоки пропорциональны токам, то можно написать, что

$I_{\sim} = I_y \pm I'_{oc}$. В этом случае характеристика 1 является зависимостью $I_p = f(I_{\sim})$.

При согласном включении обмоток магнитные потоки ФУ и Фос складываются. Следовательно, определенному значению рабочего тока соответствует ток управления, отличающийся от суммарного на I'_{oc} .

Таким образом, чтобы построить нагрузочную характеристику магнитного усилителя $I_p = f(I_y)$ при наличии тока в обмотке обратной связи, надо для каждого значения рабочего тока из I_{\sim} (абсцисса кривой 1 - |OA|) вычесть I'_{oc} (абсцисса линии 2 - |OB|). Отрезок |OC| = |OA| - |OB| будет определять ток управления I_y , необходимый для получения заданного рабочего тока. Проведенная по семейству точек кривая 3 и есть нагрузочная характеристика магнитного усилителя с обратной связью.

Как видно из рис. 11.14, угол наклона кривой 3 к оси абсцисс при согласном включении обмоток управления и обратной связи (первый квадрант) больше, чем угол наклона кривой 1.

Следовательно, коэффициент усиления магнитного усилителя с обмоткой обратной связи стал больше. Если обмотку обратной связи включить встречно с обмоткой управления (второй квадрант), то обратная связь будет отрицательной и коэффициент усиления уменьшится.

При использовании обратной связи ток холостого хода увеличивается до I'_{p0} . Однако если применить обмотку смещения, включенную встречно с обмоткой управления, то кривую 3 можно сместить вправо. При этом ток смещения $I'_{см}$ подбирают таким, чтобы ток холостого хода был равен I_{p0} . Коэффициент усиления при этом не уменьшается.

Схема магнитного усилителя с внутренней связью приведена на рис. 11.15. Нагрузка Z_H включена между одним из зажимов источника переменного напряжения и точкой соединения двух частей рабочей обмотки. Благодаря выпрямителям в первый полупериод рабочий ток проходит по одной части рабочей обмотки, а во второй - по другой ее части. Ток в нагрузке переменный и протекает в течение всего периода.

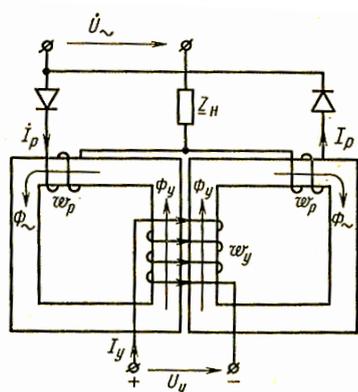


Рис. 11.15. Схема магнитного усилителя с внутренней обратной связью

Магнитные потоки Φ_{\sim} в каждом замкнутом магнитопроводе протекают через полпериода, т. е. только в одном направлении, как показано на рис. 11.15. Следовательно, эти потоки, пропорциональные рабочему току, создают такое же постоянное подмагничивание, как и обмотка обратной связи. Части рабочей обмотки соединяют между собой таким образом, чтобы потоки Φ_{\sim} во внутренних стержнях были направлены в одну сторону.

Нагрузочная характеристика магнитного усилителя с внутренней обратной связью имеет такой же вид, как и характеристика 3 на рис. 11.10. Коэффициент усиления магнитных усилителей с обратной связью повышается до 1000 (иногда до 3000—5000).

Вопросы

1. Чем заключается явление электромагнитной индукции ?
2. Для чего используются дросселе ?
3. Устройство магнитного усилителя
4. Принцип действия магнитного усилителя

Лекция № 12. Трансформаторы

План:

1. Назначение и область применения трансформаторов.
2. Устройство однофазного трансформатора. Принцип действия трансформатора.
3. Режимы работы трансформаторов.
4. Потери напряжения в трансформаторе.
5. Внешняя характеристика и к.п.д. трансформатора.
6. Потери мощности и коэффициент полезного действия трансформатора
7. Трехфазные трансформаторы
8. Автотрансформаторы
9. Специальные трансформаторы.

Назначение и область применения трансформаторов

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока той же частоты.

Обычно приемники электроэнергии расположены на некотором расстоянии от электростанций. Иногда эти расстояния измеряются сотнями и тысячами километров. Генераторы электростанций вырабатывают электроэнергию напряжением не выше 10-20 кВ. Энергия большой мощности

$S = \sqrt{3}UI$ при небольшом значении напряжения может быть передана только при большом значении тока. Для этого требуются провода больших сечений, иначе потери мощности $P_{\text{п}} = 3I^2R_0L$ (R_0 - сопротивление 1 км линии передачи, Ом/км; L - длина линии, км) будут большими. Чем больше мощность и длина линии передачи, тем больше потери мощности. При некоторых значениях S и L передача электроэнергии становится экономически невыгодной.

Если ту же самую мощность передавать при более высоком напряжении, то $I = S / (\sqrt{3}U)$ уменьшится. Такое изменение напряжения при практически неизменной передаваемой мощности осуществляется с помощью трансформатора. Трансформаторы могут повышать напряжение генераторов электростанций до 35, 220, 330, 500, 750 кВ.

На местах потребления электроэнергии напряжение должно быть понижено до такого уровня, которое является номинальным для электроприемников (220, 380 В и т.д.). Для этой цели также используют трансформаторы.

Первые идеи создания трансформатора принадлежали талантливому русскому изобретателю П.Н. Яблочкову (1878). Быстрое развитие трансформаторостроения началось тогда, когда М.О. Доливо-Добровольским была разработана трехфазная система тока (1889-1890). Им же была предложена конструкция трехфазного трансформатора.

Трансформаторы применяются в установках электросварки, в радио- и телеустановках, в системах автоматического управления, связи и др. В этих случаях трансформаторы преобразуют напряжение одного уровня в напряжение другого уровня, которое требуется для питания данного элемента установки и отличается от напряжения источника питания.

Область применения трансформаторов очень широка, чем и объясняются их конструктивное разнообразие и большой диапазон мощностей (от долей вольт-ампер до сотен мегавольт-ампер).

Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

Трансформатор (рис.12.1) состоит из стального магнитопровода 1, на который намотаны обмотки. Обмоток может быть две (двухобмоточный трансформатор), три (трехобмоточный трансформатор) и т.д. К одной из обмоток подводят напряжение U_1 от источника питания. Это обмотка называется первичной и имеет w_1 витков. Другая обмотка, имеющая w_2 витков, называется вторичной. Начало обмоток обозначают A и a , концы – X и x .

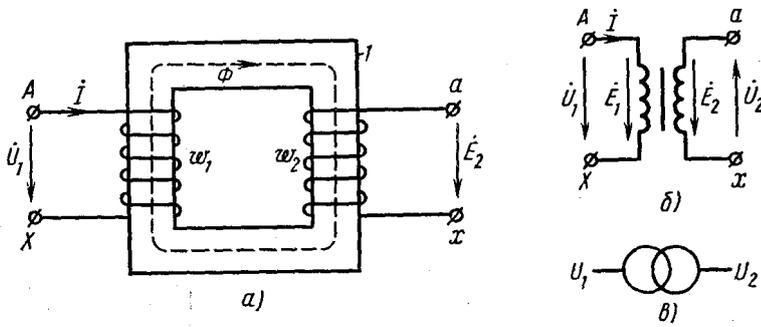


Рис.12.1. Электромагнитная схема трансформатора (а) и его условное изображение на электрических схемах (б,в)

Под действием переменного напряжения u_1 по виткам первичной обмотки протекает переменный ток i_1 , создающий переменную МДС $i_1 w_1$, которая, в свою очередь, создает переменный основной магнитный поток Φ , замыкающийся по стальному магнитопроводу. Применение магнитопровода с большой магнитной проводимостью способствует увеличению магнитного потока и усилению электромагнитной связи между обмотками. Замыкаясь, магнитный поток Φ оказывается сцепленным как с первичной, так и со вторичной обмотками.

При синусоидальном первичном напряжении магнитный поток также будет синусоидальным:

$\phi = \phi_m \sin \omega t$. Магнитный поток индуцирует в первичной обмотке э.д.с. самоиндукции, пропорциональную числу витков обмотки и скорости изменения магнитного потока:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega w_1 \phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (12.1)$$

где $E_{1m} = \omega w_1 \phi_m$ - амплитуда первичной э.д.с.

Как видно из формулы (12.1) э.д.с. первичной обмотки отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$.

Синусоидальный магнитный поток, сцепленный со вторичной обмоткой, индуцирует в ней э.д.с. взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \frac{d\phi}{dt} = -\omega w_2 \phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2) \quad (12.2)$$

где $E_{2m} = \omega w_2 \phi_m$ - амплитуда вторичной э.д.с.

Сравнивая (12.2) с (12.1), видим, что вторичная э.д.с. совпадает по фазе с первичной э.д.с., т.е. также отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$. Этого и следовало ожидать, так как обе э.д.с. индуцируются одним и тем же магнитным потоком.

Действующие значения первичной и вторичной э.д.с.:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_m w_1 = 4.44 w_1 f \phi_m \quad E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{w_2 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_m w_2 = 4.44 w_2 f \phi_m$$

Так как частота э.д.с. одинакова и индуцируются они одним и тем же магнитным потоком, то первичная э.д.с. отличается от вторичной только в том случае, если число витков w_1 и w_2 обмоток неодинаково. Чем больше число витков обмотки, тем большая э.д.с. в ней индуцируется. Таким образом электрическая энергия первичной цепи с параметрами $U_1 I_1$ и частотой f будет преобразована в энергию переменного тока вторичной цепи с параметрами $U_2 I_2$ и частотой f . Отношение первичной э.д.с. к вторичной называется коэффициентом трансформации трансформатора

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

и равно отношению числа витков обмоток. Коэффициент трансформации может быть как больше, так и меньше единицы.

Если необходимо повысить напряжение источника питания, то число витков вторичной обмотки делают больше числа витков первичной обмотки ($w_2 > w_1$). Такой трансформатор называется

повышающим. Если это напряжение надо понизить, то ($w_1 > w_2$). В этом случае трансформатор будет понижающим. Если требуется несколько различных значений вторичного напряжения, то на тот же магнитопровод наматывают несколько вторичных обмоток с различным числом витков. Таким образом при подключении первичной обмотки трансформатора к источнику переменного тока на зажимах вторичной обмотки индуцируется переменная э.д.с. E_2 и вторичная обмотка становится источником питания, к которой можно присоединить какой-либо электроприемник.

Режимы работы трансформаторов. Режим холостого хода трансформатора

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим, когда вторичная обмотка разомкнута, т.е. нагрузка отсутствует. В режиме холостого хода к первичной обмотке подведено напряжение U_1 , по ней протекает ток холостого хода I_0 , а по магнитопроводу замыкается магнитный поток Φ , индуцирующий в первичной обмотке э.д.с. e_1 и вторичной – e_2 . Так как вторичная обмотка разомкнута, ток по ней не протекает.

Опыт холостого хода. Для проведения опыта холостого хода собирают электрическую цепь, схема которой изображена на рис.2. Подводимое к первичной обмотке напряжение U_1 изменяют от 0 до $1,1U_{1ном}$. Вторичная обмотка трансформатора разомкнута, к ее зажимам присоединен вольтметр для измерения напряжения U_2 .

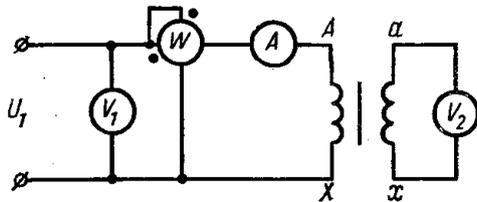


Рис.12.2. Схема опыта холостого хода трансформатора

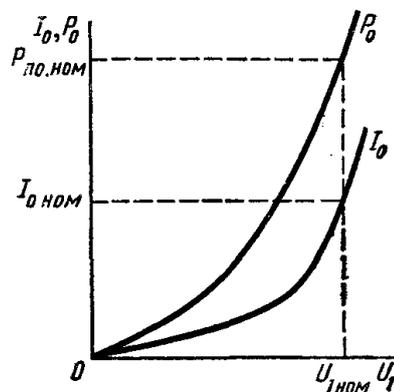


Рис.12.3. Характеристики холостого хода трансформатора

Опыт холостого хода проводится при подведении к первичной обмотке $U_{1ном}$. При этом значения магнитного потока Φ_m и магнитной индукции B_m в сердечнике трансформатора соответствует номинальному режиму.

При этом опыты определяют:

- 1) коэффициент трансформации по показанием вольтметров $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$
- 2) потери на нагрев обмотки сердечника и гистерезиса по показание ваттметра $\Delta P_{обм1} = I_0^2 r_1$
 $P_0 = \Delta P_{обм1} + \Delta P_{серд}$

- 3) ток холостого хода по показание амперметра I_0 : $I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100$

- 4) коэффициент мощности $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_{1н}}$

- 5) параметры намагничивающего контура схема замещения $r_0 = \frac{\Delta P_0}{I_{10}^2}$

$$z_0 = \frac{U_1}{I_{10}} \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \quad \cos \varphi_0 = \frac{r_0}{z_0} \quad \text{а также значения токов}$$

$$I_a = I_{10} \cos \varphi_0 \quad I_P = I_{10} \sin \varphi_0.$$

Режим короткого замыкания. Режимом короткое замыкание трансформатора называется такой режим, когда выводы вторичной обмотки замкнуты токопроводом с сопротивлением, равным нулю ($Z_H=0$). Короткое замыкание трансформатора в условиях эксплуатации создает аварийный режим, так как вторичный ток, а следовательно, и первичной увеличиваются в несколько десятков раз по сравнению с номинальным. Поэтому в цепях с трансформаторами предусматривают защиту, которая при коротком замыкании автоматически отключает трансформатор.

В лабораторных условиях можно провести испытательное короткое замыкание трансформатора, при котором накоротко замыкают зажимы вторичной обмотки, а к первичной подводят такое пониженное напряжение U_K , при котором ток первичной обмотке не превышает номинального значения ($I_K \leq I_{ном}$). При этом выраженное в процентах напряжение U_K , при котором $I_K = I_{ном}$, обозначают u_K и называют напряжением короткого замыкания трансформатора. Это характеристика трансформатора, указываемое в паспорте. Таким образом (%)

$$u_K = U_K 100 / U_{1ном}$$

где $U_{1ном}$ – номинальное первичное напряжение.

Напряжение короткого замыкания зависит от высшего напряжения обмоток трансформатора. Так, например, при высшим напряжении 6-10 кВ, $u_K = 5,5\%$, при 35 кВ $u_K = 6,5 \div 7,5\%$, при 110 кВ $u_K = 10,5\%$ и т.д. Как видно, с повышением номинального высшего напряжения увеличивается напряжение короткого замыкания трансформатора.

Опыт короткого замыкания трансформатора. Этот опыт, как и опыт холостого хода, проводят для определения параметров трансформатора.

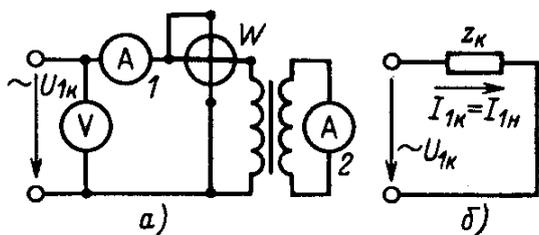


Рис.14.3. Схема опыта короткого замыкания (а) схема замещения трансформатора при коротком

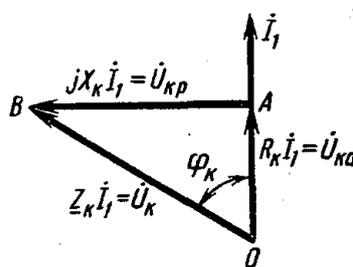


Рис.14.4. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

К первичной обмотке подводится такое пониженное напряжение U_K , при котором ток в ней равен номинальному значению $I_{ном}$. По данным измерений определяют следующие параметры трансформатора:

$$u_{KH} \% = \frac{I_{1K} Z_K}{U_{1H}} 100$$

1) напряжение короткого замыкания

2) активное и реактивное падение напряжение в обмотках

$$u_{ан} \% = \frac{I_{1H} r_K}{U_{1H}} 100 = \frac{P_{KH}}{U_{1H} I_{1H}} 100 = \frac{P_{KH}}{S_{1H}} 100 \quad u_{рн} \% = \frac{I_{1K} x_K}{U_{1H}} 100$$

3) При токе $I_1 = I_{ном}$ получают номинальные потери мощности на нагрев обмоток, которые называются электрическими потерями или потерями короткого замыкания.

$$P_{к.з.} = \Delta P_{обм} = I_{1H}^2 r_1 + I_{2H}^2 r_2$$

4) параметры упрощенной схемы замещения трансформатора, полное z_k , активное r_k , индуктивное x_k сопротивление обмоток:

$$z_k = \frac{U_{1K}}{I_{1H}} \quad r_k = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2} \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

Потери напряжения в трансформаторе

Трансформатор может быть представлен в виде элемента с сопротивлением $Z_k = R_k + jX_k$, включенного последовательно с нагрузкой.

Тогда

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}'_2 + Z_k \dot{I}'_2$$

Величина $Z_k \dot{I}'_2 = \dot{U}'_1 - \dot{U}'_2$, представляющая векторную разность между напряжениями на первичной и вторичной обмотках, есть падение напряжения в трансформаторе.

Алгебраическая разность между первичным и вторичным напряжениями является потерей напряжения в трансформаторе.

$$\Delta U = U_1 - U'_2 = U'_{20} - U'_2 \quad (12.3)$$

Потери напряжения в трансформаторе зависят как от значения нагрузки (I'_2) и ее характера (φ_2) так и от сопротивлений обмоток трансформатора (R_k и X_k).

$$\Delta U = I'_2 (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2) \quad (12.4)$$

Ток I'_2 нагрузки трансформатора можно определить через номинальный ток $I'_{2ном}$, введя понятие коэффициента нагрузки трансформатора

$$\beta = I'_2 / I'_{2ном} = I_1 / I_{1ном}$$

с учетом $I'_2 = \beta I'_{2ном}$ формула принимает вид

$$\Delta U = \beta I'_{2ном} (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2) \quad (12.5)$$

Потери напряжения удобнее определять в относительных единицах или в процентах от номинального значения.

$$\Delta u = \Delta U 100 / U_{1ном} = \beta (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2)$$

где $u_{ka} = R_k I'_{2ном} 100 / U_{1ном}$ - активная и $u_{kp} = X_k I'_{2ном} 100 / U_{1ном}$ - реактивная составляющие напряжения вк.

Как указывалось ранее, у трансформаторов большой мощности можно пренебрегать активной составляющей u_{ka} и считать $u_{kp} = u_k$. В этом случае (%)

$$\Delta u = \beta u_k \sin \varphi_2$$

Итак, потери напряжения в трансформаторе прямо пропорциональны напряжению короткого замыкания.

Внешняя характеристика трансформатора

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при постоянных значениях первичного напряжения и коэффициента мощности нагрузки: $U'_2 = f(I'_2)$ или $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$ и $\varphi_2 = \text{const}$

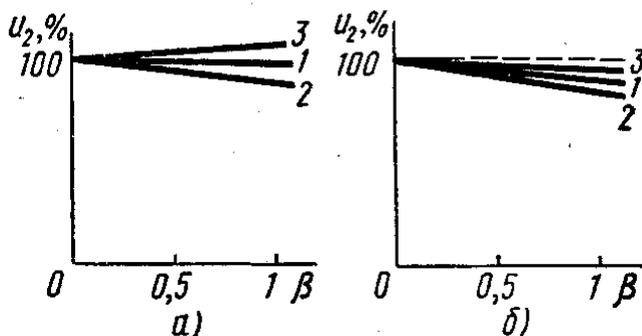


Рис.12.5. Внешние характеристики трансформатора. а)- для трансформатора большой мощности; б) для трансформатора мощностью 1-10 кВА

$$1 - \cos \varphi_2 = 1,$$

При холостом ходе трансформатора можно считать, что $U'_2 = U'_{20} = U_1$, поэтому согласно (3)

$$U'_2 = U'_{20} - \Delta U \quad (12.6)$$

т.е. напряжение на вторичной обмотке отличается от напряжения при холостом ходе на значение потери напряжения в трансформаторе.

Переходя к относительным единицам, для уравнения (6) имеем (%)

$$u'_2 = u_2 = 100 - \Delta u$$

Для трансформатора большой мощности (%)

$$u_2 = 100 - \beta u_k \sin \varphi_2 \quad (12.7)$$

На рис. 12.5а представлены зависимости вторичного напряжения от коэффициента нагрузки трансформатора для нескольких значений $\cos \varphi_2$. При $\cos \varphi_2 = 1$ $\sin \varphi_2 = 0$ и напряжение U_2 остается неизменным при всех значениях нагрузки. При активно – индуктивной нагрузке φ_2 положителен, и чем он больше, тем больше потери напряжения и тем значительнее снижение напряжения U_2 с ростом тока нагрузки. При активно – емкостной нагрузке φ_2 отрицателен и потери напряжения $\Delta u = -\beta u_k \sin \varphi_2$ также отрицательны. Уравнение (12.7) принимает вид

$$u_2 = 100 + \beta u_k \sin \varphi_2$$

откуда следует, что с ростом тока нагрузки (β) напряжение U_2 увеличивается по сравнению с U_{20} . Для трансформаторов малой мощности нельзя пренебрегать активной составляющей напряжения короткого замыкания и в (%)

$$u_2 = 100 - \beta (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2)$$

Наличие составляющей тока обуславливает снижение напряжения U_2 при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) и уменьшение отклонения напряжения от номинального значения при наличии реактивной составляющей тока нагрузки (как индуктивной, так и емкостной).

Внешние характеристики трансформаторов являются практически прямыми линиями. Снижение напряжения при номинальной нагрузке в очень большой степени зависит от коэффициента мощности нагрузки и напряжения короткого замыкания.

Потери мощности и коэффициент полезного действия трансформатора

Подводимая к трансформатору мощность $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, а мощность, отдаваемая трансформатором и потребляемая нагрузкой, $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Разность $P_{\text{п}} = P_1 - P_2$ представляет собой потери мощности в трансформаторе. В энергетическом отношении трансформатор, является весьма совершенным аппаратом и потери в трансформаторах большой мощности находятся в пределах 1—5% от номинальной мощности трансформатора (меньшие потери мощности у трансформаторов большей мощности).

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (12.8)$$

Разность между значениями P_2 и P_1 равная потерям мощности в трансформаторе, очень мала. Если для определения коэффициента полезного действия в формулу (8) подставлять показания ваттметров, измеряющих мощности P_1 и P_2 то это может привести к большим ошибкам, так как точность показаний ваттметров находится в пределах разности между P_1 и P_2 (при определенных условиях можно получить даже значение к. п. д., превышающее 100%). Поэтому к. п. д. трансформатора определяют косвенным путем по формуле

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + P_{\text{п}}) \quad (12.9)$$

Потери мощности в трансформаторе состоят из потерь холостого хода и потерь короткого замыкания:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{по}} + P_{\text{пк}}$$

Потери мощности $P_{\text{по}}$ пропорциональны квадрату магнитной индукции и, следовательно, квадрату первичного напряжения U_1 . При $U_1 = \text{const}$, что соответствует нормальным условиям работы трансформатора, $P_{\text{по}}$ постоянны и не зависят от тока нагрузки. Эти потери определяются из опыта холостого хода и в паспорте трансформатора указывают их номинальное значение $P_{\text{по ном}}$ (при $U_1 = U_{1 \text{ ном}}$). У большинства трансформаторов $P_{\text{по ном}}$ составляет менее 1% от номинальной мощности.

Потери мощности на нагрев обмоток $P_{пк} = I_2'^2 R_k = I_1^2 R_k$. Используя выражение для коэффициента нагрузки трансформатора

$$\beta = I_2' / I_2 = I_1 / I_{1НОМ} = P_2 / (S_{НОМ} \cos \varphi_2) \quad (12.10)$$

откуда $I_1 = \beta I_{1НОМ}$, получим выражение для потерь мощности

$$P_n = P_{поНОМ} + \beta^2 P_{пкНОМ}$$

где $P_{пкНОМ}$ - номинальные потери в обмотках, определяемые в опыте короткого замыкания и указываемые в паспорте трансформатора.

Таким образом,

$$P_n = P_{поНОМ} + \beta^2 P_{пкНОМ}$$

Из (12.10) получаем $P_2 = \beta S_{НОМ} \cos \varphi_2$ и выражение (12.9) принимает вид

$$\eta = \beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 / (\beta S_{НОМ} \cos \varphi_2 + P_{поНОМ} + \beta^2 P_{пкНОМ}) \quad (12.11)$$

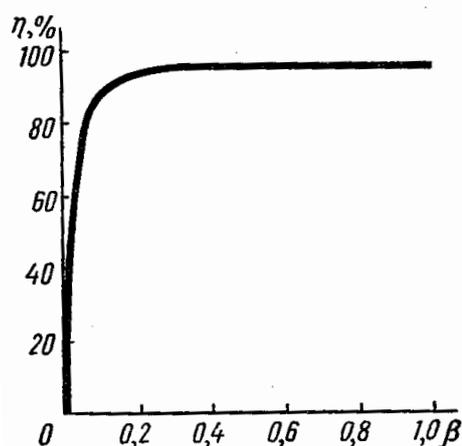


Рис.12.6. Изменение к.п.д. трансформатора в зависимости от нагрузки

Для данного трансформатора номинальной мощностью $S_{НОМ}$ из паспорта находят номинальные потери мощности $P_{поНОМ}$ и по формуле (12.11) можно рассчитать к. п. д. для любого значения нагрузки и $\cos \varphi_2$. Для определенного значения $\cos \varphi_2$ можно также построить зависимость $\eta = f(\beta)$.

На рис.6 эта зависимость построена для трансформатора, у которого $P_{поНОМ} = 1\%$, а $P_{пкНОМ} = 3\%$ от $S_{НОМ}$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$. Если нагрузка активная ($\cos \varphi_2 = 1$), к. п. д. трансформатора будет несколько выше.

Так как $P_{поНОМ}$ остаются постоянными, а потери в обмотках $P_{пк}$ увеличиваются пропорционально квадрату коэффициента нагрузки, то из анализа выражения (11) можно сделать вывод, что к.п.д. трансформатора достигает максимального значения η_{max} при некотором значении коэффициента нагрузки β , который определяется из условия $d\eta/d\beta = 0$. Продифференцировав выражение (11), получим, что η максимально при условии $\beta^2 P_{пкНОМ} = P_{поНОМ}$ т.е. при равенстве потерь холостого хода и короткого замыкания. Оптимальный коэффициент нагрузки $\beta_{опт}$, при котором $\eta = \eta_{max}$, определится из равенства

$$\beta_{опт} = \sqrt{P_{поНОМ} / P_{пкНОМ}} \quad (12.12)$$

Из зависимости $\eta = f(\beta)$ видно, что к. п. д. трансформатора мало изменяется при $0,2 \leq \beta \leq 1$ и максимум в значениях к. п. д. не является ярко выраженным. Для принятых исходных данных ($P_{поНОМ} = 0,01 S_{НОМ}$; $P_{пкНОМ} = 0,03 S_{НОМ}$) из формулы (12.12) получаем

$$\beta_{опт} = \sqrt{0,01 / 0,03} = 0,58.$$

Чем меньше разница между $P_{поНОМ}$ и $P_{пкНОМ}$, тем ближе значение $\beta_{опт}$ к единице. Обычно трансформаторы изготавливают такими, чтобы $\beta_{опт}$ находилось в пределах 0,5-0,7, так как они в основном работают именно такой нагрузкой. Увеличение $\beta_{опт}$ приводит к увеличению расхода проводникового материала.

У трансформатора малой мощности номинальное значение к.п.д. снижается до 70-90 %, а трансформаторы мощностью несколько вольт-ампер могут иметь и более низкий к.п.д.

Трехфазные трансформаторы

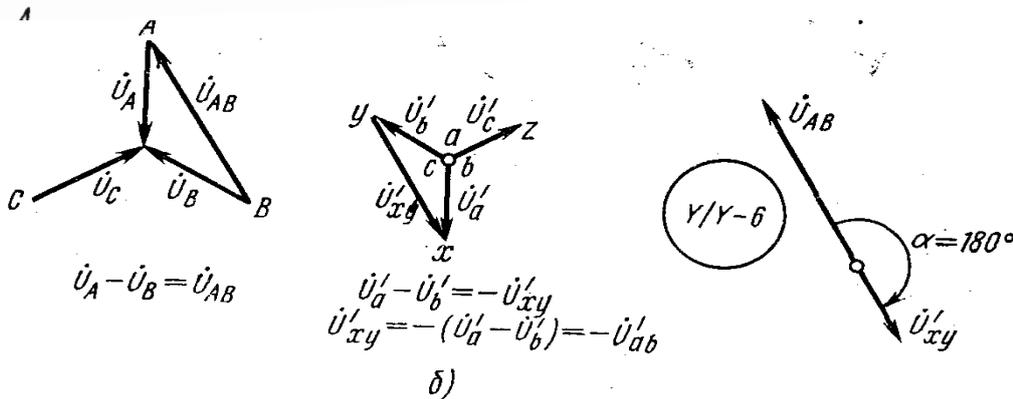
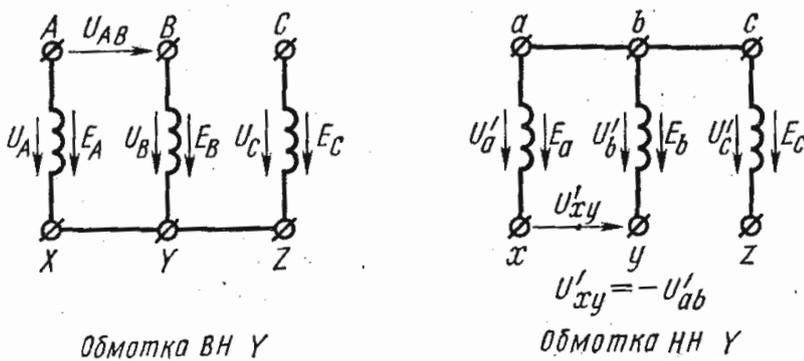
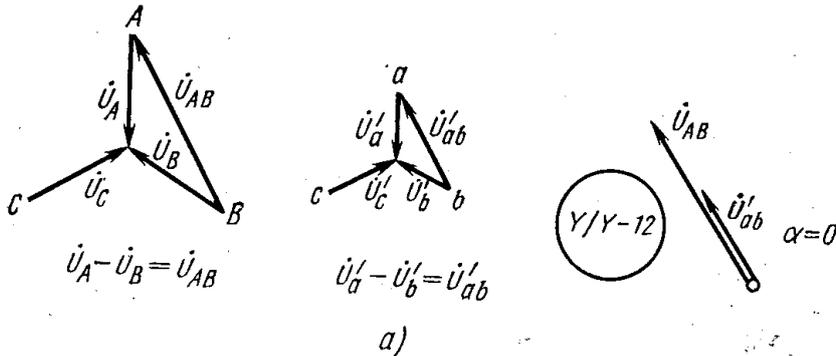
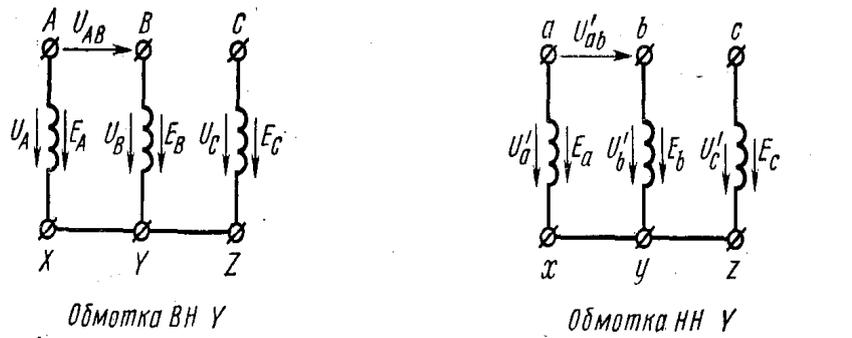


Рис.12.8. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы напряжений трехфазного трансформатора в режиме холостого хода при соединения

обмоток Y/Y-12 (а), Y/Y-6 (б)

На параллельную работу разрешается включать трансформатор одной группы соединения обмоток. В противном случае возникают уравнительные токи, опасные в отношении перегрева обмоток.

Для записи группы соединения пользуются так называемым часовым способом. Поясним принцип часового способа записи на трехфазных трансформаторах. Вектор линейного напряжения обмотки

высшего напряжения совмещают с большой (минутной) стрелкой часов и устанавливают на цифре 12 циферблата.

Вектор линейного напряжения обмотки низшего напряжения мысленно совмещают с малой (часовой) стрелкой часов и устанавливают соответственно положению вектора линейного напряжения обмотки низшего напряжения трансформатора. Отсчет угла свдига фаз α производится по ходу стрелок часов.

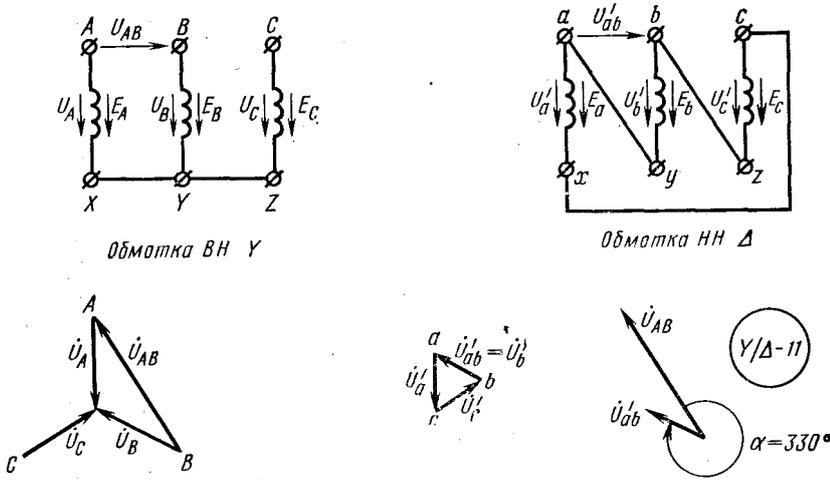


Рис.12.9. Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы напряжений трехфазного трансформатора в режиме холостого хода при соединении обмоток Y/Δ-11

Если векторы линейных напряжений обмоток трансформатора (\dot{U}_{AB} и \dot{U}_{ab}) совпадают по фазе, что соответствует на циферблате часов цифре 12, то это характеризует группу соединения обмоток трансформатора 12, что соответствует обозначению Y/Y-12 (рис. 12.8, а). Соединение обмоток, изображенное на рис. 8,б, дает группу соединения Y / Y-6.

Трехфазные трансформаторы имеют два коэффициента трансформации:

1) фазный коэффициент трансформации, равный отношению числа витков обмотки ВН к числу витков фазы обмотки НН и определяемый по приближенной формуле через отношение фазных напряжений в режиме холостого хода:

$$k_{\phi} = w_{\phi \text{ВН}} / w_{\phi \text{НН}}$$

2) линейный коэффициент трансформации, определяемый приближенно через отношение линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН:

$$k_L \approx \dot{U}_{\text{лВН}} / \dot{U}_{\text{лНН}}$$

Автотрансформаторы

Трансформатор, у которого часть витков w_1 первичной обмотки используется в качестве вторичной обмотки, называют автотрансформатором. Автотрансформаторы применяют в однофазных и трехфазных цепях для понижения и повышения напряжения.

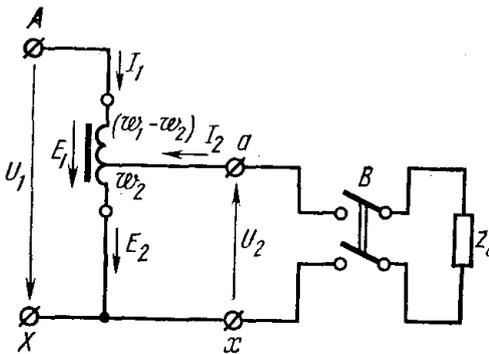
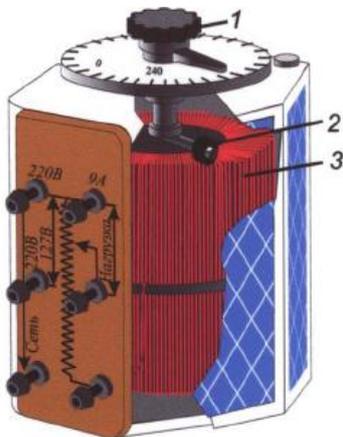


Рис.12.10. Электрическая схема однофазного понижающего автотрансформатора



На рис.12.10 приведена электрическая схема однофазного понижающего автотрансформатора. При рассмотрении принципа действия и вывода основных уравнений автотрансформатора будем пренебрегать полями рассеяния и потерями мощности в автотрансформаторе. Условные положительные направления величин указаны на схеме стрелками.

Напряжение U_1 подведено к зажимам А-Х обмотки, имеющей w_1 витков. Часть этих витков w_2 между зажимами а—х является витками вторичной обмотки. При разомкнутом выключателе В напряжение U_1 создает в витках w_1 ток I_0 . Намагничивающая сила $I_0 w_1$ возбуждает в сердечнике автотрансформатора синусоидальный поток, индуктирующий в витках w_2 синусоидальную э. д. с. E_2 . При $I_2=0$ на выходных зажимах а-х $U_{20} = E_{20}$.

Коэффициент трансформации автотрансформатора

$$k_{AT} = w_1/w_2 = E_1/E_2 \approx U_1/U_2 \quad (12.13)$$

Если включить выключатель В, то под действием э. д. с. E_2 в замкнутом контуре возникнет ток I_2 . Магнитный поток $\Phi(t)$ в сердечнике автотрансформатора создается результирующей намагничивающей силой, которая равна:

$$I_1(w_1 - w_2) + (I_1 + I_2)w_2 = I_0 w_1 \quad (12.14)$$

Из (12.14) получаем, что

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1 \quad (12.15)$$

Разделив обе части (15) на w_1 , получим уравнение токов автотрансформатора:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 / k_{AT} \quad (12.16)$$

У реальных автотрансформаторов $\dot{I}_0 \ll \dot{I}_1$. Тогда, приняв ток \dot{I}_0 равным нулю, получим

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = 0 \quad (12.17)$$

Из (12.17) можно найти приближенное выражение для коэффициента трансформации автотрансформатора через отношение токов:

$$k_{AT} = w_1/w_2 \approx I_2/I_1. \quad (12.18)$$

Из (12.16) k_{AT} видно, что при $I_0 = 0$ чем ближе величина k_{AT} к единице тем меньше ток в витках w_2 . Благодаря этому автотрансформаторы, имеющие коэффициент трансформации в пределах $2 > k_{AT} > 1$, экономически выгоднее обычных трансформаторов с тем же коэффициентом трансформации. Часть обмотки между зажимами а-х можно выполнять из провода меньшего сечения по сравнению с остальной частью обмотки. Потери в обмотке получаются меньше. Кроме того, выполнение части обмотки из провода меньшего сечения сказывается на уменьшении размеров окна, т. е. дает экономию в материале сердечника.

В автотрансформаторе в отличие от обычного трансформатора мощность P_1 передается во вторичную цепь не только через магнитный поток, но и непосредственно в виде электрической мощности за счет имеющейся электрической связи между обмотками.

На практике широко применяются автотрансформаторы типа ЛАТР-лабораторный автотрансформатор, у которого обмотка с одной стороны не имеет изоляции и зажим а выполнен в виде скользящего контакта, перемещающегося по виткам первичной обмотки. Напряжение U_2 можно плавно регулировать в пределах от нуля (самое нижнее положение движка) до величины $U_2 = U_1$, когда движок занимает самое верхнее положение.

Специальные трансформаторы

Измерительные трансформаторы. В электроустановках переменного тока большой мощности и напряжением выше 1000 В непосредственное включение электроизмерительных приборов невозможно, так как номинальные значения напряжения и тока приборов не соответствуют номинальным значениям напряжения и тока электроустановок.

Для расширения пределов измерения приборов и для изоляции их от высокого напряжения применяют измерительные трансформаторы:

трансформатор тока и трансформаторы напряжения

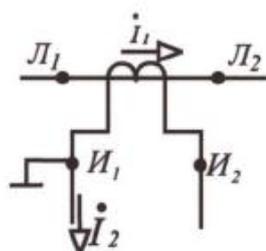
Кроме измерительных приборов к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов подключают обмотки других аппаратов. Мощность измерительных трансформаторов от пяти до нескольких сотен вольт-ампер.

Трансформатор тока используют для расширения пределов измерения амперметров и последовательных обмоток ваттметров, счетчиков энергии и фазометров. Его первичную обмотку включают последовательно в ту цепь, ток в которой надо измерить (рис.12.11). Она обычно состоит из одного или нескольких витков. Выводы первичной обмотки обозначают Л1 и Л2 (первыми буквами слова «линия»).



Трансформаторы тока

Условное обозначение



Ток в первичной обмотке I_1 не зависит от сопротивления приборов, включенных во вторичную обмотку

К зажимам вторичной обмотки подключают амперметр или последовательные обмотки ваттметра, счетчика и фазометра. Чтобы ток во вторичной обмотке был меньше измеряемого первичного тока, число витков вторичной обмотки делают большим. Выводы вторичной обмотки обозначают И1 и И2 (первыми буквами слов «измерительный прибор»). Вторичную обмотку и металлические части кожуха заземляют. Это вызвано требованиями техники безопасности для защиты обслуживающего персонала от возможного поражения током высокого напряжения при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками.

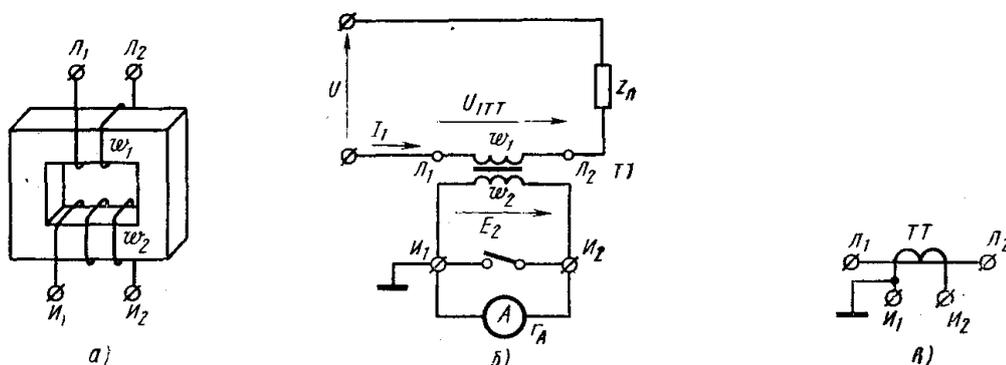


Рис.12.11. Устройства (а) схема включения (б) и условное графическое изображение (в) трансформатора тока

Подключаемые ко вторичной обмотке приборы обычно имеют небольшое сопротивление. Поэтому для трансформатора тока нормальным режимом является режим короткого замыкания, при котором можно считать $I_2 = I_1/kI$ ($kI = w_2/w_1$) При отключении прибора или при его замене вторичная обмотка должна быть обязательно закорочена. Если этого не сделать, то м. д. с.

первичной обмотки $11w_1$ не будет скомпенсирована, магнитный поток и потери в магнитопроводе увеличатся настолько, что трансформатор может сгореть. Кроме того, возросший магнитный поток индуцирует на зажимах вторичной обмотки, имеющей большое число витков, значительную э. д. с. (сотни и даже тысячи вольт).

Стандартные номинальные первичные токи трансформаторов тока от 5 до 15 000 А, номинальный вторичный ток 5 А (у некоторых трансформаторов тока 1 А). Поэтому к вторичной обмотке следует присоединять приборы, номинальный ток которых равен 5 А. При соблюдении этого условия цена деления прибора определяется по номинальному первичному току трансформатора тока.

Некоторые типы лабораторных трансформаторов тока изготавливаются на несколько значений номинальных первичных токов, в том числе и на токи, меньшие 5 А. Это необходимо тогда, когда измеряемые токи настолько малы, что не могут быть измерены прибором, предел измерения которого равен 5 А. В этом случае трансформаторы работают как повышающие, т. е. измеряемый ток увеличивается с их помощью.

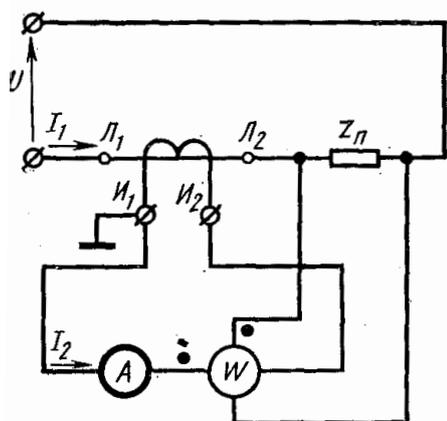


Рис.12.12. Схема включения амперметра и ваттметра с

использованием трансформатора тока

Трансформаторы напряжения применяют в сетях высокого напряжения для измерения напряжения и частоты. К вторичной обмотке подключают вольтметры, частотомеры и параллельные обмотки ваттметров, счетчиков и фазометров, т. е. обмотки, имеющие большое сопротивление. Поэтому для трансформаторов напряжения нормальным режимом является режим холостого хода.

Трансформаторы напряжения конструктивно мало отличаются от обычных силовых трансформаторов. Они имеют небольшую мощность и включаются в сеть так же, как обычные трансформаторы (рис.12.13). Вторичная обмотка заземлена. Коэффициент трансформации выбирают таким, чтобы вторичное напряжение было равно 100 В.

При включении через измерительные трансформаторы измерительных приборов, у которых различаются начала и концы обмоток, нужно следить, чтобы начала обмоток приборов (генераторные зажимы) были присоединены к зажиму и трансформатора тока и зажиму а трансформатора напряжения (рис. 12.14). Тогда направление тока в обмотках приборов будет таким, как при прямом включении приборов, и показание приборов будет правильным.

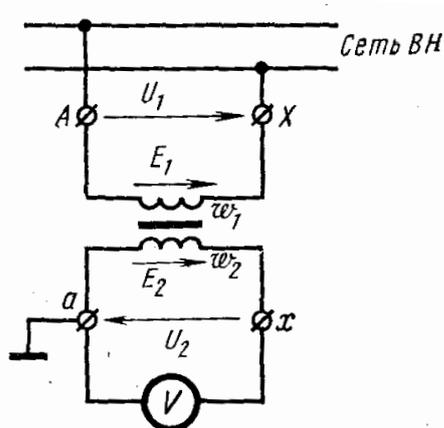


Рис.12.13. Схема включения трансформатора напряжения

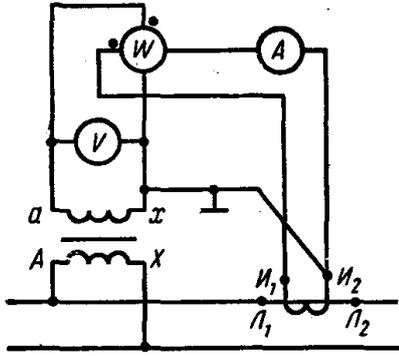


Рис.12.14. Схема включения измерительных приборов через трансформатор

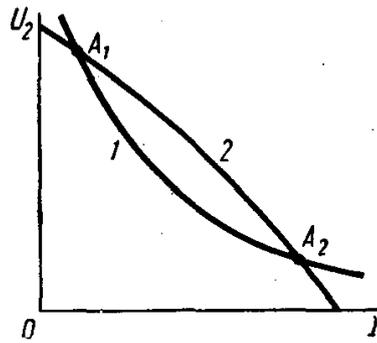


Рис.12.15. Вольт-амперная характеристика электрической дуги (1) и внешняя характеристика сварочного

Сварочные трансформаторы. В конструктивном отношении имеется большое разнообразие сварочных трансформаторов. В значительной степени это определяется видом сварки (дуговая, стыковая, шовная, точечная).

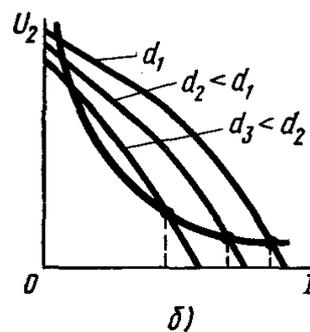
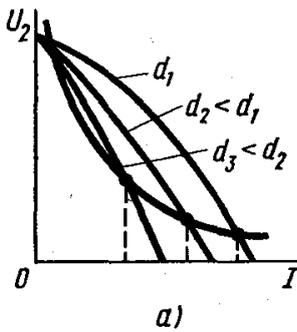
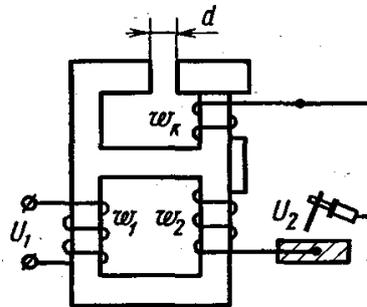
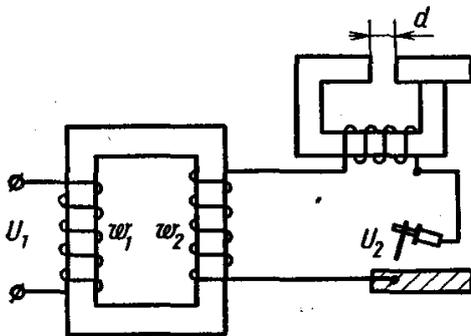


Рис.12.16. Принципиальные схемы сварочных трансформаторов и их внешние характеристики: а- с внешней индуктивностью (реактором); б- с реактивной катушкой на одном сердечнике со вторичной

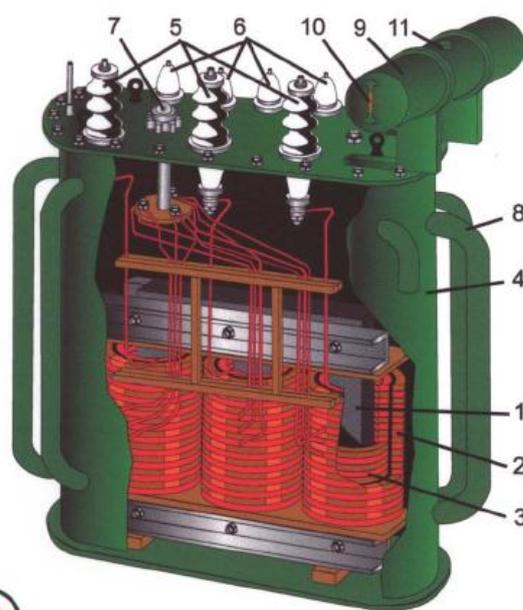
При дуговой сварке вольт-амперная характеристика электрической дуги имеет вид, показанный на рис. 12.15 (кривая .1). Вольт-амперная (или внешняя) характеристика трансформатора, т. е. источника питания дуги, должна иметь точки пересечения с вольт-амперной характеристикой дуги, чтобы ее горение было устойчивым. Следовательно сварочный трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику (кривая 2). Зажигание дуги происходит в точке А1 при напряжении 60-70 В, а устойчивое горение дуги- в точке А2 при напряжении 12—30 В и при большом токе.

Для получения крутопадающей внешней характеристики можно использовать включенную последовательно с вторичной обмоткой индуктивную катушку с большим индуктивным сопротивлением (реактор) или обеспечить большие магнитные потоки рассеяния (большое X_k) в самом трансформаторе.

В качестве примера на рис. 16 показаны принципиальные схемы сварочных трансформаторов, в которых использованы указанные способы получения необходимых внешних характеристик. При изменении воздушного зазора d меняется индуктивное сопротивление реактора или самого трансформатора и соответственно наклон внешней характеристики. Плавное регулирование путем изменения зазора d и регулирование ступенями путем изменения числа витков применяются и в варианте а, и в варианте б.

Для плавного уменьшения напряжения электрической дуги принципе можно использовать и автотрансформаторы. Но так как них первичная и вторичная обмотки электрически связаны, то электросварщик может попасть под полное напряжение сети (220 или 380 В), что недопустимо с точки зрения техники безопасности. Поэтому обычно автотрансформаторы с этой целью не используют.

Трехфазный трансформатор



Силовой трехфазный трансформатор.

- 1 - магнитопровод;
- 2 - обмотка высокого напряжения;
- 3 - обмотка низкого напряжения;
- 4 - стальной бак с трансформаторным маслом;
- 5,6 - изоляторы;
- 7 - переключатель;
- 8 - охлаждающие трубы;
- 9 - расширительный бачок;
- 10 - измеритель уровня масла;
- 11 - заливное отверстие.

Лекция № 13
Электрические машины постоянного тока.

План:

1. Общие сведения.
2. Генератор постоянного тока.
 - 2.1. Принцип действия генератора постоянного тока.
 - 2.2. Конструкция машин постоянного тока
 - 2.3. Классификация и параметры.
3. Электродвижущая сила якоря.
4. Реакция якоря.
5. Коммутация.

Общие сведения

Электрические машины постоянного тока по своему назначению делятся на: электрические генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую при постоянном напряжении; и электрические двигатели (электродвигатели), преобразующие электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

Электротехнической промышленностью выпускаются машины постоянного тока различной мощности, и напряжения. Условно их можно подразделить на следующие группы по мощности:

микромашин, мощность которых измеряется от долей Ватта до 500 Вт;

машин малой мощности 0,5-10 кВт;

машин средней мощности от 10 до нескольких сотен кВт;

машин большой мощности – свыше нескольких сотен кВт.

Напряжение машин постоянного тока изменяется от 6-12 В для используемых на автотранспорте до 30 кВ для используемых в радиотехнических установках.

Большое применение находят машины постоянного тока мощностью до 200 кВт на напряжение 110-440 В с частотой вращения 550-2870 об/мин. Микромашин имеют частоты вращения от нескольких оборотов до 30000 об/мин.

В промышленности на транспорте и в сельском хозяйстве наиболее широко используют электродвигатели. Генераторы применяют для питания устройств связи, радиотехнических установок и т.д. В последние годы в качестве источников постоянного тока все более широко применяют более экономичные и простые в эксплуатации статические полупроводниковые преобразователи.

Принцип действия генератора постоянного тока

Работа генератора основана на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле и пересекающим магнитный поток, индуцируется ЭДС.

Одной из основных частей машины постоянного тока является магнитопровод, по которому замыкается магнитный поток. Магнитная цепь машины постоянного тока (рис.13.1) состоит из неподвижной части – статора 1 и вращающейся части – ротора 4. Статор представляет собой стальной корпус, к которому крепятся другие детали машины, в том числе магнитные полюсы 2. На магнитные полюсы насаживается обмотка возбуждения 3, питаемая постоянным током и создающая основной магнитный поток Φ_0 .

Ротор машины набирают из стальных штампованных листов с пазами по окружности и с отверстиями для вала и вентиляции (рис.13.2).

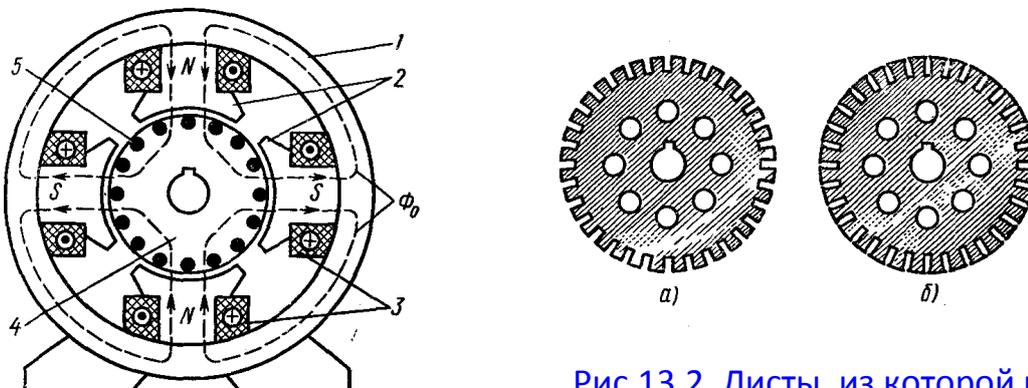
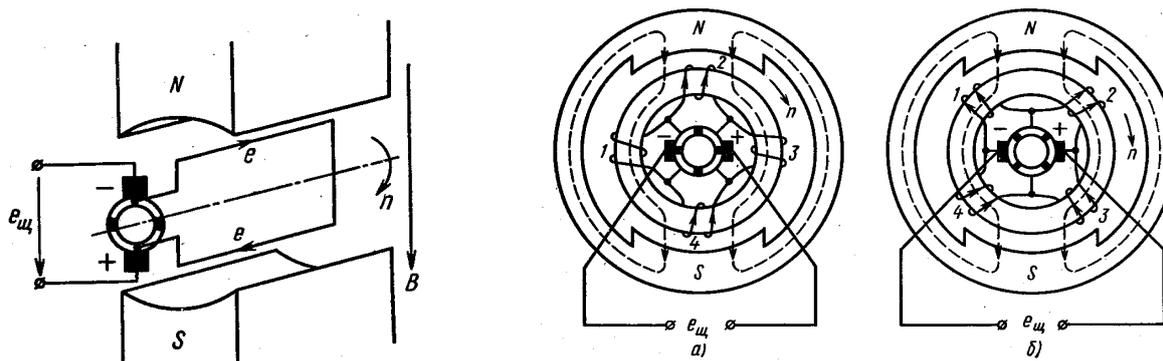


Рис 13.2 Листы, из которой набирают

В пазы 5 (на рис.13.1) ротора закладывается рабочая обмотка машин постоянного тока, т.е. обмотка, в которой основным магнитным потоком индуцируется ЭДС. Эту обмотку называют обмоткой якоря (поэтому ротор машины постоянного тока принято называть якорем). Значение ЭДС генератора постоянного тока может изменяться, но ее полярность остается постоянной. Принцип действия генератора постоянного тока показан на рис.13.3.



Полюсы постоянного магнита создают магнитный поток. Представим, что обмотка якоря состоит из одного витка, концы которого соединены крестовинами полуколец, изолированных друг от друга. Эти полукольца образуют коллектор, который вращается вместе с витком обмотки якоря. По коллектору при этом скользят неподвижные щетки.

Рис.13.3. Простейший ГПТ

Рис.13.3а. Схема простейшего ГПТ с

При вращении витка в магнитном поле в нем индуцируется ЭДС $e = Blv$, где B – магнитная индукция; l – длина проводника; v – его линейная скорость.

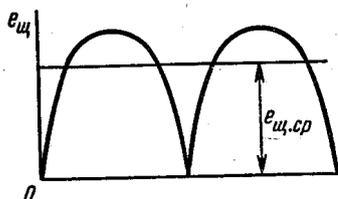


Рис.13.4. Изменение во времени ЭДС простейшего ГПТ

Когда плоскость витка совпадает с плоскостью полюсов (виток расположен вертикально), проводники пересекают максимальный магнитный поток и в них индуцируется максимальное значение ЭДС. Когда виток занимает горизонтальное положение, ЭДС в проводниках равна нулю. Направление ЭДС в проводнике определяется по правилу правой руки (на рис.13.3 оно показано стрелками). Когда при вращении витка проводник переходит по другой полюс, направление ЭДС в нем меняется на обратное.

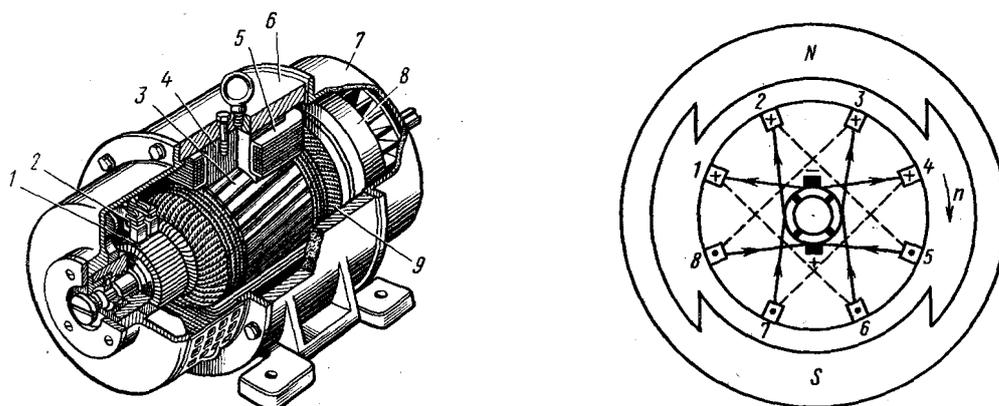
Но так как вместе с витком вращается коллектор, а щетки неподвижные, то с верхней щеткой всегда соединен проводник, находящийся под северным полюсом, ЭДС которого направлена от щетки. В результате полярность щеток остается неизменной, а следовательно, остается неизменной ЭДС на щетках.

Для уменьшения пульсаций обмотку якоря генератора постоянного тока выполняют из большого числа витков (катушка), а коллектор – из большого числа коллекторных пластин, изолированных друг от друга.

Конструкция машин постоянного тока. В процессе технического прогресса в электромашиностроении конструктивный вид машин постоянного тока изменяется, хотя основные детали остаются теми же. Как указывалось, основами машинами являются статор и

якорь. Статор 6 изготовленный в виде стального цилиндра, служит для крепления других деталей, так и для защиты от механических повреждений и является неподвижной частью магнитной цепи. К статору крепятся магнитные полюсы 4, которые могут представлять собой постоянные магниты (у машин малой мощности) или электромагниты. В последнем случае на полюсы насаживается обмотка возбуждения 5. между главными полюсами располагаются добавочные полюсы со своими обмотками. К статору крепятся подшипниковые щиты 7.

Якорь 3 машины постоянного тока набирается из листовой стали (рис.13.2) для уменьшения потерь мощности от вихревых токов. Якорь является подвижной (вращающейся) частью магнитопровода машины. В пазы якоря укладывается обмотка якоря или рабочая обмотка 9. В настоящее время выпускаются машины с якорем и обмоткой барабанного типа. Рассмотренная ранее обмотка кольцевого якоря имеет недостаток, заключающийся в том, что ЭДС индуцируется только в проводниках, расположенных на внешней поверхности якоря. Следовательно, активными являются только половина проводников. В обмотке барабанного якоря все проводники – активные, т.е. для создания той же ЭДС, что и в машине с кольцевым якорем, требуется почти в два раза меньше проводникового материала.



Коллектор 1 состоит из медных изолированных друг от друга пластин, которые соединяют с точками соединения секций обмотки якоря, и служит для преобразования переменной ЭДС в проводниках обмотки якоря в постоянную э.д.с. на щетках генератора 2 или преобразования постоянного тока, проводимого к щеткам двигателя из сети, в переменный ток в проводниках обмотки якоря двигателя. Коллектор вращается вместе с якорем.

При вращении якоря по коллектору скользят неподвижные щетки 2. Щетки бывают графитовые и медно-графитовые. Они крепятся в щеткодержателях, которые допускают поворот на некоторый угол. С якорем соединена крыльчатка 8 для вентиляции.

Классификация и параметры. В основу классификации генераторов постоянного тока положен вид источника питания обмотки возбуждения. Различают:

- 1) генераторы с независимым возбуждением, обмотка возбуждения которых питается от постоянного источника (аккумулятора или другого источника постоянного тока). У генераторов малой мощности (десятки Ватт) основной магнитный поток может создаваться постоянными магнитами;
- 2) генераторы с самовозбуждением, обмотка, обмотка возбуждения питается от самого генератора. По схеме соединения обмоток якоря и возбуждения по отношению к внешней цепи бывают: генераторы параллельного возбуждения, у которых обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря (шунтовые генераторы); генераторы последовательного возбуждения, у которых эти обмотки включены последовательно (сериесные генераторы); генераторы смешанного возбуждения, у которых одна обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, а вторая – последовательно (компаундные генераторы).

Номинальный режим генератора постоянного тока определяется номинальной мощностью – мощностью, отдаваемой генератором приемнику; номинальным напряжением на зажимах обмотки якоря; номинальным током якоря; током возбуждения; номинальной частотой вращения якоря. Эти величины обычно указываются в паспорте генератора.

Электродвижущая сила якоря

Электродвижущая сила обмотки якоря, или э.д.с. якоря представляет собой ЭДС, которая индуцируется в обмотке и измеряется между разнополярными щетками. Следовательно, ЭДС якоря E может быть вычислена как алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС в проводниках обмотки, входящих в одну параллельную ветвь:

$$E = l_1 + l_2 + \dots + l_{N/2a} = \sum_{x=1}^{N/(2a)} ex = IV \sum_{x=1}^{N/(2a)} B_x$$

где N - число проводников в обмотке якоря; a - число пар параллельных ветвей; $N(2a)$ - число проводников, входящих в одну параллельную ветвь; ex - мгновенное значение ЭДС в проводнике x ; B_x - магнитная индукция в той точке окружности якоря, в которой расположен проводник x . При вращении якоря число проводников в параллельной ветви не меняется и при достаточно большом количестве пазов якоря и числе проводников, образующих параллельную ветвь, остаются неизменными в пространстве между полюсами. Это позволяет заменить сумму магнитных индукций B_x произведением единого значения магнитной индукции B_{cp} на число слагаемых:

$$\sum_{x=1}^{N/(2a)} B_x = B_{cp} N / (2a) \quad \text{тогда} \quad \tau = \pi D / (2\rho)$$

где D - диаметр якоря; ρ - число пар полюсов.

Поэтому, воспользовавшись соотношением между линейной скоростью и частотой вращения $V = \pi D n / 60$ получим $V = 2\rho\tau n / 60$, где n - частота вращения, об/мин. Таким образом, ЭДС якоря

$$E = \frac{\rho N}{60a} n B_{cp} \tau \quad \text{где} \quad B_{cp} \tau = \Phi - \text{магнитный поток.}$$

Для конкретной машины значения ρ , N и a являются постоянными. Поэтому коэффициент $C_e = \rho N / (60a) = const$, а ЭДС якоря машины постоянного тока $E = C_e n \Phi$ (1)

В формуле (13.1) магнитный поток выражен в веберах, а ЭДС в вольтах. Итак, для изменения ЭДС якоря генератора необходимо изменить либо магнитный поток путем изменения тока возбуждения, либо частоту вращения двигателя, вращающего якорь генератора.

Реакция якоря

Магнитный поток в машине создается всеми ее обмотками, по которым протекает ток. В режиме холостого хода по обмотке якоря генератора ток не протекает, а по обмотке якоря двигателя протекает ток холостого хода, небольшой по значению. Поэтому в машине существует только основной магнитный поток Φ_0 , создаваемый обмоткой возбуждения полюсов и симметричный относительно их осевой линии (рис.13.5а).

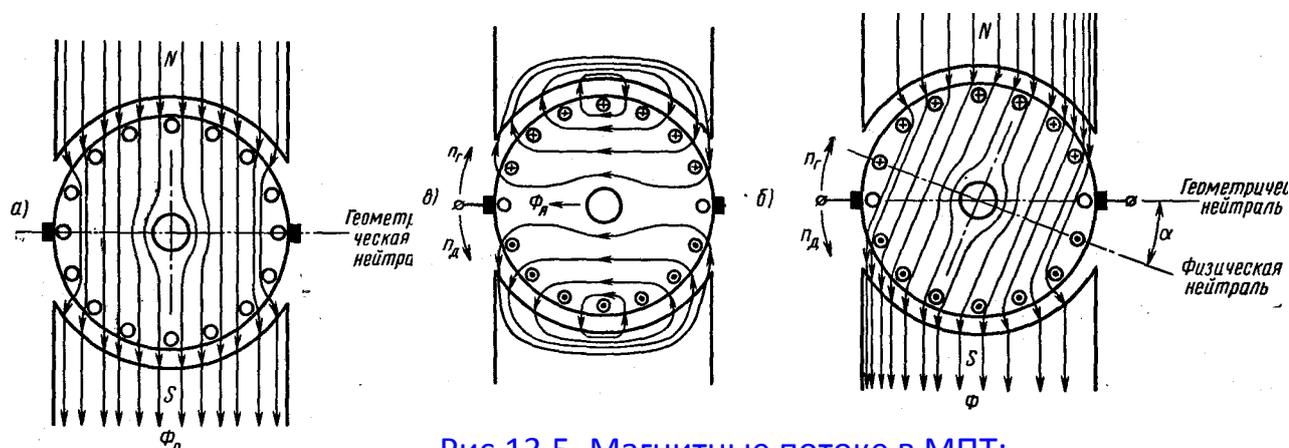


Рис.13.5. Магнитные потоки в МПТ:

а - магнитный поток полюсов; б - магнитный поток обмотки якоря;

На рис.13.5а щетки расположены на геометрической нейтрале. Геометрическая нейтраль перпендикулярно осевой линии полюсов.

Когда к обмотке якоря генератора присоединена нагрузка R_n или когда на вал двигателя действует тормозной момент, по обмотке протекает ток якоря I_a , который создает магнитный поток якоря Φ_a (рис.13.5б). Магнитный поток якоря направлен по линии, на которой расположены щетки. Если щетки расположены на геометрической нейтрали, то поток якоря направлен перпендикулярно основному магнитному потоку и поэтому называется поперечным магнитным потоком.

В генераторе постоянного тока под «сбегающим» краем полюса магнитные потоки складываются, под «набегающим» - вычитаются. У двигателя - наоборот. Таким образом, под одним краем полюса результирующий магнитный поток Φ увеличивается по сравнению с основным магнитным потоком, под другим краем полюса-уменьшается. В результате он становится несимметричным по отношению к осевой линии полюсов (рис.13.5в). Физическая нейтраль – линия, находящаяся через центр якоря и проводники обмотки якоря, в которых индуцируемая результирующим магнитным потоком ЭДС равна нулю, поворачивается на угол α по отношению к геометрической нейтрали (в сторону опережения у генераторов, в сторону отставания - у двигателей). При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В результате реакции якоря магнитная индукция в зазоре машины становится еще более неравномерной. В проводниках якоря, индуцируется большая ЭДС, что приводит к увеличению разности потенциалов между соседними пластинами коллектора и к возникновению искрения на коллекторе, иногда электрическая дуга перекрывает весь коллектор, образуя «круговой огонь». Кроме того, реакция якоря приводит к уменьшению ЭДС якоря, если машина работает в области, близкой к насыщению.

Отрицательное влияние реакции якоря можно уменьшить, сдвигая щетки на физическую нейтраль. При этом поток якоря поворачивается на угол α и встречный поток под набегающим краем полюса генератора уменьшается. Сдвиг щеток осуществляется у генератора по направлению вращения якоря, а у двигателя - против направления вращения якоря. Угол α меняется с изменением тока якоря I_a . На практике щетки обычно устанавливают на угол, соответствующий средней нагрузке.

В машинах средней и большой мощности применяют компенсационную обмотку, расположенную в пазах главных полюсов и включаемую последовательно с обмоткой якоря так, чтобы ее магнитный поток Φ_k был противоположен магнитному потоку Φ_a . Если при этом $\Phi_k = \Phi_a$, то магнитный поток в воздушном зазоре из-за реакции якоря практически не искажается.

Коммутация.

Под коммутацией в машинах постоянного тока понимают явления, вызывающие изменение направления тока в проводниках обмотки якоря при переходе из одной параллельной ветви в другую, т.е. при пересечении линии, по которой расположены щетки (от латыни commutation – изменение). Один из моментов периода коммутации показан на рис.6. Коммутируемый виток оказывается замкнутым коротко коллекторными пластинами и щеткой. Так как за период коммутации происходит изменение направления тока в витке 2-3, то это означает, что по витку протекает переменный ток, создающий переменный магнитный поток. Последний индуцирует в коммутируемом витке ЭДС самоиндукции e_l или реактивную ЭДС. Согласно принципу Ленца, e_l стремится в проводнике ток прежнего направления- следовательно, направление e_l совпадает с направлением тока до коммутации.

Под действием ЭДС самоиндукции в короткозамкнутом витке 2-3 протекает большой дополнительный ток i_o , так как сопротивление контура мало. В месте контакта щетки с левой пластиной ток i_o направлен противоположно току I_a , а в месте контакта щетки с правой пластиной направление этих токов совпадает. Чем ближе к окончанию периода коммутации, тем меньше площадь контакта щетки с правой пластиной и тем больше плотность тока. По окончании периода коммутации контакт щетки с правой пластиной разрывается и образуется электрическая дуга. Для улучшения условий коммутации сдвигают щетки в сторону физической нейтрали.

Лекция № 14
Асинхронные и синхронные машины.

План:

1. Асинхронные машины. Общие сведения.
2. Устройство асинхронных двигателей.
3. Принцип действия асинхронного двигателя.
4. Частота вращения магнитного потока статора и скольжения
5. Синхронные машины.
6. Устройство синхронных машин.

Общие сведения

Асинхронная машина – это бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор вращаются с разными скоростями.

Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели, причем из всех электрических двигателей они являются самыми распространенными. Преимущества АД состоят в простоте устройства, а также в большой надежности и сравнительно низкой стоимости. Широкое применение находит трехфазный асинхронный двигатель, изобретенный в конце XIX века М.О.Доливо-Добровольским. Используют также однофазный асинхронный двигатель. Трехфазные двигатели применяют во всех отраслях народного хозяйства, однофазные – в основном, в схемах автоматики, для привода электроинструмента, бытовых машин, и т.п.

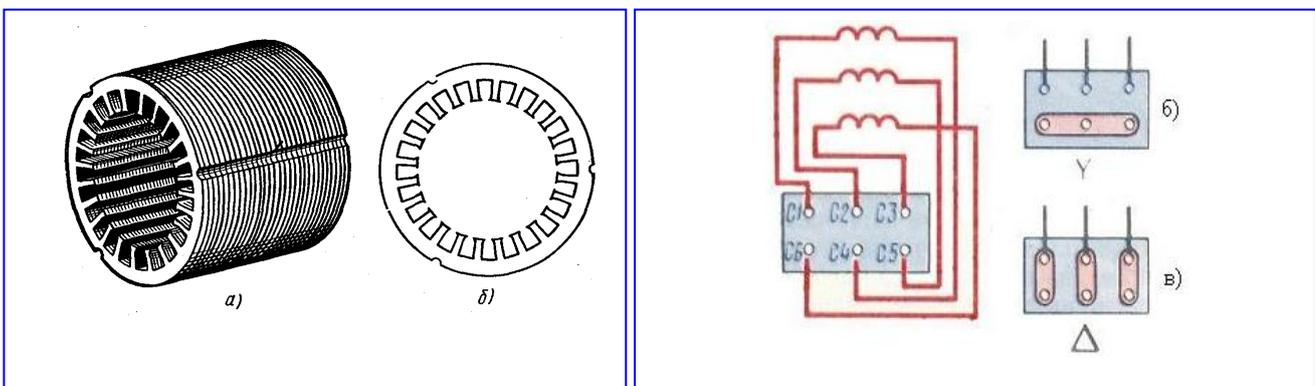
Промышленность выпускает асинхронные двигатели на рабочее напряжение от 127В до 10кВ, мощностью от долей Ватта до нескольких тысяч киловатт. Однофазные асинхронные двигатели имеют мощность, как правило, не превышающую 0,5 кВт. Двигатели максимальной мощности изготавливаются на напряжение 6-10кВ. При частоте 50Гц синхронная частота вращения двигателей различного типа колеблется от 500 до 3000об/мин.

Кроме асинхронных двигателей, преобразующих электрическую энергию переменного тока в механическую энергию, имеются асинхронные машины, выполняющие функции преобразователя частоты, регулятора напряжения и фазорегулятора.

Асинхронные двигатели могут работать в режиме генератора. Но асинхронные генераторы источники как электрической энергии не применяются, так как они не имеют собственного источника возбуждения магнитного потока и могут работать только параллельно с другими (синхронными) генераторами, имеющими лучшие показатели. Асинхронные машины малой мощности используются как генераторы для измерения частоты вращения валов (тахогенераторы).

Устройство асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель состоит из статора – неподвижной части и ротора – вращающейся части. Статор представляет собой полый цилиндр, (рис.14.1,а) набранный из стальных пластин, имеющих вид кольца и изолированных друг от друга. Они образуют неподвижную часть магнитопровода. Выполнение магнитопровода из отдельных пластин уменьшает потери мощности в стали, вызываемые вихревыми потоками. В пазах статора закладывают обмотку статора, которая у трехфазного асинхронного двигателя состоит из трехфазных обмоток, смещенных по окружности цилиндра друг относительно друга на 120°. Начала и концы данных обмоток выводят наружу, они могут быть присоединены к клеммам специального щитка. Выводы обмоток охватываются алюминиевыми хомутиками, на которых обозначены буквы и цифры, принятые для обозначения выводов (рис.14.2).



На щитке двигателя выводы обмоток располагают так, как показано на рис. 14.2. Это позволяет легко и удобно с помощью коротких плоских пластин соединять обмотки статора звездой (рис. 14.2а) или треугольником (рис.14.2 б). На паспортной пластинке, укрепленной на корпусе двигателя, указывают два номинальных линейных напряжения, различающихся в $\sqrt{3}$ раза. Если номинальное напряжение источника питания равно наибольшему напряжению, указанному в паспорте двигателя, то обмотку его статора соединяют звездой, в противном случае – треугольником.

Ротор асинхронного двигателя также набирают из стальных штампованных листов в форме диска (рис.14.2). Насаженные на вал, они образуют ротор, имеющий форму цилиндра. По окружности диска выштамповывают отверстия, образующие пазы ротора, в которые закладывают обмотку. Форма пазов может быть различной. Двигатели большой мощности имеют ротор с вентиляционными отверстиями для охлаждения.

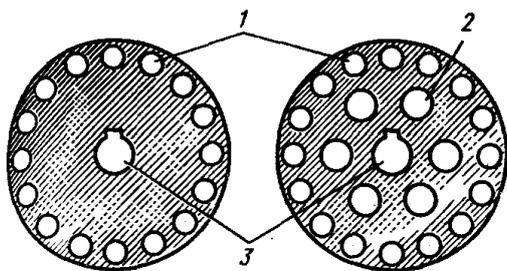


Рис.14.3. Стальные диски, из которых набирается магнитопровод ротора 1-пазы; 2-отверстия для вентиляции; 3-

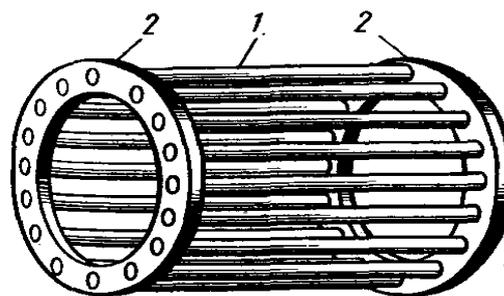


Рис.4.Короткозамкнутая обмотка ротора («беличья клетка»).1-стержни, 2-ротор

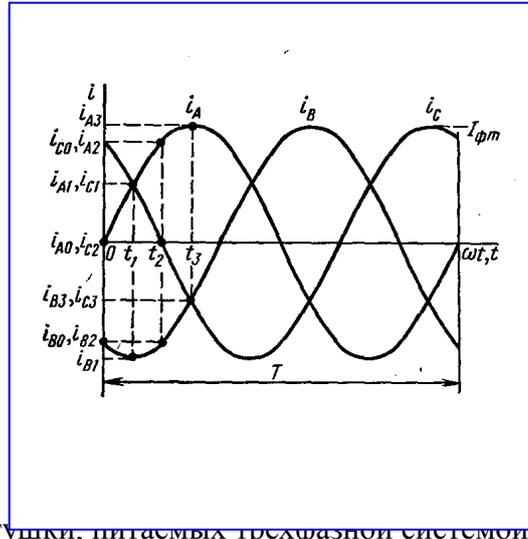
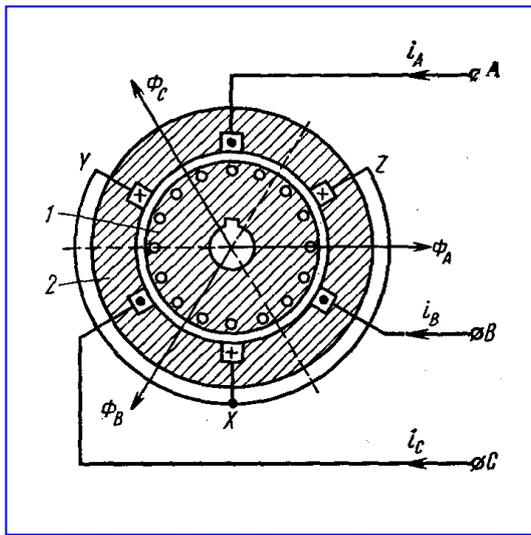
двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Короткозамкнутая обмотка образуется медными или латунными неизолированными стержнями, помещаемыми в пазы ротора. Поперечное сечение этих стержней имеет форму паза. По торцам стержни соединяют медными коротко замыкающими кольцами. Получается обмотка, не имеющая никаких выводов. Такие обмотки могут быть одноклеточными и двух клеточными (рис.14.4). У машин малой мощности (до 100кВт) пазы ротора заливают расплавленным алюминием. При этом сразу отливаются стержни обмотки, коротко замыкающие кольца и вентиляционные лопатки. Обмотку фазного ротора выполняют из изолированных проводников. В пазы ротора, аналогичные пазам статора, укладывают три фазные обмотки, сдвинутые в пространстве на 120°. Таким образом, обмотка ротора получается такой же, как и обмотка статора. Фазные обмотки ротора соединяют звездой, при этом их начала соединяют с контактными кольцами, насаженными на вал и изолированными как от вала, так и друг от друга. Контактные кольца вращаются вместе с валом. По ним скользят неподвижные щетки, которые могут быть замкнуты накоротко или подсоединены к реостатам, соединенным звездой.

Принцип действия асинхронного двигателя

Получение вращающегося магнитного потока. Рассмотрим процесс получения вращающегося магнитного потока в асинхронном двигателе с тремя фазными обмотками статора, соединенными

звездой. От источника питания к обмоткам подводится трехфазная система напряжения, под действием которой по обмоткам протекает трехфазная система токов.

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C &= I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (14.1)$$



е катушки, питаемых трехфазной системой токов будут:

$$\begin{aligned} B_A &= B_m \sin \omega t \\ B_B &= B_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ B_C &= B_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned}$$

В общей части поля эти магнитные индукции складываются векторно, образуя магнитную индукцию результирующего поля. Это поле удобно определить через составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям.

Определим теперь составляющую результирующего поля по оси X. Она будет равна алгебраической сумме проекций на эту ось мгновенных значений трех индукций:

$$B_x = B_A \cos 0^\circ + B_B \cos(-120^\circ) + B_C \cos(-240^\circ) = B_A + B_B(-\frac{1}{2}) + B_C(-\frac{1}{2}).$$

Подставив теперь выражения индукции как синусоидальных величин, получим

$$\begin{aligned} B_x &= B_m \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \right] = \\ &= B_m \left[\sin \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right] = 1.5 B_m \sin \omega t. \end{aligned}$$

Составляющая результирующего магнитного поля по оси Y будет:

$$B_y = B_A \sin 0^\circ + B_B \sin(-120^\circ) + B_C \sin(-240^\circ) = 0 + B_B(-\frac{\sqrt{3}}{2}) + B_C \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Или после подстановки значений индукций как синусоидальных величин

$$B_y = B_m \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \right] = 1.5 B_m \cos \omega t.$$

Результирующая магнитная индукция

$$B_{рез} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 1.5 B_m \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = 1.5 B_m$$

т.е. результирующее поле постоянно по величине, а угол α , образуемый им осью Y определяется из условия

$$tg \alpha = \frac{B_x}{B_y} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = tg \omega t, \text{ следовательно } \alpha = \omega t.$$

Магнитное поле вращается в плоскости осей катушек с угловой скоростью ω . Оно последовательно совпадает по направлению с осью той из катушек, ток в которой достигает максимального значения, т.е. оно вращается в направлении последовательности фаз трехфазной системы токов, питающих обмоток.

Создание вращающего момента. Созданный обмоткой статора вращающийся с частотой $n1$ магнитный поток Φ_1 , замыкаясь через ротор, пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Проводники обмотки ротора (как короткозамкнутого, так и фазного)

образуют замкнутую цепь, и под действием ЭДС по ним протекает ток ротора. Ток ротора создает магнитный поток ротора Φ_2 , направление которой определяется правилом «Буравчика». Этот магнитный поток складывается с магнитным потоком статора Φ_1 и образует суммарный магнитный поток Φ . Суммарный магнитный поток, деформированный относительно проводника ротора, создает силу F , действующую на проводник, направление можно определить по правилу левой руки, под действием которой ротор вращается с некоторой частотой n_2 . Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного потока статора. Но частота вращения n_2 в режиме двигателя меньше n_1 . Если представить, что $n_2 = n_1$ проводники ротора не будут пересекаться вращающимся магнитным потоком, в них не будет индуцироваться ЭДС, по ним не потечет ток, не будет магнитного потока ротора, будет равна нулю.

Частота вращения магнитного потока статора и скольжения

В рассмотренном двигателе трехфазной системой токов статора создавался магнитный поток с одной парой полюсов ($p=1$). Этот магнитный поток за время одного периода T совершил один оборот, т.е. поворачивается на угол, соответствующий одной паре полюсов.

За время одного периода магнитный поток двухполюсного двигателя повернется на половину оборота, так как одна пара полюсов занимает половину окружности статора. В общем случае, когда двигатель имеет p пар полюсов, магнитный поток совершит $1/p$ оборота за период T . В каждую секунду имеем f периодов. Следовательно, магнитный поток совершит f/p оборотов в секунду. В технике принято определять частоту вращательного движения числом оборотов в минуту. Получаем выражение для частоты вращения магнитного потока статора в следующем виде:

$$n_1 = 60f/p \quad (2)$$

Частота вращения магнитного потока зависит от частоты приложенного к обмоткам статора напряжения и числа пар полюсов, создаваемых обмоткой статора. В нормальных условиях эксплуатации электроустановок частота f поддерживается постоянной. Для двигателя число пар полюсов также постоянно. Поэтому частота вращения магнитного потока оказывается постоянной, а так как она определяется частотой напряжения сети, ее называют синхронной частотой вращения.

Большинство асинхронных двигателей работают при промышленной частоте $f=50\text{Гц}=\text{const}$. Поэтому для них существует шкала синхронных частот вращения, определяемых как $n_1=3000/p$.

При p , равном 1,2,3,4,5,6 частота n_1 соответственно равна 3000, 1500, 1000, 750, 600 и 500 об/мин.

Чтобы возникали сила F и вращающий момент, действующий на ротор, частота вращения ротора должна быть $n_2 < n_1$. Степень отставания ротора от вращающегося магнитного потока называется скольжением асинхронного двигателя. Скольжение обозначают S и выражают в относительных единицах или в процентах:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1$$

или

$$s = (n_1 - n_2)100 / n_1 \quad (14.3)$$

Чем больше тормозной момент, создаваемый на валу двигателя, тем меньше частота вращения ротора n_2 и больше скольжение S изменяется с изменением нагрузки и не равна синхронной частоте, двигатель называется асинхронным.

В режиме двигателя скольжения s изменяется от 0 до 1. При пуске двигателя $n_2=0$ и $s=1$. При номинальной нагрузке для современных двигателей $S=0.06-0.08=3-6\%$. В паспорте двигателя указывают номинальную частоту вращения ротора, отличающуюся от синхронной на 3-6%. При этом данным всегда легко определить число пар полюсов двигателя. Например, если $n_2=1450$ об/мин, то $n_1=1500$ об/мин, $S=3,3\%$, а $p=2$.

Как и в трансформаторе, ЭДС обмотки статора асинхронного двигателя является

противодействующей по отношению к напряжению сети U_1^* .

Поскольку частота индуцируемой ЭДС пропорциональна частоте пересечения проводника магнитным потоком (в двигателе это n_1), частота ЭДС статора $f_1 = \rho n_1 / 60 = 60 \rho f / (60 \rho) = f$, т.е. равна частоте напряжения сети.

В проводниках обмотки ротора индуцируется синусоидальная ЭДС, имеющая частоту f_2 . Так как проводники обмотки ротора вращаются с частотой $n_2 < n_1$, то они пересекаются магнитным потоком с частотой $n_s = n_1 - n_2 = s n_1$. Поэтому частота ЭДС ротора, число полюсов которого всегда равно числу полюсов статора,

$$f_2 = \rho n_s / 60 = s \rho n_1 / 60 = s f \quad (14.4).$$

Таким образом, частота ЭДС ротора составляет $S\%$ от частоты напряжения сети и равна ей только при пуске, когда $n_2 = 0$ и $S = 1$. В остальных режимах $f_2 < f$. При номинальной частоте вращения при $S = 0.04$ $f_2 = 0.04 \times 50 = 2$ Гц. При меньших скольжениях частота еще меньше.

Синхронные машины

Синхронная машина - это машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор имеют одинаковую частоту вращения $n = 60f / \rho$.

На современных электростанциях электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами, которые приводятся во вращение паровыми или гидравлическими турбинами. В первом случае синхронные генераторы называются турбогенераторами, во втором - гидрогенераторами; В настоящее время построен турбогенератор мощностью 1200 МВт, который установлен на ГЭС. На автономно работающих электростанциях (удаленные малонаселенные районы, лесоразработки, горные предприятия) синхронные генераторы имеют небольшую мощность и приводятся во вращение дизельными двигателями или газовыми турбинами.

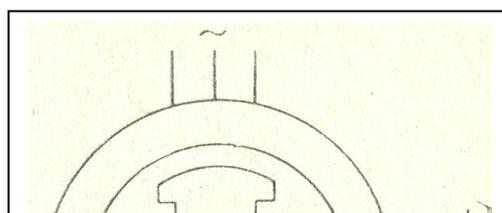
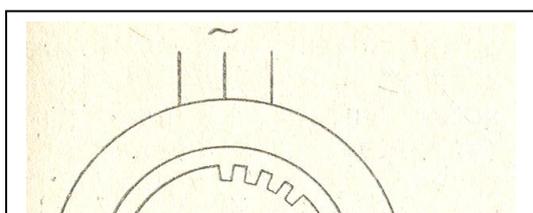
Применяют синхронные машины также в качестве двигателей. Синхронные двигатели имеют постоянную частоту вращения и используются там, где нет необходимости в регулировании частоты или где она должна быть постоянной. Синхронные двигатели имеют большую мощность (50-100 кВт и более) и применяются на металлургических заводах, в шахтах и других предприятиях для приведения в движение насосов, компрессоров, прокатных станов и т. д.

Имеются также специальные синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт, используемые в схемах автоматики, звукозаписи, для вращения ленты самопишущих приборов и в других случаях, требующих строгого постоянства частоты вращения. Синхронная машина, работающая в режиме генератора или двигателя, может служить источником реактивной мощности. Если синхронная машина предназначена для работы в режиме не нагруженного двигателя, то она называется синхронным компенсатором.

Устройство синхронных машин

Статор синхронных машин конструктивно выполняют аналогичным статору асинхронной машины. Его набирают из листовой стали, в пазах статора размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120 эл. град. Обмотку статора соединяют с трехфазной сетью. Ротор синхронных машин конструктивно выполняют либо явно полюсным (с явно выраженными полюсами), либо неявнополюсным (с неявно выраженными полюсами) (рис. 14.6). На роторе располагают обмотку возбуждения, питаемую от источника постоянного тока. Таким образом, ротор синхронной машины имеет свой магнитный поток, который определяет его полярность, в этом заключается принципиальное отличие ротора синхронной машины от ротора асинхронной машины, полярность которого всегда определяется полярностью статора.

Явнополюсный ротор изготавливают из листовой стали. Он имеет большое число полюсов, на которых расположена обмотка возбуждения, и применяется в гидрогенераторах. Это связано с тем, что гидротурбины - тихоходные машины, и чтобы получить стандартную частоту напряжения $f = \rho n / 60$ при малой частоте вращения, надо иметь большое число пар полюсов ρ . Так, например, гидрогенератор имеющий частоту вращения $n = 68.2$ об/мин, число пар полюсов в нем $\rho = 44$. В мощных гидрогенераторах вал ротора расположен вертикально.



Ротор с неявно выраженными полюсами изготавливают из поковки специальной стали с высокими магнитными и механическими свойствами. Обмотку возбуждения закладывают в выфрезерованные пазы, и она создает два полюса ротора ($p = 1$). Пазы занимают около $2/3$ окружности ротора. Такой ротор имеет горизонтально расположенный вал и применяется в турбогенераторах. Частота вращения вала 3000 об/мин.

Синхронные двигатели и компенсаторы строят, как правило, в горизонтальном исполнении. При частоте вращения 3000 об/мин они имеют ротор с неявно выраженными полюсами, а при частоте вращения от 100 до 1000 об/мин – с явно выраженными полюсами.

Для питания обмотки возбуждения в некоторых случаях применяют возбудитель- генератор постоянного тока, устанавливаемый на одном валу с ротором синхронной машины. В этом случае постоянный ток от обмотки якоря возбудителя подается через щетки на кольца на валу ротора, которые соединены с обмоткой возбуждения синхронной машины.

Применяют и другие системы возбуждения. Например, схема питания обмоток возбуждения через выпрямитель, присоединенный к обмотке статора. Обмотка возбуждения синхронной машины потребляет небольшую мощность (0,25-2,5% от номинальной мощности синхронной машины).

Лекция № 15
Полупроводниковые приборы.

План:

1. Полупроводниковые диоды. Общие сведения о диодах
2. Виды диодов. Выпрямительные диоды, импульсные диоды, туннельные диоды, обращенный диод, диоды Шоттки, варикапы, стабилитроны, светодиоды, фотодиод, PIN-диод
3. Транзисторы.
4. Тиристоры.

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.

В полупроводниковых диодах выпрямляющим электрическим переходом может быть электронно-дырочный (p–n) переход, либо контакт «металл– полупроводник», обладающий вентильными свойствами, либо гетеропереход.

В зависимости от типа перехода полупроводниковые диоды имеют следующие структуры (рис. 16.1).

а) с p–n-переходом или гетеропереходом, кроме выпрямляющего перехода, должно быть два омических перехода, через которые соединяются выводы диода; б) с выпрямляющим переходом в виде контакта «металл – полупроводник» всего один омический переход.

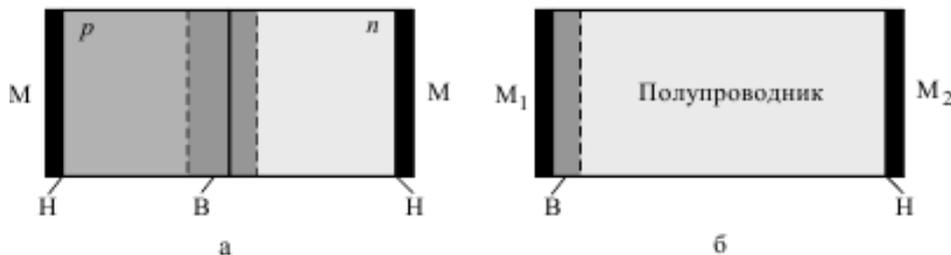


Рис. 16.1. Структуры полупроводниковых диодов: а) с выпрямляющим p–n-переходом; б) с выпрямляющим переходом на контакте «металл– полупроводник»; Н – невыпрямляющий электрический (омический) переход; В – выпрямляющий электрический переход; М – металл.

В большинстве случаев полупроводниковые диоды с p-n-переходами делают несимметричными, т. е. концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой. Поэтому количество неосновных носителей, инжектируемых из сильно легированной (низкоомной) области, называемой эмиттером диода, в слабо легированную (высокоомную) область, называемую базой диода, значительно больше, чем в противоположном направлении.

Классификация диодов производится по различным признакам: по типу полупроводникового материала – кремниевые, германиевые, из арсенида галлия; по назначению – выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы и др.; по технологии изготовления электронно-дырочного перехода – сплавные, диффузионные и др.; по типу электронно-дырочного перехода – точечные и плоскостные. Основными классификационными признаками являются тип электрического перехода и назначение диода.

В зависимости от геометрических размеров p–n-перехода диоды подразделяют на плоскостные и точечные. Плоскостными называют такие диоды, у которых размеры, определяющие площадь p–n-

перехода, значительно больше его ширины. У таких диодов площадь p–n-перехода может составлять от долей квадратного миллиметра до десятков квадратных сантиметров. Плоскостные диоды (рис. 16.2) изготавливают методом сплавления или методом диффузии.

Плоскостные диоды имеют сравнительно большую величину барьерной емкости (до десятков пикофарад), что ограничивает их предельную чистоту до 10 кГц.

Промышленность выпускает плоскостные диоды в широком диапазоне токов (до тысяч ампер) и напряжений (до тысяч вольт), что позволяет их использовать как в установках малой мощности, так и в установках средней и большой мощности.

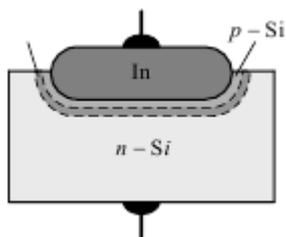


Рис. 16.2. Структура плоскостного диода, изготовленного методом сплавления

Точечные диоды имеют очень малую площадь р–п-перехода, причем линейные размеры ее меньше толщины р–п-перехода. Точечные р–п-переходы (рис. 16.3) образуются в месте контакта монокристалла полупроводника и острия металлической проволочки–пружинки. Для обеспечения более надежного контакта его подвергают формовке, для чего уже через собранный диод пропускают короткие импульсы тока.

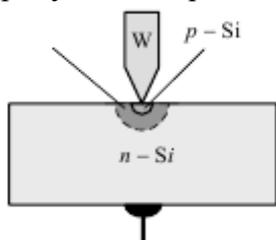


Рис. 16.3. Структура точечного диода

В результате формовки из-за сильного местного нагрева материал острия пружинки расплавляется и диффундирует в кристалл полупроводника, образуя слой иного типа электропроводности, чем полупроводник. Между этим слоем и кристаллом возникает р–п-переход полусферической формы. Благодаря малой площади р–п-перехода барьерная емкость точечных диодов очень незначительна, что позволяет использовать их на высоких и сверхвысоких частотах.

По аналогии с электровакуумными диодами, ту сторону диода, к которой при прямом включении подключается отрицательный полюс источника питания, называют катодом, а противоположную – анодом.

Выпрямительные диоды. Выпрямительный диод – это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный.

Выпрямительные диоды, помимо применения в источниках питания для выпрямления переменного тока в постоянный также используются в цепях управления, коммутации, в ограничительных и развязывающих цепях, в схемах умножения напряжения и преобразователях постоянного напряжения, где не предъявляются высокие требования к частотным и временным параметрам сигналов.

На рис. 16.4 приведена конструкция выпрямительного маломощного диода, изготовленного методом сплавления. В качестве полупроводникового материала использован германий.

Изготовление германиевых выпрямительных диодов начинается с сплавления индия 1 в исходную полупроводниковую пластину (кристалл) германия 2 n-типа. Кристалл 2 припаивается к стальному кристаллодержателю 3. Основой конструкции является коваровый корпус 6, приваренный к кристаллодержателю. Корпус изолирован от внешнего вывода стеклянным проходным изолятором 5. Внутренний вывод 4 имеет специальный изгиб для уменьшения механических напряжений при изменении температуры. Внешняя поверхность стеклянного изолятора покрывается светонепроницаемым лаком для предотвращения попадания света внутрь прибора, для устранения генерации пар «электрон – дырка» и увеличения обратного тока р–п-перехода.

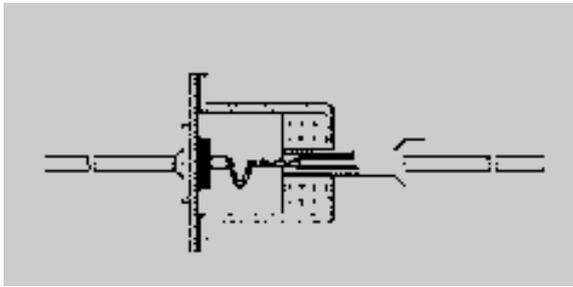


Рис. 16.4. Конструкция маломощного сплавленного диода

Конструкция ряда маломощных кремниевых диодов практически не отличается от конструкции маломощных германиевых диодов. Кристаллы мощных выпрямительных диодов монтируются в массивном корпусе, который имеет стержень с резьбой для крепления диода на радиаторе (рис. 16.5), для отвода выделяющегося при работе прибора тепла.

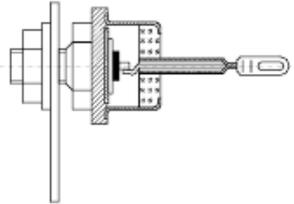


Рис. 2.5. Конструкция мощного кремниевого выпрямительного диода

Для получения р–n-переходов кремниевых выпрямительных диодов вплавляют алюминий в кристалл кремния n-типа или же сплава золота с сурьмой в кремний р-типа. Для получения переходов также используют диффузионные методы.

Выпрямительные диоды должны иметь возможно меньшую величину обратного тока, что определяется концентрацией неосновных носителей или, в конечном счете, степенью очистки исходного полупроводникового материала. Типовая вольт-амперная характеристика выпрямительного диода описывается уравнением (1.16) и имеет вид, изображенный на рис. 16.6.

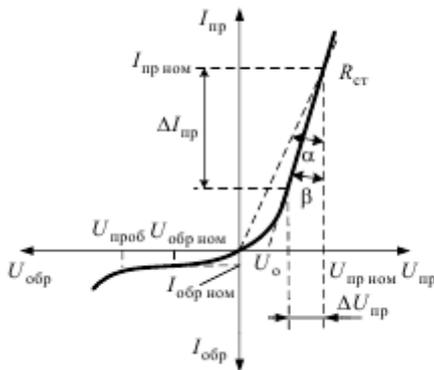


Рис 16.6. Вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

По вольт-амперной характеристике выпрямительного диода можно определить следующие основные параметры, влияющие на его работу:

1. Номинальный прямой ток $I_{пр ср}$ – среднее значение тока, проходящего через открытый диод и обеспечивающего допустимый его нагрев при номинальных условиях охлаждения.
2. Номинальное прямое напряжение $U_{пр ср}$ – среднее значение прямого напряжения на диоде при протекании среднего прямого тока. Этот параметр является очень важным для обеспечения параллельной работы нескольких диодов в одной электрической цепи.
3. Напряжение отсечки U_0 , определяемое точкой пересечения линейного участка прямой ветви вольт-амперной характеристики с осью напряжений.
4. Пробивное напряжение $U_{проб}$ – обратное напряжение на диоде, соответствующее началу участка пробоя на вольт-амперной характеристике, когда она претерпевает излом в сторону резкого увеличения обратного тока.

5. Номинальное обратное напряжение $U_{обр\ ном}$ – рабочее обратное напряжение на диоде; его значение для отечественных приборов составляет $0,5U_{обр\ ном}$. Этот параметр используется для обеспечения последовательного включения нескольких диодов в одну электрическую цепь.
6. Номинальное значение обратного тока $I_{обр\ ном}$ – величина обратного тока диода при приложении к нему номинального обратного напряжения.
7. Статическое сопротивление диода:

$$R_{стат} = \frac{\Delta U_{уп}}{\Delta I_{уп}} = \text{tg}\beta,$$

где $I_{пр}$ – величина прямого тока диода; $U_{пр}$ – падение напряжения на диоде при протекании тока $I_{пр}$.

Статическое сопротивление диода представляет собой его сопротивление постоянному току.

Для защиты силовых диодов от выхода из строя из-за большой скорости нарастания тока можно последовательно с диодом включить небольшой дроссель L (рис. 16.7).

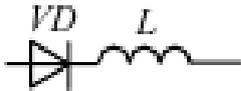


Рис. 16.7.

Для защиты силовых диодов шунтируют защитной RC -цепочкой (рис. 2.8), причём ёмкость C выбирают больше величины собственной ёмкости р–n-перехода.

Тогда импульс обратного тока будет проходить в основном по защитной цепочке, не принося вреда самому диоду.

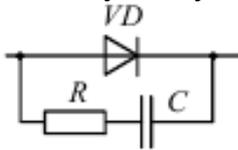


Рис. 16.8. Способ уменьшения скорости нарастания обратного напряжения

Импульсные диоды. Импульсный диод – это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Импульсные режимы – это такие режимы, когда диоды переключаются с прямого напряжения на обратное через короткие промежутки времени, порядка долей микросекунды, при этом важную роль играют здесь переходные процессы. Основное назначение импульсных диодов – работа в качестве коммутирующих элементов. Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции, т.е. относительно большим прямым токам. Вследствие этого свойства и параметры импульсных диодов определяются переходными процессами.

Одной из первых была разработана конструкция точечного импульсного диода (рис. 16.9).

Точечный диод состоит из кристалла германия, припаянного к кристаллодержателю, контактного электрода в виде тонкой проволоки и стеклянного баллона. Особенностью точечных диодов является большое сопротивление базы, что приводит к увеличению прямого напряжения на диоде. В связи с недостатками точечных диодов они практически полностью вытеснены импульсными диодами, производство которых основано на современных производительных и контролируемых методах формирования р–n-переходов (планарной технологии, эпитаксиального наращивания). Основным исходным полупроводниковым материалом при этом служит кремний, а иногда арсенид галлия.

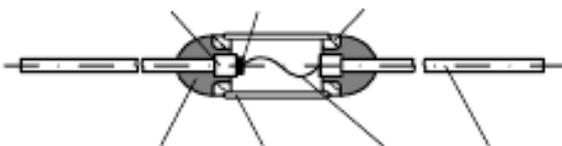


Рис. 16.9. Конструкция импульсного диода:

- 1) кристалл полупроводника; 2) кристаллодержатель; 3) припой; 4) контактная пружина; 5) стеклянный корпус; 6) коваровая трубка;
- 7) внешние выводы

Для ускорения переходных процессов в кремниевых импульсных диодах и для уменьшения значения времени восстановления обратного сопротивления этих диодов в исходный кремний вводят примесь золота. Эта примесь обеспечивает появление в запрещенной зоне кремния энергетических уровней рекомбинационных ловушек и уменьшение времени жизни неосновных носителей.

В настоящее время большинство конструкций имеет металлокерамический, металлостеклянный или металлический корпус с ленточными выводами.

Рассмотрим процесс переключения такого диода при воздействии на него прямоугольного импульса (рис. 16.10).

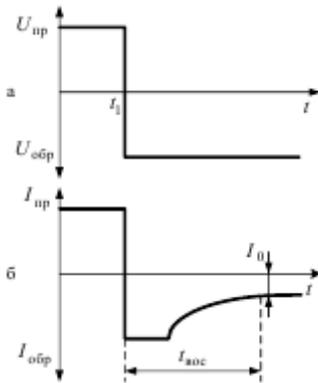


Рис. 16.10. Переходные процессы в импульсном диоде

При прямом напряжении на участке $(0 \rightarrow t_1)$ происходит инжекция носителей из эмиттерной области в базовую и их накопление там. При смене полярности напряжения на обратную в первый момент величина обратного тока будет значительна, а обратное сопротивление диода резко уменьшится, так как накопленные в базе неосновные носители под действием изменившегося направления напряженности электрического поля начнут двигаться в сторону р–n-перехода, образуя импульс обратного тока. По мере перехода их в эмиттерную область, их количество уменьшится и через некоторое время обратный ток достигнет нормального установившегося значения, а сопротивление диода в обратном направлении восстановится до нормальной величины.

Процесс уменьшения накопленного заряда в базе называется рассасыванием, а время, в течение которого обратный ток изменяется от максимального значения до установившегося, называется временем восстановления $t_{вос}$. Время восстановления – один из важнейших параметров импульсных диодов.

Чем оно меньше, тем диод лучше. Для улучшения свойств импульсных диодов исходный полупроводник выбирают с малым временем жизни носителей заряда (для более интенсивного процесса рекомбинации в базе), а сам р–n-переход делают с малой площадью, чтобы снизить величину барьерной емкости перехода $C_{бар}$.

Туннельные диоды. Туннельный диод – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Для изготовления туннельных диодов используют полупроводниковый материал с очень высокой концентрацией примесей ($10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$), вследствие чего получается малая толщина р–n-перехода (около $10\text{--}2 \text{ мкм}$), что на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах, и сквозь тонкий потенциальный барьер возможно туннелирование свободных носителей заряда.

На рис. 16.11 представлена вольт-амперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.

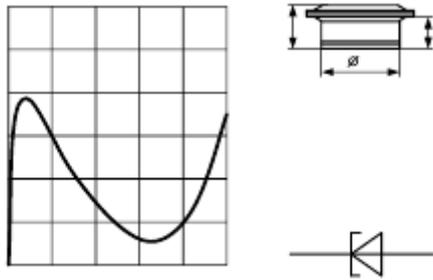


Рис. 16.11. Туннельный диод 1И104: а) вольт-амперная характеристика при прямом смещении; б) конструктивное исполнение; в) условное графическое изображение туннельных диодов. Обращенный диод. Обращенный диод – это разновидность туннельного диода, у которого концентрация примесей подобрана таким образом, что в уравновешенном состоянии при отсутствии внешнего напряжения потолок валентной зоны материала р-типа совпадает с дном зоны проводимости материала п-типа (рис. 16.12).

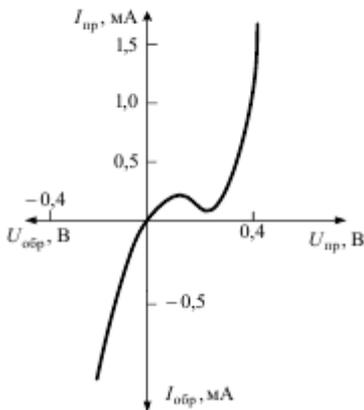


Рис. 16.12. Зонная энергетическая диаграмма обращенного диода

В этом случае туннельный эффект будет иметь место только при малых значениях обратного напряжения и вольт-амперная характеристика такого прибора будет аналогична обратной ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода (рис. 16.12). Поэтому обратные токи в обращенных диодах оказываются довольно большими при очень малых обратных напряжениях (десятки милливольт). При прямом напряжении на р–п-переходе прямой ток связан с диффузией носителей через понизившийся потенциальный барьер и вольт-амперная характеристика его аналогична прямой ветви вольт-амперной характеристики обыкновенного диода. Поэтому прямой ток образуется только в результате инжекции носителей заряда через потенциальный барьер р–п-перехода, но при прямых напряжениях в несколько десятых долей вольта. При меньших напряжениях прямые токи в обращенных диодах меньше обратных.

Таким образом, этот диод оказывает малое сопротивление току, проходящему в обратном направлении и сравнительно высокое прямому току. Поэтому используются они тогда, когда необходимо выпрямлять очень слабые электрические сигналы величиной в малые доли вольта. Диоды Шоттки. Потенциальный барьер, полученный на основе контакта «металл–полупроводник», часто называют барьером Шоттки, а диоды, использующие такой потенциальный барьер, – диодами Шоттки.

Как уже было рассмотрено выше, в контакте «металл – полупроводник» не происходит накопления неосновных носителей в базе из-за отсутствия инжекции неосновных носителей, вследствие чего значительно уменьшается время восстановления, что в сочетании с малой величиной барьерной емкости создает идеальные условия для использования таких диодов в импульсных и высокочастотных устройствах.

Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния Si или арсенида галлия GaAs, реже на основе германия Ge. Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода. В первую очередь важна величина контактной разности потенциалов, образующейся на границе контакта. Чаще всего используются металлы Ag, Au, Pt, Pd, W, которые наносятся на полупроводник и дают величину потенциального барьера 0,2...0,9 эВ.

Диоды Шоттки на электрических принципиальных схемах изображают условным обозначением (рис. 16.13), которое используется только тогда, когда необходимо сделать акцент на том, что в схеме используется именно диод Шоттки.

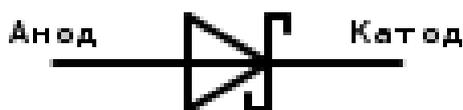


Рис. 16.13. Условное обозначение диода Шоттки по ГОСТ 2.730-73

Варикапы. Варикап ([англ.](#) vari(able) — переменный и [cap\(acity\)](#) — ёмкость) — [полупроводниковый диод](#), работа которого основана на зависимости барьерной ёмкости [p-n перехода](#) от обратного [напряжения](#). Таким образом, варикап можно рассматривать как конденсатор, ёмкость которого можно регулировать при помощи электрического сигнала. Максимальное значение ёмкости варикап имеет при нулевом обратном напряжении. При увеличении обратного напряжения ёмкость варикапа уменьшается. На рис. 16.14 показана зависимость ёмкости варикапа КВ126А-5 от приложенного напряжения.

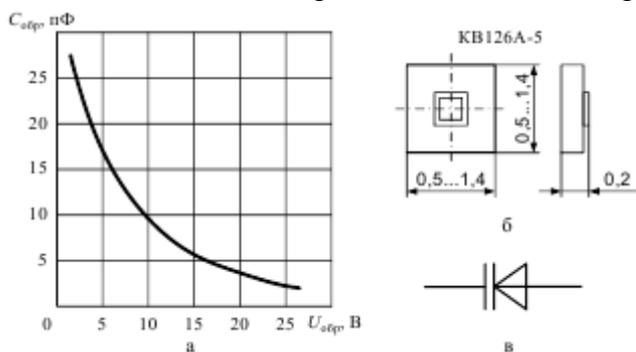


Рис. 16.14. Варикап КВ126А-5: а) вольт-амперная характеристика; б) конструкция; в) условное графическое изображение варикапов.

Варикапы применяются в качестве элементов с электрически управляемой ёмкостью в схемах перестройки частоты [колебательного контура](#), деления и умножения частоты, [частотной модуляции](#), управляемых фазовращателей и др.

Стабилитроны. Стабилитронами называют полупроводниковые диоды, использующие особенность обратной ветви вольт-амперной характеристики на участке пробоя изменяться в широком диапазоне изменения токов при сравнительно небольшом отклонении напряжения. Это свойство широко используется при создании специальных устройств — стабилизаторов напряжения.

Стабилитрон ([диод](#) Зенера)— [полупроводниковый диод](#), предназначенный для стабилизации [напряжения](#) в [источниках питания](#). По сравнению с обычными диодами имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя (при обратном включении) и может поддерживать это напряжение на постоянном уровне при значительном изменении силы обратного тока. Материалы, используемые для создания [p-n перехода](#) стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. Поэтому, при относительно небольших обратных напряжениях в переходе возникает сильное [электрическое поле](#), вызывающее его [электрический пробой](#), в данном случае являющийся обратимым (если не наступает [тепловой пробой](#) вследствие слишком большой силы тока).



Напряжение пробоя стабилитрона зависит от ширины р–п-перехода, которая определяется удельным сопротивлением материала полупроводника. Поэтому существует определенная зависимость пробивного напряжения (т.е. напряжения стабилизации) от концентрации примесей.

Низковольтные стабилитроны выполняют на

основе сильно легированного кремния. Ширина р–п-перехода в этом случае получается очень маленькой, а напряженность электрического поля потенциального барьера – очень большой, что создает условия для возникновения туннельного пробоя. При большой ширине р–п-перехода пробой носит лавинный характер.

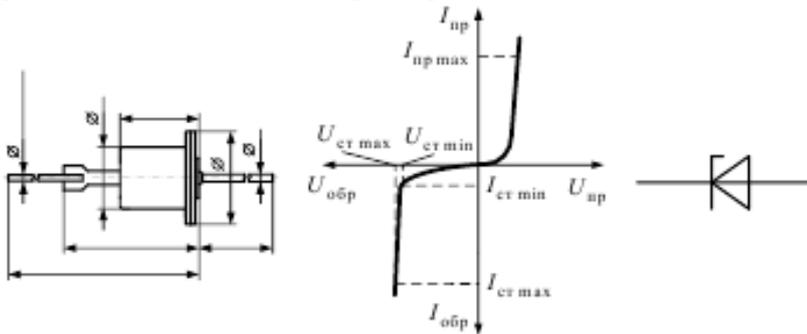


Рис. 16.15. Конструкция корпуса (а), вольт-амперная характеристика (б) и условное графическое обозначение стабилитрона (в)

Вольт-амперная характеристика стабилитрона представлена на рис. 16.15. Рабочий ток стабилитрона (его обратный ток) не должен превышать максимально допустимое значение $I_{ст\ max}$ во избежание перегрева полупроводниковой структуры и выхода его из строя.

Существенной особенностью стабилитрона является зависимость его напряжения стабилизации от температуры. В сильно легированных полупроводниках вероятность туннельного пробоя с увеличением температуры возрастает. Поэтому напряжение стабилизации у таких стабилитронов при нагревании уменьшается, т.е. они имеют отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации.

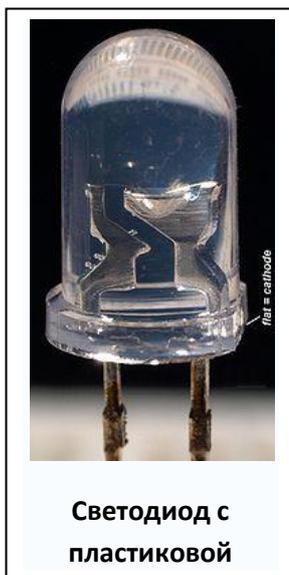
Светодиоды. Светодиод или светоизлучающий **диод** (СД, LED [англ.](#) Light-emitting diode) — [полупроводниковый прибор](#), излучающий [некогерентный](#) свет при пропускании через него

электрического тока. Излучаемый свет лежит в узком диапазоне спектра, его цветовые характеристики зависят от химического состава использованного в нем [полупроводника](#). Считается, что первый светодиод, излучающий свет в [видимом диапазоне спектра](#), был изготовлен в [1962 году](#) в [Университете Иллинойса](#) группой, которой руководил [Ник Холоньяк](#).

Как и в любом [полупроводниковом диоде](#), в светодиоде имеется [р-п переход](#). При пропускании электрического тока в прямом направлении, носители заряда - [электроны](#) и [дырки](#) - рекомбинируют с излучением [фотонов](#) (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

Не всякие полупроводниковые материалы эффективно испускают свет при рекомбинации. Лучшие излучатели относятся к [прямозонным полупроводникам](#) (т. е. таким, в которых разрешены прямые оптические переходы зона-зона), типа [АШВУ](#) (например, [GaAs](#) или [InP](#)) и [АШВУ](#) (например, [ZnSe](#) или [CdTe](#)). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от [ультрафиолета](#)

([GaN](#)) до среднего инфракрасного диапазона ([PbS](#)). Диоды, сделанные из [непрямозонных полупроводников](#) (например, [кремния](#), [германия](#) или [карбида кремния](#)), свет практически не излучают. Впрочем, в связи с



развитием кремниевой технологии, активно ведутся работы по созданию светодиодов на основе кремния. В последнее время большие надежды связываются с технологией квантовых точек и фотонных кристаллов.

Фотодиод-приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область [свет](#) в электрический [заряд](#) за счёт процессов в р-п-переходе. Фотодиод, работа которого основана на [фотовольтаическом эффекте](#) (разделение электронов и дырок в р- и п- области, за счёт чего образуется заряд ([ЭДС](#))) называется солнечным элементом. Кроме р-п фотодиодов существуют и р-і-п фотодиоды, в которых между слоями р- и п- находится слой изолятора і. р-п и р-і-п фотодиоды только преобразуют свет в электрический ток, но не усиливают его, в отличие от лавинных фотодиодов и [фототранзисторов](#).

РІП-диод- разновидность [диола](#), в котором между областями электронной (п) и дырочной (р) проводимости находится собственный (нелегированный, англ. intrinsic) [полупроводник](#) (і-область). р и п области как правило [легируются](#) сильно, так как они часто используются для [омического контакта](#) к металлу.



Широкая нелегированная і-область делает ріп-диод плохим выпрямителем (обычное применение для диода), но с другой стороны это позволяет использовать его в [аттенюаторах](#) (ослабителях сигнала), быстрых переключателях, [фотодетекторах](#), а также в высоковольтной электронике.

Как правило предназначен для работы в сантиметровом диапазоне волн ([СВЧ](#)).

Характерные качества ріп-диода проявляются при работе в режиме сильной [инжекции](#), когда і-область заполняется носителями заряда из сильнолегированных п+ и р+ областей, к которым прикладывается прямое смещение напряжения. ріп-диод функционально можно сравнить с ведром воды с отверстием сбоку- как только ведро наполняется до уровня отверстия- оно начинает протекать. Точно так же и диод начинает пропускать ток, как только заполнится носителями заряда і-область. Из-за того, что в і-области очень низкая концентрация носителей заряда, там практически отсутствуют процессы рекомбинации во время инжекции. Но в режиме прямого смещения концентрация носителей заряда на несколько порядков превышает собственную концентрацию.

Транзисторы

Транзистор (от [англ.](#) Transfer- переносить и resistance- сопротивление)- [электронный](#) прибор из [полупроводникового](#) материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналам управлять током в электрической цепи. Обычно используется для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов.

Управление током в выходной цепи осуществляется за счёт изменения входного напряжения или тока. Небольшое изменение входных величин может приводить к существенно большему изменению выходного напряжения и тока. Это усилительное свойство транзисторов используется в аналоговой технике (аналоговые ТВ, радио, связь и т. п.).

В настоящее время в аналоговой технике доминируют [биполярные транзисторы](#) (БТ)

(международный термин- ВЈТ, bipolar junction transistor). Другой важнейшей отраслью

электроники является [цифровая техника](#) ([логика](#), [память](#), [процессоры](#), [компьютеры](#), [цифровая](#)

[связь](#) и т.п.), где, напротив, биполярные транзисторы почти полностью вытеснены [полевыми](#)

Вся современная цифровая техника построена, в основном, на полевых [МОП](#) (металл-оксид-полупроводник)-транзисторах (МОПТ), как более экономичных, по сравнению с БТ, элементах.

Иногда их называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)- транзисторы. Международный

термин- MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor). Транзисторы изготавливаются в

рамках интегральной технологии на одном кремниевом кристалле (чипе) и составляют

элементарный «кирпичик» для построения микросхем логики, памяти, процессора и т.п. Размеры

современных МОПТ составляют от 90 до 32 [нм](#). На одном современном чипе (обычно размером

1—2 см²) размещаются несколько (пока единицы) миллиардов МОПТ. На протяжении 60 лет

происходит уменьшение размеров (миниатюризация) МОПТ и увеличение их количества на одном

чипе (степень интеграции), в ближайшие годы ожидается дальнейшее увеличение степени

интеграции транзисторов на чипе (см. [Закон Мура](#)). Уменьшение размеров МОПТ приводит также

к повышению быстродействия процессоров.

Тиристоры

Тиристор-полупроводниковый прибор, выполненный на основе монокристалла полупроводника с четырёхслойной структурой p-n-p-n-типа, обладающий в прямом направлении двумя устойчивыми состояниями- состоянием низкой проводимости (тиристор заперт) и состоянием высокой проводимости (тиристор открыт). В обратном направлении тиристор обладает только запирающими свойствами. Т.е тиристор- это управляемый диод. Тиристоры подразделяются на тринисторы, динисторы и симисторы. Перевод тиристора из закрытого состояния в открытое в электрической цепи осуществляется внешним воздействием на прибор: либо воздействием напряжением (током), либо светом (фото тиристор). Тиристор имеет нелинейную разрывную вольтамперную характеристику (ВАХ). Прибор без управляющих электродов называется диодным тиристором (или динистором). Прибор с одним управляющим электродом называют триодным тиристором или тринистором (или просто тиристором)



Вопросы

1. Расскажите об основных методах изготовления полупроводниковых диодов.
2. Какие полупроводниковые диоды называются варикапами? Назовите основные параметры варикапов.
3. Дайте определение диоду Шоттки. Выведите уравнение идеализированной электродной характеристики диода Шоттки.
4. Расскажите об особенностях работы обращенных и лавинно-пролетных диодов.

Лекция 16
Выпрямители

План:

1. Выпрямители с неуправляемыми вентилями
2. Однополупериодная схема выпрямления
3. Трехфазная однопериодная схема выпрямления

1. Выпрямители с неуправляемыми вентилями

Устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный ток, называется выпрямителем.

Необходимость выпрямления тока на практике возникает: в электроприводе постоянного тока, системах возбуждения машин, химической промышленности, системах управления и регулирования, электротяге, при передаче электроэнергии постоянным током на дальние расстояния и т.д.

Для преобразования переменного тока в постоянный ток применяются вентильные установки, состоящие из компонент:

электрических вентилях (диоды, тиристоры);

силового согласующего трансформатора, с помощью которого получают необходимое число фаз и величину выпрямленного напряжения;

сглаживающих фильтров, уменьшающих амплитуды высших гармоник выпрямленного тока.

Работа преобразовательных установок сопровождается сложными электромагнитными процессами, характер которых зависит от многих параметров системы, содержащей нелинейные элементы (вентили) и магнитные связи.

Каждый установившийся режим работы по существу представляет собой непрерывно повторяющиеся переходные процессы, возникающие при включении (зажигании) и выключении (гашении) вентилях, осуществляющих коммутацию тока в преобразовательной установке.

2. Однополупериодная схема выпрямления

Рассмотрим простейшую схему выпрямления тока.

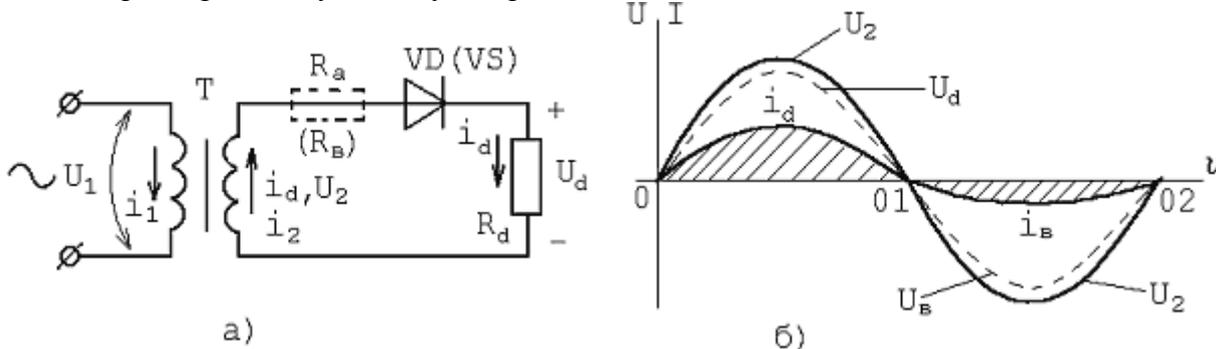


Рис.1. Однополупериодная схема выпрямления (а) и кривые токов и напряжений (б)

В промежутке времени (0-01) к вентилю VD подводится положительное напряжение и через вентиль протекает ток прямого направления. Этот промежуток называется проводящим

полупериодом, а ток i_d - прямым током (рис.1).

В промежутке (01-02) разность потенциалов между анодом и катодом вентиля отрицательна, и

через вентиль протекает незначительный ток i_e . Промежуток (01-02) называется непроводящим

полупериодом, а ток i_e - обратным током.

Обозначим через R_a сопротивление вентиля в проводящем полупериоде, а через R_e - сопротивление вентиля в непроводящем полупериоде. В промежутке (0-01) напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = i_d R_a + i_d R_b,$$

где

$$i_d R_a = \Delta U_a$$

- падение напряжения в вентиле;

$$i_d R_d = U_d$$

- выпрямленное напряжение на зажимах приемника энергии.

В промежутке (01-02) напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = i_e R_e + i_e R_d = U_e + i_e R_d,$$

где U_e - обратное напряжение на вентиле.

Для большинства типов вентиля обратный ток i_e и падение напряжения ΔU_d незначительны и ими пренебрегают, тогда в проводящем полупериоде

$$U_2 = i_d R_d = U_d,$$

а в непроводящем полупериоде

$$U_2 = U_e.$$

В любой вентильной схеме выпрямленный ток i_d имеет пульсирующий характер и наряду с постоянной составляющей I_d содержит переменную составляющую \tilde{i}_d . Переменная составляющая \tilde{i}_d представляет сумму высших гармоник выпрямленного тока. Аналогично, выпрямленное напряжение U_d содержит постоянную E_d и переменную \tilde{U}_d составляющие.

Для схемы рис.1 примем следующие обозначения:

$$U_1, U_2, i_1, i_2$$

– мгновенные значения напряжений и токов первичных и вторичных обмоток трансформатора.

Мгновенное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \sqrt{2} E_2 \sin \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin \nu \quad (1)$$

где E_1 и E_2 – действующие значения напряжений первичной и вторичной обмоток

трансформатора, I_1 и I_2 – действующие значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Кривые выпрямленного тока и напряжения представляют собой полусинусоиды (рис.2), поэтому схема называется однополупериодной.

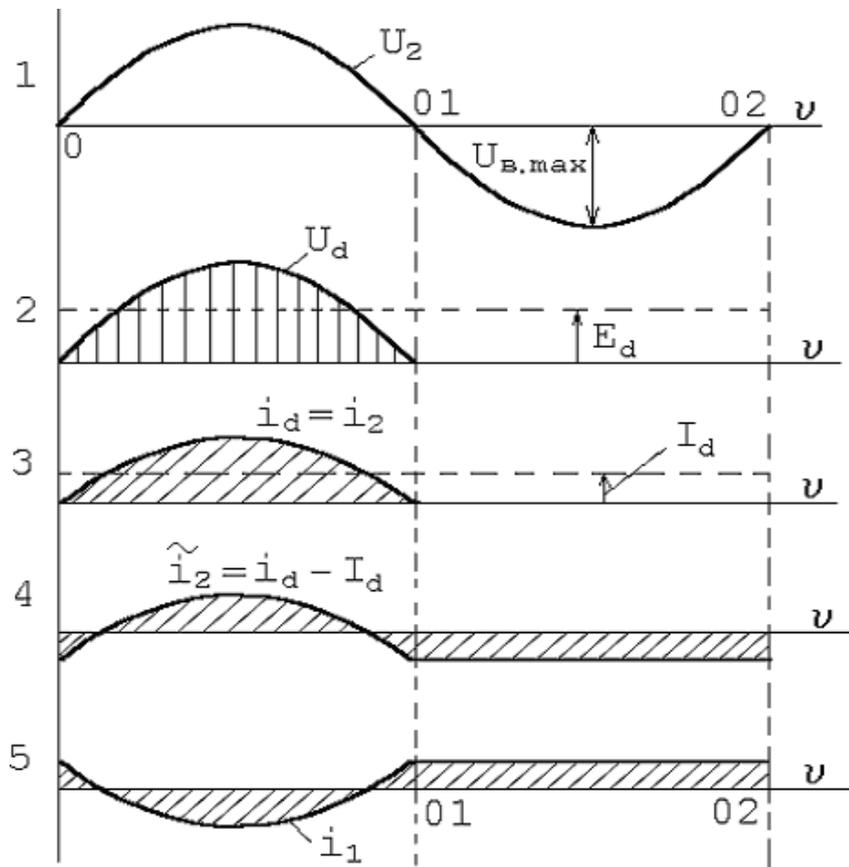


Рис.2. Кривые токов и напряжений в схеме рис.1

Мгновенное значение выпрямленного тока

$$i_d = i_2 = \frac{U_d}{R_d} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} \sin \nu \quad (2)$$

В первом полупериоде

$$U_d = U_2 = \sqrt{2}E_2 \sin \nu \quad (3)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_2^2(\nu) d\nu} = \frac{\pi}{2} I_d ;$$

$$i_1 = -\frac{\tilde{i}_2}{K_{12}} = \frac{1}{K_{12}} (I_d - i_2) ;$$

$$i_2 = I_d + \sum_K B_K \cos K\nu ;$$

$$S_1 = S_2 = E_1 I_1 = 2.69 E_d I_d .$$

Замечание. При работе выпрямителя на нагрузку $R-L$ и в режиме непрерывного тока при работе на якорную цепь двигателя действительно предложенное выражение для средневывпрямленного напряжения: Средневывпрямленное напряжение преобразователя E_d или постоянная составляющая выпрямленного напряжения – это отношение интеграла по кривой выпрямленного напряжения к периоду повторяемости.

$$E_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}E_2 \sin \nu d\nu = \frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi} [-\cos \pi - (-\cos 0)] = \frac{\sqrt{2}E_2}{\pi} \quad (4)$$

откуда

$$E_2 = 2.22 E_d = \frac{\pi}{\sqrt{2}} E_d \quad (5)$$

Так как обычно напряжение сетевое E_1 задано, коэффициент трансформации

$$K_{12} = K_T = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{W_1}{W_2}$$

Постоянная составляющая выпрямленного, или анодного, тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d} \quad (6)$$

Амплитуда тока через вентиль

$$I_{d \max} = \frac{\sqrt{2}E_2}{R_d} = \pi I_d \quad (7)$$

Амплитуда обратного напряжения

$$U_{e \max} = \sqrt{2}E_2 = \pi E_d \quad (8)$$

По полученным значениям

$$I_d, I_{d \max}, U_{e \max}$$

из каталога выбираем соответствующий вентиль с его эксплуатационными параметрами, заданными заводом-изготовителем (фирмой).

Сумма первичных и вторичных рабочих намагничивающих сил трансформатора в рассматриваемой схеме отличается от нуля, т.е. имеем магнитно-неуравновешенную систему. Постоянные намагничивающие силы создают постоянный магнитный поток, который может вызвать значительное насыщение магнитной системы, т.е. увеличение тока холостого хода, действующего значения первичного тока и, соответственно, расчетной мощности. Во избежание этого нежелательного явления магнитную систему трансформатора рассчитывают с учетом постоянной составляющей потока.

Увеличенная расчетная мощность трансформатора и наличие значительных высших гармоник в выпрямленном токе ограничивают широкое распространение рассматриваемой вентильной схемы [1,2,3,4].

Двухполупериодные схемы выпрямления однофазного тока

Вентильные схемы с нулевым выводом характеризуются тем, что токи во вторичных обмотках имеют одно направление и поэтому содержат постоянную и переменную составляющие. В зависимости от наличия броневой или стержневой магнитной системы для полной компенсации намагничивающих сил трансформатора обмотки следует располагать по-разному. В дальнейшем будем рассматривать однофазную двухполупериодную однокатную схему, представленную на рис.3,а, при этом подразумевается, что в схемах рис.3,а и рис.3,б электромагнитные процессы протекают одинаково, т.е. обе схемы магнитно уравновешены.

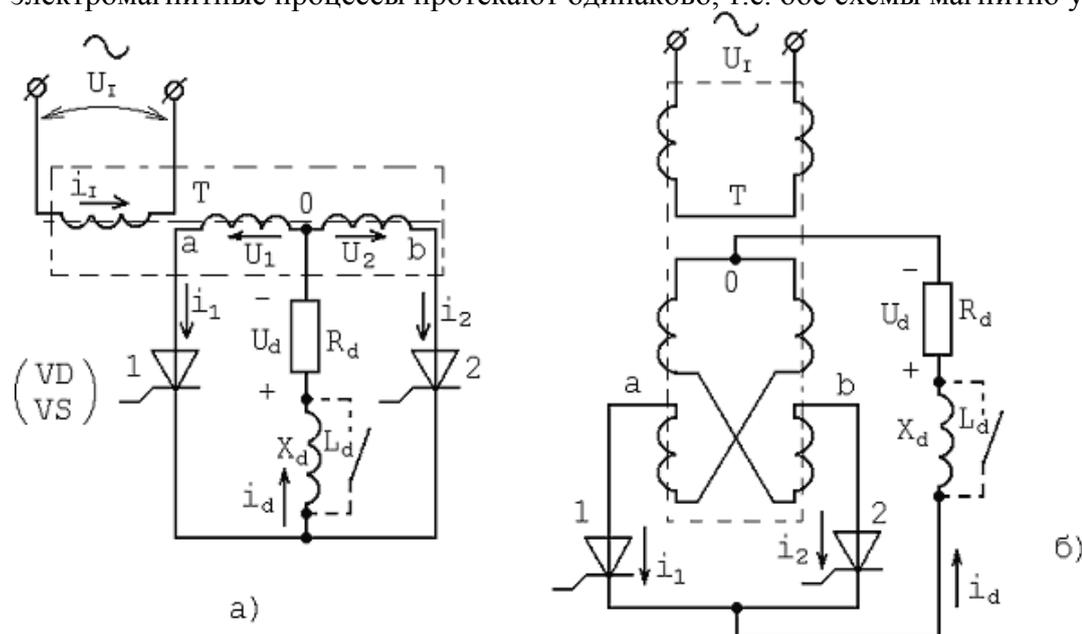


Рис.3. Двухполупериодная однокатная вентильная схема: а – с броневой магнитной системой; б – со стержневой магнитной системой

Вторичная обмотка трансформатора имеет секции $0a$ и $0b$ с напряжениями U_1 и U_2 , сдвинутыми по фазе на 180° .

Для напряжений секций $0a$ и $0b$ трансформатора имеем

$$U_1 = -U_2 = \sqrt{2}E_2 \sin \nu,$$

где E_2 – действующее значение напряжения одной секции вторичной обмотки трансформатора. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$E_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}E_2 \sin \nu d\nu = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 (-\cos \pi - (-\cos 0)) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0.9E_2 \quad (9)$$

Действующие значения напряжения через коэффициент схемы

$$E_2 = 1.11E_{d1}; \quad E_I = K_{12} \times 1.11E_d; \quad K_{12} = \frac{E_I}{E_2} \quad (10)$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d},$$

а постоянная составляющая тока через один вентиль

$$I_a = 0.5I_d \quad (11)$$

Амплитуда тока вентиля

$$I_{a\max} = I_{d\max} = \frac{\sqrt{2}E_d}{R_d} = \frac{\pi}{2} I_d = \pi I_a \quad (12)$$

Когда вентиль 1 закрыт, на его катод с помощью токопроводящего вентиля 2 подается напряжение U_2 .

Поэтому обратное напряжение на вентиле

$$U_e = U_1 - (U_2) = 2U_1,$$

$$U_2 = -U_1,$$

а его амплитуда

$$U_{e\max} = 2\sqrt{2}E_2 \quad (13)$$

Мгновенное значение первичного тока

$$i_I = \frac{1}{K_{12}} (i_1 - i_2).$$

Так как ток i_1 меняется синусоидально, его действующее значение

$$I_I = \frac{1.11}{K_{12}} I_d \quad (14)$$

Мощность трансформатора

$$S_1 = E_I I_1 = 1.23E_d I_d = S_2 \quad (15)$$

Параметры трансформатора и вентиля несколько изменяются при работе выпрямителя на нагрузку $R_d - L_d$, когда $X_d \rightarrow \infty$.

Действующее значение тока вторичной обмотки

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{2}}.$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки

$$U_2 = \frac{\pi}{4} U_d \quad (16)$$

тогда мощность трансформатора

$$S_2 = S_1 = 2U_2 I_2 = 1.1 U_d I_d \quad (17)$$

Амплитуда анодного тока вентиля $I_{a.\max} = I_d$.

Остальные параметры вентиляей такие же, как и при $X_d = 0$.

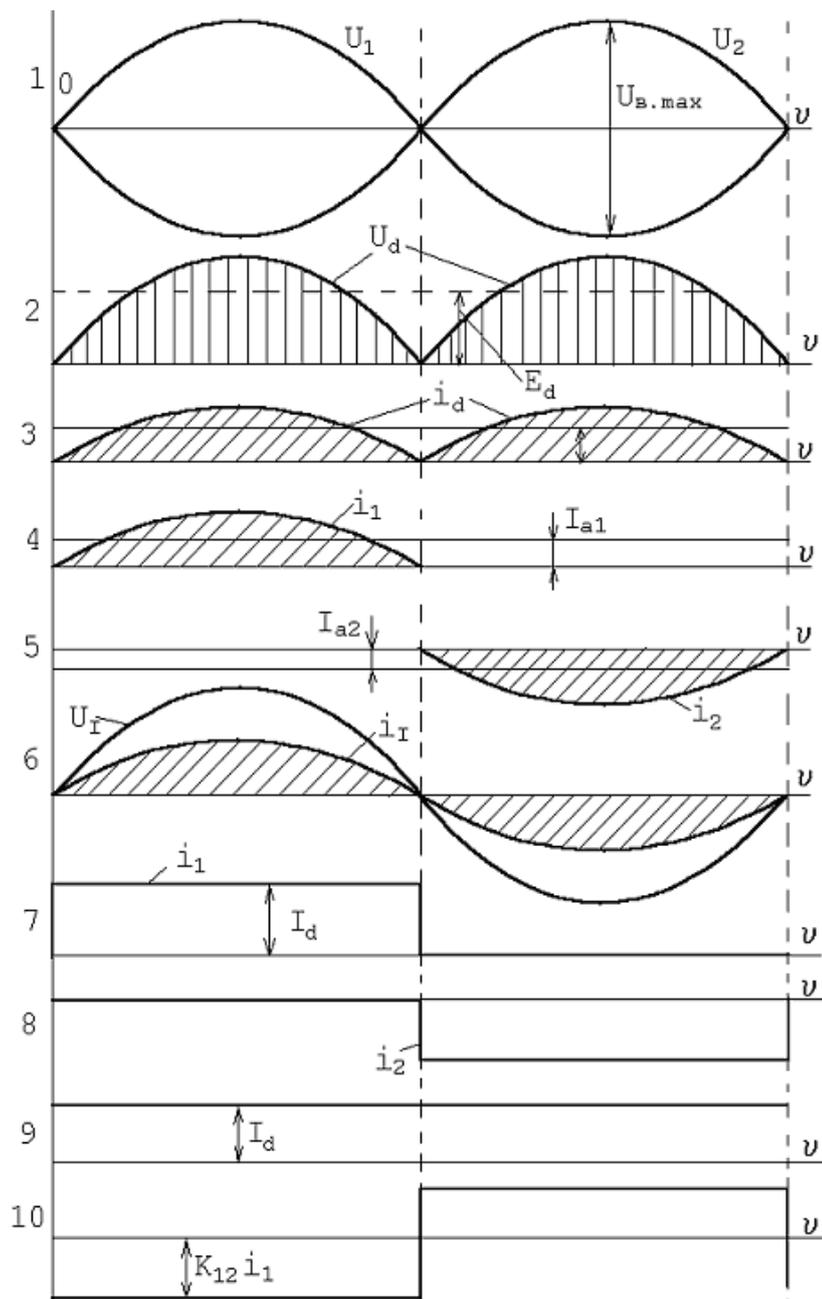


Рис.4. Кривые токов и напряжений двухполупериодной однофазной вентильной схемы: $X_d = 0$ -

кривые токов и напряжений приведены на осях 2,3,4,5,6; $X_d \rightarrow \infty$ - 7,8,9,10

3. Работа однофазной мостовой схемы выпрямления

Пусть имеем неуправляемую мостовую двухтактную схему рис.1.

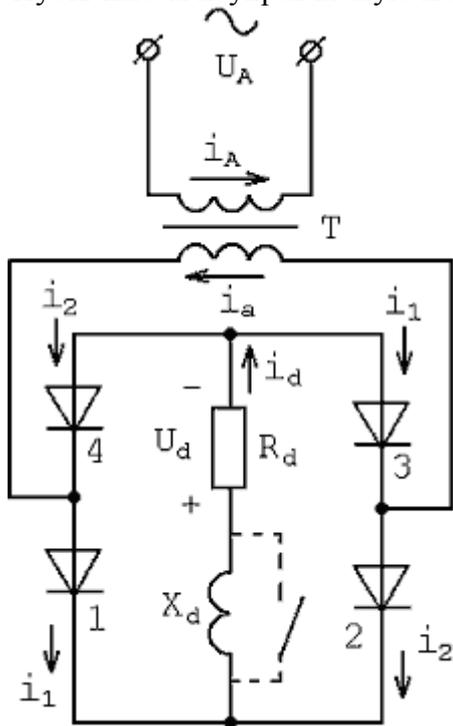


Рис.1. Двухполупериодная мостовая схема

Как видно из рис.1 вентили включаются так, что в первом полупериоде ток i_1 протекает через вентили 1 и 3, а во втором полупериоде ток i_2 протекает через вентили 2 и 4. Форма кривых выпрямленного, фазных и анодных токов зависит от индуктивного сопротивления X_d . Кривые токов и напряжений при $X_d = 0$ приведены на осях 2,3,4,5 и 6 рис.2. Аналогично рассмотренной ранее одноконтурной схеме имеем

$$E_d = 0.9E_2, \quad I_d = \frac{E_d}{R_d}.$$

Амплитуда обратного напряжения

$$U_e = \sqrt{2}E_2.$$

Ток вторичной обмотки трансформатора равен

$$i_2 = i_1 - i_d.$$

Поэтому действующие значения токов обеих обмоток равны:

$$I_2 = 1.11I_d, \quad I_1 = \frac{1.11}{K_{12}} I_d.$$

Мощность первичной и вторичной обмоток, а также типовая мощность трансформатора

$$S_1 = S_2 = 1.23I_d E_d.$$

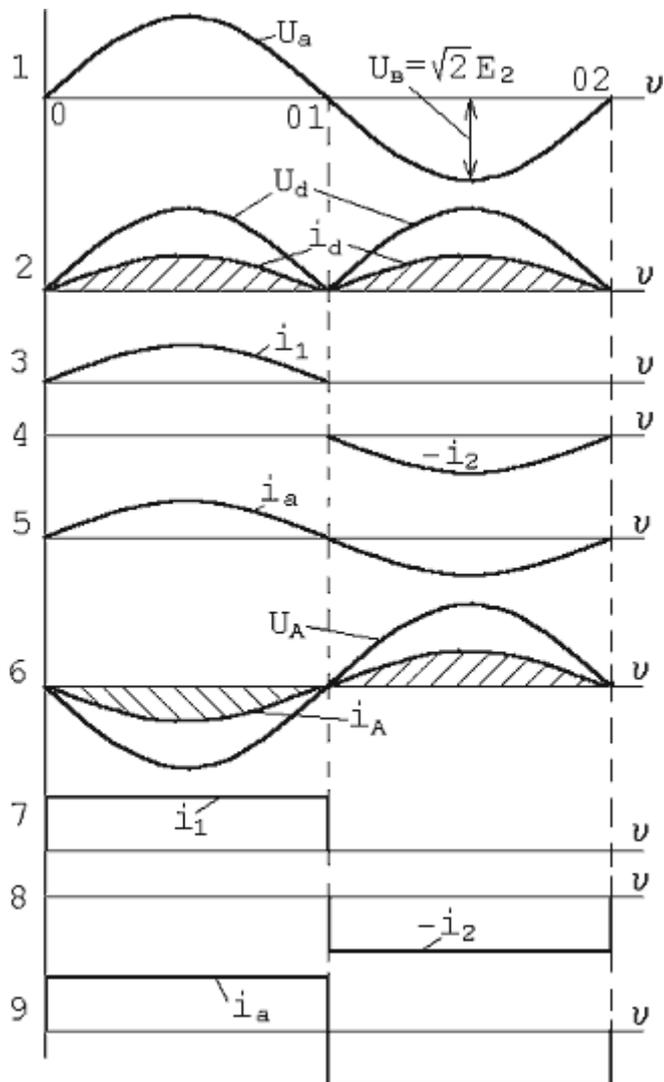


Рис.2. Кривые токов и напряжений двухтактной схемы

Так как кривые анодных токов представляют полусинусоиды, они содержат постоянные составляющие, первые гармоники и гармоники с четными порядковыми номерами

$$i_1 = I_{a1} + i_1' + i_2' + i_4' + i_6' + \dots$$

Кривые токов при

$$X_d \rightarrow \infty$$

приведены на осях 7, 8 и 9 рис.2.

Действующие значения токов первичной и вторичной обмоток при

$$X_d \rightarrow \infty$$

$$I_2 = K_{12} I_1 = I_d$$

Мощность трансформатора

$$S_1 = S_2 = S = 1.11 P_d = 1.11 E_d I_d$$

Амплитуда анодного тока вентиля

$$I_{a, \text{max}} = I_d$$

3. Трехфазная однотактная схема выпрямления

Схема (рис.1) состоит из трансформатора, трех вентилях и приемника энергии R_d . Для уменьшения высших гармоник выпрямленного тока последовательно с сопротивлением R_d включен реактор с индуктивным сопротивлением $X_d (L_d)$ [1,2].

Обычно первичную обмотку трансформатора соединяют треугольником, а вторичную – звездой или первичную – звездой, а вторичную – зигзагом (Δ/Z).

Пусть трансформатор соединен по схеме Δ/Δ .

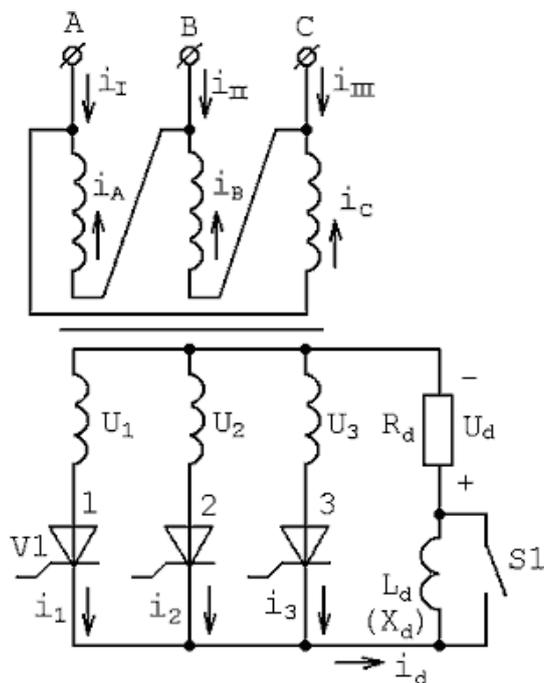


Рис. 1. Трехфазная однотактная вентильная схема

В промежутке (0-01) наибольшее положительное значение, как это показано на рис. 2, имеет напряжение первой фазы u_1 , поэтому ток протекает только через вентиль 1 ($V1$), а остальные вентили заперты. Начиная с момента 01 и правее $u_2 > u_1$, анод вентиля 2 оказывается под положительным напряжением относительно катода. Если в момент 01 на вентиль 2 поступает отпирающий импульс, он включается, а анодное напряжение вентиля 1 ($u_{a1} = u_1 - u_2 < 0$), и этот вентиль выключается (рис.2).

Замечание. Если по какой-нибудь причине вентиль 2 не включится, то вентиль 1 выключится не в точке 01, а позже. Следовательно, причиной выключения вентиля 1 в точке 01 является включение очередного вентиля 2.

В промежутке (01-02) ток пропускает вентиль 2. В точке 02 включается вентиль 3 и выключается вентиль 2 и т.д. Каждый вентиль пропускает ток в течение периода, равного $1200\left(\frac{2\pi}{3}\right)$, поэтому число пульсаций выпрямленного напряжения равно трем.

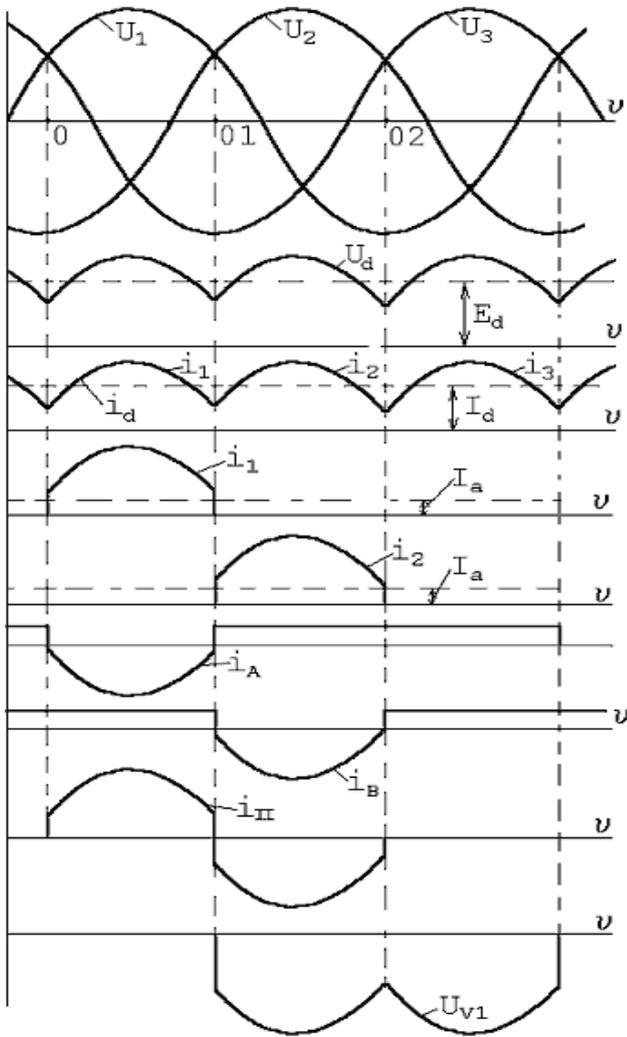


Рис. 2. Кривые токов и напряжений при $X_d = 0$ ($L_d = 0$)

Когда выключен вентиль 1, к нему на интервале проводимости вентиля 2 приложено линейное напряжение u_{21} , а на интервале проводимости вентиля 3 – напряжение u_{31} . Среднее значение выпрямленного напряжения найдем путем интегрирования напряжения на вторичной обмотке трансформатора в интервале повторяемости формы выпрямленного напряжения:

$$E_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5}{6}\pi} \sqrt{2} E_2 \sin \omega t d\omega = \frac{3}{2\pi} \int_{-60^\circ}^{+60^\circ} \sqrt{2} \cos \omega t d\omega = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} E_2 = 1.17 E_2 \quad (1)$$

где E_2 – действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Зная напряжение первичной сети E_1 , находим коэффициент трансформации:

$$K_{12} = \frac{E_1}{E_2}$$

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{E_d}{R_d},$$

а постоянная составляющая тока одного вентиля

$$I_a = \frac{I_d}{3}$$

Амплитуда анодного тока вентиля

$$I_{a, \max} = I_{d, \max} = \frac{\sqrt{2} E_2}{R_d} = 1.21 I_d = 3.63 I_a \quad (2)$$

Когда вентиль заперт, на его зажимах действует линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, поэтому амплитуда обратного напряжения

$$U_{e, \max} = \sqrt{6} E_2$$

При $X_d \rightarrow \infty$ выпрямленный ток идеально сглажен и кривые фазных токов имеют прямоугольную форму (рис.3). В этом случае кривые выпрямленного напряжения U_d и обратные напряжения на вентилях остаются такими же, как и при работе на активную нагрузку, а значения токов становятся равными (действующее значение тока вторичной обмотки):

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} I_d^2 \frac{2\pi}{3}} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 0.577 I_d \quad (3)$$

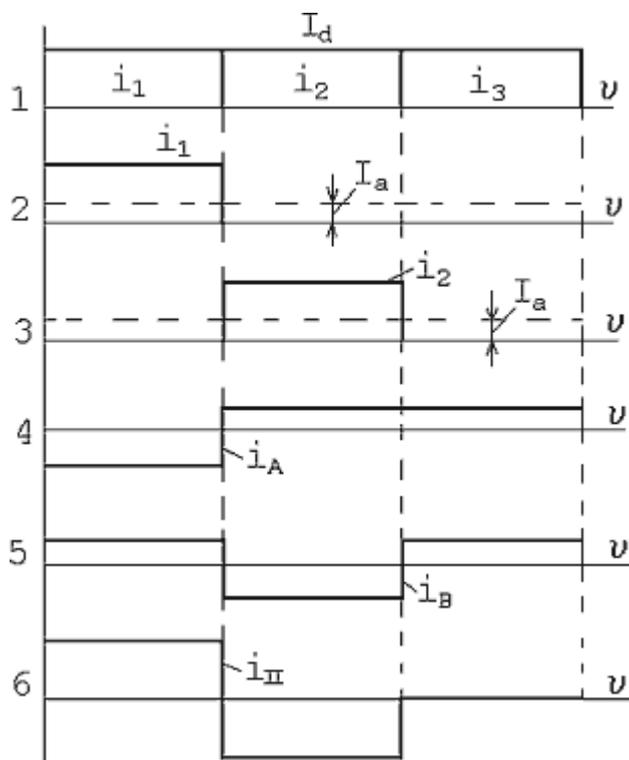


Рис.3. Кривые токов при $X_d \rightarrow \infty$

По кривой первичного фазного тока (ось 4) определяем его среднее значение

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{3K_{12}} I_d \quad (4)$$

По кривой первичного линейного тока (рис.3, ось б) находим его действующее значение

$$I_I = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_d}{K_{12}} \quad (5)$$

Полученные выражения справедливы для любого способа соединения первичной обмотки трансформатора (звездой или треугольником).

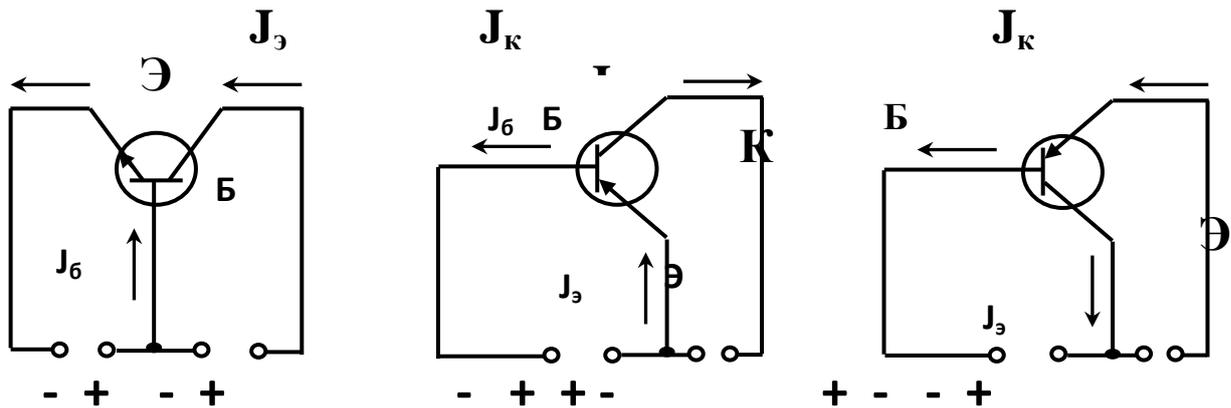
Лекция 17
Электронные усилители

План:

1. Схемы включения
2. Транзисторный усилитель в режиме большого сигнала.
3. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя

1. Схемы включения

На рис. 3.1. показаны условные обозначения биполярных транзисторов структуры n-p-n, p-p-n и три возможные схемы их включения. В зависимости от того, относительно какого из электродов задаются напряжения всех других электродов, различают схемы с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором. Нетрудно заметить, что в любой из схем, обратносмещенный коллекторный p-n переход обязательно входит как элемент в выходную цепь, точно также как прямосмещенный эмиттерный переход обязательно входит как элемент во входную, т.е. управляющую, цепь. Что касается физической природы входного и выходного токов, то она зависит, естественно, от схемы включения. В схеме с общей базой входным током является ток эмиттера. В схемах же с общим эмиттером и общим коллектором это ток базы. p-n-p.



Соответственно, выходным током является ток коллектора в схемах с общей базой и общим эмиттером, ток эмиттера в схеме с общим коллектором. Направление стрелки символа эмиттера указывает направление тока, протекающего в переходе эмиттер – база при прямом смещении этого перехода. Поскольку направление движения дырок совпадает с направлением тока, а направление движения электронов противоположно направлению тока, то направление стрелки символа эмиттера указывает также на тип структуры транзистора. Если, например, стрелка направлена к символу базы, то, следовательно, дырки движутся от эмиттера к базе, а это возможно только в том случае, если эмиттер будет p-типа, а база n-типа. Транзистор имеет структуру n-p-n. Если же стрелка направлена от символа базы, то дырки движутся от базы к эмиттеру, а это возможно только в том случае, если эмиттер будет n-типа, а база p-типа. Транзистор имеет структуру p-n-p.

2. Транзисторный усилитель в режиме большого сигнала

Параметры усилителя в режиме большого сигнала на низкой частоте могут быть получены на основе так называемых передаточных (нагрузочных) характеристик. Передаточная характеристика по току - это зависимость мгновенного значения тока в выходной цепи усилителя от мгновенного значения тока в его входной цепи. Передаточная характеристика по напряжению - это зависимость мгновенного значения напряжения на выходе усилителя от мгновенного значения напряжения на его входе. При этом исходят из предположения, что мгновенные значения названных величин тождественны их статическим значениям, что справедливо в той области частот, в которой инерционные свойства транзистора еще не проявляются.

Передаточные характеристики могут быть рассчитаны аналитически, с использованием тех или иных математических моделей транзисторов, или построены графическими приемами на основе справочных графиков семейств характеристик транзистора. Схема усилителя соответствует

Используется транзистор КТ 602. Напряжение питания $\varepsilon_K = 60$ В. Сопротивление нагрузки $R_n = 2$ кОм.

Падение напряжения на сопротивлении нагрузки

$$U_R = \varepsilon_K - U_{KЭ}$$

Ток в нагрузке

$$I_R = \varepsilon_K / R_n - U_{KЭ} / R_n$$

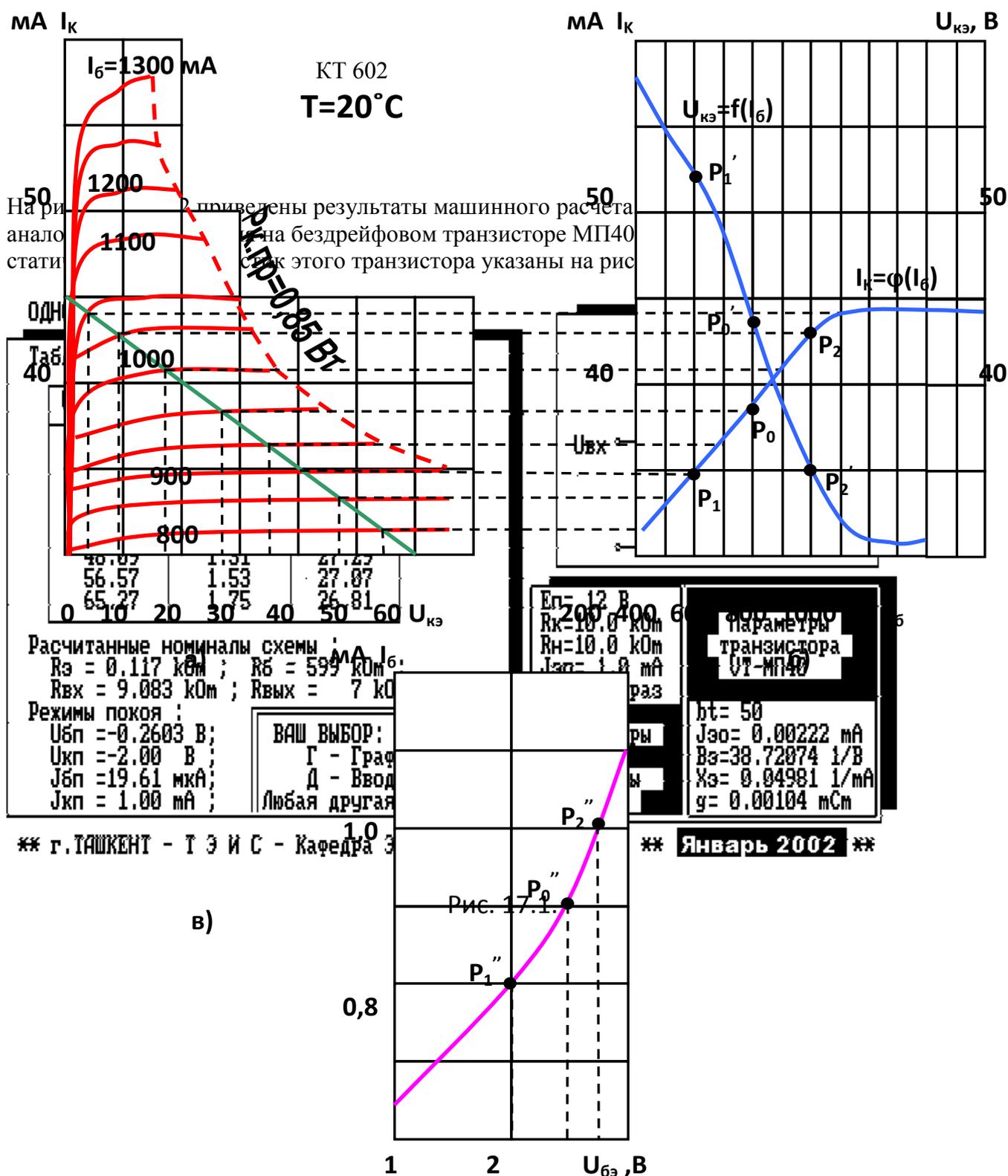
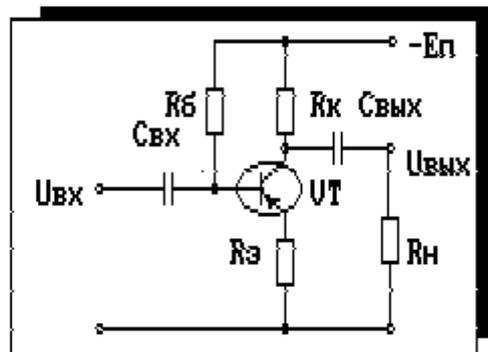
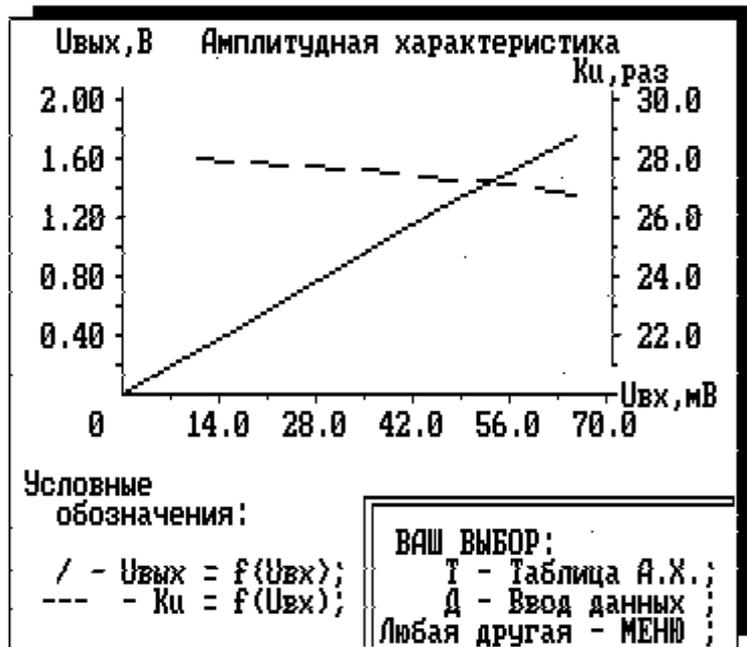


Рис. 11.1. Нагрузочные характеристики транзистора в схеме ОЭ.

ОДНОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ на МП40



Ел= 12 В	Параметры транзистора UT-МП40 βт= 50 Jэ0= 0.00222 мА Bэ=38.72874 1/В Xэ= 0.04981 1/мА γ= 0.00104 мСм
Rк=10.0 kОм	
Rн=10.0 kОм	
Jэп= 1.0 мА	
Ku>= 26 раз	Параметры и номиналы схемы

** г.ТАШКЕНТ - Т Э И С - Кафедра Э К П **

** Январь 2002 **

3. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя Рис. 17.2.

В большинстве случаев одиночные каскады не обеспечивают необходимое усиление и заданные параметры усилителей. Поэтому усилители, которые применяют в аппаратуре связи и измерительной технике, многокаскадные. При анализе и расчете многокаскадного усилителя необходимо определить общий коэффициент усиления усилителя, искажения, вносимые им, распределять их по каскадам, определить требование к источникам, решить вопросы введения обратных связей и т.д.

1. Коэффициент усиления многокаскадного усилителя

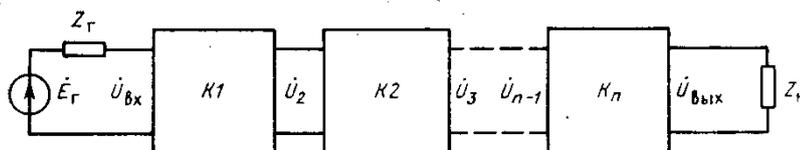


рис.1

Коэффициент усиления усилителя можно определить, исходя из структурной схемы (рис.1):

$$K_{общ} = U_{вых}/U_{вх} = (U_{вых}/U_{n-1}) \dots (U_3/U_2)(U_2/U_{вх}) = K_n K_{n-1} \dots K_2 K_1 \quad \text{или}$$

$$K_{общ} = K_1 K_2 \dots K_n \operatorname{ef}(\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n)$$

где K_1, \dots, K_n – коэффициенты усиления каскадов, $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ – фазовые сдвиги, вносимые каждым усилительным каскадом.

Таким образом, для многокаскадного усилителя общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления каждого каскада. Суммарный фазовый сдвиг, вносимый усилителем, равен сумме фазовых сдвигов каждого каскада. Сквозной коэффициент усиления $K_{общ} = k_{вх} K_{общ}$

где $k_{вх} = Z_{вх} / (Z_{Г} + Z_{вх})$ – коэффициент передачи входной цепи. Если коэффициент усиления отдельных каскадов выразить в логарифмических единицах, то общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя будет равен сумме коэффициентов $K_{общ}[дб] = K_1[дб] + \dots + K_n[дб]$

В аппаратуре связи для компенсации потери мощности на отдельных участках (затухания) необходимо, чтобы усилитель работал на согласованную нагрузку, т.е. его входное сопротивление должно быть равно сопротивлению источника (выходного сопротивления предыдущего тракта аппаратуры или линии), а выходное сопротивление должно равняться сопротивлению нагрузки. Для согласования усилителей по входу и выходу используют усилители с обратной связью и согласующие трансформаторы. Отклонение от согласования в рабочей полосе частот оценивается коэффициентом отражения

$$\delta_Z = \left| \frac{Z_{Г} - Z_{ВВ}}{Z_{Г} + Z_{ВВ}} \right|$$

При использовании согласующих трансформаторов пересчитанное сопротивление нагрузки в первичную обмотку $R'1 = R_H n^2$, где n – коэффициент трансформатора, т.е. отношение витков первичной обмотки к вторичной (рис. 2,а).

На рис.2,а имеем: $U_2 = U_1/n$; $I_2 = I_1 n$, тогда $R_H = U_2/I_2 = (U_1/I_1)n^2$ или $R'1 = U_1/I_1 = R_H n^2 = R_{Г}$. Отсюда с учетом потерь в трансформаторе коэффициент трансформации:

$$n = \sqrt{R_{Г} / R_H \eta_t}$$

где η_t – КПД трансформатора.

Применение входного и выходного трансформаторов позволяет достаточно просто осуществить переход с симметричной схемы на несимметричную (рис.2, б).

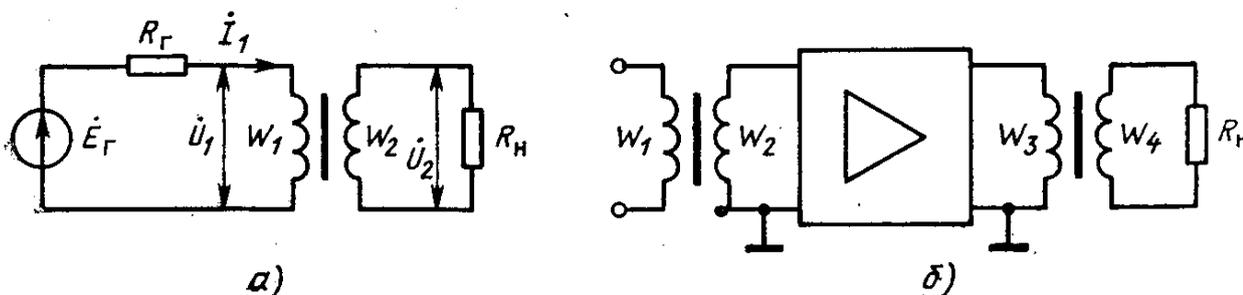


рис. 2

Контрольные вопросы:

1. Чем характеризуются параметры усилителя в режиме большого сигнала?
2. Как графически определяются характеристики и параметры усилителя?
3. Как аналитически определяются характеристики и параметры усилителя?
4. Нарисуйте статические электродные характеристики БТ в схеме с ОБ.
5. Нарисуйте и охарактеризуйте выходную характеристику БТ в схеме с ОЭ.

Лекция 18.

Динамические характеристики электронных усилителей.

План:

1. Определение ДУ, схемная реализация с фиксированным током эмиттера.
2. Передаточная характеристика по току и напряжению в области устойчивого состояния (ключевой режим), область усиления.
3. Коэффициент усиления.

1. Определение ДУ, схемная реализация с фиксированным током эмиттера

Усилительный дифференциальный каскад (ДК) предназначен для усиления разности двух напряжений. В идеальных ДК выходное напряжение пропорционально только разности входных напряжений, приложенных к двум его входам, и не зависит от их абсолютной величины. Схема усилителя представлена на рис. 7.1. Это два эмиттерно-связанных идентичных транзистора с одинаковыми резисторами R_1 и R_2 в цепях коллекторов, питаемые от ГСТ. Усилитель имеет два выхода. Выходное напряжение снимается с коллекторов транзисторов.

Так как потенциалы эмиттеров всегда одинаковы, транзисторы идентичны и $R_1 = R_2$, то при $U_{вх1} = U_{вх2}$ $U_{вых} = 0$. Другими словами, такой усилитель реагирует только на разность входных напряжений, почему и назван дифференциальным.

Чтобы транзисторы в возможно более широком диапазоне изменения значения разности $U_{вх1} - U_{вх2}$ сохраняли активный режим, необходимо чтобы значение тока ГСТ I_g и номинал резисторов R_1 и R_2 удовлетворял неравенству $I_g \cdot R_1 < E_{п1}$, так как в предельном случае ток эмиттера одного из транзисторов может стать равным I_g .

Напишем соотношения, связывающие значения токов и напряжений в элементах цепи.

$$\begin{aligned}
 I_{к1} &= I_1 + I_n, \\
 I_{к2} &= I_2 - I_n, \\
 I_{к1} &= \frac{\beta \cdot I_{э1}}{\beta + 1}, \\
 I_{к2} &= \frac{\beta \cdot I_{э2}}{\beta + 1},
 \end{aligned}
 \tag{12.1}$$

$$U_{к1} = E_n - I_1 \cdot R_1,$$

$$U_{к2} = E_n - I_2 \cdot R_2,$$

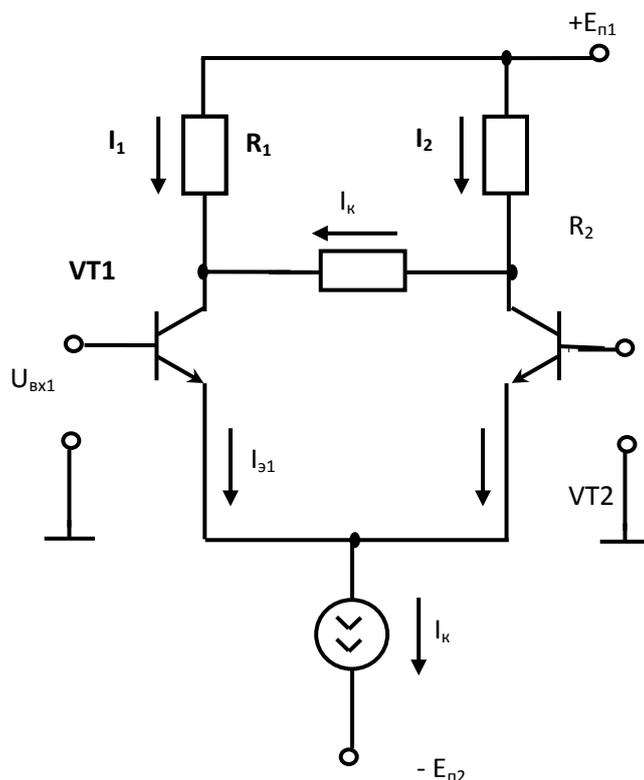
$$U_{б1} = U_{вх1},$$

$$U_{б2} = U_{вх2},$$

$$U_{вых} = U_{к2} - U_{к1}.$$

Так как значение выходного напряжения определяется лишь значением разности $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, при расчетах любое из них можно положить равным нулю. Будем далее считать $U_{вх2} = 0$ (вывод базы VT2 закорочен на общую шину).

$$U_{\text{вых}} = \frac{\beta}{\beta+1} \cdot \frac{R_1 \cdot R_H \cdot I_2}{R_H + 2R_1} \left(2 \frac{I_{\text{э1}}}{I_2} - 1 \right), \quad (12.2)$$



Дифференциальный каскад

$$U_{\text{к1}} = E_{\text{n1}} - \frac{\beta}{\beta+1} \cdot R_1 \cdot I_2 \cdot \frac{R_1 + R_H \frac{I_{\text{э1}}}{I_2}}{R_H + 2R_1}, \quad (12.3)$$

$$U_{\text{кб1}} = U_{\text{к1}} - U_{\text{б1}} = E_{\text{n1}} - \frac{\beta}{\beta+1} \cdot R_1 \cdot I_2 \cdot \frac{R_1 + R_H \frac{I_{\text{э1}}}{I_2}}{R_H + 2R_1} - U_{\text{вх1}}, \quad (12.4)$$

$$U_{\text{кб2}} = U_{\text{к2}} = E_{\text{n1}} - \frac{\beta}{\beta+1} \cdot R_1 \cdot I_2 \cdot \frac{R_1 + R_H \frac{I_{\text{э1}}}{I_2}}{R_H + 2R_1}, \quad (12.5)$$

$$U_{\text{бэ1}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{э}}, \quad (12.6)$$

$$U_{\text{бэ2}} = -U_{\text{э}}. \quad (12.7)$$

В соответствии с (11.2) и системой (12.2) – (12.7) имеем

$$U_{\text{э}} = - \frac{\left[\ln(I_{\text{э2}} - I_{\text{э1}}) + \mu \cdot U_{\text{кб2}} - \ln I \right]}{b_{\text{э}} + \chi \cdot U_{\text{кб2}}}, \quad (12.8)$$

$$\begin{aligned} & \chi \cdot U_{\text{вх1}}^2 - \left[b_{\text{э}} + \chi \cdot U_{\text{к1}} + \chi \cdot U_{\text{э}} + \mu \right] U_{\text{вх1}} + \\ & + \left(b_{\text{э}} + \chi \cdot U_{\text{к1}} \right) U_{\text{э}} + \mu U_{\text{к1}} - \ln I_{\text{оо}} + \ln I_{\text{э1}} = 0 \end{aligned} \quad (12.9)$$

Передаточная характеристика по току и напряжению в области устойчивого состояния (ключевой режим), область усиления

Метод расчета передаточной характеристики дифференциального усилителя представляется следующим образом. Задаемся рядом равноотстоящих значений $I_{\text{э1}}$ в интервале от $I_{\text{э1}} = 0.1 \cdot I_{\text{г}}$ до $I_{\text{э1}} = 0.9 \cdot I_{\text{г}}$. Для каждого из этих значений по формуле (7.2) определяем значение $U_{\text{вх}}$ по формуле (7.5) значение $U_{\text{кб2}}$ и по формуле (7.8) $U_{\text{э}}$. Затем, по формуле (7.3) определяем значение $U_{\text{к1}}$ и, решая уравнение (7.8), находим значение $U_{\text{вх1}}$. В таблице 7.1 приведены результаты расчетов для случая $E_{\text{п1}} = 12 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$, $I_{\text{г}} = 1 \text{ мА}$ и транзистора с параметрами (4.1).

В интервале измерения тока эмиттера $I_{\text{э1}}$ от $I_{\text{э1}} = 0.3 \cdot I_{\text{г}}$ до $I_{\text{э1}} = 0.7 \cdot I_{\text{г}}$ передаточная характеристика практически линейна и дифференциальный коэффициент передачи по напряжению $K_{\text{u}} = 54.1$. Однако за пределами этого интервала крутизна характеристики уменьшается, стремясь к нулю.

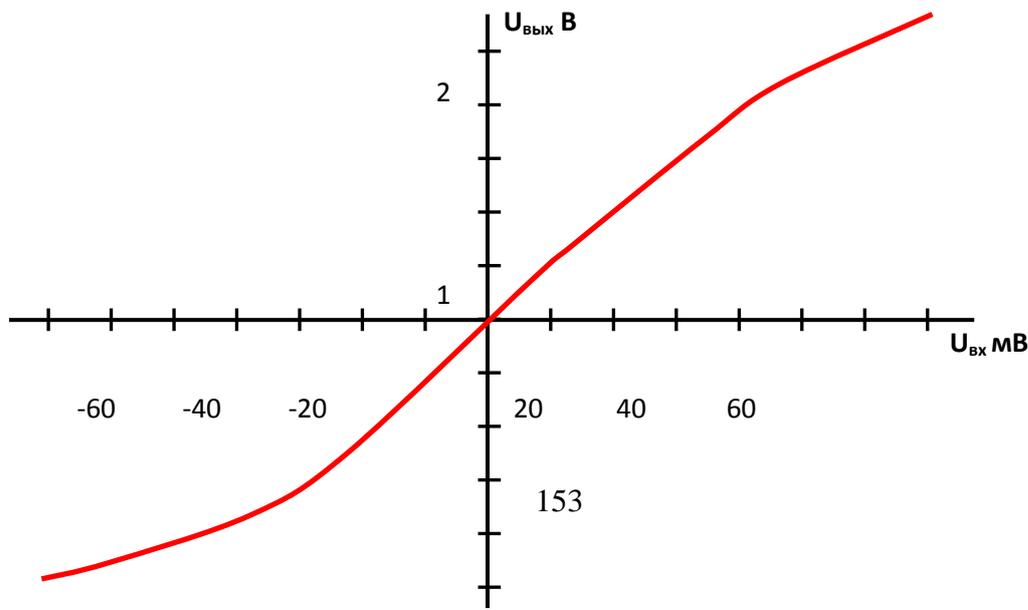
Выходное сопротивление дифференциального усилителя при этом довольно велико, так что изменение значения $R_{\text{н}}$ существенно сказывается на крутизне характеристики. Так например, если

в рассмотренной схеме считать $R_{\text{н}} = \infty$, то при токе $I_{\text{э1}} = 0.4 \cdot I_{\text{г}}$ получим $U_{\text{вх}} = -1.981 \text{ В}$, $U_{\text{вх}} = -8.57 \text{ мВ}$, $K_{\text{u}} = 231$. Как видим, по сравнению с прежним ($R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$), крутизна характеристики возросла более чем в 4 раза.

Для усилителей постоянного тока важна стабильность выходного напряжения в отсутствии сигнала или, как говорят, важно отсутствие дрейфа нуля. Этот дрейф может обуславливаться изменением напряжения питания, изменением температуры и изменением значений параметров транзисторов со временем.

Таблица 12.1.

График этой передаточной характеристики приведен на рис.12.2.



Достоинством рассмотренного типа дифференциальных усилителей является практически полное отсутствие дрейфа нуля. Это непосредственно следует из их нечувствительности к синфазным сигналам. Изменение же напряжения питания, изменение температуры, изменение значений параметров транзисторов дифференциальной пары можно рассматривать как воздействие на эту пару таких синфазных сигналов.

Обратим внимание еще на одно важное свойство дифференциального усилителя.

Так как сумма токов эмиттеров дифференциальной пары остается постоянной и равной $I_{г}$, то изменение входного напряжения вызывает, по существу, изменение соотношения тока каждого эмиттера (например $I_{э1}$) к току ГСТ. В режиме малого сигнала (область изменения $I_{э1} / I_{г}$ от 0.4 до 0.6), как было показано, передаточная характеристика линейна. Но это значит, если учесть (7.2), что величина $(2 I_{э1} / I_{г} - 1)$ с большой точностью пропорциональна разности $(U_{вх1} - U_{вх2})$. На этом основании можно утверждать, что в режиме малого сигнала выходное напряжение дифференциального усилителя пропорционально произведению тока ГСТ и разности значений входных напряжений

$$U_{вых} = \beta I_{г} \cdot (U_{вх1} - U_{вх2}) \quad (16.10)$$

т.е. дифференциальный усилитель осуществляет операцию перемножения этих двух величин. В рассмотренном выше случае

$$\beta = 54.1 \text{ мА}^{-1}.$$

Вопросы

Режимы работы усилителей?

Почему усилитель назван дифференциальным?

Опишите принцип работы ДУ.

Проанализируйте передаточную характеристику дифференциального каскада.

Назовите достоинство рассмотренного типа дифференциальных усилителей.

Как определяется главный параметр ДУ - коэффициент усиления?

Список использованных литератур

1. Karimov A.S. va boshqalar «Elektrotexnika va elektronika asoslari» Toshkent-O'qituvchi-1995 y.
2. Karimov A.S. va boshqalar. «Nazariy elektrotexnika asoslari» Toshkent-O'qituvchi-2002 y.
3. G.R.Raximov «Umumiy elektrotexnika» Toshkent «O'qituvchi» 1981 y.
4. N.X. Xonboboev. «Elektrotexnika va elektronika asoslari» Toshkent-O'qituvchi-1997 y.
5. Karimov A.S. va boshqalar. «Elektrotexnika va elektronika asoslari» (programmalashtirilgan savollar va masalalar tuplami), Toshkent «O'qituvchi» 1978 y.
6. Karimov A.S. va boshqalar. «Elektrotexnika» (masalalar to'plami va laboratoriya ishlari) Toshkent - «O'qituvchi» - 1975 y..
7. M.Yu.Zaychik «Nazariy elektrotexnikadan masala va mashqlar to'plami» Toshkent-O'qituvchi-1981 y.
8. A.S. Karimov M.M. Mirxaydarov «Nazariy elektrotexnika» Toshkent-O'qituvchi-1979 y.
9. S.Majidov «Elektrotexnikadan ruscha-o'zbekcha lug'at spravochnik» Toshkent «O'qituvchi» 1981 y
10. G.R.Raximov. «Elektrotexnika» Toshkent «O'qituvchi» 1966 y.
11. Ф.И.Андреев ТОЭ Учебное пособие. Екатеринбург 2003г.
12. Ф.И.Андреев Основы электротехники Учебное пособие. Екатеринбург 2004 г.
13. А.А.Иванов Справочник по электротехнике Киев «Высшая школа» 1984г.
14. Н.Н.Лебедев С.С.Леви Электротехника и электрооборудование М: «Высшая школа» 1970г.
15. Н.Н.Гусев, Б.Н. Мельцер. Электротехника и основы промышленной электроники Минск «Высшая школа» 1969г.
16. Э.А. Рабинович. «Сборник задач и упражнений по общей электротехнике» М: Энергия 1978г.
15. Под ред. В.С. Пантюшина «Сборник задач по электротехнике и основам электроники» М: «Высшая школа» 1978 г.
16. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника, -М : Энергоатомиздат, 1969й 1988 й.
17. Ю.М.Борисов, Д.Н.Липатов «Электротехника» М. Энергоатомиздат, 1974г
18. И.И.Иванов, Б.С.Равдоник «Электротехника» М. «Высшая школа» 1984 г.
19. Под ред.В.С.Пантюшина. «Электротехника» М: «Высшая школа» 1976г.
20. Под редакцией А.Т.Блажкина. «Общая Электротехника » Л:Энергоатомиздат 1986г.
21. М.Ю.Зайчик Сборник задач и упражнений по теоретической электротехнике М: «Энергия» 1973г.
22. Ф.С.Забродин. Промышленная электроника. Москва «Высшая школа» 1982 г.
23. Тули М. Карманный справочник по электронике. Пер с англ. М.: Энергияатомиздат, 1993 г. - 176 с.
24. Радин В.И и др. Электрические машины: Асинхронные машины. -М.: «Высшая школа», 1988 г. -328 с.
25. Борисов Ю. М. Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. Электротехника. Учебник для вузов. -М: Энергоатомиздат, 1985. -552 с.
26. Гаев Г.П и др.Электротехника и электроника. Учебник для вузов. Кн 3. -М: Энергоатомиздат, 1998 -432 с.
27. С.А.Башарин, В.В.Федоров. ТОЭ. Уч. пособ. Для вузов. -М.: Академия, 2004 г. -304 с.
28. Ю. Г. Синдеев Электротехника с основами электроники. Ростов н/Д: Феникс, 2005.- 368 с.
29. S.F. Amirov, M.S. Yoqubov, N.G'. Jabborov. Elektrotexnikaning nazariy asoslari. Toshkent 2007
30. Л.А. Бессонов. ТОЭ -М.: «Высшая школа» 1996
31. Лихачев В.Л. Электротехника. Справочник. Том 1. -М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. -560 с.
32. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах. Под ред. В.А Прянишникова. Санкт-Петербург. КОРОНА-Век, 2007. -336 с.
33. В. А. Прянишников. Электроника. Курс лекций. Санкт-Петербург. КОРОНА-принт, 1998. - 400 с.
34. П.В.Ермуратский, А. А. Косякин и др. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники.-М.: «Высшая школа» 1986 г. -248 с.
35. Н.В. Белов. Моя профессия электрик. -Минск. Современный литератор, 2004 г. -192 с.