

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Э.М. Пинт

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

КУРС ЛЕКЦИЙ

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация
транспортно-технологических машин и комплексов»
и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»

Пенза 2016

УДК 621.537

ББК 312

ПЗ2

Рецензенты: кафедра «Автономные информационные и управляющие системы» Пензенского государственного университета (зав. кафедрой, доктор технических наук, профессор А.И. Сидоров); кандидат технических наук, доцент С.В. Чекайкин (ПГТУ)

Пинт Э.М.

ПЗ2 Общая электротехника и электроника: курс лекций по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»/ Э.М. Пинт. – Пенза: ПГУАС, 2016 – 110 с.

Излагается теоретический материал курса лекций по дисциплине «Общая электротехника и электроника».

Курс лекций подготовлен на кафедре «Механизация и автоматизация производства» и предназначен для использования студентами, обучающимися по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов», при изучении дисциплины «Общая электротехника и электроника».

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2016

© Пинт Э.М., 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс лекций подготовлен в соответствии с программой по дисциплине «Общая электротехника и электроника» и предназначен для использования студентами третьего курса, обучающимися по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов», при изучении дисциплины «Общая электротехника и электроника», относящейся к базовой части профессионального цикла.

При освоении курса «Общая электротехника и электроника» должны быть сформированы некоторые общекультурные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции, предусмотренные Федеральными государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

- владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыками работы с компьютером как средством управления информацией, а также с традиционными и графическими носителями информации;

- владение знаниями технических условий и правил рациональной эксплуатации транспортной техники, причин и последствий прекращения её работоспособности;

- способность в составе коллектива исполнителей к анализу передового научно-технического опыта и тенденций развития технологий эксплуатации транспортно-технических машин и комплексов;

- готовность к участию в составе коллектива исполнителей к деятельности по организации управления качеством эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов).

В результате изучения дисциплины обучающийся должен:

з н а т ь :

- основные физические явления, фундаментальные понятия и законы современной электротехники и электроники;

- построение, принцип действия, характеристики, параметры основных электрических цепей, электронных приборов, электротехнических и электронных устройств;

у м е т ь :

- применять современные математические методы в прикладных задачах профессиональной деятельности;

– диагностировать состояние электронной и электрической аппаратуры;

в л а д е т ь :

– методологией проведения исследований электротехнических и электронных устройств;

– методикой расчета схем электронных и электрических устройств.

Знания, полученные студентами, могут быть использованы при подготовке выпускной квалификационной работы и в дальнейшей профессиональной деятельности.

ВВЕДЕНИЕ

Целью курса лекций по дисциплине «Общая электротехника и электроника» является формирование у студентов знаний по конструкции, принципам действия, параметрам, характеристикам, областям применения основных электрических цепей, электронных приборов, электротехнических и электронных устройств.

Теоретическая основа курса лекций подкрепляется практической частью, в которой даются расчеты (или элементы расчета) электрических цепей, электронных приборов, электротехнических и электронных устройств.

В разделе «Электротехника» настоящего курса лекций рассматриваются электрические цепи и основные электротехнические устройства. Основное внимание уделяется анализу физических процессов, происходящих в электрических цепях и электротехнических устройствах, их основным характеристикам и параметрам и областям применения.

В разделе «Электроника» курса лекций изучается современная элементарная база электроники: полупроводниковые диоды, транзисторы и построенные на их основе интегральные микросхемы.

Тема №1. Определение электротехники.

Общие сведения об электрических цепях и ее элементах.

Электрические цепи постоянного тока

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

– определение электротехники, основные элементы, параметры, типы электрических цепей;

– методы расчета электрических цепей постоянного тока с помощью уравнений Кирхгофа и контурных токов;

у м е т ь :

– применять методы расчета электрических цепей постоянного тока ;

о з н а к о м и т ь с я :

– с применением электротехники в народном хозяйстве страны, в частности в строительной индустрии, в автомобильном хозяйстве.

1.1. Определение электротехники как науки

Электротехника – наука, изучающая вопросы, связанные с производством (генерированием), передачей на расстояние и потреблением электрической энергии. Электрическая энергия самым широким образом применяется в различных областях науки и техники, в хозяйстве страны. Это объясняется тем, что электрическую энергию легко получать в результате преобразования других видов энергии, например механической, тепловой, химической. В местах потребления электрическую энергию легко преобразовать в тот или иной вид энергии. Электрическую энергию можно быстро и экономично по проводам высоковольтной линии передавать от источника электрической энергии к приемнику (потребителю).

Гидроэлектростанции, тепловые электростанции, атомные электростанции преобразуют соответственно механическую энергию падающей воды, тепловую энергию, например, при сжигания газа, атомную энергию в электрическую. Около 70 % вырабатываемой в нашей стране электрической энергии потребляется промышленными предприятиями, а остальная часть расходуется в жилых домах, на транспорте и пр.

1.2. Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Как известно, направленное движение носителей электрических зарядов называется электрическим током. Для такого движения зарядов необходимо создать замкнутый электрический контур, состоящий из источника и приемников электрической энергии, соединенных с помощью проводников. Такой контур называют электрической цепью. Цепь представляет

собой совокупность устройств, обеспечивающих генерирование, передачу и использование электрической энергии. Отдельные устройства цепи называются элементами.

Элементы цепи, генерирующие электрическую энергию, называют источниками электрической энергии, а элементы, потребляющие электроэнергию, – приемниками электрической энергии. С помощью источников различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, например: в машинных генераторах – в электрическую энергию преобразуют механическую энергию, в аккумуляторах – в химическую энергию, в термогенераторах – в тепловую. Приемники, наоборот, преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии, а именно: электродвигатели – в механическую, электронагревательные устройства – в тепловую, лампы накаливания – в световую и т.д. Наряду с источниками, приемниками электрической энергии и соединительными проводниками в реальных электрических цепях содержится ряд вспомогательных элементов: коммутационная аппаратура, служащая для включения и выключения отдельных участков цепи, электроизмерительные приборы, защитные устройства, а также преобразующие устройства в виде трансформаторов, выпрямителей и инверторов.

Свойства каждого элемента электрической цепи характеризуются параметрами. Свойства элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (тепловую, световую) характеризует параметр сопротивления R . Свойства элемента, состоящие в возникновении собственного магнитного поля при прохождении через элемент электрического тока, характеризует параметр «индуктивность α ». Свойство элемента накапливать заряды характеризует параметр «емкость C ». Электрические цепи могут быть неразветвленными или разветвленными, с одним или несколькими источниками питания, линейными или нелинейными, постоянного или переменного тока. Если в приемнике отношение напряжения к току есть величина постоянная, то приемник является линейным элементом, если нет, то приемник является нелинейным элементом.

Электрические цепи, которые состоят только из линейных элементов, называют линейными. Электрические цепи, в которые входит хотя бы один нелинейный элемент, называют нелинейными.

1.3. Электрические цепи постоянного тока. Уравнения Кирхгофа. Метод контурных токов

Рассмотрим простейшую электрическую цепь постоянного тока, в которой сопротивлением проводов, соединяющих источник питания с приемником, можно пренебречь. Электрическое поле, возникающее в проводниках между зажимами источника, где имеется ЭДС источника E , воздей-

ствуется на свободные носители зарядов проводников и вызывает электрический ток в цепи I . Перемещение носителей зарядов (электроны) требует затраты энергии. Для поддержания тока необходимо стационарное электрическое поле, энергия которого должна непрерывно восстанавливаться, что и осуществляется за счет источника электрической энергии.

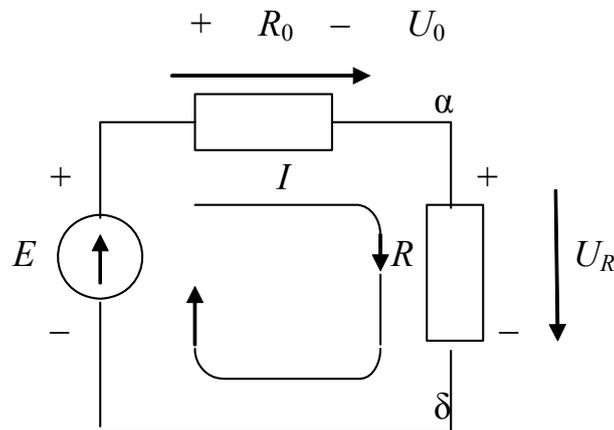


Рис. 1.1. Неразветвленная цепь постоянного тока

Противодействие электрическому току оказывает сопротивление R (R_0 – внутреннее сопротивление источника). Одной из важнейших характеристик электрического поля является потенциал ϕ , численно равный работе A , которую совершают силы поля при переносе единичного положительного заряда q из данной точки поля в точку, потенциал которой равен нулю.

В рассматриваемой цепи на внешнем участке $\alpha\delta$ положительные заряды движутся в сторону убывания потенциала ϕ (в действительности противоположно движутся электроны), а в источнике перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания потенциала, т.е. против электростатического поля. ЭДС равна работе A , совершаемой при перемещении единичного положительного заряда q внутри источника от зажима с отрицательным потенциалом к зажиму с положительным потенциалом:

$$E = \frac{A}{q}.$$

Иначе ЭДС равна разности потенциалов между положительными и отрицательными зажимами источника:

$$E = \phi_1 - \phi_2.$$

Электрическое поле на внешнем участке $\alpha\delta$ характеризуется напряжением или разностью потенциалов между этими точками:

$$U_{\alpha\delta} = U_R = \varphi_a - \varphi_b = IR \text{ (по закону Ома).}$$

Напряжение равно работе, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда по сопротивлению R от положительного потенциала к отрицательному.

Внутри источника осуществляется падение напряжения $U_0 = I \times R_0$ на внутреннем сопротивлении источника R_0 , которое показано на схеме (см. рис. 1.1). Поэтому для электрической цепи справедливо выражение

$$E = U_0 + U_R = I(R_0 + R),$$

т.е. ЭДС замкнутого контура равна сумме падений напряжения на его участках. Отсюда

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

Получаем закон Ома для замкнутой цепи.

Напряжение на выходе источника равно ЭДС источника минус падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

$$U = U_R = E - IR_0 = E - U_0.$$

Основной единицей ЭДС, напряжения, потенциала в Международной системе единиц (СИ) является вольт (В). Вольт есть напряжение на участке цепи, в котором при перемещении положительного заряда в 1 кулон (Кл) совершается работа в 1 джоуль (Дж). Используют такие единицы: микровольт – $1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$, милливольт – $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$, киловольт – $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$, мегавольт – $1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}$. За положительное направление ЭДС принимают направление от зажима с меньшим потенциалом к зажиму с большим потенциалом. За положительное направление напряжения принимают направление от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

Мощность источника питания определяется формулой $P = EI$.

Мощность – работа, совершаемая электрическим током за секунду.

Следует иметь в виду, что в цепи от отрицательного зажима источника к положительному зажиму движутся носители тока – электроны. Однако условно за положительное направление тока принимают направление движения положительных носителей заряда, которые во внешней цепи перемещаются от положительного зажима источника к отрицательному.

Электрический ток оценивается количеством носителей зарядов, проходящих в единицу времени через поперечное сечение проводника. Электрический ток, изменяющийся во времени, называется переменным.

Значение переменного тока для заданного момента времени называют мгновенным значением тока и обозначают i . Переменный ток определяется как отношение количества электричества заряда aq , протекающего через поперечное сечение проводника за время at , к этому времени:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Электрический ток, значение и направление которого не изменяются, называется постоянным и обозначается I . Постоянный ток определяется отношением

$$I = \frac{q}{t}.$$

Основными единицами заряда, тока в Международной системе единиц (СИ) являются: кулон (Кл), ампер (А). Для тока используют такие производные единицы: миллиампер – $1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$, микроампер – $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$.

Мощность, потребляемая сопротивлением R ,

$$P = U_R I = I^2 R.$$

Реальный элемент электрической цепи, основной характеристикой которого является параметр сопротивления R , называется резистором.

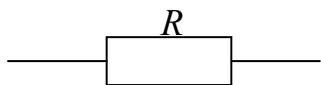


Рис. 1.2. Изображение резистора

Резистор – это устройство, вводимое в электрическую цепь для регулирования тока и напряжения. Основной единицей сопротивления в СИ является Ом, однако часто используют единицы: килоом – $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$, мегаом – $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$.

Индуктивность L реализуется катушкой индуктивности и является коэффициентом пропорциональности между магнитным потоком $w\Phi$, пересекающим все витки катушки индуктивности, и током I в катушке, Φ – поток, сцепленный одним витком.

$$w\Phi = LI,$$

где $w\Phi$ – потокосцепление – поток, сцепленный с w витками.

Катушка индуктивности представляет собой витки проводника, намотанные на магнитный (дроссель) или немагнитный сердечник. В катушке при протекании переменного тока сосредотачивается переменное магнитное поле, которое усиливается при применении магнитного (железного) сердечника.



Рис. 1.3. Изображение катушки индуктивности

Параметр L называют индуктивностью. Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}^{-1}$. Часто используют единицу миллигенри – $1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$.

Электрическая емкость C представляет собой коэффициент пропорциональности между зарядом q и напряжением на элементе: $q = CU$. Реальный элемент, основной характеристикой которого является параметр C , называется конденсатором.



Рис. 1.4. Изображение конденсатора

В простейшем случае конденсатор представляет собой две пластины (обкладки), которые разделены диэлектриком, на которых при протекании тока (во время заряда) накапливаются разноименные заряды и между которыми возникает электрическое поле.

Электрическая емкость C выражается в СИ в фарадах (Ф). Фарада – это емкость такого конденсатора, напряжение между обкладками которого равно 1В при заряде на обкладках в 1Кл, т.е. $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$. На практике используют единицы: микрофарада (мкФ) – $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$, нанофарада (нФ) – $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$, пикофарада (пФ) – $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$.

За единицу количества электричества (заряда) в 1 Кл принимают заряд, пересекающий за 1 с сечение проводника с током 1 А.

При расчетах последовательно соединенные сопротивления просто суммируются, а параллельно соединенные сопротивления суммируются в виде обратных величин.

Аналогично суммируются индуктивности.

У емкости, наоборот, последовательно соединенные емкости суммируются в виде обратных величин, а параллельно соединенные – просто суммируются (складываются).

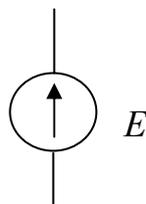


Рис. 1.5. Изображение источника ЭДС

При расчетах электрических цепей источники питания замещаются эквивалентными источниками питания, которые подразделяют на источники ЭДС и источники тока.

Идеальным источником ЭДС является источник, внутреннее сопротивление которого равно нулю, а ЭДС E постоянна и равна ЭДС реального источника, причем эта ЭДС не зависит от тока нагрузки, проходящего через источник.

Стрелка указывает положительное направление ЭДС (от «-» к «+»).

Идеальным источником тока является источник с внутренним сопротивлением, равным бесконечности, и током I , не зависящим от сопротивления нагрузки (ток I равен току короткого замыкания реального источника). Изображение источника тока приведено на рис. 1.6.

Две стрелки указывают направление тока I .

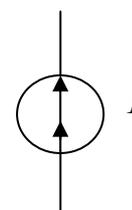


Рис. 1.6. Изображение источника тока

Разветвленная цепь постоянного тока

Простейшую цепь постоянного тока мы уже рассмотрели. Рассмотрим более сложную – разветвленную цепь. Разветвленной цепью постоянного тока называется такое соединение источников и сопротивлений, при котором для тока имеются два или более путей. Каждый из этих путей является замкнутым контуром. Всякая точка разветвленной цепи, в которой сходятся не менее трех проводников, называется узлом. Изобразим цепь.

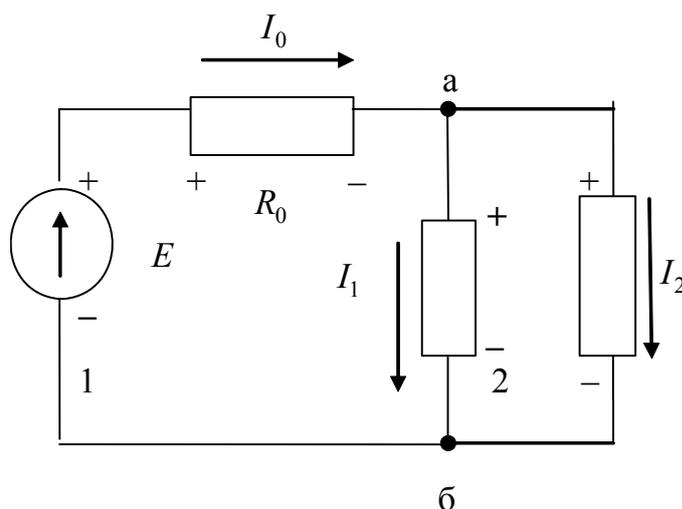


Рис. 1.7. Разветвленная цепь постоянного тока

Покажем положительные направления токов в данной цепи. Как видно из рис.1.7, цепь содержит три замкнутых контура и два узла.

Величины токов во всех сопротивлениях цепи могут быть определены, если известны величины ЭДС и сопротивлений, составляющих электрическую цепь. Расчет токов может быть сделан с помощью уравнений Кирхгофа.

Уравнения Кирхгофа

Первая система уравнений Кирхгофа относится к узлам электрической цепи. Токи, направленные к узлу, будем считать положительными, а токи, исходящие от узла, – отрицательными. Поскольку заряд в узле накапливаться не может, алгебраическая сумма токов, сходящихся в узел, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0.$$

Вторая система уравнений Кирхгофа относится к замкнутым контурам, которые можно выделить в разветвленной цепи. Применяя закон Ома к этим контурам, можно заметить, что в любом произвольно выбранном

замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме произведений токов на сопротивления соответствующих участков контура, т.е. в замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях контура, включая внутренние сопротивления источников:

$$\sum_{k=1}^{k=m} E_k = \sum_{k=1}^{k=n} I_k R_k .$$

Например, для определения трех различным токов электрической цепи, изображенной на рис.1.7, можно составить для узла «а» первое уравнение Кирхгофа:

$$I_0 - I_1 - I_2 = 0 .$$

Два вторых уравнения Кирхгофа для контуров 1, 2 (всего можно три):

$$I_0 R_0 + I_1 R_1 = E ,$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0 .$$

Совместное решение этих трех уравнений (для трех неизвестных токов) дает:

$$I_0 = E \frac{R_1 + R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2} ,$$

$$I_1 = E \frac{R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2} ,$$

$$I_2 = E \frac{R_1}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2} ,$$

Использование уравнений Кирхгофа для расчета сложных электрических цепей связано с трудоемкими преобразованиями.

Метод контурных токов

Разветвленную цепь можно рассматривать как совокупность соприкасающихся друг с другом замкнутых контуров. Каждому контуру можно приписать некоторый контурный ток I_k . Контурные токи можно найти через действительные токи в цепи. При этом действительные токи в участках, принадлежащих нескольким контурам, являются алгебраической суммой соответствующих контурных токов.

Контурные токи могут быть найдены с помощью вторых уравнений Кирхгофа, число которых равно числу соприкасающихся контуров.

На схеме (рис. 1.8), выбранной в качестве примера (то же, что и на рис.1.7) имеются два соприкасающихся контура.

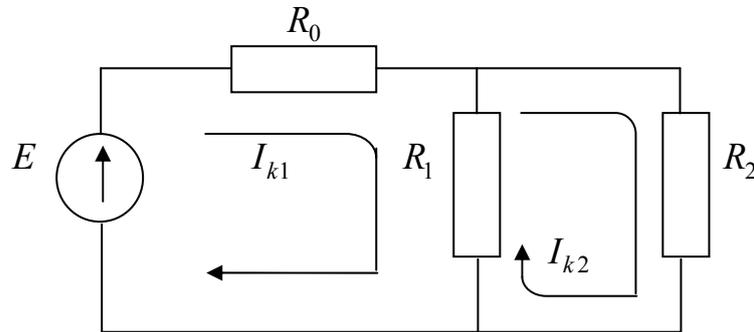


Рис. 1.8. Разветвленная цепь постоянного тока

Направления контурных токов выбирают произвольно. Пусть контурные токи текут по часовой стрелке. Считая направление контурного тока, текущего по часовой стрелке, за положительное, составим два уравнения Кирхгофа для определения контурных токов:

$$R_0 I_{k1} + R_1 (I_{k1} - I_{k2}) = E,$$

$$R_1 (I_{k1} - I_{k2}) - R_2 I_{k2} = 0.$$

Решив эти уравнения относительно контурных токов, получим:

$$I_{k1} = E \frac{R_1 + R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2},$$

$$I_{k2} = E \frac{R_1}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2}.$$

Однако нас интересуют действительные токи, протекающие по проводникам цепи. Поэтому, возвращаясь к обозначениям токов на рис.1.7, находим:

$$I_0 = E \frac{R_1 + R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2},$$

$$I_1 = E \frac{R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2},$$

$$I_2 = E \frac{R_1}{R_0 R_1 + R_0 R_2 + R_1 R_2}.$$

Получим те же токи, что и при решении с использованием трех уравнений Кирхгофа. В последнем примере использовались два уравнения.

Контрольные вопросы

1. Дать определение электротехники.
2. Что такое электрическая цепь?
3. Каковы основные элементы электрической цепи?
4. Что такое узел электрической цепи?
5. Сформулировать первый закон Кирхгофа.
6. Сформулировать второй закон Кирхгофа.
7. Оценить метод контурных токов.

Тема №2. Однофазный синусоидальный ток и его основные параметры. Электрические цепи однофазного синусоидального тока

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

- основные параметры однофазного синусоидального тока;
- физические процессы, происходящие в последовательном и параллельном колебательных контурах;
- основные параметры последовательного и параллельного колебательных контуров;

у м е т ь :

- строить векторные диаграммы для последовательного и параллельного колебательных контуров;

о з н а к о м и т ь с я :

- с применением последовательного и параллельного колебательных контуров.

2.1. Определение однофазного синусоидального тока

Переменным током называется такой электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, изменяется по величине, сохраняя своё направление в цепи неизменным.

Наиболее часто применяется синусоидальный переменный ток, который мы и будем рассматривать.

2.2. Основные параметры однофазного синусоидального тока

Так как переменный ток в общем случае меняется по величине и направлению, то обычно одно из направлений переменного тока считается условно положительным, а другое – отрицательным. Величина переменного тока i , соответствующая данному моменту времени, называется мгновенным значением переменного тока. Максимальное мгновенное значение тока есть амплитуда I_m . Синусоидальный ток есть периодический ток. Время, в течение которого переменный периодический ток совершает полный цикл своих изменений, возвращаясь к своей исходной величине, называется периодом переменного тока T (с).

Величина, обратная периоду, называется частотой переменного тока.

$$f = \frac{1}{T}.$$

За единицу измерения частоты принят герц, который соответствует периоду, равному 1 с.

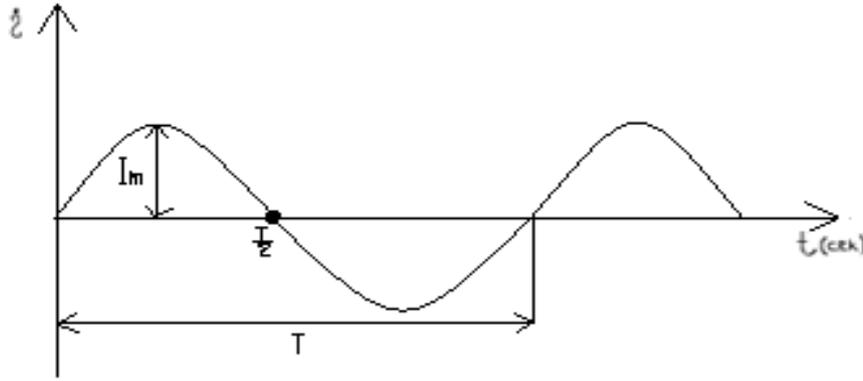


Рис. 2.1. Временной график однофазного синусоидального тока.

В простейшем случае синусоидальный ток математически выражается формулой

$$i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (2.1)$$

где ωt – некоторый угол, который называется фазой синусоидального тока. Фаза изменяется пропорционально времени t ;

ω – величина постоянная и называется угловой частотой синусоидального тока,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}. \quad (2.2)$$

Согласно выражению (2.1) получим зависимость $i = f(\omega t)$.

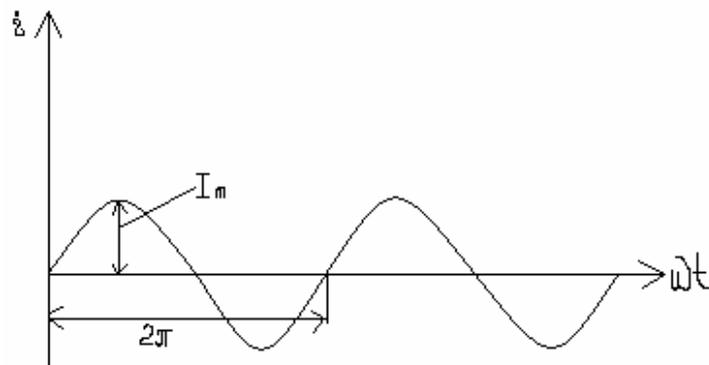


Рис. 2.2. График зависимости тока от фазы тока

За время $t = T$ из выражения (2.2): $\omega T = 2\pi$.

Периоду соответствует фаза (или угол), равная 2π .

В общем случае может оказаться, что в момент $t=0$, с которого мы начинаем наблюдение за изменением переменного синусоидального тока, мгновенное значение этого тока не равно нулю. Тогда формула для мгновенного значения синусоидального тока принимает вид:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi),$$

где $\omega t + \psi$ – фаза переменного тока;

ψ – угол, называемый начальной фазой переменного синусоидального тока.

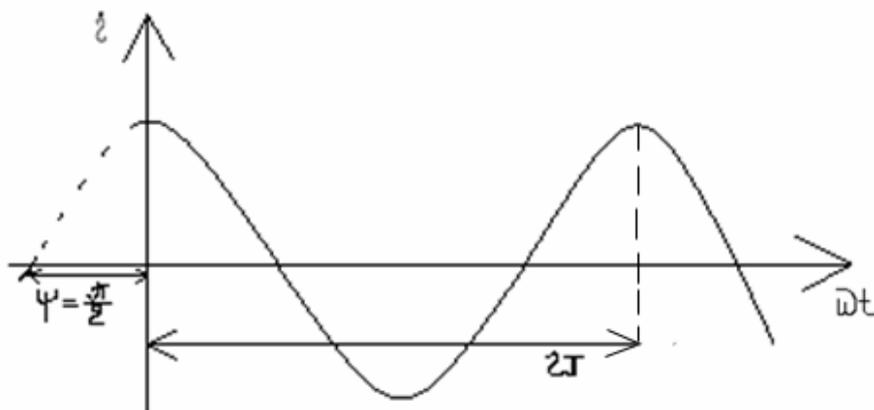


Рис. 2.3. График зависимости тока от фазы тока

При $t=0$:

$$\omega t + \psi = \psi;$$

$$i = I_m \cdot \sin \psi.$$

Начальная фаза – фаза синусоидального тока в момент времени $t=0$. Если $i_{t=0}$ положителен, то ψ положительна (см. рис. 2.3); если наоборот, то ψ – отрицательна.

Токи синусоидальные могут:

а) совпадать по фазе (рис. 2.4):

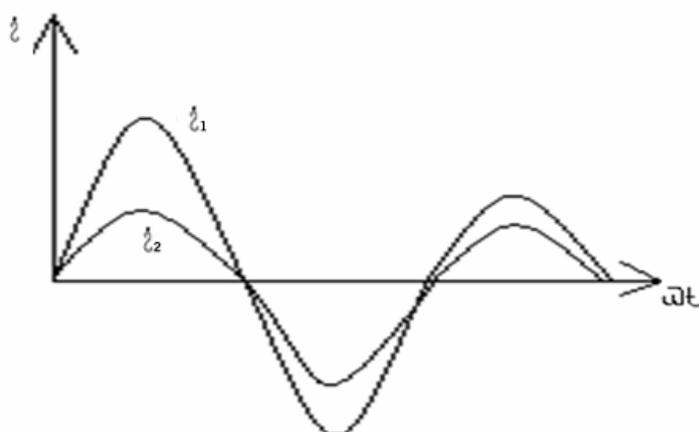


Рис.2.4. График зависимостей двух токов от фазы токов

б) сдвинуты по фазе (рис. 2.5):

$$i_2 = I_{m2} \cdot \sin \omega t;$$

$$i_1 = I_{m1} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

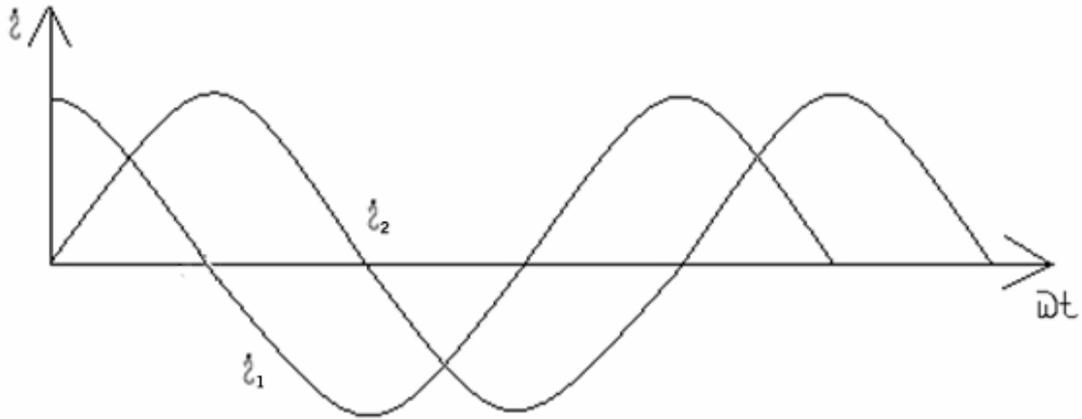


Рис. 2.5. График зависимостей двух токов от фазы токов

Действующее значение переменного тока, измеряемое амперметром:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

2.3. Избражение синусоидального тока в виде комплексного числа (символический метод)

Для упрощения записей и преобразований в теории переменных токов используют комплексные числа.

Запишем синусоидальный ток:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Запишем синусоидальный ток в виде комплексного числа – комплекса мгновенного значения тока:

$$i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) + jI_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = I_m e^{j\varphi} e^{j\omega t} = I_m e^{j\omega t}. \quad (2.3)$$

Покажем вектор амплитуды тока на комплексной плоскости. На этой плоскости ось абсцисс совмещена с осью действительных чисел (обозначена +1), а ось ординат – с мнимой осью (обозначена +j). Отложим на комплексной плоскости вектор амплитуды тока I_m .

Мнимая составляющая комплексного числа определяет синусоидальный ток (без j):

$$i' = I_m \cos(\omega t + \varphi),$$

т.е.

$$i(t) = i' + ji.$$

Тогда амплитуда тока $I_m = \sqrt{(i')^2 + i^2}$.

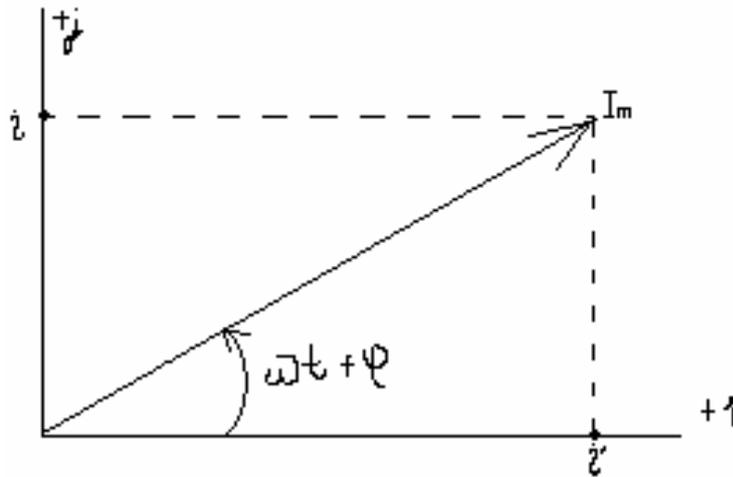


Рис.2.6. Векторная диаграмма однофазного тока.

Выражение (2.3)

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi}$$

называют комплексной амплитудой.

Вводят также комплексное действующее значение тока:

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi} = I e^{j\varphi}.$$

Аналогично выражаются в виде комплексных чисел ЭДС, напряжения, сопротивления.

Пусть на цепь действует синусоидальная ЭДС

$$e = E_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_1).$$

Тогда комплексная амплитуда ЭДС

$$\dot{E}_m = E_m \cdot e^{j\varphi_1}.$$

Пусть по цепи течет синусоидальный ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_2),$$

комплексная амплитуда тока

$$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\varphi_2},$$

тогда закон Ома для комплексной амплитуды и действующего значения токов:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}}; \quad \dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}},$$

где \dot{Z} – комплексное сопротивление цепи (\underline{Z}).

Это сопротивление

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{I}_m} = \frac{E_m e^{j\varphi_1}}{I_m e^{j\varphi_2}} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}} = \frac{E e^{j\varphi_1}}{I e^{j\varphi_2}} = Z e^{j\varphi},$$

где Z – полное сопротивление цепи (модуль комплексного сопротивления);

$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – фазовый сдвиг между ЭДС и током.

Комплексное сопротивление цепи

$$\dot{Z} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jx,$$

где R – действительная составляющая полного сопротивления;

x – мнимая составляющая полного сопротивления.

Модуль сопротивления

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2},$$
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{Z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{R}$$

2.4. Законы Кирхгофа для цепей синусоидального тока

Законы Кирхгофа для цепей синусоидального тока, выраженного в комплексной форме, аналогичны законам Кирхгофа для цепей постоянного тока.

По первому закону Кирхгофа в комплексной форме для каждого узла алгебраическая сумма комплексных действующих значений (амплитуд) токов равна нулю:

$$\sum_{k=1}^{k=n} \dot{I}_k = 0.$$

Согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме для замкнутого контура алгебраическая сумма комплексных действующих значений (амплитуд) напряжений его отдельных участков равна алгебраической сумме комплексных значений (амплитуд) ЭДС:

$$\sum_{k=1}^{k=n} \dot{U}_k = \sum_{k=1}^{k=m} \dot{E}_k.$$

2.5. Принцип получения синусоидального переменного тока

Вопрос о получении переменного тока сводится к вопросу о получении переменной ЭДС. Из физики известно, что при движении проводника относительно постоянного магнитного поля (или, наоборот, при движении

постоянного магнита относительно проводника) в проводнике создается индуцированная ЭДС. Эта ЭДС тем больше, чем сильнее магнитное поле, чем больше активная длина проводника (ℓ) и скорость его движения (ω). ЭДС возникает при пересечении проводника магнитными силовыми линиями. Чем большее количество магнитных силовых линий пересечет проводник в единицу времени, тем больше величина ЭДС. Поэтому ЭДС пропорциональна B (магнитная индукция) (чем сильнее поле, тем магнитные силовые линии будут гуще). Индуцированная ЭДС зависит от направления движения проводника: наибольшая ЭДС получается при движении проводника перпендикулярно магнитным силовым линиям (в этом случае он пересечет максимальное количество магнитных силовых линий); если же он движется вдоль магнитных силовых линий, ЭДС равна нулю (магнитные силовые линии не пересекаются).

Итак,

$$e = Blv \cdot \sin \omega t .$$

2.6. Последовательно соединённая цепь R, L, C (последовательный колебательный контур)

К цепи прикладывается синусоидальная ЭДС e , и по цепи подаётся синусоидальный ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi),$$

комплексное действующее значение которого

$$\dot{I} = I e^{j\psi} .$$

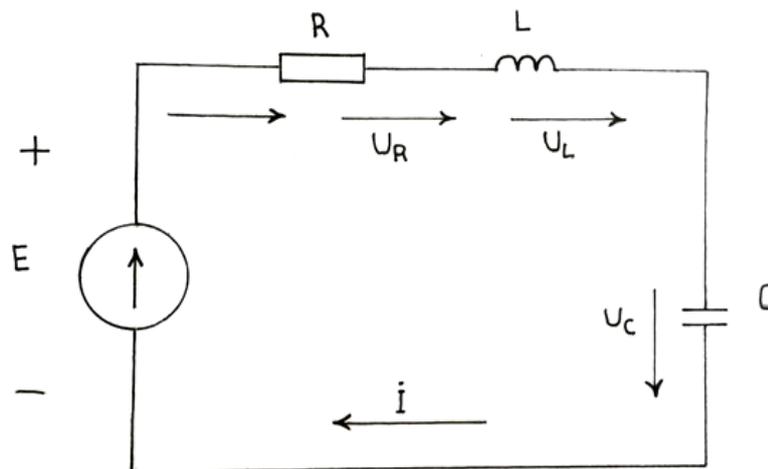


Рис. 2.7. Последовательный колебательный контур

По второму закону Кирхгофа в комплексной форме

$$\dot{E} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + jx_L\dot{I} - jx_C\dot{I} = [R + j(x_L - x_C)]\dot{I} = (R + jx)\dot{I} = \dot{I}\dot{Z},$$

где величина $\dot{Z} = R + j(x_L - x_C) = R + jx$ представляет собой комплексное полное сопротивление цепи (контура), а $x = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ – реактивное сопротивление цепи (контура). При $x > 0$ цепь будет индуктивной, при $x < 0$ – емкостной, при $x_L = x_C$ – чисто активной. Модуль полного сопротивления цепи или контура

$$Z = \sqrt{R^2 - x^2} = \sqrt{R^2 - (x_L - x_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Активное сопротивление R включает в себя внутреннее сопротивление источника и сопротивление потерь контура. В контуре наблюдаются вынужденные колебания, частота которых определяется частотой внешнего генератора ω . Комплексная амплитуда тока в контуре

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}}.$$

Амплитуда тока в контуре

$$I_m = \frac{E_m}{Z} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Анализируя последние формулы, видим, что величины I_m , Z зависят от частоты внешней ЭДС. Для определённой частоты генератора, которая называется резонансной ($\omega = \omega_{\text{рез}}$), реактивное сопротивление контура

$$x = \omega_{\text{рез}} \alpha - \frac{1}{\omega_{\text{рез}} C} = 0.$$

Отсюда резонансная частота

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha C}}, \quad f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\alpha C}}.$$

В контуре наблюдается резонанс напряжений. Во время резонанса сопротивление контура Z минимально, т.е. $Z_{\text{рез}} = R$, а амплитудное значение тока в контуре достигает наибольшей величины

$$I_{m\text{рез}} = \frac{E_m}{R}.$$

Когда частота внешней ЭДС отлична от резонансной частоты, сопротивление контура Z возрастает, а амплитуда тока в контуре уменьшается.

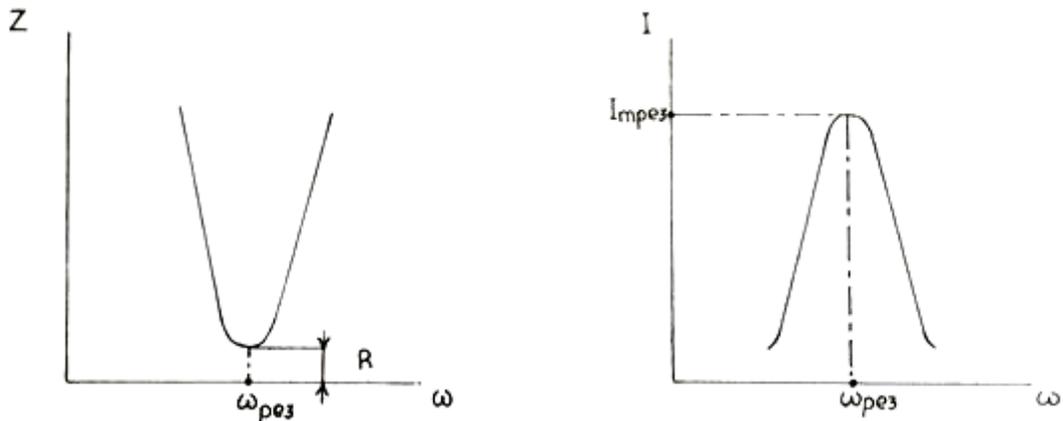


Рис. 2.8. Зависимости Z и I от частоты ω

Можно показать, что во время резонанса напряжения на каждом из реактивных элементов контура (L или C) значительно больше внешней ЭДС. Таким образом, последовательный контур обладает частотной избирательностью. Это свойство позволяет использовать этот контур во входных цепях радиоприёмных устройств для выделения нужного радиосигнала. Построим векторные диаграммы для указанных выше случаев.

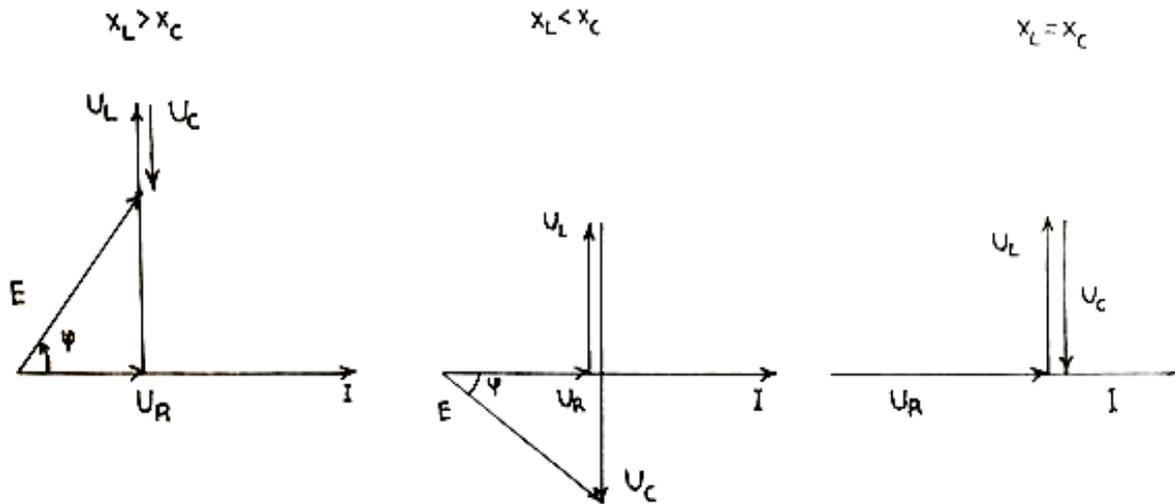


Рис. 2.9. Векторные диаграммы последовательного колебательного контура

Рассмотрим полную мощность рассматриваемой цепи. Можно показать, что в заданной цепи модуль полной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_a - Q_c)^2},$$

где $P = RI^2$, $Q_a = x_a I^2$, $Q_c = x_c I^2$;

$$S = E \cdot I; \quad P = S \cdot \cos \varphi; \quad Q = S \cdot \sin \varphi.$$

2.7. Параллельно соединённая цепь R, L, C (параллельный колебательный контур)

Пусть на параллельный контур воздействует источник гармонической ЭДС $e = E_m \cos(\omega t + \Psi)$ с внутренним сопротивлением R_i . В общей ветви будет протекать синусоидальный ток I , а в ветвях – синусоидальные токи I_1, I_2 .

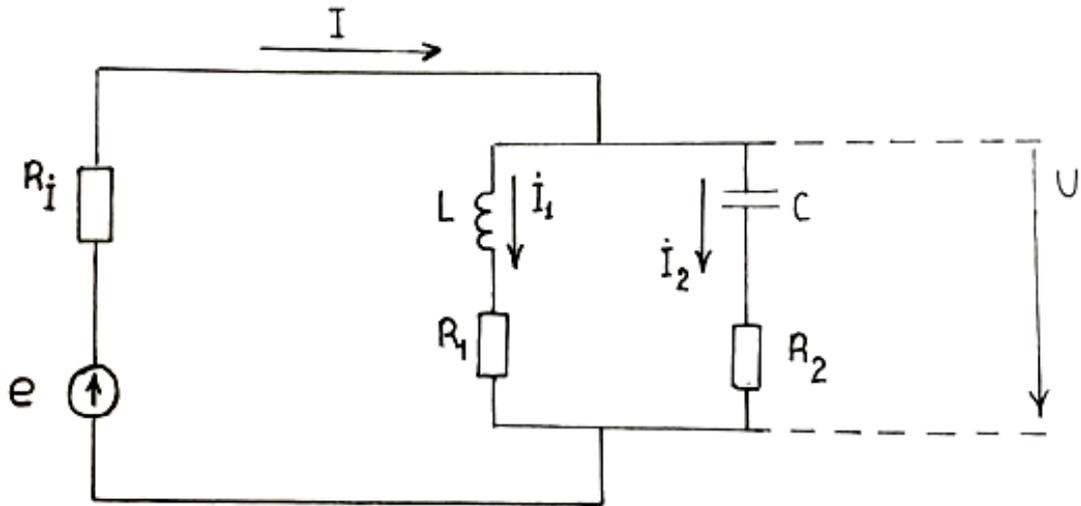


Рис. 2.10. Параллельный колебательный контур

Комплексные амплитуды токов в ветвях цепи (контура) через комплексную амплитуду напряжения на контуре можно выразить следующим образом:

$$(I_1) \quad \dot{I}_{1m} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{U}_m}{R_1 + j \cos \alpha}, \quad (I_2) \quad \dot{I}_{m2} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{Z}_2} = \frac{\dot{I}_m}{R_2 - j \frac{1}{\omega C}}.$$

Тогда комплексная амплитуда тока во внешней цепи по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{m1} + \dot{I}_{m2}.$$

Токи в ветвях контура и ток во внешней цепи содержат активную и реактивную составляющие. Комплексные амплитуды токов в ветвях контура:

$$\dot{I}_{m1} = \dot{I}_{m1a} + \dot{I}_{m1p};$$

$$\dot{I}_{m2} = \dot{I}_{m2a} + \dot{I}_{m2p}.$$

При некотором значении частоты внешней ЭДС $\omega = \omega_{\text{рез}}$ ток во внешней цепи и напряжение на контуре совпадают по фазе. В контуре наблю-

дается резонанс токов. При этом реактивная составляющая тока во внешней цепи обращается в нуль. Реактивный ток при резонансе циркулирует только в контуре, не выходя во внешнюю цепь, т.к. при резонансе реактивные составляющие токов ветвей контура (индуктивный и емкостный токи) равны по величине и противоположны по направлению, т.е. компенсируют друг друга в общей ветви и образуют ток в контуре. Так как кроме реактивных токов в ветвях контура протекают активные токи, то они и образуют при резонансе ток во внешней цепи $I_{\text{рез}}$. При этом можно показать, что ток в контуре при резонансе значительно больше тока во внешней цепи $I_{\text{рез}}$.

Найдем комплексное сопротивление контура по формуле

$$\dot{Z} = \frac{\dot{Z}_1 \times \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = \frac{(R_1 + j\omega L)(R_2 - j\frac{1}{\omega C})}{R_1 + R_2 + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}.$$

Из последнего выражения можно получить комплексное сопротивление параллельного колебательного контура

$$\dot{Z} = \frac{\frac{L}{C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)},$$

где $R = R_1 + R_2$.

Модуль сопротивления контура

$$Z = \frac{\frac{L}{C}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I}.$$

Когда $x = 0$, в контуре наблюдается резонанс токов. При этом

$$x = \omega_{\text{рез}} L - \frac{1}{\omega_{\text{рез}} L} = 0$$

и $\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Резонансное сопротивление контура $Z_{\text{рез}}$ равно:

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{CR}.$$

Зависимость модуля сопротивления контура от частоты генератора имеет вид:

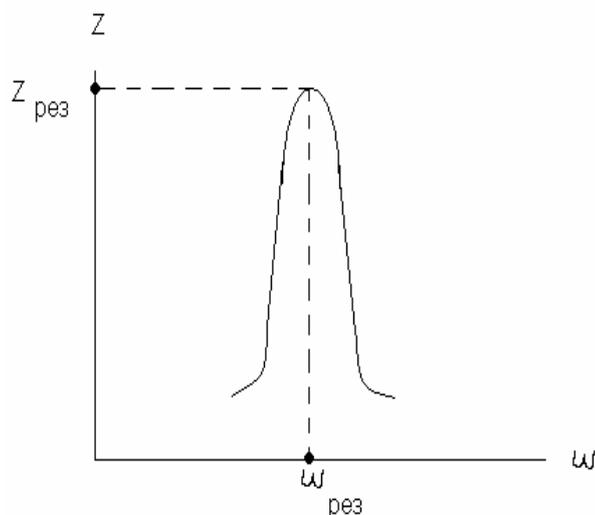


Рис. 2.11. Зависимость Z от ω

При резонансе ток во внешней цепи активный и минимальный, а сопротивление контура наибольшее. Когда частота генератора отличается от резонансной частоты, во внешней цепи дополнительно проявляется реактивная составляющая тока (индуктивный или емкостный ток), ток во внешней цепи увеличивается, сопротивление контура уменьшается. Параллельный контур обладает избирательными свойствами. Параллельный контур используется в качестве избирательной нагрузки в усилителях, генераторах и других устройствах электроники.

Ток в общей ветви $I = \frac{U}{Z}$.

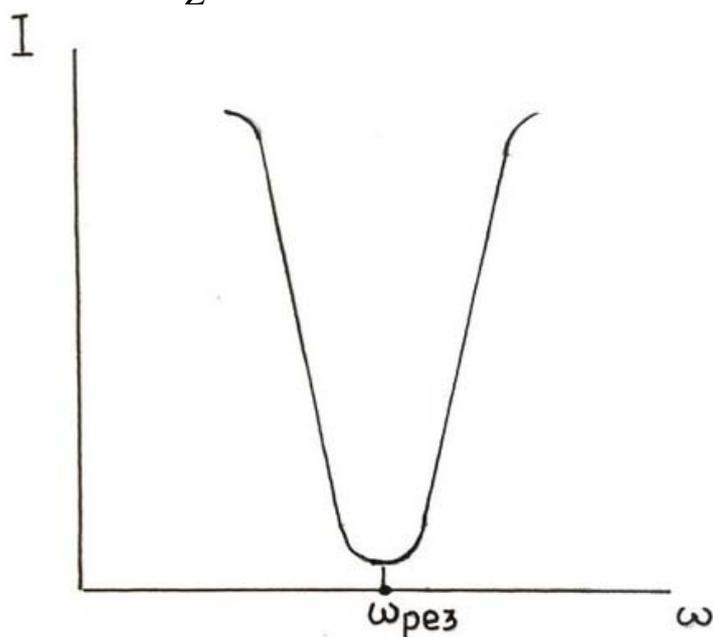


Рис. 2.12. Зависимость I от ω

Полная комплексная мощность источника

$$\dot{S} = \dot{E}\dot{I},$$

которую можно расписать

$$\dot{S} = P + \dot{S}_1 + \dot{S}_2 = R_i I^2 + \dot{U} \dot{I}_1 + \dot{U} \dot{I}_2,$$

где P – комплексная мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении источника R_i ;

\dot{S}_1, \dot{S}_2 – полные комплексные мощности ветвей контура, определяемые по формулам:

$$\dot{S}_1 = \dot{Z}_1 \dot{I}_1 I_1 = \dot{Z}_1 \dot{I}_1^2 = R_1 I_1^2 + jx_L I_1^2 = P_1 + jQ_L;$$

$$\dot{S}_2 = \dot{Z}_2 \dot{I}_2 I_2 = \dot{Z}_2 \dot{I}_2^2 = R_2 I_2^2 + jx_C I_2^2 = P_2 + jQ_C.$$

Суммарная полная мощность источника

$$\dot{S} = P + P_1 + P_2 + j(Q_L - Q_C),$$

а модуль этой мощности

$$S = \sqrt{(P + P_1 + P_2)^2 + (Q_L - Q_C)^2},$$

где $P = R_i I^2$; $P_1 = R_1 I_1^2$; $P_2 = R_2 I_2^2$; $Q_L = x_L I_1^2$; $Q_C = x_C I_2^2$

Для контура:

$$S = UI; \quad P = S \cos \varphi; \quad Q = S \sin \varphi.$$

S – мощность, подводимая к контуру.

Величину, обратную полному комплексному сопротивлению \dot{Z} , называют полной комплексной проводимостью:

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = g + jb,$$

где g – активная проводимость;

b – реактивная проводимость.

Для индуктивной ветви комплексное сопротивление $\dot{Z}_1 = R_1 + jx_L$ и комплексная проводимость:

$$\dot{Y}_1 = \frac{1}{\dot{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + jx_L} = \frac{R_1 - jx_L}{R_1^2 + x_L^2} = \frac{R_1}{Z_1^2} - j \frac{x_L}{Z_1^2} = g_1 - jb_L,$$

где $g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ – активная проводимость;

$b_L = \frac{x_L}{Z_1^2}$ – реактивная индуктивная проводимость.

Аналогично для емкостной ветви комплексное сопротивление $Z = R_2 - jx_C$ и комплексная проводимость

$$\dot{Y}_2 = \frac{1}{\dot{Z}_2} = \frac{1}{R_2 + jx_C} = \frac{R_2 - jx_C}{R_2^2 + x_C^2} = \frac{R_2}{Z_2^2} - j \frac{x_C}{Z_2^2} = g_2 - jb_C.$$

Токи в ветвях:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1p};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{2p}.$$

Изобразим векторные диаграммы.

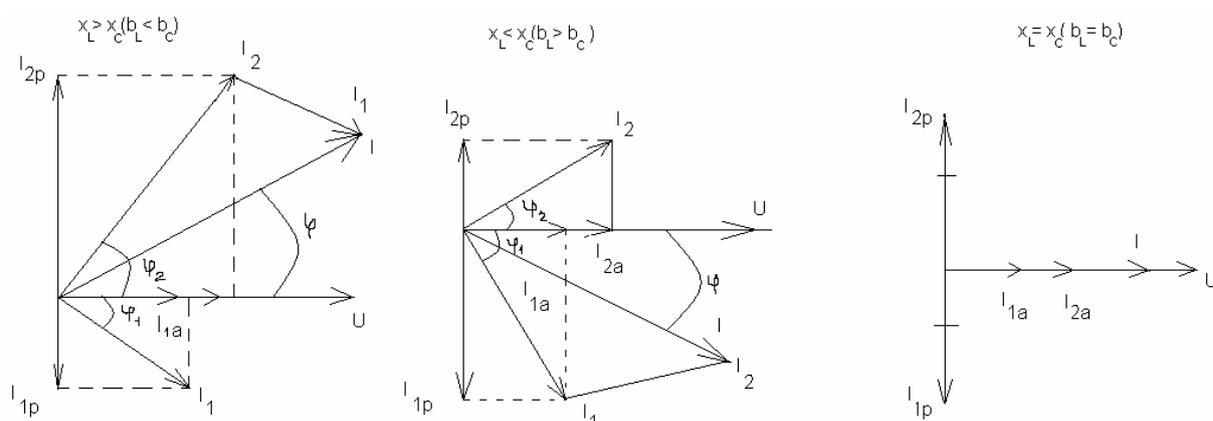


Рис. 2.13. Векторные диаграммы для параллельного контура

Активные токи в ветвях:

$$I_{1p} = b_L U = I_1 \sin \varphi_1 ;$$

$$I_{2p} = b_C U = I_2 \sin \varphi_2 ,$$

где φ_1, φ_2 – сдвиги по фазе между напряжением U и соответственно токами в ветвях I_1, I_2 .

Реактивные токи в ветвях:

$$I_{1p} = b_L U = I_1 \sin \varphi_1 ,$$

$$I_{2p} = b_C U = I_2 \sin \varphi_2 .$$

На векторной диаграмме угол φ – сдвиг по фазе между напряжением U и суммарным током I .

Можно определить мощности:

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi_1 = UI_{1a} = g_1 U^2;$$

$$P_2 = UI_2 \cos \varphi_2 = UI_{2a} = g_2 U^2;$$

$$Q_L = UI_1 \sin \varphi = UI_{1p} = b_L U^2;$$

$$Q_C = UI_2 \sin \varphi = UI_{2p} = b_C U^2.$$

Эквивалентная комплексная полная проводимость

$$\dot{Y} = \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 = g_1 + g_2 + j(b_C - b_L) = g_{\text{экв}} + j_{\text{экв}}.$$

Комплексный ток в общей ветви

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \dot{U}\dot{Y} = \dot{U}g_1 + \dot{U}g_2 + \dot{U}j(b_C - b_L) = I_a + j(I_{2p} - I_{1p}),$$

где $I_a = I_{1a} + I_{2a}$

Контрольные вопросы

1. Дать определение однофазного синусоидального тока.
2. Каковы основные параметры однофазного синусоидального тока?
3. Как выражаются комплексные параметры электрической цепи однофазного синусоидального тока: тока, напряжения, сопротивления?
4. Что такое векторная диаграмма для цепи однофазного синусоидального тока?
5. Каковы векторные диаграммы для простейших цепей однофазного синусоидального тока; с резистором, с катушкой индуктивности, с конденсатором?
6. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа для цепей однофазного синусоидального тока.
7. Как выражаются основные параметры для последовательного колебательного контура?
8. Что такое резонанс напряжений в последовательном колебательном контуре?
9. Как выражаются основные параметры для последовательного колебательного контура во время резонанса?
10. Изобразить векторную диаграмму для последовательного колебательного контура, если $x_L > x_C$.
11. Изобразить векторную диаграмму для последовательного колебательного контура, если $x_L < x_C$.
12. Изобразить векторную диаграмму для последовательного колебательного контура, если $x_L = x_C$.
13. Каково применение последовательного контура ?
14. Как выражаются основные параметры параллельного колебательного контура?

15. Что такое резонанс токов в параллельном контуре?
16. Каковы основные параметры параллельного контура во время резонанса ?
17. Какова векторная диаграмма для параллельного контура, когда $x_L > x_C$?
18. Какова векторная диаграмма для параллельного контура, когда $x_L < x_C$?
19. Какова векторная диаграмма для параллельного контура, когда $x_L = x_C$?
20. Каково применение параллельного контура?

Тема №3. Электрические цепи трехфазного синусоидального тока

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

– построение и свойства трёхфазной цепи синусоидального тока при соединении фаз генератора и нагрузки звездой;

– построение и свойства трёхфазной цепи синусоидального тока при соединении фазы генератора звездой и фазы нагрузки треугольником;

у м е т ь :

– изобразить упомянутые выше схемы трёхфазных цепей;

о з н а к о м и т ь с я :

– с применением трёхфазных цепей для передачи электрической энергии.

3.1. Общие сведения о трехфазном синусоидальном токе

На рис. 3.1 показаны три фазы генератора.

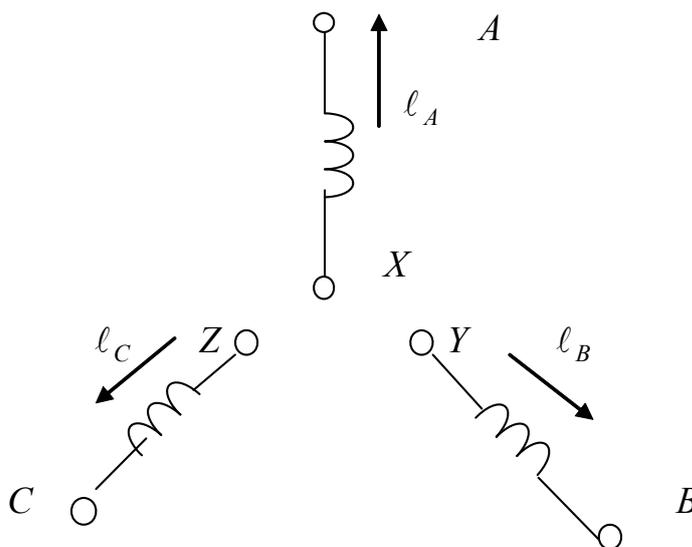


Рис. 3.1 Трёхфазная цепь. Соединение в звезду

При соединении фаз обмотки генератора в звезду их концы X , Y , Z соединяют в одну общую точку O или N , называемую нейтральной точкой генератора.

3.2. Электрическая цепь трёхфазного синусоидального тока при соединении звездой фаз генератора и нагрузки

Соответственно общая точка соединения концов фаз обмоток приемника (нагрузки) – нейтральная точка приемника O_1 или n . Провода, соединяющие начала фаз (обмоток) генератора и приемника, называются линейными; провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется нейтральным. Изображенная на рис. 3.2 цепь является четырехпроводной.

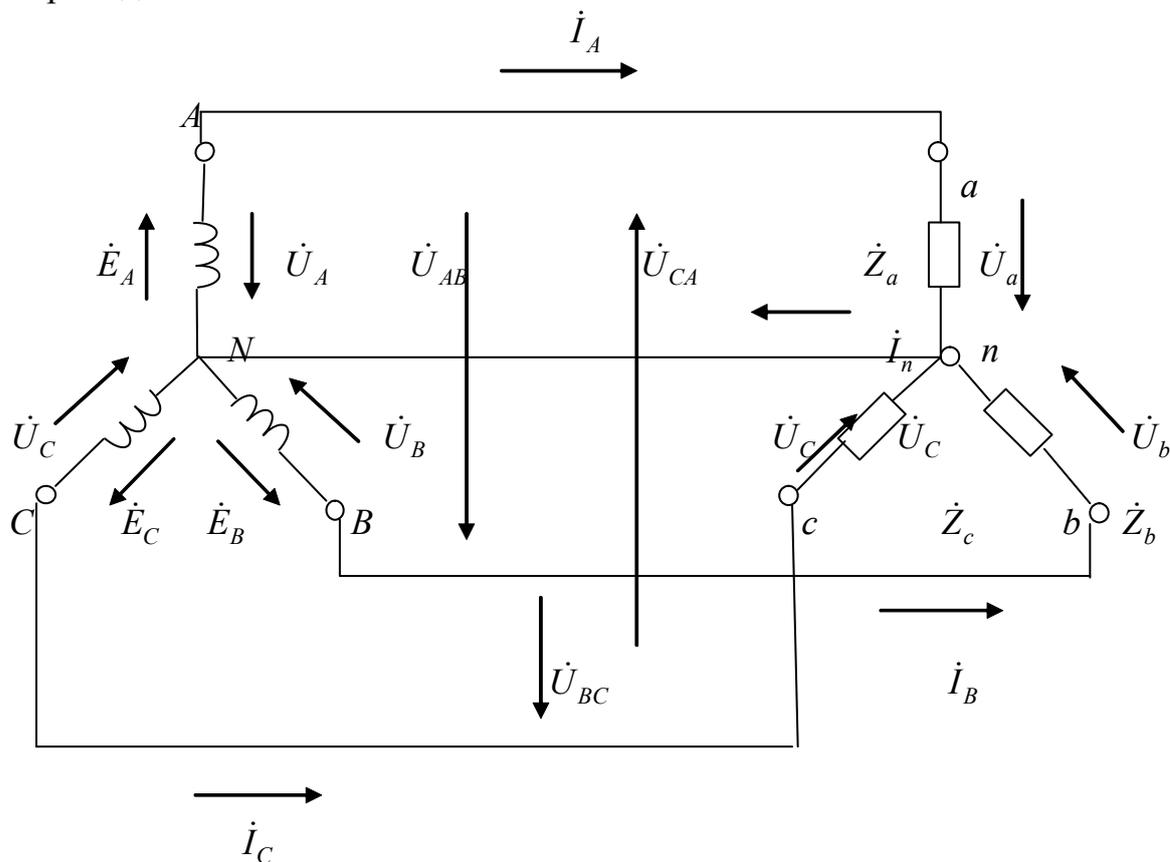


Рис.3.2. Цепь трёхфазного тока при соединении звездой фаз генератора и нагрузки

Напряжение между началом и концом каждой фазы называют фазным, а напряжения между началами фаз или между линейными проводами – линейными. На практике часто пренебрегают внутренним сопротивлением фаз генератора, поэтому фазные напряжения $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ считают численно равными фазным ЭДС и изображают их симметричной системой векторов.

За условно положительное направление фазных напряжений принимают направление от начала к концу фаз обмоток.

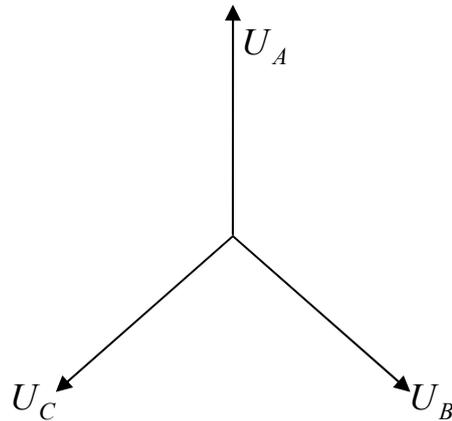


Рис.3.3. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи. Фазные – это токи в фазах генератора и приемника, линейные – токи в линейных проводах. При соединении в звезду фазные и линейные токи одинаковы: $I_{\Phi} = I_{Л}$.

При измерении линейных напряжений вольтметрами принято считать условно положительное направление тока в вольтметрах по часовой стрелке, как показано на рис. 3.4.

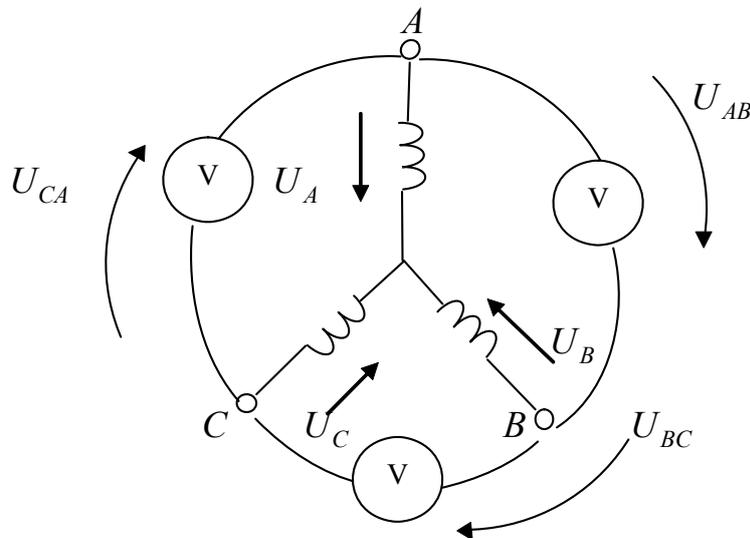


Рис.3.4. Измерение линейных напряжений

В этом случае вольтметры измеряют линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , значения которых могут быть определены из выражений, составленных по второму закону Кирхгофа для трех замкнутых контуров:

$$U_{AB} + U_B - U_A = 0, U_{BC} + U_C - U_B = 0, U_{CA} + U_A - U_C = 0,$$

$$U_{AB} = U_A - U_B, U_{BC} = U_B - U_C, U_{CA} = U_C - U_A.$$

Поэтому комплексные действующие значения линейных напряжений связаны с комплексными действующими значениями фазных напряжений следующими уравнениями:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

В соответствии с этими уравнениями построена векторная диаграмма (рис. 3.5), из которой видно, что если для симметричной системы напряжений свести три вектора линейных напряжений в звезду, то она будет опережать звезду фазных напряжений на угол 30° (см. рис. 3.3). Величина каждого из векторов линейного напряжения будет в $\sqrt{3}$ раз больше величины вектора фазного напряжения:

$$U_\Lambda = \sqrt{3} U_\Phi.$$

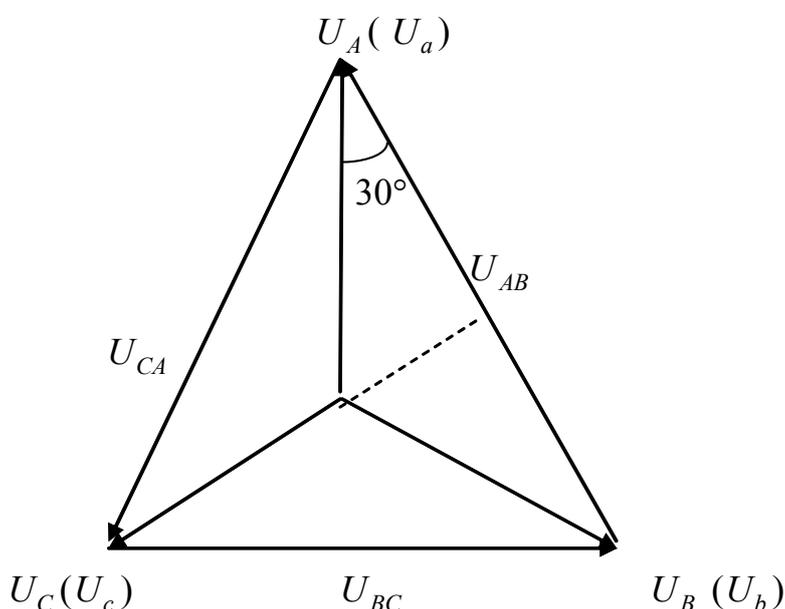


Рис. 3.5. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

Действительно. Из прямоугольного треугольника получаем выражения:

$$\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ = U_A \frac{\sqrt{3}}{2}, U_{AB} = U_A \sqrt{3}.$$

Предусмотренные ГОСТом номинальные напряжения $U_\Lambda = 380$ В и $U_\Phi = 220$ В, $U_\Lambda = 220$ В и $U_\Phi = 127$ В связаны между собой указанным выше соотношением.

Линейные токи (фазные) определяются по формулам:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_a}, \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_b}, \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_c},$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Угол сдвига фаз линейного тока по отношению к соответствующему напряжению определяется характером нагрузки. Нагрузка называется симметричной, если комплексные сопротивления фаз приемника равны между собой:

$$\dot{Z}_a = \dot{Z}_b = \dot{Z}_c = Z e^{j\varphi}.$$

Если это условие не выполняется, то нагрузка будет несимметричной.

Сопротивление нейтрального провода обычно значительно меньше сопротивления фаз приемника, поэтому часто пренебрегают падением напряжения в нейтральном проводе и считают фазные напряжения приемника равными по величине и по фазе напряжениям генератора.

При несимметричной нагрузке токи в фазах приемника различны, но благодаря нейтральному проводу напряжение на каждой фазе приемника при изменениях нагрузки практически остается неизменным и равным фазному напряжению генератора. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому в четырехпроводную сеть включают несимметричные нагрузки (например лампы накаливания) и режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

Рассмотрим векторные диаграммы: рис.3.6,а – для соединения приемника звездой с нейтралью, когда нагрузка фаз приемника активная и симметричная ($R_a = R_b = R_c$); рис.3.6,б – для соединения приемника звездой с нейтралью, когда нагрузка фаз приемника активная и несимметричная ($R_a = R_c$, обрыв фазы B).

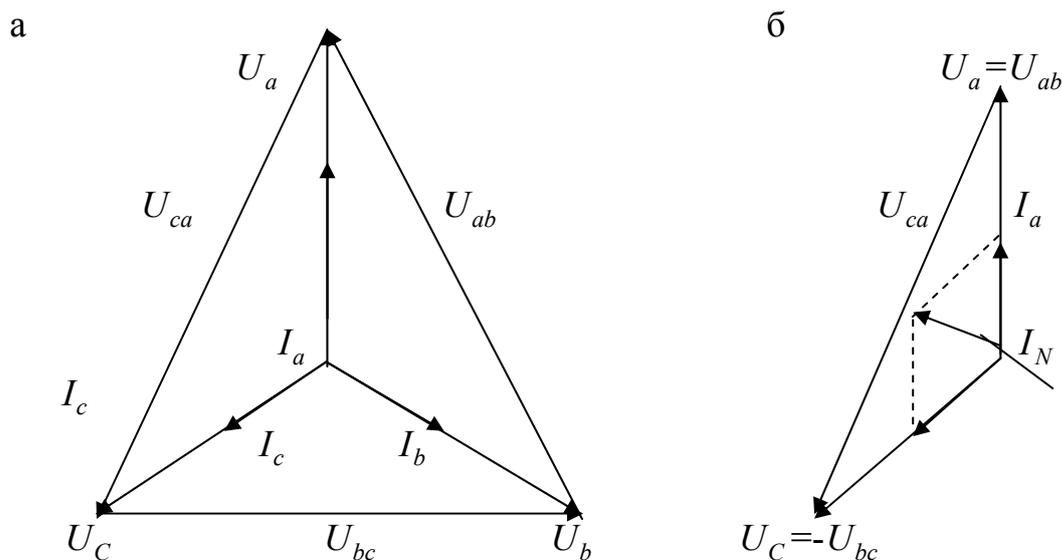


Рис. 3.6. Векторные диаграммы для трёхфазной цепи

При обрыве фазы В приемника ток $\dot{I}_B = 0$, напряжение $\dot{U}_b = 0$. Тогда $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A$, $\dot{U}_C = -\dot{U}_{BC}$. При обрыве фазы В остальные фазы работают нормально.

Теперь уберем нейтральный провод (трехпроводная цепь) и рассмотрим векторную диаграмму при обрыве фазы В.

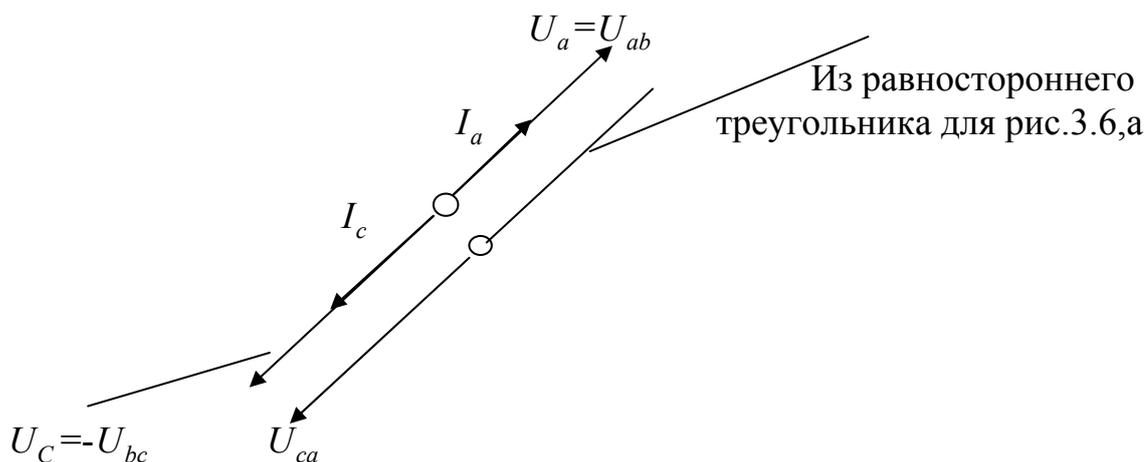


Рис. 3.7. Векторная диаграмма для трёхфазной цепи при обрыве фазы В

На фазы *a*, *c* подается напряжение U_{CA} . Напряжение $\dot{U}_b = 0$, т.к. ток $\dot{I}_B = 0$.

Напряжение \dot{U}_{CA} делится пополам между фазами приемника *a*, *c*.

Для фаз *a*, *c* фазные напряжения получаются меньше и фазные токи тоже, т.к. $\frac{U_{CA}}{2} = \frac{U_{\Delta}}{2} = \frac{1,73U_{\Phi}}{2}$. Обрыв фазы В повлиял на работу остальных фаз.

3.3. Электрическая цепь трёхфазного тока при соединении фаз генератора в звезду и фаз нагрузки треугольником

При соединении в звезду фаз симметричной нагрузки (см. рис. 3.6,а) токи в фазах будут одинаковыми по величине. Угол сдвига фаз токов по отношению к соответствующим напряжениям будет один и тот же, т.е. векторы токов образуют симметричную систему (рис. 3.8).

В этом случае ток в нейтральном проводе отсутствует, т.к. в нем трехфазные токи компенсируют друг друга:

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

Поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает. Трёхфазная цепь без нейтрального провода называется трёхпроводной.

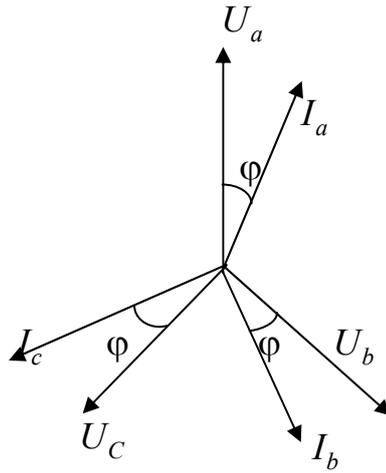


Рис. 3.8. Векторная диаграмма трёхфазной цепи при соединении фаз в звезду для симметричной нагрузки

В трехпроводную цепь при соединении нагрузки звездой включаются симметричные трехфазные приемники: электрические двигатели, электрические печи и др. Несимметричную нагрузку включать нельзя, т.к., как отмечалось ранее, работа одной фазы будет зависеть от режима работы других фаз.

Кроме соединения в звезду, широкое распространение получили трехпроводные трехфазные цепи с соединением приемников (нагрузки) в треугольник. Три фазы приемника с фазами сопротивления \dot{Z}_{ab} , \dot{Z}_{bc} , \dot{Z}_{ca} соединяют в треугольник и подключают между линейными проводами трехпроводной цепи.

В линейных проводниках текут линейные токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C , а в фазах нагрузки – фазные токи \dot{I}_{ab} , \dot{I}_{bc} , \dot{I}_{ca} .

Из схемы рис. 3.9 видно, что если пренебречь сопротивлением линейных проводов, то независимо от характера нагрузки напряжение на каждой фазе приемника равно линейному напряжению, т.е. $U_\phi = U_\Delta$, но фазные и линейные токи (в отличие от схемы соединения в звезду) не равны между собой. Принятым условно положительным направлениям линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} соответствуют условно положительные направления фазных токов. Если напряжения и сопротивления фаз нагрузки заданы, то фазные токи определяются по формулам:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{Z}_{ab}}, \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\dot{Z}_{bc}}, \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\dot{Z}_{ca}}.$$

Линейные токи определяются по фазным токам из уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов a , b и c :

$$\dot{I}_A + \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab} = 0, \quad \dot{I}_B + \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 0, \quad \dot{I}_C + \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 0.$$

Тогда

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Из уравнений следует, что любой из линейных токов равен геометрической разности токов тех двух фаз нагрузки, которые соединяются с данным линейным проводом, как указано на векторной диаграмме (рис. 3.10).

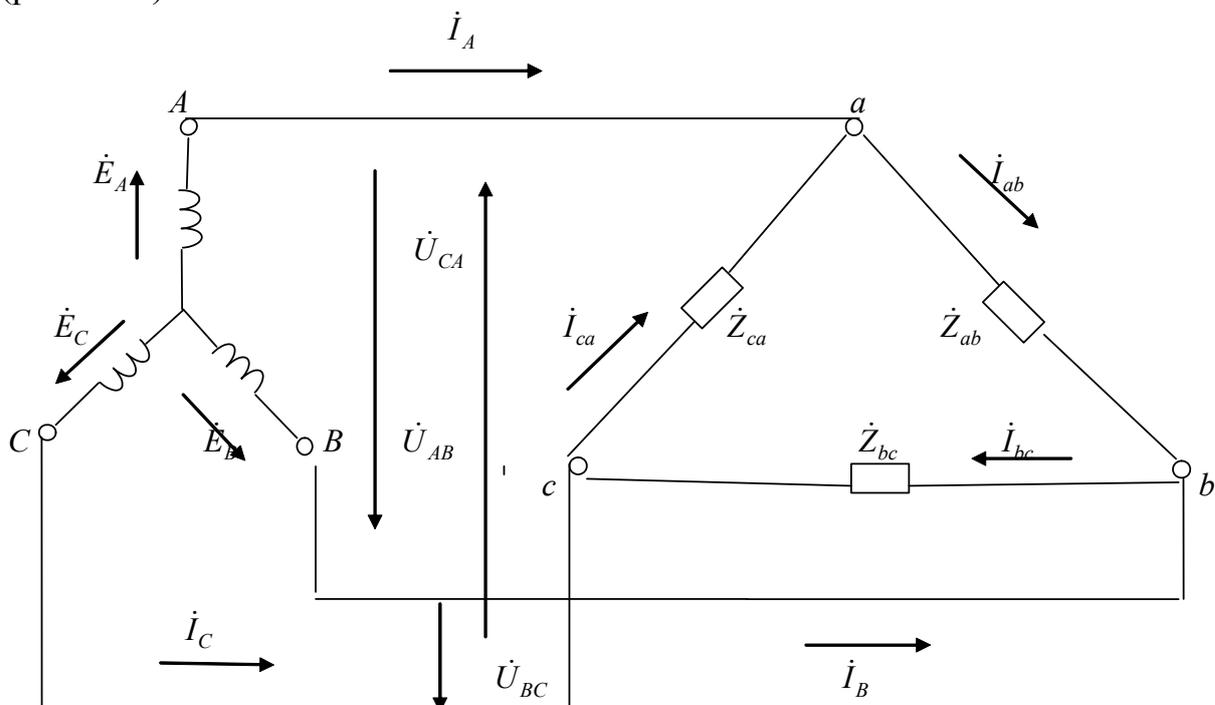


Рис. 3.9. Электрическая трёхфазная цепь синусоидального тока при соединении фаз генератора звездой, а фаз нагрузки – треугольником

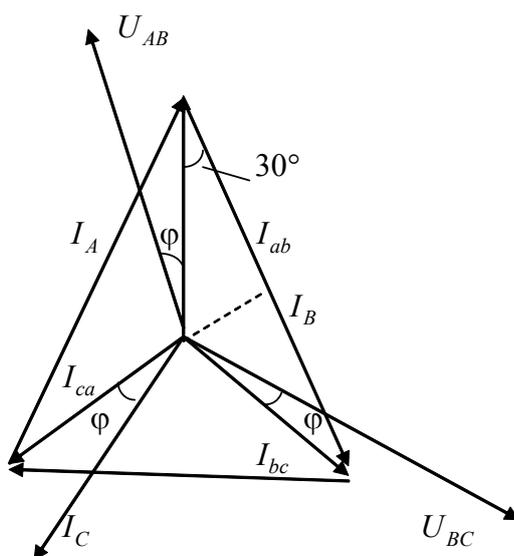


Рис. 3.10. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

Независимо от характера нагрузки геометрическая сумма линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю:

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

Векторная диаграмма (см. рис. 3.10) изображена для симметричной нагрузки ($\dot{Z}_{ab} = \dot{Z}_{bc} = \dot{Z}_{ca}$), когда фазные токи равны по величине и углы сдвига фаз токов по отношению к соответствующим фазным напряжениям (линейным) одинаковы.

В этом случае соотношения между линейными и фазными токами:

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} I_{\Phi}.$$

Как видно из прямоугольного треугольника векторной диаграммы (см. рис. 3.10):

$$\frac{I_B}{2} = \dot{I}_{ab} \cos 30^\circ = \dot{I}_{ab} \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{ab} \sqrt{3}.$$

Важной особенностью соединения фаз нагрузки в треугольник является то, что при изменении сопротивления одной из фаз будут изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах, соединенные с этой фазой. Режим работы других фаз остается неизменным, т.к. линейные напряжения генератора постоянны. Поэтому схема соединения в треугольник широко используется для включения несимметричной нагрузки, в частности ламп накаливания.

Следует иметь в виду, что в треугольник могут соединяться и фазы обмоток источников питания – генераторов или трансформаторов.

Однако на практике фазы трехфазных генераторов предпочитают соединять в звезду, т.к. при соединении в треугольник для создания заданного линейного напряжения фазы генератора должны рассчитываться на напряжение в $\sqrt{3}$ большее, чем при соединении в звезду, что приводит к увеличению размеров и стоимости генератора. Симметричную трехфазную нагрузку можно включать в трехпроводную цепь, либо в звезду, либо в треугольник, в зависимости от номинальных значений напряжений генератора и приемников. Например, имеется трехфазный электродвигатель, у которого фазная обмотка должна находиться под напряжением $U_{\Phi} = 220$ В. Тогда, если напряжение сети (линейное) $U_{\Lambda} = 380$ В, то обмотки двигателя включаются в звезду и $U_{\Phi} = \frac{U_{\Lambda}}{3} = 220$ В, а если напряжение сети $U_{\Lambda} = 220$ В, то обмотки двигателя включаются в треугольник и $U_{\Phi} = U_{\Lambda} = 220$ В.

Несимметричную нагрузку, например лампы накаливания, можно включать в четырехпроводную цепь звездой или в трехпроводную цепь треугольником, в зависимости от номинальных данных и напряжения сети.

Мощность трехфазной цепи

Для каждой фазы приемника активная (расходуемая) мощность определяется соотношением

$$P_a = U_a I_a \cos\varphi.$$

Активная мощность всей трехфазной цепи равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c.$$

Полная мощность трехфазной цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Для симметричной трехфазной цепи:

$$P = 3 P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos\varphi.$$

При расчетах трехфазных цепей удобно пользоваться линейными значениями токов и напряжений. Так, при соединении в звезду

$$U_\Phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}, I_\Phi = I_\Delta,$$

а при соединении в треугольник

$$U_\Phi = U_\Delta \text{ и } I_\Phi = \frac{I_\Delta}{\sqrt{3}}.$$

Независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность, потребляемая симметричной трехфазной цепью,

$$P = \sqrt{3} U_\Delta I_\Delta \cos\varphi_\Phi.$$

Аналогично определяются реактивная и полная мощности трехфазной цепи:

$$Q = \sqrt{3} U_\Delta I_\Delta \sin\varphi_\Phi,$$

$$S = \sqrt{3} U_\Delta I_\Delta.$$

Контрольные вопросы

1. Изобразить четырехпроводную трёхфазную цепь синусоидального тока, когда фазы генератора и нагрузки включены звездой. Показать напряжения и токи.
2. Каковы основные параметры четырехпроводной трёхфазной цепи, когда фазы генератора и нагрузки включены звездой?
3. Какова векторная диаграмма для четырехпроводной трёхфазной цепи, когда фазы генератора и нагрузки включены звездой, а нагрузка симметричная?
4. Какова векторная диаграмма для четырехпроводной трёхфазной цепи, когда фазы генератора и нагрузки включены звездой, а нагрузка стала несимметричной?
5. Каково назначение нейтрального провода в четырехпроводной цепи, когда фазы генератора и нагрузки включены звездой?
6. Изобразить трёхфазную цепь синусоидального тока при соединении звездой фаз генератора и треугольником фаз нагрузки. Показать напряжения и токи.
7. Каковы основные параметры трёхфазной цепи при соединении звездой фаз генератора и треугольником фаз нагрузки?
8. Изобразить векторную диаграмму для трёхфазной цепи при соединении звездой фаз генератора и треугольником фаз нагрузки, если нагрузка симметричная.
9. Как выражается мощность, расходуемая в трёхфазной цепи синусоидального тока?

Тема №4. Трансформаторы

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

– устройство, принцип действия, основные параметры, применение трансформатора;

у м е т ь :

– определять коэффициент трансформации;

о з н а к о м и т ь с я :

– с особенностями разных типов трансформаторов.

4.1. Назначение, конструкция и принцип действия трансформатора

Трансформаторы по назначению подразделяются на три основные группы:

– силовые;

– согласующие;

– импульсные.

Трансформатором называется электрическое устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Трансформаторы применяются для повышения или понижения напряжения.

Приоритет изображения трансформатора принадлежит русскому изобретателю Яблочкову. Простейший трансформатор состоит из двух обмоток, помещенных на общем стальном замкнутом сердечнике.

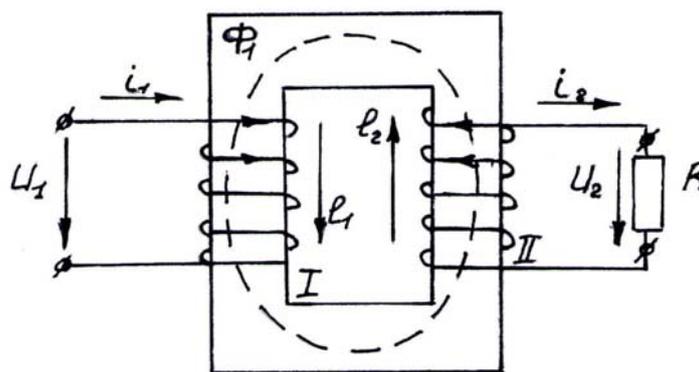


Рис. 4.1. Конструкция простейшего трансформатора

Обмотка, подключенная к источнику переменного тока, называется первичной обмоткой трансформатора, а обмотка, к которой подключается нагрузка, – вторичной обмоткой. Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции. Переменный ток, текущий на первичной обмот-

ке, создает в сердечнике переменное магнитное поле, переменный магнитный поток. Переменный магнитный поток, проходя по сердечнику, пересекает витки вторичной обмотки и индуцирует в ней ЭДС самоиндукции. Эта ЭДС создает во вторичной обмотке напряжение, которое и прикладывается к нагрузке.

Переменный магнитный поток, проходящий по сердечнику, пересекает не только вторичную, но и первичную обмотку, в которой также индуцируется ЭДС.

Напряжение, приложенное к первичной обмотке, частично падает на активном сопротивлении обмотки, и основная часть напряжения компенсирует ЭДС самоиндукции. Пренебрегая малым падением напряжения на активном сопротивлении, можно сказать, что

$$E_1 = U_1.$$

ЭДС самоиндукции распределяется по всем виткам первичной обмотки так, что ЭДС одного витка

$$e_1 = \frac{E_1}{W_1}. \quad (4.1)$$

Каждый виток первичной и вторичной обмоток пронизывается одним и тем же магнитным потоком, то есть в каждом витке вторичной обмотки индуцируется ЭДС:

$$E_2 = e_2 W_2.$$

Отсюда

$$e_1 = \frac{E_2}{W_2}. \quad (4.1)$$

Приравнявая (4.1) и (4.2), имеем:

$$\frac{E_1}{W_1} = \frac{E_2}{W_2}$$

или

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}.$$

То есть индуцированные ЭДС пропорциональны числу витков соответствующих обмоток. При холостом ходе трансформатора напряжение на вторичной обмотке равно E_2 ; как мы уже сказали, $U_1 \approx E_1$, поэтому при холостом ходе трансформатора:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = k.$$

Отношение $\frac{U_1}{U_2}$ при холостом ходе трансформатора называется коэффициентом трансформации K .

При нагрузке во вторичной цепи в ней будет протекать созданный ЭДС E_2 переменный ток, вызывающий падение напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки. Но это сопротивление обычно мало, напряжением на активном сопротивлении можно пренебречь. Тогда напряжение во вторичной обмотке U_2 (т.е. напряжение на нагрузке) равно:

$$U_2 \approx E_2.$$

Итак, поскольку между ЭДС и напряжениями разница мала, то есть

$$U_1 \approx E_1,$$

$$U_2 \approx E_2,$$

то и при нагрузке во вторичной цепи:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = k.$$

Если $k < 1$, то трансформатор повышающий, если $k > 1$, то трансформатор понижающий.

Трансформатор не является источником электрической энергии. Основываясь на законе сохранения энергии, можно учитывать, что мощность, получаемая первичной обмоткой от трансформатора, всегда равна сумме мощности, расходуемой на нагрузке, и мощности, затрачиваемой на нагрев трансформатора (эту мощность далее разберем). Последняя мощность мала, и ей можно пренебречь. Тогда

$$P_1 = P_2,$$

где P_1 – мощность, получаемая трансформатором от источника тока;

P_2 – мощность, выделяемая в нагрузке.

Каждую мощность мы берем из трансформатора, такую же мощность он отбирает у источника. Мощность P_2 зависит от напряжения U_2 и от величины сопротивления нагрузки, ибо от него зависит ток I_2 . Если уменьшить R_n , то увеличатся I_2 и P_2 , но из предыдущего следует, что должна увеличиться и мощность P_1 , а следовательно, и величина тока в первичной обмотке I_1 . Таким образом, при увеличении тока во вторичной обмотке (уменьшении R_1) сейчас же соответственно увеличивается ток в первичной обмотке (аналогично при уменьшении тока). Рассмотрим это физически. Во время холостого хода, то есть когда цепь вторичной обмотки разомкнута, магнитный поток создается только током, текущим по первичной обмотке (Φ_1). Как только цепь вторичной обмотки будет замкнута R_n , возникает ток I_2 , который будет создавать в сердечнике свое магнитное поле. По правилу Ленца это магнитное поле направлено навстречу магнитному полю первичной обмотки (противоположно при-

чине, вызвавшей поле), возникает магнитный поток противоположного направления, который уменьшает магнитный поток Φ_1 . Возникает общий магнитный поток. Но уменьшение Φ_1 вызовет уменьшение ЭДС самоиндукции E_1 и вследствие этого увеличится ток I_1 , что вызовет увеличение Φ_1 . Этот процесс закончится, когда общий магнитный поток станет равным Φ_1 , но при этом ток I_1 станет больше. Аналогично при уменьшении тока I_2 будет уменьшаться ток I_1 .

Из равенства $P_1 = P_2$ следует, что токи в первичной и вторичной обмотках не одинаковы. Если трансформатор повышающий, то есть $U_2 > U_1$, то $I_2 < I_1$, и наоборот, если понижающий:

$$P_1 = I_1 U_1,$$

$$P_2 = I_2 U_2,$$

или

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = k.$$

Во сколько раз трансформатор увеличивает (уменьшает) U , во столько же раз уменьшает (увеличивает) I .

Трансформаторы используются при передаче электрической энергии на расстояние. После генератора ставится повышающий трансформатор, который повышает напряжение и уменьшает ток в проводах линии электропередачи, и сечение проводов можно выбрать меньшим. В конце линии располагается понижающий трансформатор, преобразующий высокое напряжение в нужное и увеличивающий ток.

Устройство и типы трансформаторов

По конструкции сердечников трансформаторы разделяются на П-образные и Ш-образные. В П-образном трансформаторе каждая обмотка делится на две части, и одна половина каждой обмотки помещается на одном стержне, а другая – на втором. В Ш-образном трансформаторе все обмотки помещаются на центральном стержне. Чем больше мощность трансформатора, тем больше размеры сердечника. В сердечнике трансформатора за счет ЭДС наводятся вихревые токи. Для уменьшения вихревых токов сердечники трансформаторов собираются из тонких стальных П-образных или Ш-образных пластин, изолированных одна от другой лаком или бумагой. Тогда вихревые токи могут течь только в пределах одной пластины, и их величина уменьшается. Пластина сердечника выполняется толщиной 0,35 или 0,5 мм из стали Э4-2. Это специальная трансформаторная сталь, в которую входит 4 % кремния, что увеличивает сопротивление стали вихревым токам.

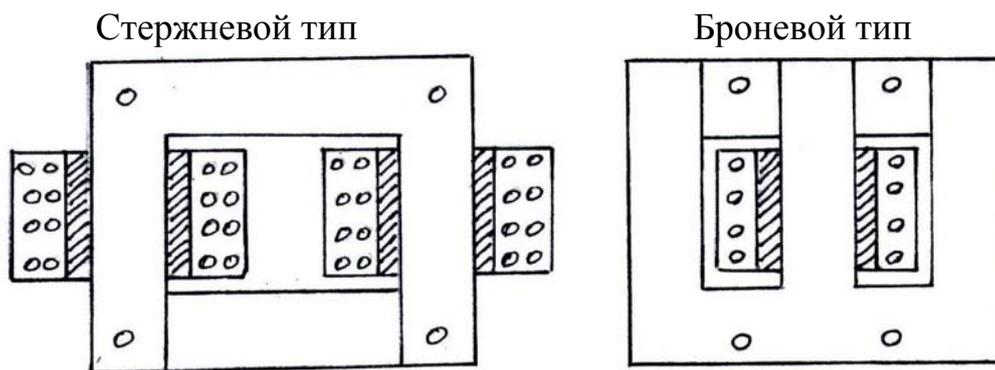


Рис. 4.2. Конструкции трансформаторов

Для уменьшения магнитного рассеяния воздушные зазоры между пластинами сердечника сводят к минимуму: пластины собирают внакладку и стягивают болтами.

Обмотки собирают на специальном каркасе из изолированного материала. Каркас располагается на сердечнике.

Обмотки наматывают изолированным медным проводом, сечение которого зависит от величины тока (I_1, I_2). Обмотку низкого напряжения располагают ближе к стержню, а сверху – обмотку высшего напряжения (к ней доступ легче, а в ней чаще неполадки).

Трансформаторы малой мощности рассчитаны на естественное охлаждение. Трансформаторы большой мощности обладают большой мощностью нагрева, поэтому они имеют радиаторы или помещаются в бак со специальным трансформаторным маслом (оно хороший изолятор и защищает обмотки от влаги). Каждая обмотка наматывается в несколько слоев. Отдельные слои часто тоже изолируются.

Силовые трансформаторы используются для передачи и распределения электрической энергии. Электрические станции обычно располагаются вблизи естественных (природных) источников энергии (река, залежи угля, торфа) и вырабатывают электрическую энергию напряжением 6–20 кВ. Для снижения потерь мощности в линиях электропередачи и уменьшения сечения проводов при передаче электроэнергии на дальние расстояния необходимо, чтобы электроэнергия передавалась при больших напряжениях и малых токах. Поэтому на электростанциях устанавливаются трансформаторы, повышающие напряжение (и понижающие ток, ибо мощность не меняется) до сотен и тысяч кВ. Большинство потребителей электроэнергии переменного тока работают при напряжении 127, 220, 380 и 660 В, поэтому в местах потребления электроэнергии необходимо устанавливать понижающие трансформаторы.

Согласующие трансформаторы используют в электронике для согласования напряжений или сопротивлений между каскадами электронных устройств.

Импульсные трансформаторы применяют в электронике для передачи импульсов напряжения (тока) из одной электрической цепи в другую.

Рассмотрим принцип работы трансформатора на примере однофазного двухобмоточного трансформатора. Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику переменного напряжения U_1 , то в ней возникает ток i_1 , который возбуждает в сердечнике – магнитопроводе – магнитный поток Φ_1 . Магнитный поток Φ_1 , замыкающийся по магнитопроводу, пересекает первичную и вторичную обмотки и индуцирует в них ЭДС e_1 и e_2 . При подключении к зажимам вторичной обмотки нагрузки с сопротивлением R под воздействием ЭДС e_1 через нее будет протекать переменный ток i_2 , и энергия из цепи первичной обмотки будет передаваться в цепь вторичной обмотки за счет переменного магнитного потока Φ_1 . Вторичный ток i_2 образует в сердечнике трансформатора свой собственный магнитный поток Φ_2 , который накладывается на поток первичной обмотки. В результате в магнитопроводе создается результирующий магнитный поток Φ , который сцепляется с витками обеих обмоток.

В паспорте трансформатора обычно указывают отношение номинальных напряжений в режиме холостого хода $U_{1н} / U_{2н}$, которое практически равно отношению ЭДС, так как при разомкнутой вторичной обмотке напряжение, приложенное к первичной обмотке, почти целиком уравновешивается её ЭДС, ибо ток i_1 небольшой ($U_1 \approx E_1$), а вторичное напряжение равно вторичной ЭДС ($U_{20} \approx E_2$). Поэтому выражение для коэффициента трансформации в режиме холостого хода:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}.$$

При исследовании процессов, наблюдаемых в реальных трансформаторах, необходимо учитывать магнитные поля рассеяния Φ_{s1}, Φ_{s2} и активные сопротивления обмоток трансформатора. Магнитные потоки рассеяния создаются токами обмоток и замыкаются соответственно вокруг витков первичной и вторичной обмоток (от северного полюса обмотки к южному) в основном через воздух. Эти потоки не участвуют в передаче энергии из первичной обмотки во вторичную. Однако в каждой из обмоток они наводят соответственно ЭДС E_{s1} .

При исследовании реального трансформатора проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора. Эти опыты характеризуют работу трансформатора в предельных режимах нагрузки: при отсутствии нагрузки ($I_2=0$) и при номинальном токе вторичной обмотки ($I_2 = I_{2н}$). На основе этих опытов

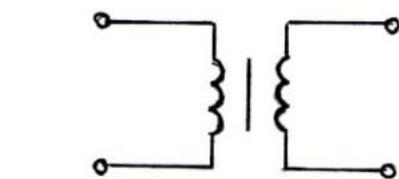


Рис. 4.3. Условное обозначение трансформатора

определяются исходные данные для расчета основных эксплуатационных параметров трансформатора. Условные обозначения трансформатора:

4.2. Опыты холостого, короткого замыкания, рабочий режим трансформатора

Опыт холостого хода

При режиме холостого хода первичная обмотка подключена к источнику переменного напряжения, а от вторичной обмотки отключена нагрузка.

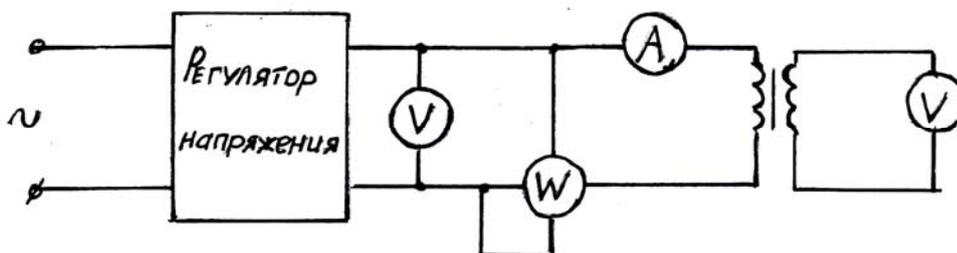


Рис. 4.4. Опыт холостого хода

С помощью регулятора синусоидальное напряжение источника плавно повышается до номинального напряжения $U_{1н}$ (или немного выше).

Активная мощность в режиме холостого хода, измеряемая ваттметром, определяется практически магнитными потерями в сердечнике (трансформаторной стали), так как при небольшом токе холостого хода потери в меди первичной обмотки незначительны. Таким образом, при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном напряжении можно определить потери в стали трансформатора $P_c = P_{он}$.

Потери в стали определяются намагничиванием сердечника и протеканием по сердечнику токов, называемых вихревыми, что приводит к нагреву сердечника при работе трансформатора. В режиме холостого хода можно определить коэффициент трансформации $k = W_1 / W_2 = U_1 / U_{20}$.

Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания производится при закороченной вторичной обмотке трансформатора.

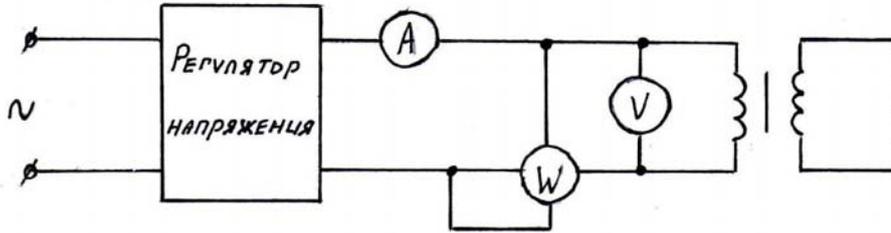


Рис. 4.5. Опыт короткого замыкания

С помощью регулятора напряжение U_1 , плавно повышается от нуля до тех пор, пока ток первичной обмотки не достигнет номинальной величины $I_{1н}$; при этом с помощью ваттметра фиксируют мощность потерь $P_{кн}$ и напряжение на первичной обмотке $U_{1к}$.

При опыте короткого замыкания $U_{1к}$ невелико и магнитный поток в магнитопроводе весьма мал. Таким образом, при опыте короткого замыкания потерями в стали можно пренебречь. Тогда мощность, потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания, расходуется на покрытие тепловых потерь в проводниках обмоток:

$$P_{кн} = I_{1н}^2 R_1 + I_{2н}^2 R_2,$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления проводников обмоток.

Рабочий режим трансформатора

В нагруженном трансформаторе (рис. 4.6) наряду с основным магнитным потоком Φ , индуцирующим ЭДС в первичной E_1 и во вторичной E_2 обмотках, возникают потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} . С учетом падений напряжений на активных сопротивлениях обмоток, всех ЭДС, наводимых в них, согласно второму закону Кирхгофа запишем уравнение электрического состояния для первичной и вторичной цепей в комплексной форме:

$$U_1 + E_1 + E_{s1} = I_1 R_1,$$

$$E_2 + E_{s2} = I_2 R_2 + U_2 = I_2 R_2 + I_2 R_{н}$$

или

$$U_1 = -E_1 - E_{s1} + I_1 R_1,$$

$$E_2 = I_2 R_2 - E_{s2} + I_2 R_{н}.$$

При замене ЭДС E_1, E_{s1}, E_{s2} падениями напряжений $-jI_1x_1, -jI_1x_{s1}, -jI_2x_{s2}$, компенсирующими ЭДС, уравнения примут вид:

$$U_1 = jI_1x_1 + jI_1x_{s1} + I_1R_1,$$

$$E_2 = I_2R_2 + jI_2x_{s2} + I_2R_H,$$

где $x_1 = \omega L_1$ – индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком Φ ;

x_{s1}, x_{s2} – индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток, обусловленные соответственно потоками Φ_{s1} и Φ_{s2} ,

$$x_{s1} = \omega L_{s1}, x_{s2} = \omega L_{s2};$$

L_1 – индуктивность первичной обмотки, на которой выделяется ЭДС E_{12} ;

L_{s1}, L_{s2} – индуктивность рассеяния обмоток.

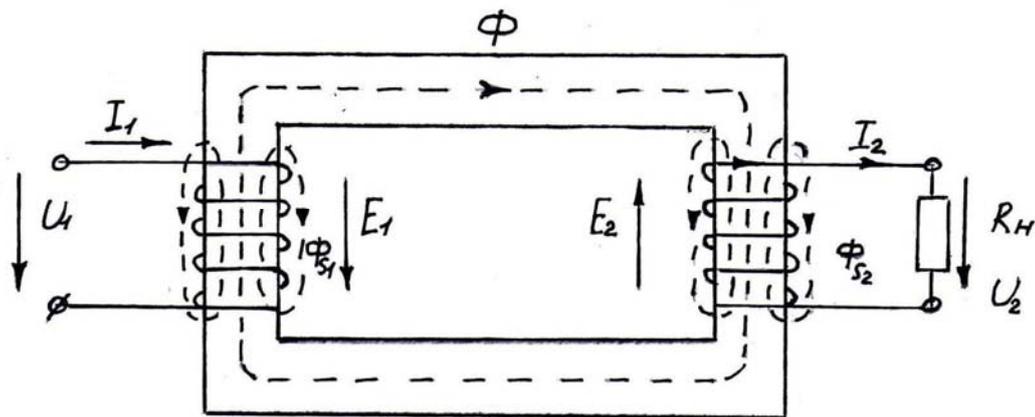


Рис. 4.6. Рабочий режим трансформатора

Схема замещения трансформатора

При составлении схемы замещения трансформатора исключается магнитная связь между обмотками трансформатора, а все элементы вторичной цепи приводятся к первичной цепи. Получаем Т-образную схему замещения реального трансформатора.

Приведенные параметры определяются формулами:

$$L'_{s2} = k^2 L_{s2}; R'_2 = k^2 R_2; R'_H = k^2 R_H; U'_2 = kU_2; I'_2 = \frac{I_2}{k}.$$

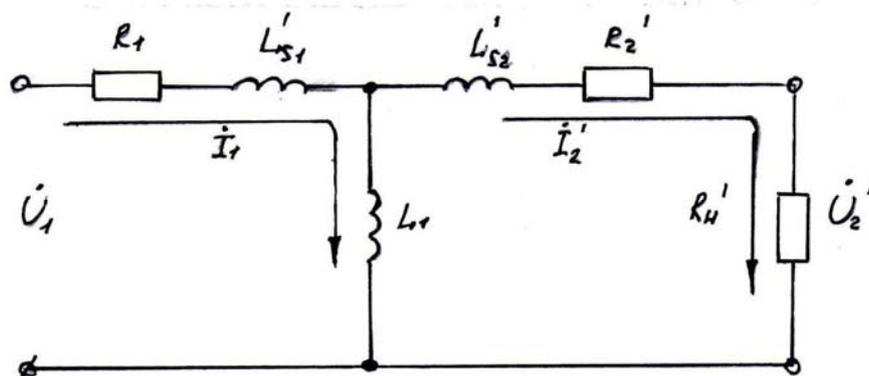


Рис. 4.7. Схема замещения трансформатора

4.3. Внешняя характеристика, коэффициент полезного действия трансформатора

При рабочем режиме с нагрузкой важной характеристикой трансформатора является внешняя характеристика. Это зависимость вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ или зависимость U_2 от коэффициента нагрузки $\beta = I_2 / I_{2н}$ при $U_1 = U_{1н}$.

Для активной нагрузки характеристика имеет вид:

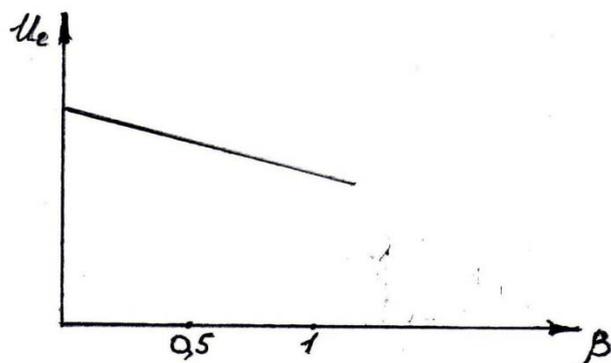


Рис. 4.8. Внешняя характеристика трансформатора

U_2 падает с ростом β , так как увеличивается падение напряжения на активном сопротивлении проводников вторичной обмотки.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия определяется формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1},$$

где P_2 – активная мощность, отдаваемая трансформатором в нагрузку;

P_1 – активная мощность, которая потребляется трансформатором.

Мощность P_1 вычисляется по формуле

$$P_1 = P_2 + P_c + P_m,$$

где P_c, P_m – мощности потерь соответственно в сердечнике и в меди проводников обмоток, определяемые по опытам соответственно холостого хода и короткого замыкания.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_m}.$$

Контрольные вопросы

1. Каково устройство однофазного трансформатора?
2. Каков принцип действия однофазного трансформатора?
3. Объяснить влияние нагрузки на работу однофазного трансформатора.
4. Каковы основные параметры однофазного трансформатора?
5. Как экспериментально определить коэффициент трансформации?
6. Как выглядит (и почему) внешняя характеристика однофазного трансформатора?
7. Каковы особенности трехфазного трансформатора?
8. Объяснить применение трансформаторов при передаче электрической энергии от генератора в нагрузку.

Тема №5. Электрические машины

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

– устройство, принципы действия, характеристики и параметры асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока;

у м е т ь :

– построить рабочие характеристики асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока;

– сравнить по свойствам разные двигатели;

о з н а к о м и т ь с я :

– с применением двигателей.

5.1. Общие сведения об электрических машинах

Электрические машины – это электромеханические устройства, которые преобразуют механическую энергию в электрическую или электрическую в механическую. Электрические машины, преобразующие механическую энергию в электрическую, называются электромашинными генераторами. Электрические машины, преобразующие электрическую энергию в механическую, называются электрическими двигателями.

Электрические машины обладают свойством обратимости, т.е. одна и та же электрическая машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Электрические машины делятся на синхронные и асинхронные (в чем суть этих машин рассмотрим далее).

Электромашинные генераторы, в частности трёхфазные синхронные генераторы, устанавливаются на электростанциях. Применяются также трёхфазные синхронные двигатели. Наибольшее распространение в промышленности получили дешёвые, простые в изготовлении и обслуживании трёхфазные асинхронные двигатели. Асинхронные трёхфазные генераторы применяются редко.

Основным недостатком асинхронных трёхфазных двигателей является сложность регулирования их частоты вращения. В тех случаях, когда необходимо регулировать частоту вращения двигателя в широких пределах, применяют более сложные в изготовлении, но легко регулируемые электрические двигатели постоянного тока.

Любая электрическая машина, в том числе трёхфазный асинхронный двигатель, состоит из двух основных частей: статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть). Трёхфазные асинхронные и синхронные двигатели имеют на статоре три фазные обмотки, по которым приходят токи, поступающие из трёхфазной сети. Эти токи, проходя по обмоткам

статора, возбуждают в двигателе вращающееся магнитное поле. Все трёхфазные асинхронные двигатели имеют конструктивно одинаковые статоры и различаются выполнением обмотки ротора. По конструкции обмотки ротора эти двигатели подразделяются на два типа: с короткозамкнутой обмоткой (короткозамкнутые) и с фазной обмоткой (или с фазным ротором, или с контактными пальцами). Вращающееся магнитное поле статора, пересекая проводники обмотки ротора, наводит в ней переменную ЭДС, и эта ЭДС вызывает в обмотке ротора ток. В результате взаимодействия проводников с током и вращающегося магнитного поля возникает сила, заставляющая ротор вращаться в направлении вращения магнитного поля статора. Так как вращение магнитного поля статора происходит асинхронно с вращением ротора двигателя, т.е. частоты вращения ротора и поля отличны (частота вращения ротора меньше), двигатель называют асинхронным.

5.2. Асинхронный двигатель: общие сведения

Асинхронный двигатель основан на принципе взаимодействия вращающегося магнитного поля трехфазного тока с токами, индуцированными этим полем в системе подвижных проводников.

5.3. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым резистором: устройство

Неподвижная часть двигателя называется статором. Статор состоит из укрепленного корпуса, внутри которого размещен сердечник, сделанный из отдельных изолированных пластин железа (для уменьшения в сердечнике вихревых токов). С внутренней стороны цилиндрического сердечника имеются пазы, в которых укрепляется обмотка статора, выполненная в виде 3-фазных обмоток $a-a^I$, $b-b^I$, $v-v^I$. Для простоты берем случай, когда каждая фазная обмотка имеет один виток. Начала обмоток – a , b , v , концы – a^I , b^I , v^I .

Начала (концы) фазных обмоток сдвинуты друг относительно друга на 120° . Между собой обмотки соединены звездой: начала соединены (a , b , v), а концы выведены (a^I , b^I , v^I) для подключения к ним сети переменного 3-фазного тока.

Магнитное поле имеет как бы одну пару полюсов и $p=1$. Полюсы вращаются.

Число оборотов магнитного поля равно частоте сети, т.е.

$$n_1 = f_1.$$

Число оборотов магнитного поля в минуту будет равно:

$$n_1 = 60 f_1.$$

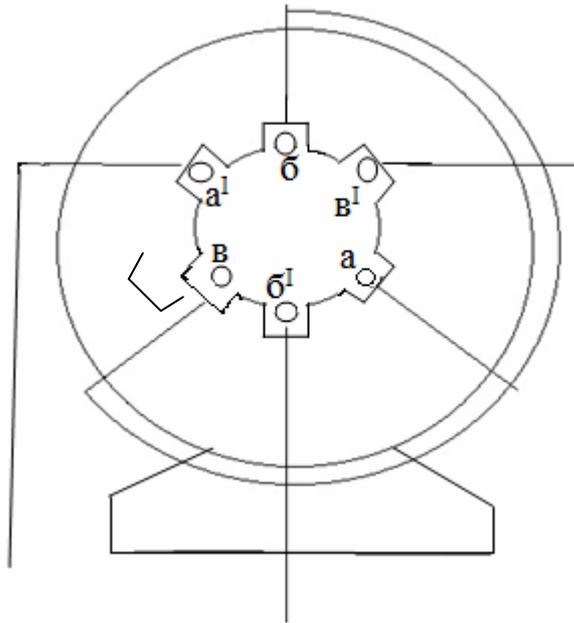


Рис. 5.1. Устройство статора асинхронного двигателя

Если статорную обмотку выполнить не из трех витков (катушек), а из шести, причем начала витков (катушек) будут сдвинуты уже не на 120° , а на 60° (соответственно и концы), и соединить первый виток (катушку) с четвертым, второй с пятым, а третий с шестым, то получим внутри статора четырехполюсное вращающееся магнитное поле, которое будет совершать вдвое меньше оборотов, чем двухполюсное поле ($p = 2$). Тогда в общем случае число оборотов магнитного поля в минуту

$$n = \frac{60 f_1}{P},$$

где P – число пар полюсов.

Внутри цилиндра статора асинхронного двигателя помещена подвижная часть, называемая ротором. Ротор представляет собой цилиндрический стержень, собранный из отдельных изолированных железных листов для уменьшения тепловых потерь от вихревых токов. В теле стержня ротора высверливаются отверстия, идущие по окружности:

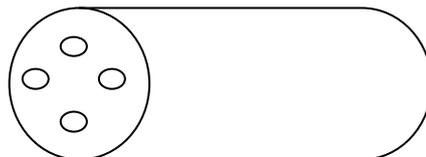


Рис. 5.2. Отверстие в стержне ротора

В эти отверстия помещаются медные стержни, скрепленные по обоим концам кольцами. Образуется как бы беличье колесо:

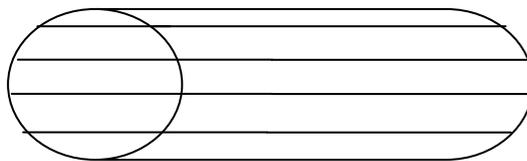


Рис. 5.3. Обмотка ротора

Стержнем с кольцами образуют обмотку ротора (беличье колесо), которое будет короткозамкнутым, ибо стержни, образующие обмотку, замкнуты накоротко двумя кольцами. Этот двигатель называется асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

Принцип действия асинхронного двигателя

При подключении обмотки статора к 3-фазной сети в статоре возникает вращающееся магнитное поле, которое будет пересекать проводники ротора и индуцировать в них синусоидальный ток. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора и индуцированного тока ротора ротор придет в движение, а он сидит на валу, вращаясь в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле. Вращающееся поле статора увлекает за собой ротор. По правилу Ленца индуцированный в роторе ЭДС будет препятствовать вращающемуся магнитному полю статора. Таким образом, индуцированный в роторе ток создает собственное магнитное поле в роторе, которое стремится затормозить вращающееся магнитное поле статора, но затормозить его невозможно. Оно вращается со скоростью, зависящей от частоты переменного тока сети и числа пар полюсов статора. Поэтому создается вращающий момент, который преодолевает тормозящее действие магнитного поля ротора и заставляет ротор вращаться. Чем быстрее будет вращаться ротор, тем меньшее число раз в единицу времени его будет пересекать вращающееся магнитное поле статора, тем меньше будет ток, индуцированный в проводниках ротора.

Если бы ротор достиг равенства скорости с вращающимся магнитным полем статора, т.е. начал бы вращаться с полем синхронно, то в проводниках ротора не мог бы индуцироваться ток, так как проводники не пересекались бы магнитным полем статора. В этом случае вращающий момент стал бы равным нулю, а ротор бы остановился. Следовательно, ротор асинхронного двигателя не может вращаться синхронно с магнитным полем статора. Поэтому двигатель называется асинхронным.

Можно провести аналогию с трансформатором, где с ростом тока нагрузки растёт ток в первичной обмотке. Здесь то же. Увеличение нагрузки на валу вызывает увеличение тока в обмотке ротора, ибо при

большей нагрузке ротор начнёт вращаться медленнее и вращающееся поле статора будет больше по времени пересекать ротор. Одновременно увеличится собственное магнитное поле ротора, которое уменьшит магнитное поле статора, уменьшатся ЭДС самоиндукции в фазных обмотках статора, а токи там возрастут. Момент вращения увеличивается, но ротор будет вращаться медленнее.

Вводят параметр скольжения

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% ,$$

где n_1 – число оборотов в минуту вращающегося магнитного поля статора;

n_2 – число оборотов в минуту ротора.

Скольжение характеризует запаздывание скорости вращения ротора относительно скорости вращающегося магнитного поля статора. В начальный момент пуска двигателя $n_2=0$ и $S=100\%$. При $n_2 < n_1$, т.е. когда ротор набирает скорость, S уменьшается, но никогда при работе двигателя не станет равной нулю.

Основным недостатком асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является большая сила тока, потребляемая им во время пуска. Во время пуска ротор неподвижен, магнитное поле статора пересекает ротор с наибольшей скоростью, ток в проводниках ротора индуцируется большой, и, следовательно, большой ток потребляется будет из сети в обмотках статора. Это часто приводит к перегоранию предохранителей. (Поэтому эти двигатели проектируют на мощность не более чем на 10 л.с.). В более мощных двигателях изменяют несколько конструкцию.

5.4. Асинхронный двигатель с фазным ротором: конструкция, принцип действия, характеристики, параметры

В этом двигателе стержни беличьего колеса заменяют обмоткой, аналогичной обмотке статора, в которую в момент пуска включается пусковой реостат. Наличие пускового реостата даёт возможность уменьшить ток в момент пуска в обмотках ротора, а следовательно, и ток в обмотках статора, т.е. токи, потребляемые из сети.

Роторная обмотка выполняется из катушек, соединённых звездой. Концы роторной обмотки присоединяются к трём контактными кольцам 1, которые укреплены на валу ротора, но от него изолированы. К кольцам прилегают щётки 2, соединённые с пусковым реостатом, который выполнен трёхфазным. Образуется соединённая звездой и замкнутая через реостат трёхфазная цепь. Пуск двигателя осуществляется следующим образом. До подачи тока в обмотку статора введён трёхфазный пусковой реостат (рис. 5.4).

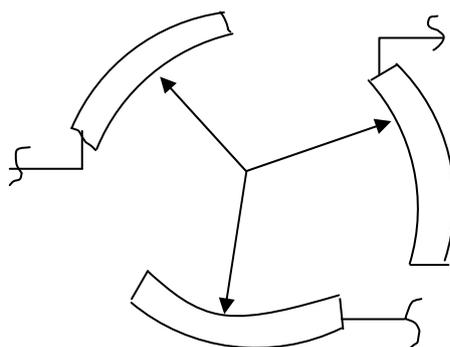


Рис. 5.4. Трёхфазный реостат

Затем подключают статорную обмотку к сети трёхфазного тока, ротор начинает вращаться, и, действуя движком, плавно выводят сопротивления, ибо при вращении ротора токи в роторной и статорной обмотках уменьшаются. После начала нормальной работы двигателя специальным рычагом кольца закорачивают друг с другом, чтобы избежать потерь энергии в проводах, идущих к реостату, и в щётках. Для уменьшения пусковых токов, кроме пускового реостата, при пуске в ход двигателя производится переключение его статорной обмотки с треугольника на звезду. При этом напряжение на каждой статорной обмотке уменьшается в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с линейным напряжением сети. Следовательно, пусковые токи в роторной и статорной обмотках уменьшаются. После того как ротор разовьёт нормальную скорость, статорную обмотку переключают на треугольник, когда каждая из фаз статора будет находиться под линейным напряжением, на которое и рассчитываются фазовые обмотки.

Число оборотов можно регулировать путём включения пускового реостата, который уменьшает ток обмотки ротора, а следовательно, вращающий момент и число оборотов ротора в минуту. Но этот способ не рационален, т.к. он сильно влияет на КПД двигателя. Для регулирования числа оборотов часто используют трёхфазный трансформатор, включаемый между сетью и статорной обмоткой.

Для изменения направления вращения асинхронного двигателя достаточно поменять местами концы двух проводов, идущих от сети трёхфазного тока.

Асинхронные двигатели просты по конструкции, удобны в эксплуатации, имеют малую зависимость числа оборотов в минуту от нагрузки. Широко применяются в промышленности.

Вращающий момент асинхронного двигателя

Момент M , развиваемый двигателем на валу, меньше электромагнитного момента, вызываемого вращающимся магнитным полем статора, на значение момента трения M_t , обусловленного силами трения ротора о

воздух; $M = M_{эм} - M_T$. При практических расчетах моментом трения, который относительно мал, пренебрегают, и момент на валу

$$M \approx M_{эм} = C \varphi_m I_2 \cos \varphi_2,$$

где C – постоянная;

φ_m – магнитный поток статора;

I_2 – ток в обмотке;

φ_2 – сдвиг по фазе между ЭДС, наводимой в роторе, и током I_2 .

Мощность, потери энергии и КПД асинхронного двигателя

Мощность, подводимая к статору асинхронного двигателя из сети,

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Основная часть подводимой из сети мощности P_1 за вычетом потерь в статоре электромагнитным путем передается в ротор в виде электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_{с1},$$

где $P_{э1}$ – мощность, идущая на покрытие электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора;

$P_{с1}$ – мощность потерь в стали (магнитопроводе) статора.

В роторе, как и в статоре, имеются электрические потери в обмотке и магнитные потери в стали сердечника. Однако на практике магнитными потерями в стали сердечника пренебрегают.

Тогда механическая мощность статора, вращающегося со скоростью Ω :

$$P_{тех} = M\Omega = P_{эм} - P_{э2},$$

где $P_{э2}$ – мощность электрических потерь в обмотке ротора.

Можно получить формулу: $P_{тех} = P_{эм} (1 - S)$. Мощность P_2 , развиваемая на валу, меньше механической мощности на значение механических потерь (потери на трении в подшипниках, потери на трении ротора о воздух):

$$P_2 = P_{тех} - P_T, \quad P_2 \sim M.$$

Отношение полезной мощности P_2 , развиваемой двигателем на валу, к мощности, потребляемой из сети P_1 , определяет КПД:

$$\eta = P_2/P_1.$$

В паспорте двигателя указывают его номинальную мощность $P_{ном}$, которая совпадает с номинальной мощностью P_2 .

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимости частоты вращения ротора n (или Ω), тока статорной обмотки I_1 , момента на валу M , КПД η и $\cos \varphi_1$ от мощности P_2 ,

развиваемой двигателем на валу при $U_1 = \text{const}$, называются рабочими характеристиками асинхронного двигателя (n_0 – частота вращения поля).

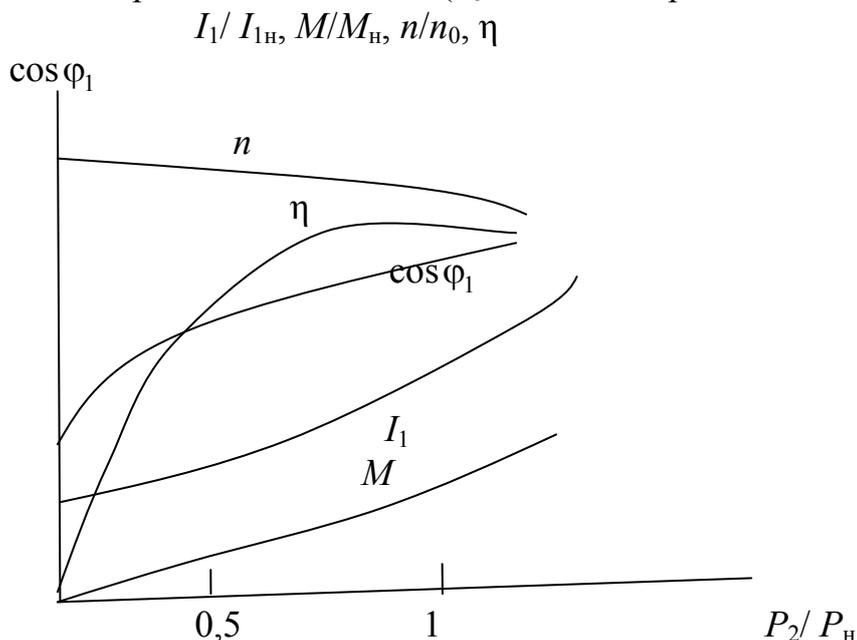


Рис. 5.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимость частоты вращения двигателя $n=f(P_2)$, является жёсткой, т.к. количество оборотов ротора $n=n_0(1 - S)$ при изменении нагрузки меняется незначительно. Это определяется небольшим значением скольжения S при номинальной нагрузке ($S_H=0,1:0,6$).

Вращающий момент $M=P_2/\Omega$. Частота вращения двигателя Ω с ростом P_2 немного уменьшается, M растёт с увеличением P_2 и с уменьшением Ω . Ток статора I_1 растёт с увеличением P_2 (нагрузки), т.к. возрастает расход электрической энергии из сети.

При увеличении нагрузки двигателя (P_2) угол φ_1 уменьшается, а $\cos \varphi_1$ растёт. Зависимость $\eta=f(P_2)$ для асинхронного двигателя имеет тот же характер, что и для трансформатора или большинства электрических машин.

5.5. Двигатель постоянного тока: устройство, принцип действия

Если якорную обмотку (роторную) генератора постоянного тока подключить к источнику постоянного напряжения, то генератор начнёт работать как электрический двигатель, т.е. превращать электрическую энергию в механическую. Это свойство электрических машин работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя называется обратимостью.

Устройство электрических двигателей постоянного тока такое же, как и генераторов постоянного тока.

Принцип действия электрических двигателей постоянного тока основан на взаимодействии постоянного тока, протекающего по обмотке якоря (ротора), $I_{я}$ и магнитного поля, создаваемого полюсами электромагнитов статора (рамка с постоянным током вращается в магнитном поле с магнитным потоком Φ). У нас будет вращаться якорь, по обмотке которого течёт постоянный ток, в магнитном поле статора. Вращающий момент двигателя:

$$M_{вр} = K I_{я} \Phi, \quad (5.1)$$

где K – коэффициент пропорциональности, учитывающий число пар полюсов статора, длину проводников обмотки якоря;

Φ – магнитный поток, создаваемый электромагнитами статора.

Разберём назначение коллектора.

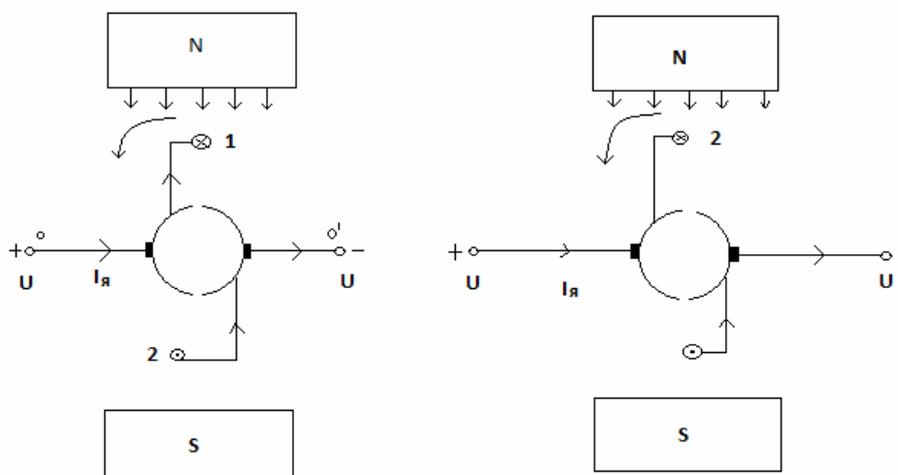


Рис. 5.6. Устройство двигателя постоянного тока

Представим себе рамку с током (берем для простоты один виток якорной обмотки, вид спереди) в поле постоянного магнита статора. К щеткам подводится постоянное напряжение U , под действием которого в рамке течёт постоянный ток $I_{я}$. Рамка начнёт двигаться согласно правилу левой руки против часовой. Рамка по инерции пройдёт положение нейтралити (ось по $0\ 0'$ – единственное место, где магнитное поле не будет действовать), и, когда проводник первой рамки окажется в нижней части, а проводник 2 – в верхней, вращающиеся вместе с проводниками полукольца коллектора пройдут к другим щёткам.

Направление тока в проводниках изменится, но направление силы, действующей на рамку, останется прежним, и рамка опять будет двигаться против часовой стрелки. Если бы вместо полуколец были кольца, связанные соответственно **только с одной щеткой**, ток в проводниках не сменил бы направления, а рамка в положении (б) стала бы вращаться по часовой стрелки. Отсюда, кстати, следует: чтобы в двигателе сменить направление

движения якоря (ротора), нужно поменять полярность напряжения U для якорной обмотки.

Обратная ЭДС якоря

При вращении якоря электродвигателя обмотка его пересекает силовые линии магнитного поля статора. Поэтому в якорной обмотке по закону индукции возникает индуктированная ЭДС, которая по правилу Ленца будет противоположна причине, её вызывающей, т.е. напряжению на якорной обмотке U . ЭДС будет уменьшать ток в якорной обмотке, вызывающий вращение якоря в магнитном поле. Тогда

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}, \quad (5.2)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление витков обмотки якоря.

Величина ЭДС E , которая называется обратной ЭДС якоря, зависит от скорости вращения якоря n , величины магнитного потока статора Φ , т.е.

$$E = K_1 n \Phi, \quad (5.3)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий число пар полюсов статора и длину активных проводников якоря обмотки.

Напряжение U , приложенное к якорной обмотке, уравнивает ЭДС E и частично падает на сопротивление проводников якорной обмотки $R_{\text{я}}$:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (5.4)$$

Во время пуска двигателя скорость вращения якоря в первоначальный момент равна нулю ($n=0$) и ЭДС E (формула (5.3)) равна нулю, поэтому ток якоря $I_{\text{я}}$ в начале пуска (формула (5.2)) достигает величины, опасной для целостности обмотки якоря. Во избежание этого на время пуска включают пусковой реостат R_n и уменьшают пусковой ток якорной обмотки. По мере того как скорость вращения двигателя будет увеличиваться, в обмотке якоря возникнет обратная ЭДС E , которая будет уменьшать ток якорной обмотки. Поэтому по мере увеличения скорости вращения якоря пусковой реостат выводят, а при нормальной скорости он выводится полностью.

Регулировка скорости вращения якоря n

Из формулы (5.3):

$$n = \frac{E}{K_1 \Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{K_1 \Phi}. \quad (5.5)$$

Так как:

$$I_{\text{я}} R_{\text{я}} \ll U, \text{ то } n = \frac{U}{K_1 \Phi}. \quad (5.6)$$

Следовательно, число оборотов в минуту n можно изменить путем изменения величины U (с помощью пускового реостата) или путем изменения тока **возбуждения в статорной обмотке (обмотке возбуждения)**, создающего магнитный поток Φ . Для этого в обмотку возбуждения ставят специальный реостат $R_{\text{рег}}$, с помощью которого изменяют ток $I_{\text{в}}$. Зависимость n от $I_{\text{в}}$ обратная. Действительно, увеличим, например, $I_{\text{в}}$ (выведем реостат), увеличится Φ , увеличится ЭДС E (формула (5.3)), уменьшатся $I_{\text{я}}$ и момент вращения. Это приведёт к уменьшению n . Изменять ток $I_{\text{в}}$ выгоднее (более экономично), чем напряжение U .

Влияние нагрузки на скорость вращения n

Предположим, что нагрузка на двигатель увеличилась. В связи с этим n уменьшится, следовательно, будет уменьшаться E , но будет увеличиваться $I_{\text{я}}$, что увеличит $M_{\text{вр}}$. Двигатель преодолеет возросшие силы сопротивления и будет продолжать вращаться, но с меньшей скоростью n . Если нагрузка уменьшится, всё произойдёт наоборот и ток $I_{\text{я}}$ уменьшится. Видно, что с ростом нагрузки из сети потребляется больший ток $I_{\text{я}}$, а при уменьшении нагрузки – меньший ток $I_{\text{я}}$.

5.6. Типы двигателей постоянного тока: характеристики, параметры

По способу питания обмотки возбуждения двигатели, как и генераторы постоянного тока, делятся на следующие виды: двигатель с независимым возбуждением, двигатель с последовательным возбуждением, двигатель с параллельным возбуждением, двигатель со смешанным возбуждением.

Недостатком первого двигателя является необходимость дополнительного источника для обмотки возбуждения. В других двигателях этого нет, т.к. в них обмотка возбуждения присоединяется к якорной обмотке и использует напряжение, подаваемое на якорную обмотку.

Двигатель с параллельным возбуждением

Он аналогичен генератору с независимым возбуждением, но только имеет один источник питания.

Из схемы видно, что обмотка возбуждения включена параллельно якорной обмотке. О назначении реостатов R_n и $R_{\text{рег}}$ уже говорилось. Ток возбуждения постоянен и равен

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}$$

если реостат $R_{\text{рег}}$ выведен. Поэтому магнитный поток статора Φ постоянен. Следовательно, вращающий момент

$$M = K I_{\text{я}} \Phi$$

будет зависеть только от тока $I_{\text{я}}$. Ранее говорилось, что при увеличении нагрузки количество оборотов в минуту n уменьшается, ЭДС в якорной обмотке уменьшается и ток $I_{\text{я}}$ увеличивается. Из формулы (5.5)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{K \Phi}$$

видно, что с увеличением $I_{\text{я}}$ n уменьшается, но это уменьшение мало, т.к. мало напряжение $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$.

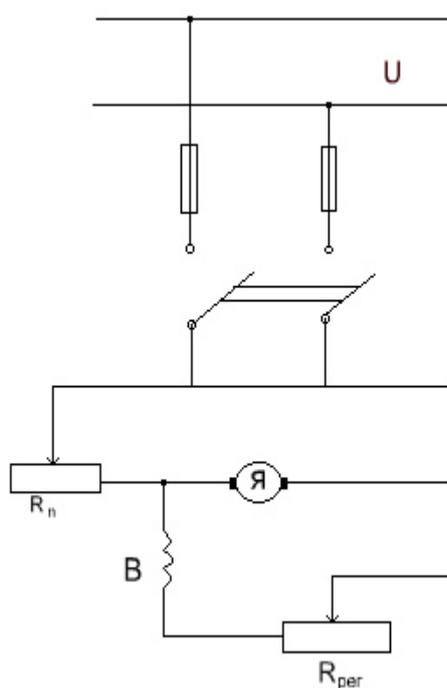


Рис. 5.7. Двигатель с параллельным возбуждением

С увеличением нагрузки и тока $I_{\text{я}}$ n уменьшается, но незначительно.

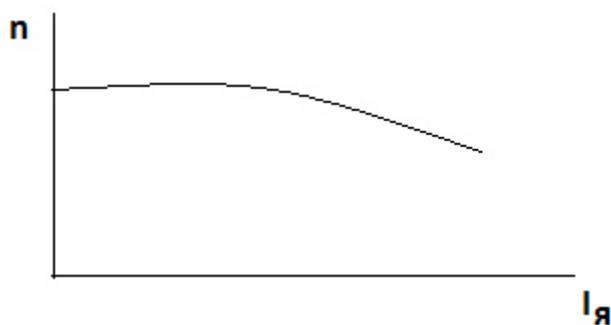


Рис. 5.8. Характеристика двигателя с параллельным возбуждением

Достоинством двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением является то, что при изменении нагрузки двигателя количество оборотов в минуту n изменится незначительно. Поэтому этот двигатель применяется там, где нужно иметь постоянным n , несмотря на изменение нагрузки, например для приведения в действие станков.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением

В этом двигателе обмотка возбуждения и якорная обмотка соединены последовательно.

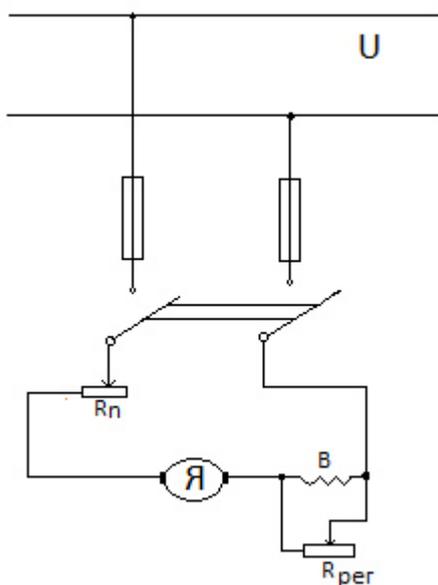


Рис.5.9. Двигатель с последовательным возбуждением

Как уже отмечалось, вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = R I_{\text{я}} \Phi.$$

Поскольку токи $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ в этом двигателе равны ($R_{\text{рег}}$ пренебрегаем), то магнитный поток статора Φ пропорционален току $I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$, и, следовательно, момент вращения пропорционален $I_{\text{я}}^2$:

$$M_{\text{вр}} \sim I_{\text{я}}^2.$$

Мы уже говорили, что в начале пуска двигателя ЭДС в якорной обмотке $E=0$, т.к. количество оборотов в минуту $n=0$, и ток $I_{\text{я}}$ большой. Следовательно, велик момент вращения $M_{\text{вр}}$. Поэтому особенностью двигателя с последовательным возбуждением является то, что он развивает во время пуска особенно большой момент вращения по сравнению с ранее рассмотренным двигателем. Для данного двигателя справедливы формулы:

$$n = \frac{E}{K\Phi} = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{в}} + R_{\text{я}})}{K\Phi},$$

т.к.

$$U = E + I_{\text{я}} (R_{\text{в}} + R_{\text{я}}).$$

Рассмотрим влияние нагрузки.

Допустим, нагрузка на двигатель увеличилась. Количество оборотов в минуту n уменьшается, уменьшается ЭДС, увеличивается $I_{\text{я}}$, и n резко уменьшается. Это объясняется тем, что несколько уменьшается числитель верхней формулы и увеличивается одновременно знаменатель, т.к. увеличивается магнитный поток $\Phi \sim I_{\text{я}}$.

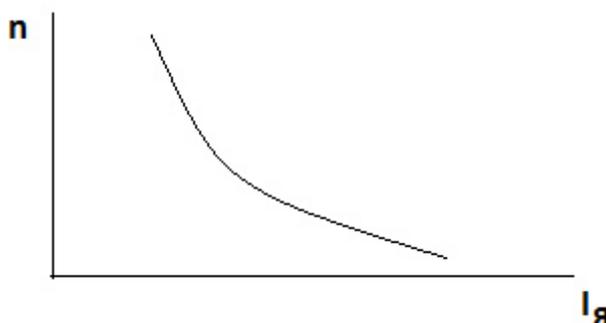


Рис. 5.10. Характеристика двигателя с последовательным возбуждением

Итак, имеем резкую зависимость n от нагрузки, т.е. от тока $I_{\text{я}}$. Если нагрузку двигателя снять с двигателя, возрастут n , E , уменьшатся $I_{\text{я}}$, Φ , и n резко увеличится. Двигатель пойдёт вразнос. Это существенный недостаток двигателя. Следовательно, его нельзя оставлять недогруженным.

Благодаря особенностям двигателя развивать большой момент вращения при пуске и при большой нагрузке, он нашел применение как тяговый двигатель трамваев, поездов.

Двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением

Двигатель имеет две обмотки возбуждения: B_1 , которая включена последовательно с якорной обмоткой, B_2 , которая включена параллельно якорной обмотке.

Рабочие характеристики определяются тем, действие какой из обмоток возбуждения преобладает.

Такие электродвигатели применяют там, где нагрузка резко неравномерная, например при работе экскаватора. Когда ковш экскаватора заполнен, то требуется при малом количестве оборотов в минуту развивать большой момент вращения. Тогда используется свойство двигателя с последовательным возбуждением (обмотка B_1). Когда ковш освободится от груза, необходимы постоянство числа оборотов в минуту n и небольшой момент вращения. Тогда используется характеристика двигателя с параллельным возбуждением (обмотка B_2).

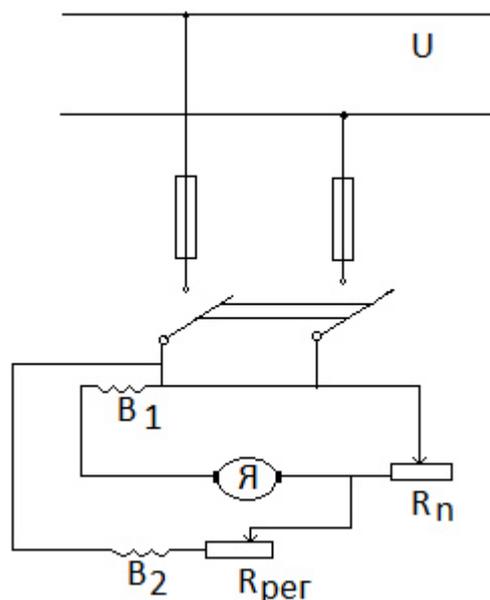


Рис. 5.11. Двигатель со смешанным возбуждением

Если для экскаватора применить двигатель с последовательным возбуждением, то он будет удобен в момент подъема груза, а в момент его сброса двигатель пойдёт вразнос. Здесь это не произойдёт, т.к. есть обмотка возбуждения B_2 . Если для экскаватора применить двигатель с параллельным возбуждением, то он будет работать с почти постоянным количеством оборотов в минуту с грузом и без груза и не сможет развивать большой вращающий момент при поднятии груза. Здесь это не произойдёт, т.к. есть обмотка возбуждения B_1 .

Регулирование частоты вращения

Частоту вращения двигателя постоянного тока можно регулировать изменением магнитного потока статора Φ путем изменения тока возбуждения с помощью реостата в цепи якоря.

Изменение направления вращения

Изменение направления вращения можно осуществить изменением направления тока в обмотке якоря $I_{я}$ или путем изменения направления магнитного потока статора (ток возбуждения). На практике это производят путем переключения проводов, подводящих ток к обмотке якоря или к обмотке возбуждения.

Свойство саморегулирования

Для того чтобы двигатель вращался с определённой частотой n , развиваемый или вращающий момент M должен быть равным создаваемому нагрузкой тормозному моменту M_T :

$$M = M_T = K \Phi I_{я}.$$

Если из-за изменения нагрузки изменяется тормозной момент M_T и равенство вышеприведенное нарушается, то частота вращения двигателя увеличивается или уменьшается до тех пор, пока снова вращающий момент M не станет равным тормозному. Таким образом, двигатели постоянного тока обладают свойством саморегулирования – способностью при изменении нагрузки автоматически устанавливать новое значение частоты вращения, при которой двигатель работает устойчиво. Роль регулятора играет противоЭДС (обратная ЭДС), наводимая в обмотке якоря.

Допустим, что тормозной момент M_T , создаваемый нагрузкой, уменьшился и стал меньше вращающего момента двигателя, вследствие чего частота вращения последнего начала возрастать. С увеличением n возрастает обратная ЭДС E , уменьшается ток якоря I_a и вращающий момент двигателя не станет равным тормозному. Тогда рост частоты вращения прекратится. Аналогично протекает процесс при увеличении тормозного момента, когда $M < M_T$. Частота вращения начинает падать, обратная ЭДС уменьшается. Возрастают ток якоря и вращающий момент двигателя M . Этот процесс прекратится, когда $M = M_T$. Потребляемый обмоткой якоря ток I_a всегда пропорционален тормозному моменту на валу M_T .

Для оценки эксплуатационных свойств двигателей широко используются рабочие характеристики, представляющие зависимость потребляемой мощности $P_{эл}$, тока якоря I_a , частоты вращения n , вращающего момента M и КПД η от мощности на валу P при $U = \text{const}$, $I_b = \text{const}$.

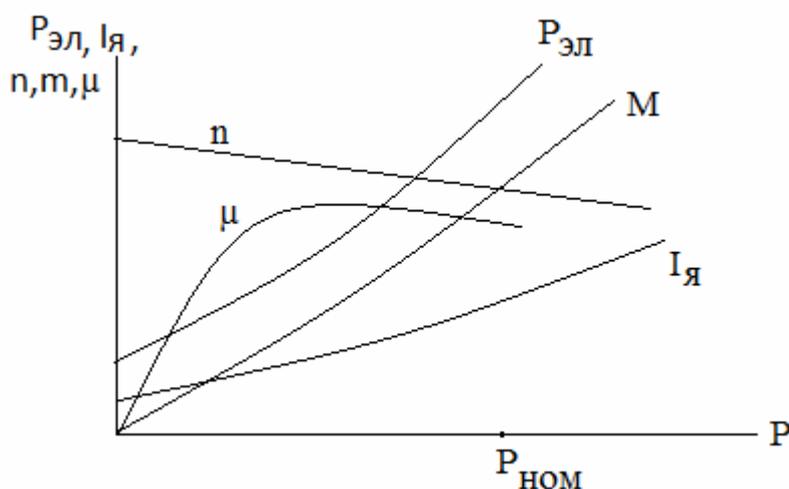


Рис.5.12. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением

С увеличением нагрузки частота вращения двигателя несколько уменьшается и характеристика $n = f(P)$ линейна. Момент вращения растет практически прямо пропорционально нагрузке, т.е. характеристика $M = f(P)$ тоже линейна. Характеристики $P_{эл} = f(P)$, $I_a = f(P)$ имеют вид, характерный для любых электрических машин.

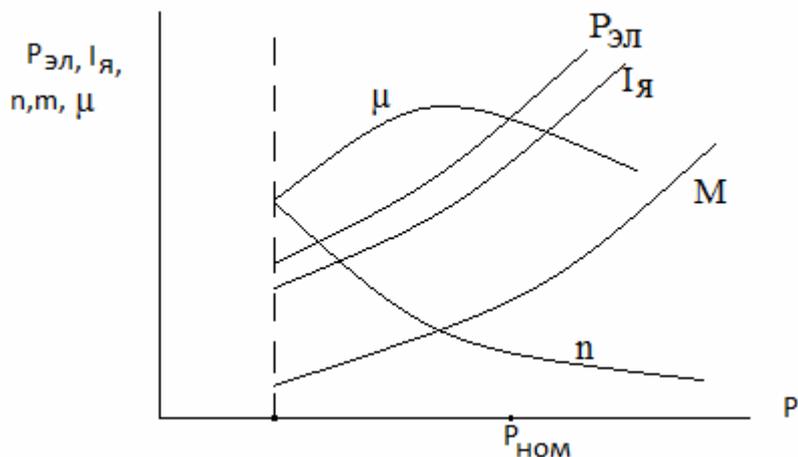


Рис.5.13. Рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением

Характеристики $M=f(P)$, $n=f(P)$ не линейны, а характеристики $\eta = f(P)$, $P_{эл}=f(P)$, $I_{я} = f(P)$ имеют вид, подобный зависимостям для двигателя параллельного возбуждения. Характеристики начинаются от P_{min} , т.к. при мощности на валу, меньшей P_{min} , частота вращения становится недопустимо большой.

Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Каков принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объяснить влияние нагрузки на работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
4. Каковы основные параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
5. Каковы рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
6. Каковы особенности и преимущества асинхронного двигателя с фазным ротором?
7. Объяснить применение асинхронного двигателя.
8. Объяснить устройство двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
9. Объяснить принцип действия двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.
10. Объяснить влияние нагрузки на работу двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

11. Каким образом можно изменить количество оборотов ротора двигателя постоянного тока с независимым возбуждением?

12. Почему в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением во время пуска возникает большой ток якоря и как этот эффект уменьшить?

13. Каковы особенности двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением?

14. Каковы особенности двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением?

15. Каковы особенности двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением?

16. Где применяется двигатель постоянного тока?

Тема №6. Полупроводниковые диоды. Биполярный транзистор

Изучив материал темы, студенты должны:

з н а т ь :

– устройство, принцип действия, характеристику и основные параметры полупроводниковых диодов, биполярного транзистора;

у м е т ь :

– объяснить вольт-амперную характеристику для разных диодов, управление биполярным транзистором;

о з н а к о м и т ь с я :

– с особенностями и применением специализированных диодов, биполярных транзисторов.

6.1. Полупроводниковые диоды

Определение и назначение полупроводниковых приборов

Электронными называются такие приборы, действие которых основано на физических процессах, происходящих при движении заряженных частиц в вакууме, газе или твердом теле. Электронные приборы нашли широкое применение в различных областях науки, техники, военного дела.

По принципу действия и физическим явлениям, происходящим в электронных приборах, их делят на электровакуумные и полупроводниковые. Электровакуумные приборы, в свою очередь, подразделяют на высоковакуумные и ионные (газоразрядные). Принцип действия высоковакуумных приборов основан на перемещении электронов между электродами при давлении газа внутри баллона порядка 10^{-1} в 10^{-5} степени Па.

Действие ионных приборов основано на использовании электронного разряда в газе при давлении газа в баллоне порядка 10^{-1} в 10^3 степени Па и выше, действие полупроводниковых приборов связано с использованием перемещения электронов и дырок на границах полупроводников с различными видами проводимостей.

По сравнению с электровакуумными приборами полупроводниковые приборы имеют ряд преимуществ: значительно больший срок службы; малые габариты и вес; большую механическую прочность; меньшее потребление мощности, а следовательно, больший КПД; возможность работы при значительно меньших напряжениях источников питания.

Но полупроводниковые приборы в настоящее время обладают целым рядом недостатков: значительный разброс параметров внутри одного и того же типа приборов; зависимость характеристик и параметров приборов от температуры и уровня радиоактивности; относительно узкий диапазон частот; чрезмерная чувствительность к электрическим нагрузкам.

Преимущества полупроводниковых приборов позволяют создать высоконадежную, малогабаритную, экономичную радиоаппаратуру. Успешное развитие полупроводниковых приборов, конечно, не может привести к полному вытеснению электровакуумных приборов.

Краткие сведения об электронно-дырочном переходе

В полупроводниках различают собственную и примесную проводимости. Чистый полупроводник при $T=0^\circ\text{K}$ ведет себя как идеальный изолятор. Вследствие нагревания такого полупроводника ($T > 0^\circ\text{K}$) в нем возникает генерация пар носителей заряда электрон-дырка. После приложения к кристаллу полупроводника напряжения в нем возник электрический ток. Такая электропроводность, обусловленная перемещением электронов и дырок теплового происхождения, называется собственной. Она зависит от температуры и возрастает с ее увеличением.

Примесная электропроводность образуется в результате введения в полупроводник атомов примесей. В зависимости от того, атомы какого вещества вводятся в кристалл полупроводника, можно получить полупроводник с электронной (типа n) или дырочной (типа p) проводимостью. В полупроводнике с примесной проводимостью всегда существует собственная проводимость. При нормальной комнатной температуре все атомы примесей ионизированы. В полупроводнике типа n преобладают электроны, образованные в основном за счет примесей и в небольшом количестве – за счет собственной проводимости, а в полупроводнике типа p – дырки, образованные в основном за счет примесей и в небольшом количестве – за счет собственной проводимости. Названные носители являются основными носителями тока. Кроме того, в полупроводнике типа n имеется небольшое количество дырок собственной проводимости, а в полупроводнике типа p – небольшое количество электронов собственной проводимости. Эти носители являются неосновными носителями тока.

Электронно-дырочный или p - n -переход образуется между p - и n -областями полупроводника. Диффузия основных носителей из одной области в другую создает диффузионный ток $I_{\text{диф}}$ через p - n -переход. В результате этого p -область приобретает отрицательный заряд, а n -область – положительный заряд, что обусловлено ионами примесей. В граничном слое образуется электрическое поле (или потенциальный барьер) с напряженностью $E_{\text{зап}}$ (рис. 6.1,а). Это поле, называемое запирающим, затрудняет диффузию основных носителей через p - n -переход и вызывает дрейф неосновных носителей, создающих ток проводимости $I_{\text{пров}}$, встречный по направлению току $I_{\text{диф}}$ (рис. 6.1,а). Устанавливается равновесие, при котором сохраняется равенство $I_{\text{диф}} = I_{\text{пров}}$ и результирующий ток через p - n -переход отсутствует. Этому соответствует определенная контактная разность потенциалов ϕ_k потенциального барьера (рис. 6.1, б).

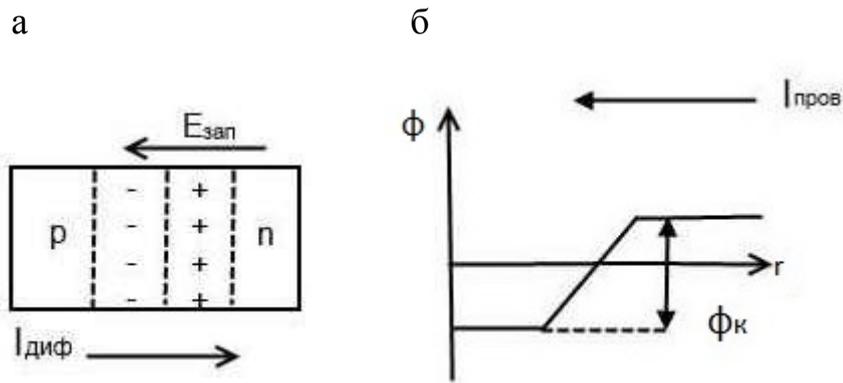


Рис.6.1. Образование $p-n$ -перехода

Если к $p-n$ -переходу приложить внешнее электрическое поле напряженностью $E_{вн}$ путем подключения полупроводника к источнику ЭДС E , как показано на рис.6.2,а, то высота потенциального барьера уменьшится и станет равной $\phi = \phi_k - E$ (рис. 6.2, б), ширина барьера также уменьшится. Дрейфовый ток снизится, а диффузионный возрастет. Через $p-n$ -переход будет протекать большой ток основных носителей, называемый прямым током ($I_{пр}$), а включение $p-n$ -перехода называется прямым включением, при обратном включении $p-n$ -перехода (рис.6.2, в) высота потенциального барьера станет равной $\phi = \phi_k + E$ (рис.6.2, г), т.е. ширина барьера увеличится. Ток проводимости увеличится, а диффузионный ток уменьшится. Через $p-n$ -переход будет протекать малый ток неосновных носителей, называемый обратным током. Так как $I_{пр} \gg I_{обр}$, $p-n$ -переход обладает вентильными свойствами.

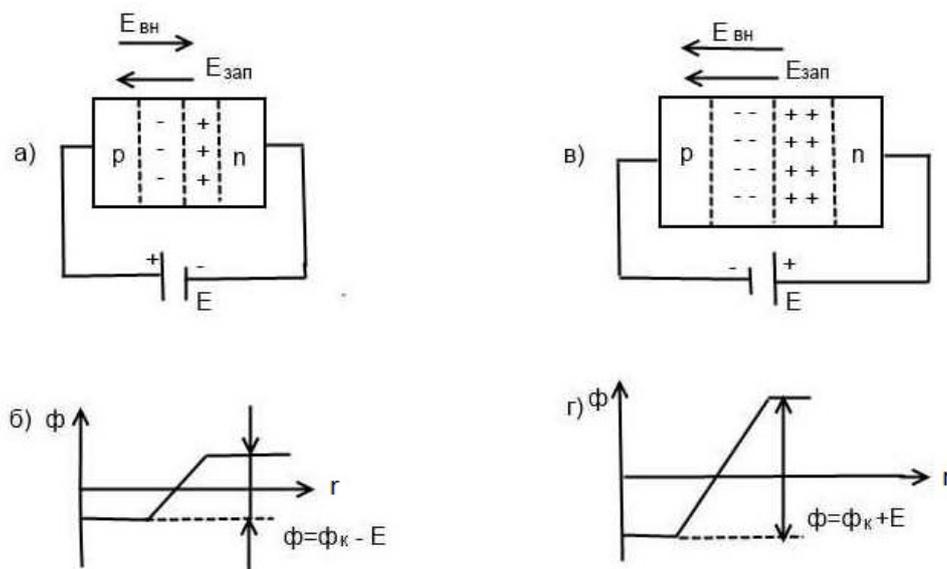


Рис. 6.2. Подключение к $p-n$ -переходу внешнего напряжения

Полупроводниковый диод: назначение, классификация, условное обозначение, вольт-амперная характеристика и основные параметры

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами, принцип действия которого основан на использовании свойств $p-n$ -перехода.

По исходному полупроводниковому материалу диоды делятся на германиевые, кремниевые и диоды из арсенида галлия. По типу $p-n$ -контакта диоды подразделяются на точечные и плоскостные. В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью n -типа, с которой соприкасается заостренная стальная проволочка, образующая $p-n$ -переход в месте контакта. В плоскостных диодах $p-n$ -переход образуется между двумя областями полупроводника с различными типами электропроводности, при этом площадь перехода у разных диодов различна – от сотых долей мм^2 до десятков см^2 .

По назначению диоды делятся на выпрямительные, высокочастотные, сверхвысокочастотные, импульсные, стабилитроны, фотодиоды, светодиоды, варикапы и пр. Условное графическое изображение диодов показано на рис.6.3. В виде стрелки обозначается тот из двух электродов диода, на который должен быть подан положительный потенциал для получения прямого тока, направление которого и указывает стрелка.

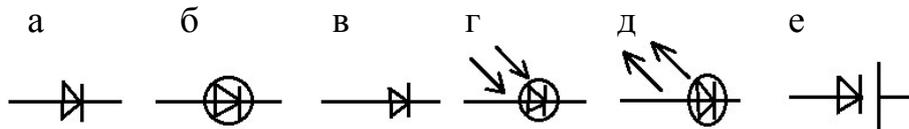


Рис. 6.3. Условные обозначения полупроводниковых диодов:
а – выпрямительные диоды; б – сверхвысокочастотные диоды;
в – стабилитроны; г – фотодиоды; д – светодиоды; е – варикапы

Важной характеристикой диода является вольт-амперная характеристика ($I = f(U)$); на рис. 6.4, а показана схема, с помощью которой можно ее снять. На рис.6.4,б,в изображены вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого диодов. При изменении прямого напряжения от 0 до $U_{пр}$ потенциальный барьер уменьшается, прямой ток увеличивается. Когда $U_{пр} \geq U'_{пр}$, потенциальный барьер исчезает и сопротивление диода определяется только объемным сопротивлением полупроводника. С ростом обратного напряжения незначительно возрастает обратный ток, ибо ток собственной проводимости при нормальной комнатной температуре мал, особенно для кремниевого диода. Когда $U_{обр}$ становится равным пробивному напряжению $U_{проб}$ (см. рис. 6.4), в диоде возникает электрический пробой, сопровождающийся резким увеличением обратного тока при незначительном увеличении обратного напряжения.

Электрический пробой подразделяется на два вида: лавинный и зенеровский, причем оба вида пробоя могут наблюдаться одновременно. При лавинном пробое неосновные носители, проходящие область $p-n$ -перехода, приобретают энергию, достаточную для выбивания ими валентных электронов, вследствие чего происходит процесс ионизации. При зенеровском пробое поле потенциального барьера $p-n$ -перехода вырывает валентные электроны.

В германиевом диоде электрический пробой неуправляем и переходит в тепловой (спадающий участок характеристики). Увеличение обратного тока, возникающее вследствие электрического пробоя, вызывает нагрев полупроводника, что ведет к возникновению новых пар – электрон – дырка. Возрастание тока приводит к дальнейшему увеличению температуры, и процесс развивается лавинообразно, переход разрушается. Следовательно, режим электрического пробоя недопустим для германиевого диода. В кремниевом диоде электрический пробой управляем (участок а-б на рис. 6.4, в), т.е. в ходе пробоя можно осуществлять управление обратным током, и только по достижении тока $I_{обр}$ значительной величины наступает тепловой пробой.

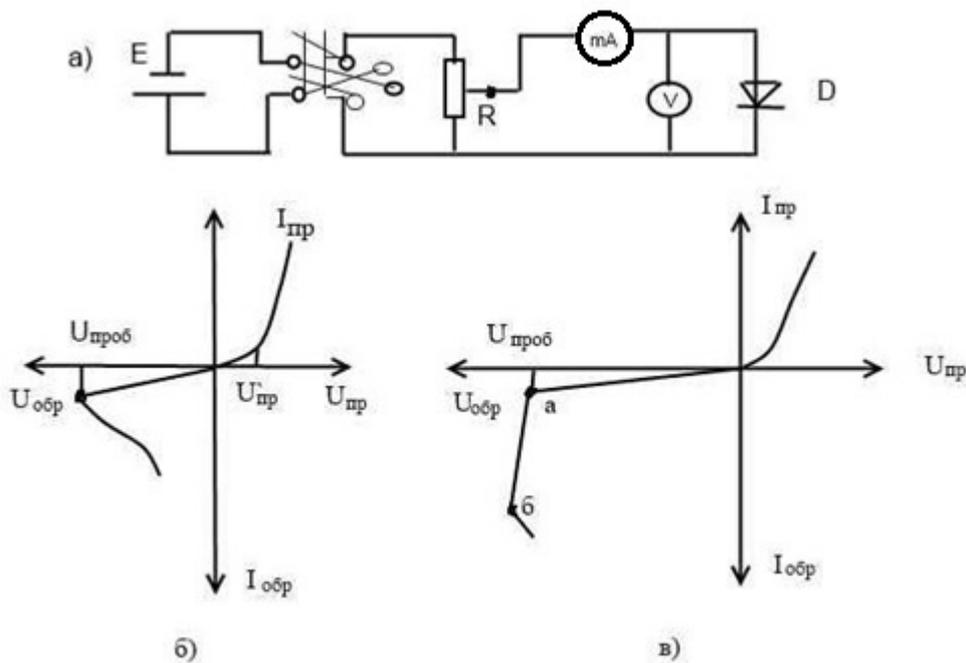


Рис. 6.4. Схема включения, вольт-амперные характеристики диодов

Рассмотрим основные параметры диода.

1. Сопротивление постоянному току определяется как отношение напряжения, приложенного к диоду, к току диода:

$$R_0 = U/I.$$

2. Внутреннее сопротивление или сопротивление переменному току определяется как отношение приращения напряжения к вызываемому им приращению тока:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Сопротивление диода в прямом направлении гораздо меньше сопротивления в обратном направлении.

3. Коэффициент выпрямления $I_{\text{выпр}}$ определяется как отношение прямого тока (при $U = 1 \text{ В}$) к обратному току (при $U = -1 \text{ В}$):

$$K_{\text{выпр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} \bigg|_{U = \pm 1 \text{ В}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}} \bigg|_{U = \pm 1 \text{ В}}.$$

Этот параметр может достигать значения порядка 10^5 .

4. Выпрямленный ток $I_{\text{выпр}}$ – наибольшее допустимое значение постоянного прямого тока, проходящего через диод.

5. Прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}$ – падение напряжения на диоде при прохождении через него тока, равного $I_{\text{выпр}}$.

6. Обратное напряжение $U_{\text{обр доп}}$ – наибольшее допустимое напряжение в обратном направлении. Обычно $U_{\text{обр доп}} = U_{\text{проб}} * 0,8$.

7. Обратный ток $I_{\text{обр}}$ – величина тока в обратном направлении при приложении к диоду напряжения $U_{\text{обр доп}}$.

8. Граничная частота, на которой можно эксплуатировать диод. Эта частота связана с емкостью диода C_d , которая определяется емкостью p - n -перехода. Емкость C_d ограничивает применение диода на высоких частотах, так как с увеличением частоты ω емкостное сопротивление $X_c = 1/\omega C_d$ уменьшается и зашунтированный емкостью p - n -переход будет пропускать переменный ток одинаково в обоих направлениях.

Типы специализированных диодов и их применение

1. Силовые (выпрямительные) диоды предназначены для преобразования переменного напряжения в постоянное. Это плоскостные диоды с относительно большой площадью p - n -перехода. Вследствие этого емкость диода имеет значительную величину (порядка десятков пикофарад), что ограничивает применение диодов в рабочем диапазоне $f=0...50 \text{ кГц}$. Основными параметрами силовых диодов являются: выпрямленный ток $I_{\text{выпр}}$, прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, обратное допустимое напряжение $U_{\text{обр доп}}$, обратный ток $I_{\text{обр}}$.

2. Высокочастотные диоды применяются для детектирования, модуляции, преобразования частоты. Это точечные диоды. Так как площадь перехода у точечных диодов относительно мала, то они допускают меньшие

выпрямленные токи и обратные напряжения. Зато емкость перехода составляет не более 1 пФ, а граничная частота определяется сотнями мегагерц. Высокочастотные диоды имеют следующие основные параметры: прямое напряжение $U_{пр}$, обратное допустимое напряжение $U_{обр доп}$, выпрямленный ток $I_{выпр}$, обратный ток $I_{обр}$ внутреннее сопротивление R_i , емкость диода C_d при заданном значении $U_{обр}$.

3. СВЧ-диоды применяются главным образом для модуляции, детектирования, преобразования частоты СВЧ-колебаний. Диоды СВЧ – точечные и имеют весьма малый радиус точечного контакта (2-3 мкм), что обеспечивает хорошие частотные свойства. Конструктивно диоды СВЧ оформлены таким образом, что позволяют производить непосредственное включение их в волноводные узлы радиоаппаратуры.

4. Стабилитроны (опорные диоды) представляют собой плоскостные кремниевые диоды, работающие в области электрического пробоя (рис. 6.5, а), где напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилитрона $I_{ст}$. Это свойство используют для получения стабильного напряжения. Основными параметрами стабилитрона являются: напряжение стабилизации $U_{ст}$, соответствующее середине рабочего участка характеристики, сопротивление на участке стабилизации R_i , минимальный ток стабилитрона $I_{ст min}$, максимальный ток стабилитрона $I_{ст max}$ (рис. 6.5,а).

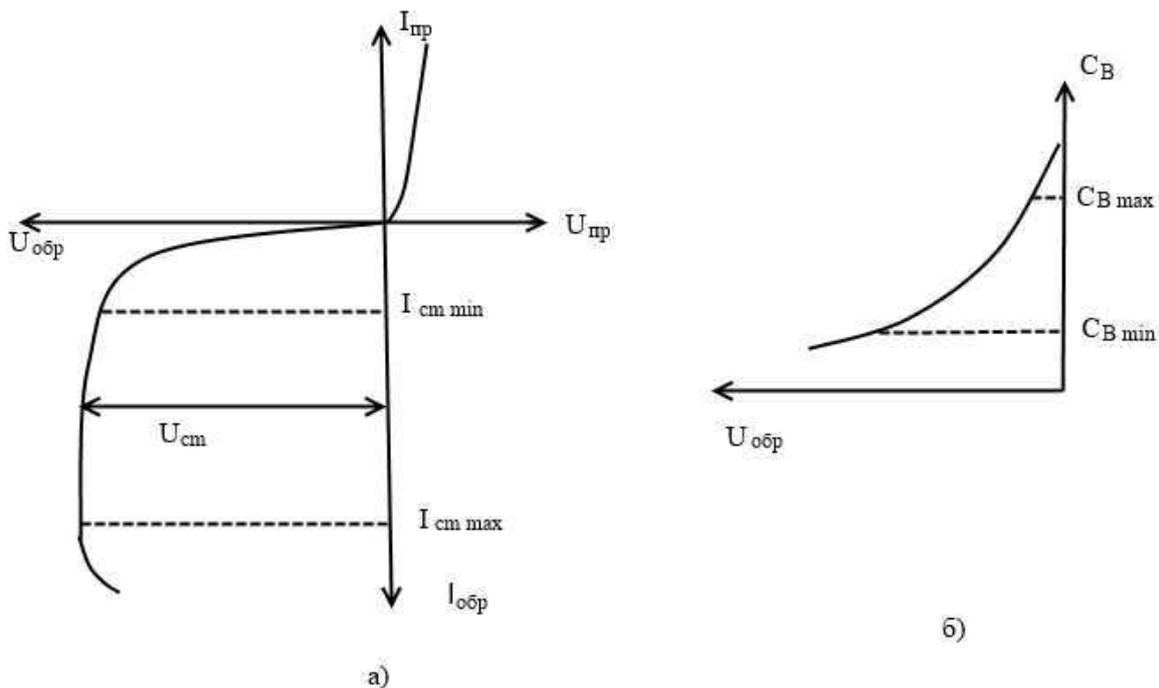


Рис. 6.5. Характеристики специализированных диодов

5. Варикапы – полупроводниковые диоды, у которых используется барьерная емкость – емкость запертого $p-n$ -перехода, определяемая потен-

циальным барьером и зависящая от величины приложенного к диоду обратного напряжения. Зависимость барьерной емкости варикапа C_B от обратного напряжения показана на рис.6.5,в. С ростом обратного напряжения расширяются области $p-n$ -перехода, что равносильно увеличению расстояния между электродами, и емкость варикапа C_B уменьшается. Основными параметрами варикапов являются: емкость варикапа C_B , коэффициент перекрытия по емкости K_C – отношение максимальной емкости варикапа $C_{B \max}$ к минимальной емкости $C_{B \min}$.

Варикапы используются главным образом для управления колебательными контурами в системах автоподстройки частоты радиоприемников, а также в радиопередатчиках с частотной модуляцией.

6. Фотодиоды используются главным образом как источники электрической энергии (солнечные батареи). В корпусе фотодиода имеется окно, через которое световой поток попадает в область $p-n$ -перехода, под действие чего на выходе диода возникает ЭДС.

7. Светодиод используется как источник света. Он включается в прямом направлении и изготавливается из такого полупроводника, который светится при соединении электронов с дырками.

6.2. Биполярный транзистор

Назначение и типы транзисторов

Транзистором называют полупроводниковый прибор с одним или несколькими $p-n$ -переходами, имеющий не менее трех выводов. Широко распространенные транзисторы с двумя переходами носят название биполярных. Термин «биполярный» связан с наличием в этих транзисторах двух различных типов носителей заряда – электронов и дырок.

В настоящее время широко используются полевые (униполярные) транзисторы, где носители заряда одного знака (электроны и дырки) проходят по полупроводниковому каналу.

Транзисторы применяются в различных усилителях, генераторах, логических и импульсных устройствах.

Биполярный транзистор: его виды, устройство, схемы включения, принцип действия

Биполярные транзисторы классифицируются по ряду признаков.

По конструкции транзисторы разделяют на **точечные** и **плоскостные** (из-за низкой стабильности параметров точечные транзисторы в настоящее время не применяются). В зависимости от используемого материала различают низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (от 3 до 30 МГц), высокочастотные (от 30 до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц)

транзисторы, а по величине максимальной рассеиваемой мощности – мало-мощные (до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 до 3 Вт), мощные (более 3 Вт). В зависимости от назначения транзисторы бывают усилительные, генераторные, импульсные и др. Наконец, в зависимости от электропроводности различают транзисторы *p-n-p*- и *n-p-n*-типов (рис. 6.6).

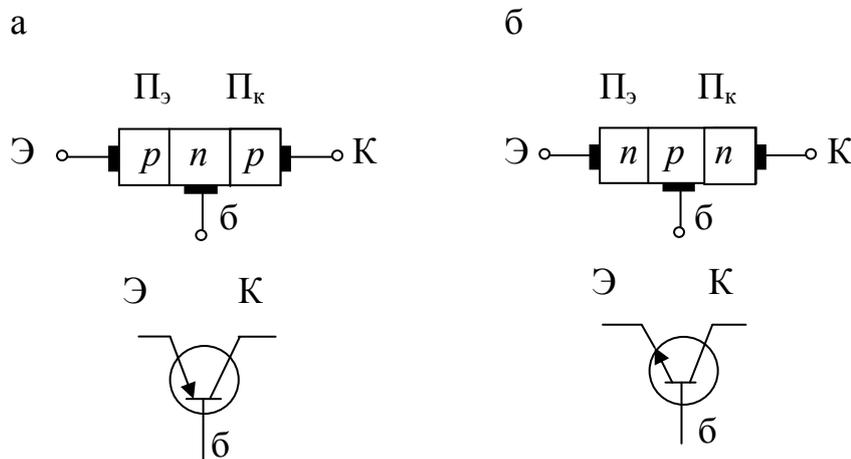


Рис. 6.6. Типы биполярных транзисторов

Средняя область транзистора называется **базой**. Область транзистора, эмиттирующая носители тока, называется **эмиттером**, а область, собирающая носители тока, – **коллектором**.

Направление стрелки в условном графическом обозначении (см. рис.6.6) указывает на направление тока в цепи эмиттера. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называется **эмиттерным**, а между коллектором и базой – **коллекторным**.

В зависимости от того, какой из 3-х выводов транзистора является общим для его входной и выходной цепей, различают три схемы включения: схему с общей базой, схему с общим эмиттером, схему с общим коллектором (рис. 6.7). Широкое распространение получила схема с общим эмиттером, так как она обеспечивает наибольшее усиление сигнала по мощности и имеет наименьшую разницу между величинами **ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО** сопротивления, что облегчает согласование однотипных каскадов.

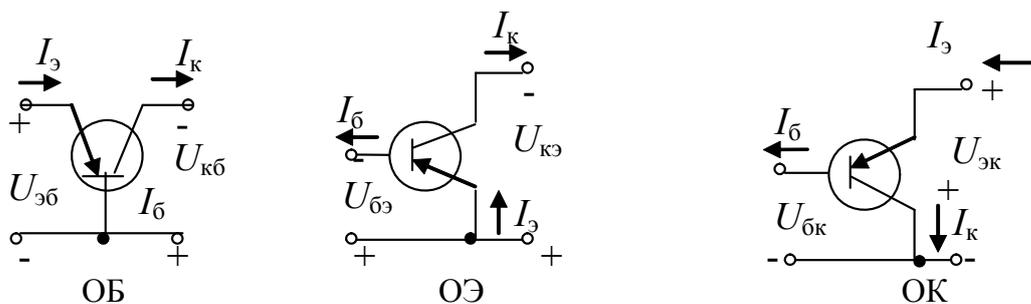


Рис. 6.7. Схемы включения биполярного транзистора

Рассмотрим принцип действия транзистора типа $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 6.8). Источник ЭДС E_b , находящийся в цепи базы, включает эмиттерный $p-n$ -переход в прямом направлении. С другой стороны, источник, расположенный в цепи коллектора и имеющий ЭДС $E_k \gg E_b$, включает коллекторный $p-n$ -переход в обратном направлении. Через открытый эмиттерный переход основные носители из эмиттера (дырки) поступают в базу, образуя ток эмиттера $I_э$. Небольшая часть этих дырок рекомбинирует с основными носителями базы – электронами, на место которых в базу под действием источника ЭДС E_b поступают другие электроны, образующие ток базы $I_б$. Поскольку при изготовлении транзистора базу делают тонкой и бедной основными носителями, то большая часть дырок (95...99 %) не успевает рекомбинировать и подходит к коллекторному переходу. Поле этого перехода увлекает дырки в область коллектора, где дырки рекомбинируют с электронами, поступающими от источника ЭДС E_k . За счет этого в цепи коллектора образуется ток коллектора $I_к$. Таким образом,

$$I_э = I_б + I_к.$$

Причем $I_к \gg I_б$, так как $I_к = (0,95 \dots 0,99) I_э$.

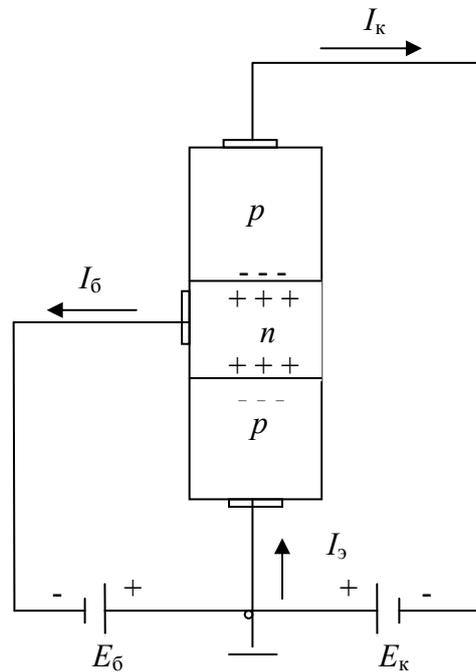


Рис. 6.8. Схема с общим эмиттером

Основные статические характеристики и параметры биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

Для биполярного транзистора наибольшее распространение получили входные характеристики $I_{BX}=f(U_{EX})$ при $U_{BX}=\text{const}$ и выходные $I_{Ebn}=f(U_{Ebk})$ при $I_{EX}=\text{const}$. Эти характеристики называются *статическими*.

Рассмотрим статические входные и выходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Схема для снятия статических характеристик транзистора изображена на рис. 6.9.

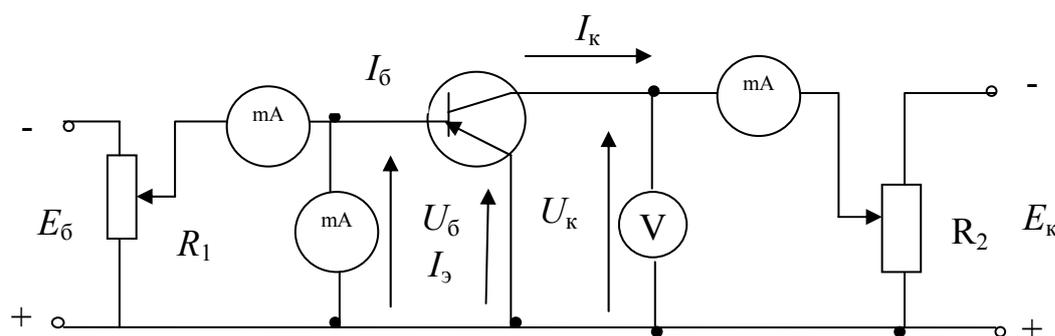


Рис. 6.9. Схема включения биполярного транзистора

Входные характеристики. Это зависимость тока базы $I_б$ от напряжения на базе $U_б$ (между базой и эмиттером) при постоянном напряжении на коллекторе $U_к$ (между коллектором и эмиттером), т.е. $I=f(U_б)$ при $U_к=\text{const}$. Семейство входных характеристик изображено на рис. 6.10,а.

При $U_к=0$ между коллектором и эмиттером имеет место короткое замыкание, а отрицательное напряжение $U_б$ является прямым по отношению к эмиттерному и коллекторному $p-n$ -переходам (рис.6.10,б). Через оба перехода текут прямые токи, которые образуют ток базы $I_б$. Такое направление тока базы считается положительным.

С ростом модуля напряжения $U_б$ увеличиваются прямые токи переходов и ток $I_б$.

При $U_к>0$ входная характеристика смещается вправо. Это можно объяснить следующим образом. В зависимости от соотношения между величинами отрицательных напряжений $U_б$ и $U_к$ коллекторный переход может быть закрыт или открыт для основных носителей тока (рис. 6.10, в).

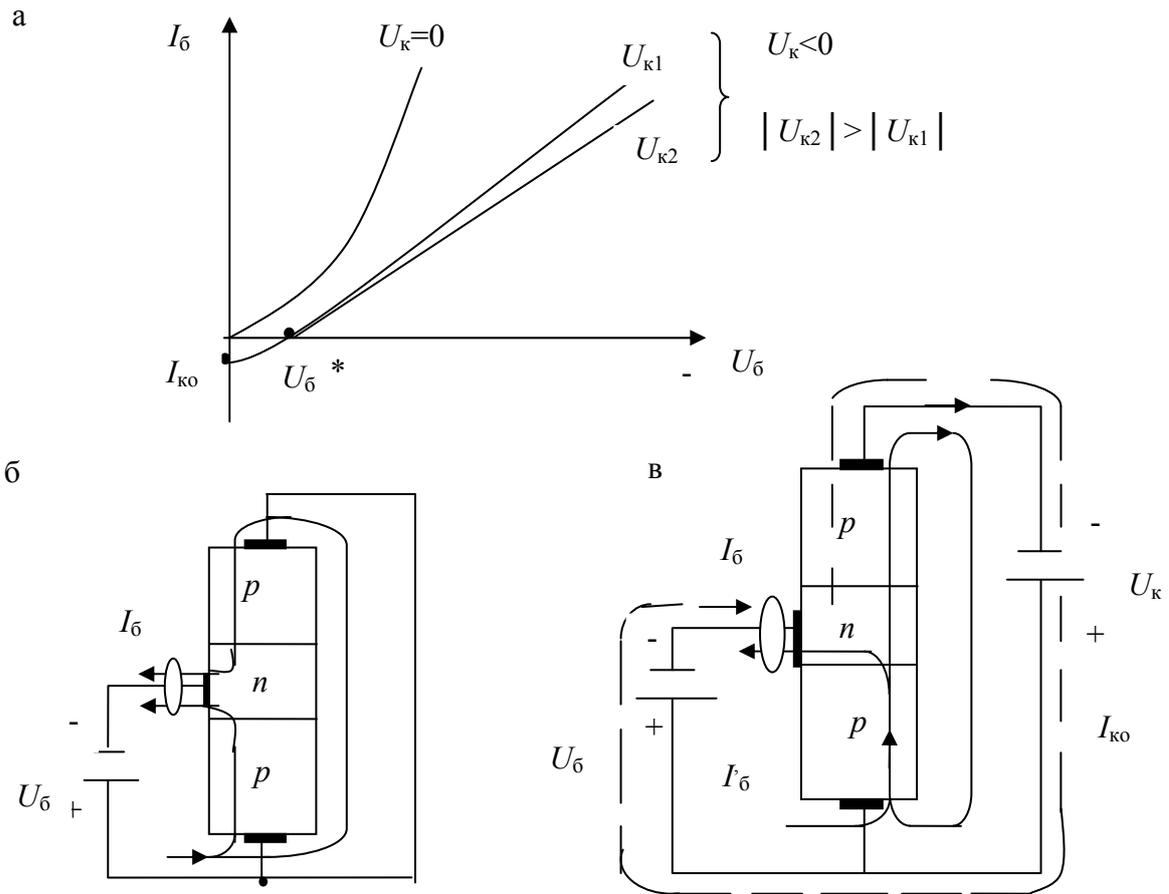


Рис. 6.10 Статические входные характеристики биполярного транзистора

Пусть по модулю напряжение U_K превышает модуль любого напряжения $U_б$. В этом случае коллекторный переход независимо от величины $U_б$ включен в обратном направлении.

Если напряжение $U_б=0$, что соответствует короткому замыканию между базой и эмиттером, то эмиттерный переход закрыт, и в цепи базы и в цепи коллектора протекает обратный ток коллекторного перехода $I_б=-I_{ко}$ (пунктирная линия на рис. 6.10,в). При отрицательном напряжении на базе $U_б$ эмиттерный переход открывается.

В цепи базы протекает ток $I_б$, который противоположен по направлению току $I_{ко}$ (рис. 6.10,в). По мере роста модуля напряжения $U_б^*$ ток $I_б$ увеличивается. При $U_б=U_б^*$ токи $I_б$ и $I_{ко}$ сравниваются, а при дальнейшем увеличении модуля напряжения $U_б$ ток $I_б$ становится немного больше тока $I_{ко}$ и ток базы определяется током $I_б$.

Таким образом, сдвиг характеристики вправо определяется током $I_{ко}$.

С ростом модуля отрицательного напряжения U_K уменьшается ток базы, так как увеличивается потенциальный барьер коллекторного перехода, что сокращает время пребывания дырок в базе и количество рекомбинаций. Это приводит к еще большему смещению характеристики вправо.

Однако, поскольку влияние напряжения U_K на ток базы I_6 весьма мало, различие во входных характеристиках, снятых при U_{K1} и U_{K2} , будет незначительным (см. рис.6.10,а).

Выходные характеристики. Это зависимость $I_k=f(U_k)$ при $I_6=\text{const.}$ Семейство выходных характеристик изображено на рис.6.11,а.

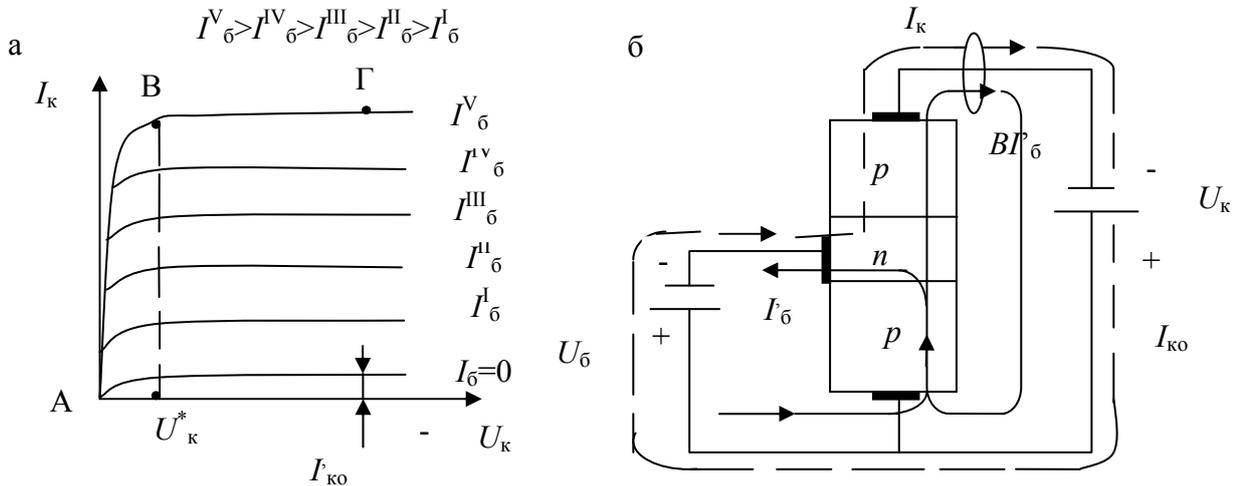


Рис. 6.11. Статические выходные характеристики биполярного транзистора

Как уже отмечалось, при $U_6=0$ эмиттерный переход закрыт, и в цепи базы, и в цепи коллектора протекает обратный ток коллекторного перехода $I_{ко}$, который мало меняется с изменением по модулю отрицательного напряжения U_K . При этом $I_6 = -I_{ко}$, $I_k = I_{ко}$. Если $I_6=0$, то в базу ответвляется часть эмиттерного тока I_6' , равная $I_{ко}$. При этом в сторону коллектора направляется ток в β раз больший ($\beta = I_k / I_6$, при $U_K = \text{const.}$). В результате ток коллектора будет состоять из суммы $I_{ко}$ и $\beta I_{ко}$ (рис. 6.11,б):

$$I_k = I_{ко}' = \beta I_{ко} + I_{ко} = (\beta + 1) I_{ко}.$$

Рассмотрим теперь одну из характеристик семейства при токе $I_6 > 0$, например, соответствующую значению $I_6 = I_6$.

Характеристика имеет два характерных участка АВ и ВГ. Так как напряжение $U_6 < 0$, то при $U_k = 0$, как уже отмечалось, оба перехода транзистора открыты (см. рис. 6.10,б). Прямой ток коллекторного перехода направлен навстречу потоку дырок, движущихся из базы в коллектор, и при их компенсации $I_k = 0$. В этом случае характеристика начинается из начала координат. Изменение напряжения U_K в пределах $0 < [U_K] < [U_K']$ вызывает резкое уменьшение прямого тока коллекторного перехода и увеличение тока коллектора, обусловленного движением дырок из эмиттера в базу. При $[U_K] > [U_K']$, т.е. когда $[U_K] > [U_6]$, коллекторный переход закрывается, прямой ток коллекторного перехода становится равным нулю. На участке ВГ увеличение тока I_k при увеличении модуля напряжения U_K объясняется двумя причинами. Во-первых, возрастает по

модулю напряжения на базе, т.к. транзистор представляет собой для напряжения U_k делитель напряжения, состоящий из двух последовательно соединенных переходов. Во-вторых, увеличивается поле коллекторного перехода, что сокращает время пребывания дырок в базе и количество рекомбинаций. Между токами I_b и I_k существует прямая связь. Чем больше открыт эмиттерный переход, тем больше ток I_e и токи I_b , I_k . Следовательно, большему току I_b , соответствует больший ток I_k и характеристики смещаются вверх. Нетрудно показать, что при $I_b > 0$:

$$I_k = \beta I_b + I_{ko}' = \beta I_b + (\beta + 1) I_{ko}.$$

Параметры биполярного транзистора

Параметры биполярного транзистора можно разделить на три группы: первичные, вторичные и предельные.

К первичным параметрам относятся сопротивления r_e , r_k , r_b . Сопротивления r_e и r_k – сопротивления переменному току эмиттерного и коллекторного переходов, r_b – омическое сопротивление базы.

Ко вторичным параметрам относятся параметры, которые устанавливают **связь** между напряжениями и токами на входе (U_1, I_1) и на выходе (U_2, I_2) транзистора. Существует несколько систем вторичных параметров. Широкое распространение получила **система H-параметров**, в которой в качестве независимых переменных приняты ток на входе I_1 и напряжение на выходе U_2 .

Тогда $U_1 = f(I_1, U_2)$, $I_2 = f(I_1, U_2)$.

Пусть величины I_1 и U_2 получили малые приращения. Приращения величин U_1 и I_2 можно найти путем определения полных дифференциалов dU_1 и dI_2 :

$$dU_1 = dU_1/dI_1 dI_1 + dU_1/dU_2 dU_2,$$

$$dI_2 = dI_2/dI_1 dI_1 + dI_2/dU_2 dU_2.$$

Для малых приращений токов и напряжений рабочие участки характеристик транзистора являются линейными, а транзистор можно представить в виде линейного активного четырехполюсника (рис. 6.12). Активность четырехполюсника проявляется в усилительных свойствах транзистора. В этом случае частные производные остаются постоянными; малые приращения токов и напряжений можно рассматривать как действующие значения переменных сигналов.

Тогда $U_1 = H_{11}I_1 + H_{12}U_2$, $I_2 = H_{21}I_1 + H_{22}U_2$.

Коэффициенты H_{11} , H_{12} , H_{22} являются H-параметрами. В общем случае это комплексные величины. Для низких частот уравнения приобретают вид:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2, I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2,$$

где h – активная составляющая параметра H .

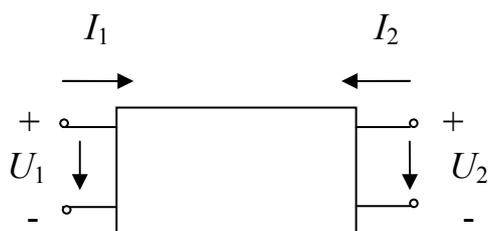


Рис. 6.12. Линейный активный четырехполюсник

Эквивалентная схема замещения четырехполюсника в системе h -параметров имеет вид, показанный на рис. 6.13.

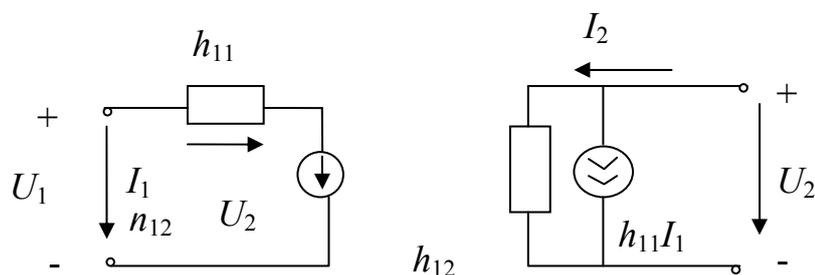


Рис. 6.13. Схема замещения четырехполюсника

Параметры h_{11} , h_{12} , h_{21} имеют вполне определенный физический смысл:
 $h_{11}=U_1/I_1$ при $U_2=0$ – входное сопротивление при короткозамкнутом (по переменному току) выходе;

$h_{12}=U_1/U_2$ при $I_1=0$ – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом (по переменному току) входе;

$h_{21}=I_2/I_1$ при $U_2=0$ – коэффициент усиления по току при короткозамкнутом (по переменному току) выходе, h_{21} для стрелы с общим эмиттером обозначается символом β , а для схемы с общей базой – α ;

$h_{22}=I_2/U_2$ при $I_1=0$ – выходная проводимость при разомкнутом (по переменному току) входе.

Часто используется параметр Y_{21} , который определяется по формуле $Y_{21}=h_{21}/h_{11}=I_2/U_1$ при $U_2=0$. Это переходная проводимость при короткозамкнутом выходе (крутизна).

Вторичные параметры можно определить в заданной рабочей точке по статическим характеристикам транзистора через приращения токов и напряжений. На рис. 6.14 показано определение h -параметров по статическим характеристикам транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Все построения на рисунке выполнены в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned}
 h_{11\text{э}} &= U_6/I_6 \text{ при } U_{\text{к}}=\text{const}, \\
 h_{12\text{э}} &= U_6/U_{\text{к}} \text{ при } I_6=\text{const}, \\
 h_{21\text{э}} &= I_{\text{к}}/I_6 \text{ при } U_{\text{к}}=\text{const}, \\
 h_{22\text{э}} &= I_{\text{к}}/U_{\text{к}} \text{ при } I_6=\text{const}.
 \end{aligned}$$

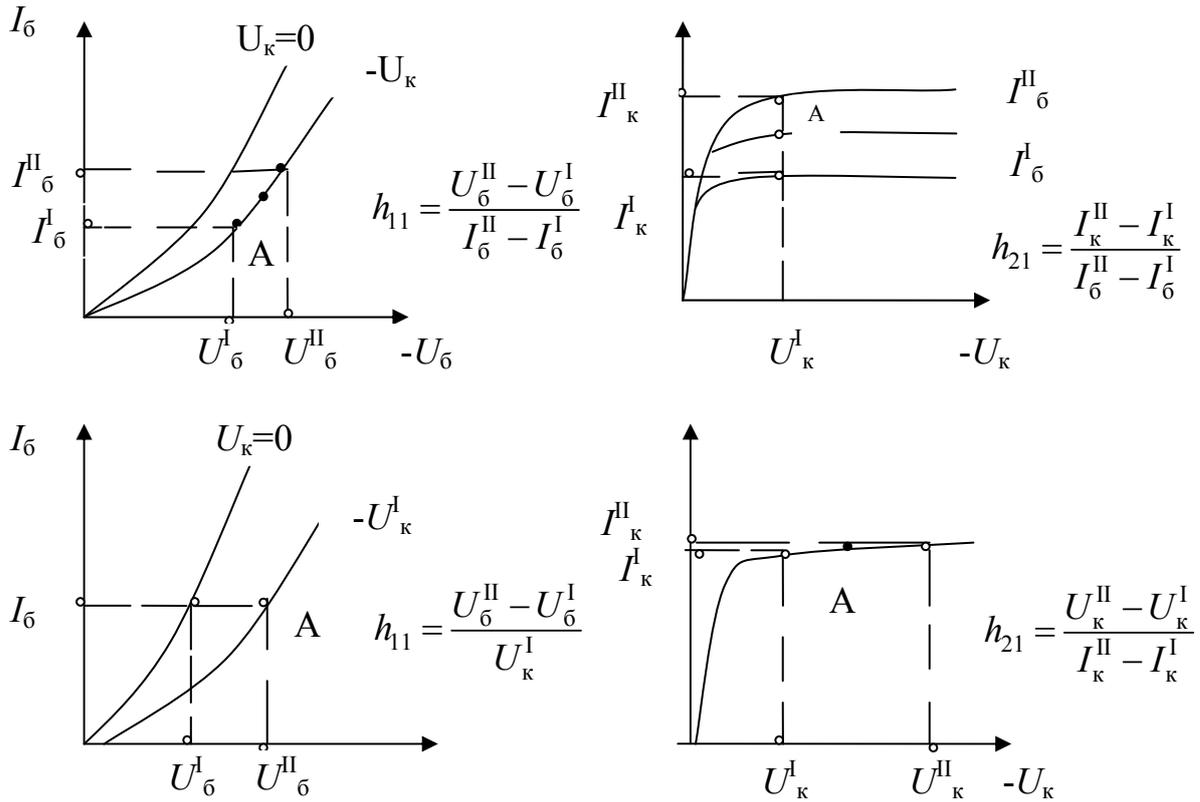


Рис. 6.14. Определение h -параметров по статическим характеристикам

К предельным параметрам относятся: предельная частота усиления по току f_v (для схемы с общим эмиттером), допустимая мощность, рассеиваемая коллектором, $P_{k \max}$, допустимое напряжение на коллекторе $U_{k \max}$, допустимый ток коллектора $I_{k \max}$.

Рассмотренные h – параметры зависят от температуры и частоты переменного напряжения. В частности, с ростом частоты $h_{21} = \beta$ уменьшается. При частоте f_v параметр β уменьшается в корень из 2 раз от своего значения для частоты $f=0$. Если мощность на коллекторе $P_k = I_k U_k$ больше $P_{k \max}$, то произойдет перегрев коллекторного перехода и транзистор выйдет из строя. При $U_k > U_{k \max}$ может произойти пробой коллекторного перехода, а при $I_k > I_{k \max}$ – недопустимый перегрев эмиттерного перехода.

Контрольные вопросы

1. Дать определение электроники.
2. Каковы достоинства полупроводниковых приборов?
3. Каковы особенности электронно-дырочного перехода?
4. Каков принцип действия выпрямительного диода?
5. Каковы условные обозначения, основные характеристики и параметры полупроводниковых диодов?
6. Каковы особенности стабилитрона, фотодиода и светодиода?

7. Объяснить условное обозначение, устройство и принцип действия биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

8. Каковы основные статические характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?

9. Каковы основные статические параметры биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?

10. Как управляется биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером?

11. Где применяются транзисторы?

12. Каковы типы основных электронных устройств?

ПРЕЗЕНТАЦИЯ ЛЕКЦИЙ

Тема №1. Определение электротехники.
Общие сведения об электрических цепях и их элементах.
Электрические цепи постоянного тока

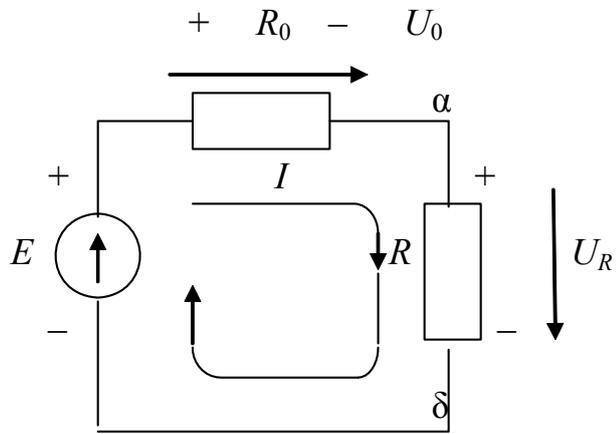


Рис. 1.1. Неразветвленная цепь постоянного тока

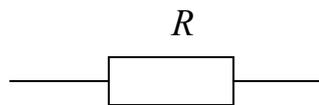


Рис. 1.2. Изображение резистора



Рис. 1.3. Изображение катушки индуктивности



Рис. 1.4. Изображение конденсатора

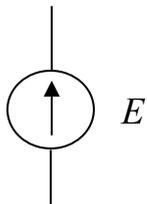


Рис. 1.5. Изображение источника ЭДС

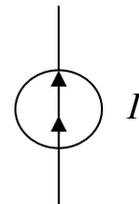


Рис. 1.6. Изображение источника тока

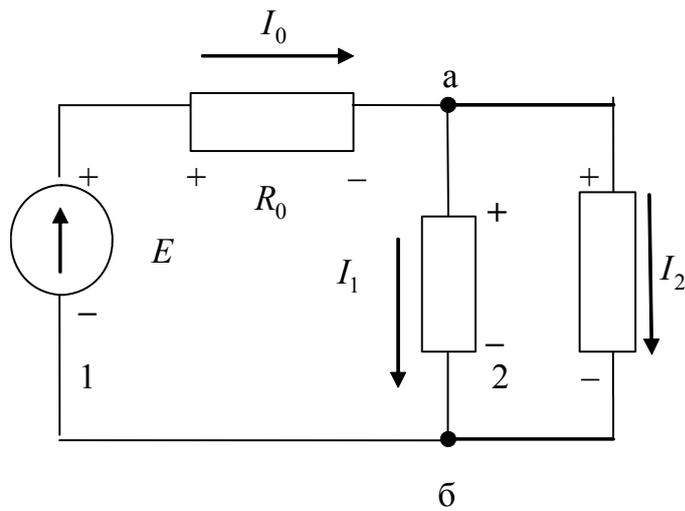


Рис. 1.7. Разветвленная цепь постоянного тока

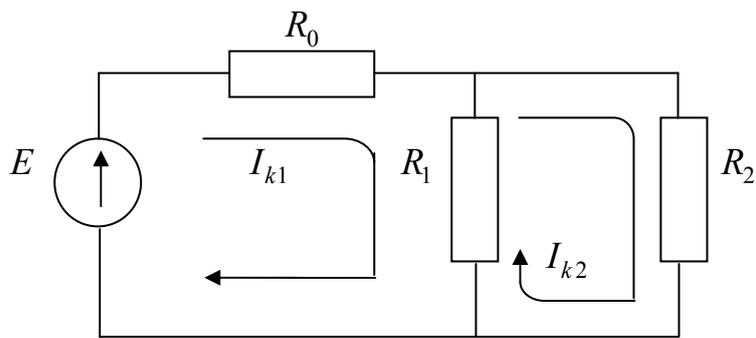


Рис. 1.8. Разветвленная цепь постоянного тока

Тема №2. Однофазный синусоидальный ток и его основные параметры. Электрические цепи однофазного синусоидального тока

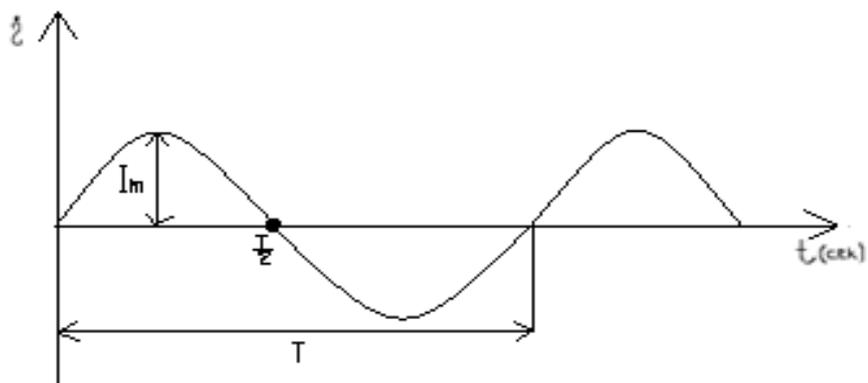


Рис. 2.1. Временной график однофазного синусоидального тока

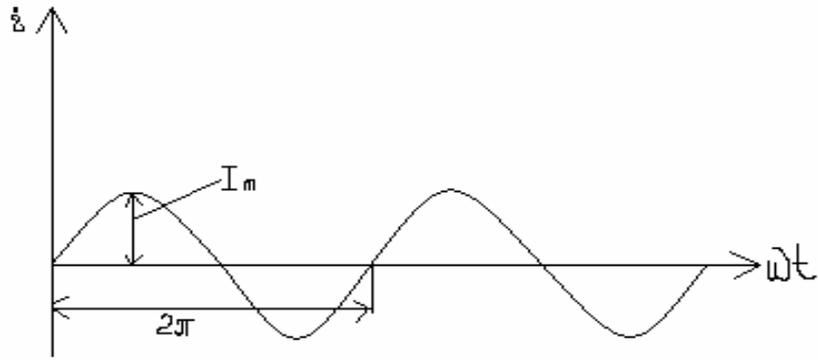


Рис.2.2. График зависимости тока от фазы тока

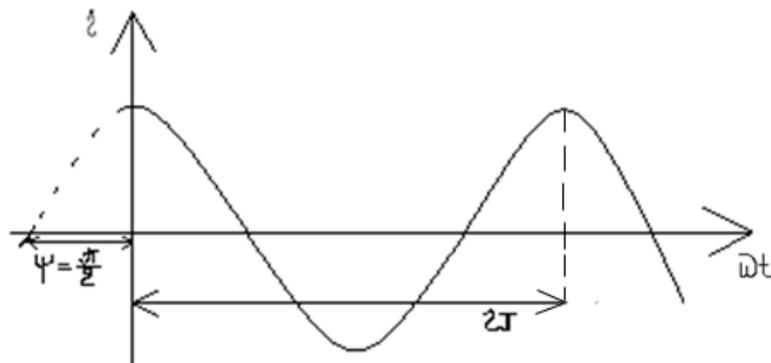


Рис.2.3. График зависимости тока от фазы тока

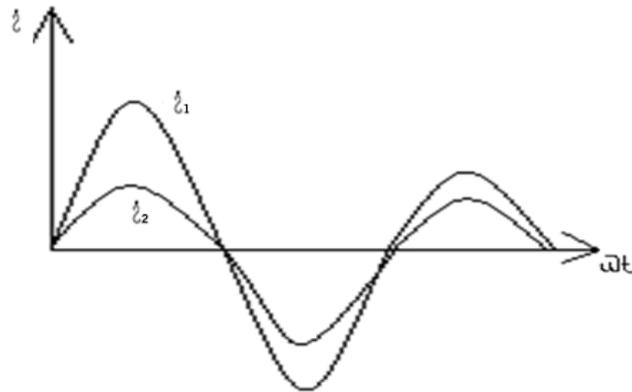


Рис. 2.4. График зависимостей двух токов от фазы токов

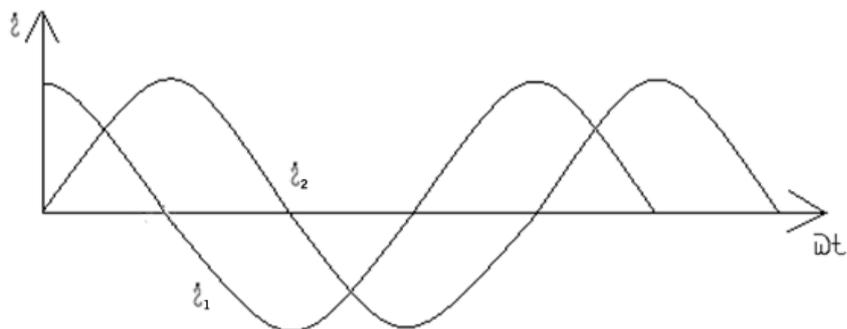


Рис. 2.5. График зависимостей двух токов от фазы токов

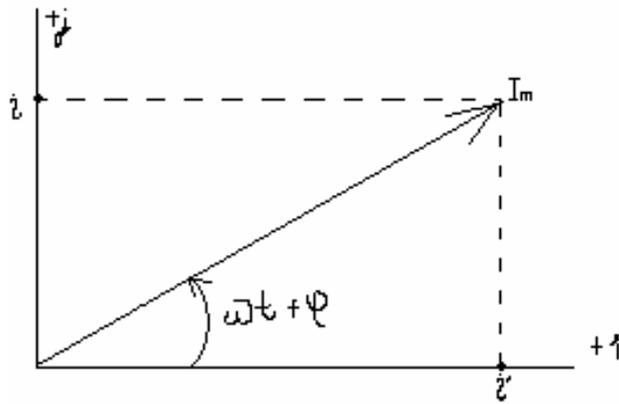


Рис. 2.6. Векторная диаграмма однофазного тока

Тема №3. Электрические цепи трехфазного синусоидального тока

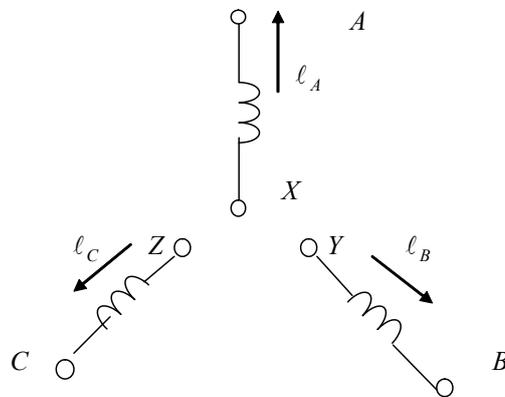


Рис. 3.1 Трёхфазная цепь. Соединение в звезду

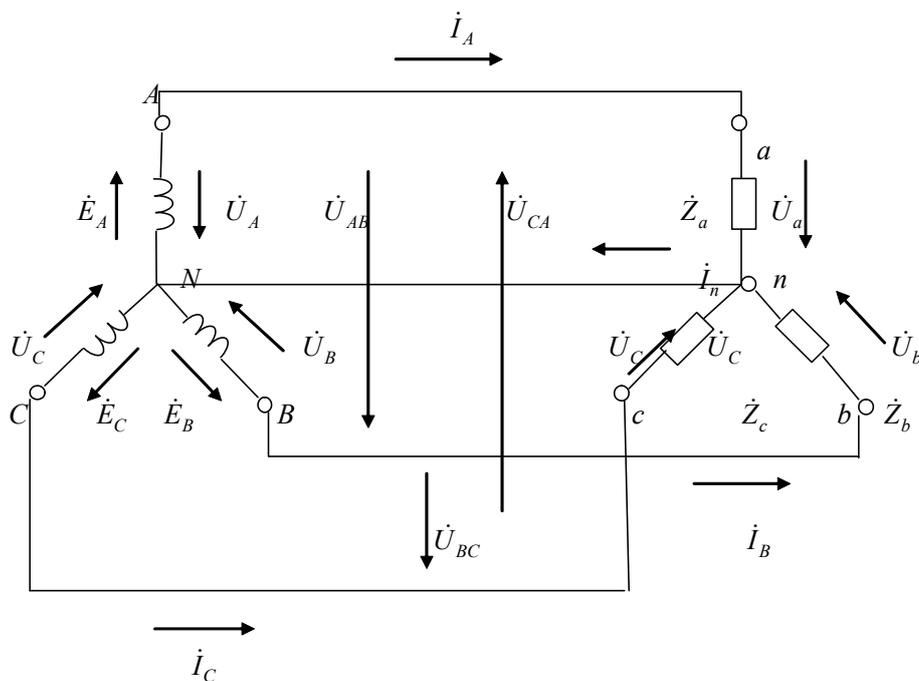


Рис.3.2. Цепь трёхфазного тока при соединении звездой фаз генератора и нагрузки

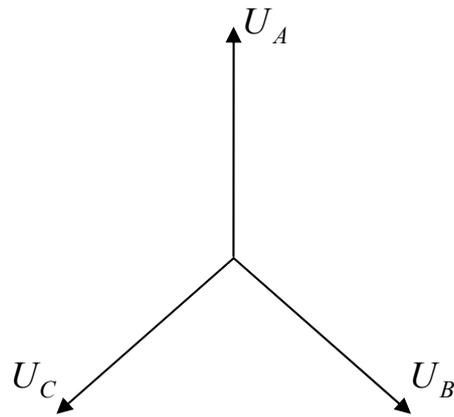


Рис.3.3. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

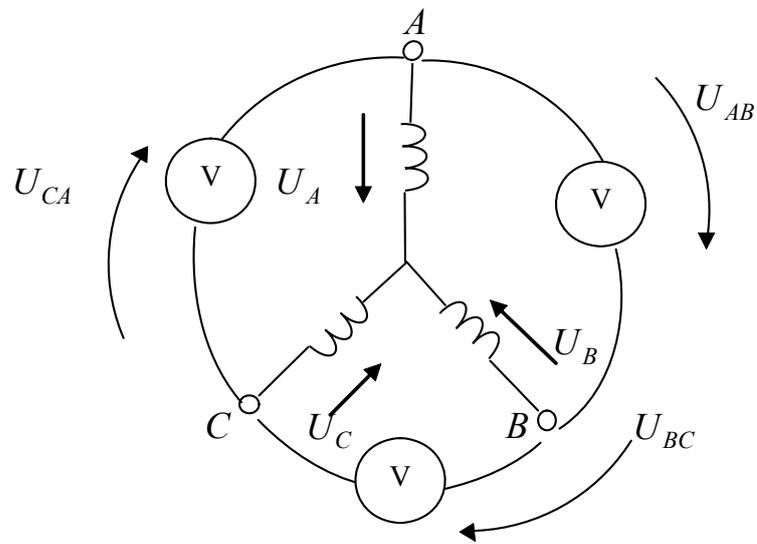


Рис.3.4. Измерение линейных напряжений

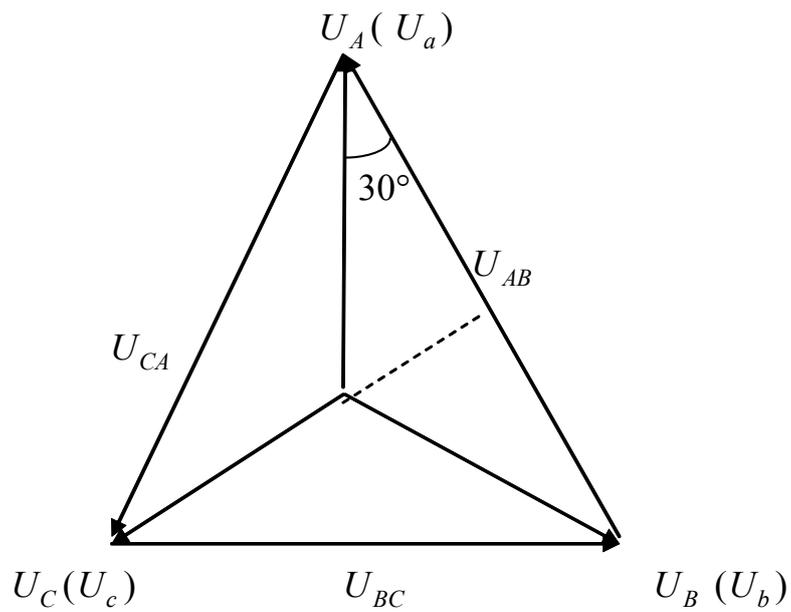


Рис. 3.5. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

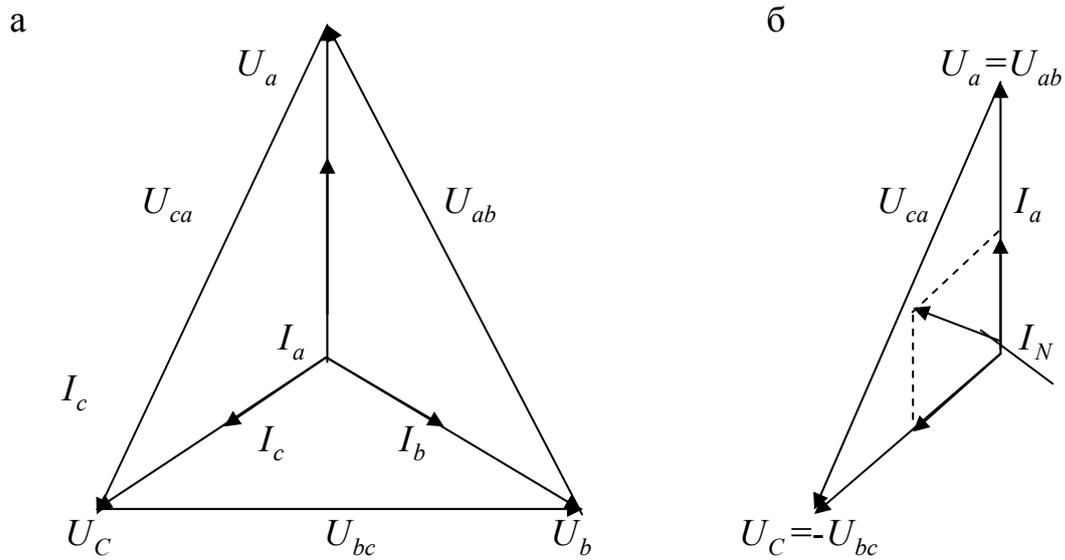


Рис. 3.6. Векторные диаграммы для трёхфазной цепи

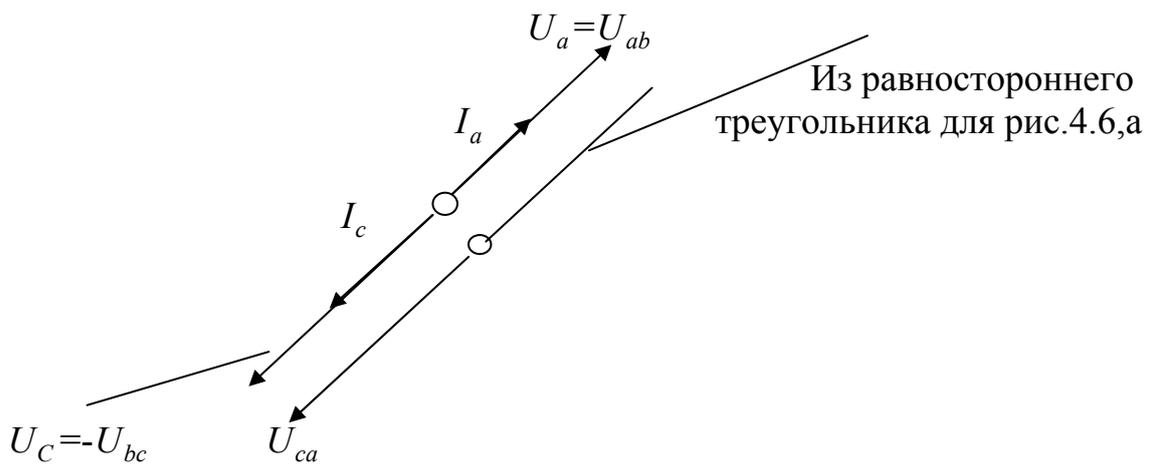


Рис. 3.7. Векторная для трёхфазной цепи при обрыве фазы B

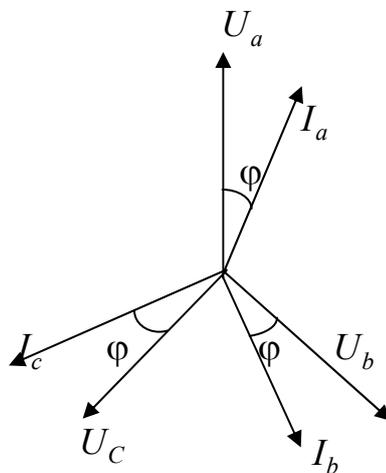


Рис. 3.8. Векторная диаграмма трёхфазной цепи при соединении фаз в звезду для симметричной нагрузки

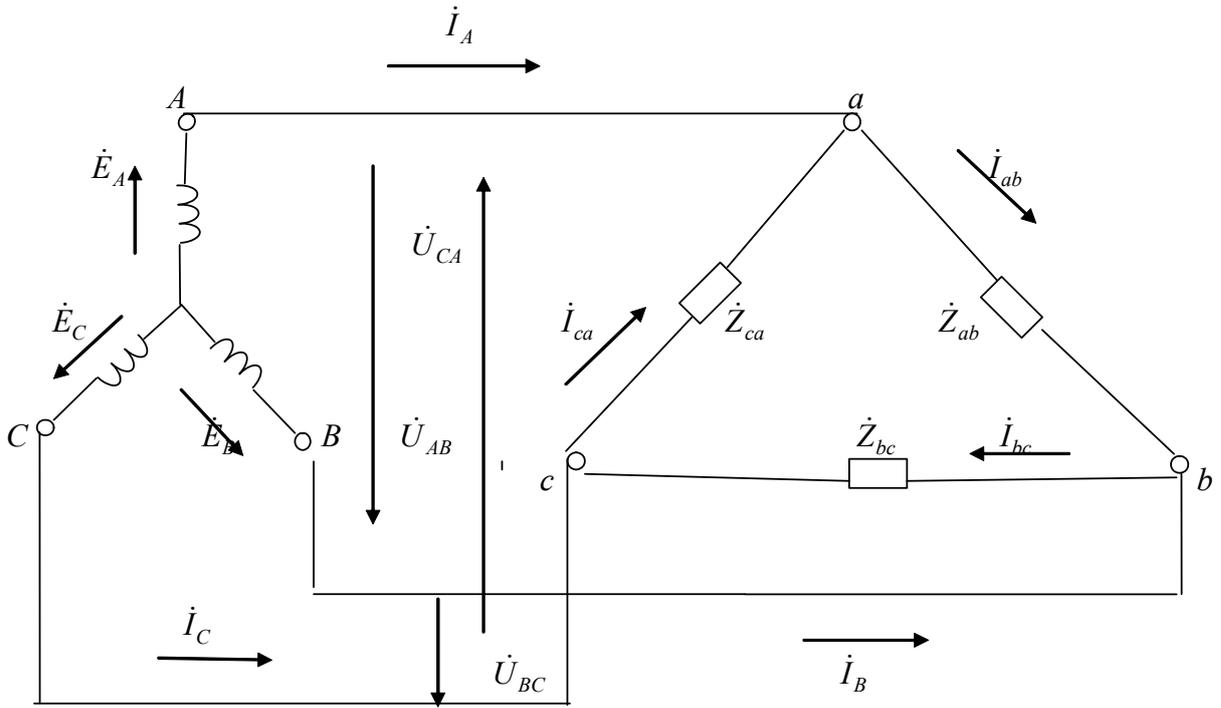


Рис. 3.9. Электрическая трёхфазная цепь синусоидального тока при соединении фаз генератора звездой, а фаз нагрузки – треугольником

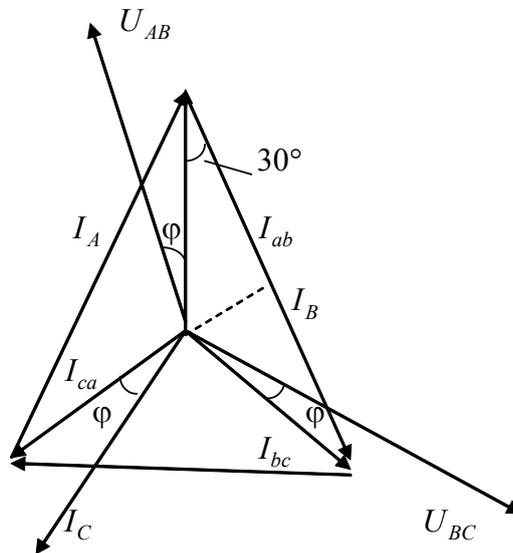


Рис. 3.10. Векторная диаграмма трёхфазной цепи

Тема №4. Трансформаторы

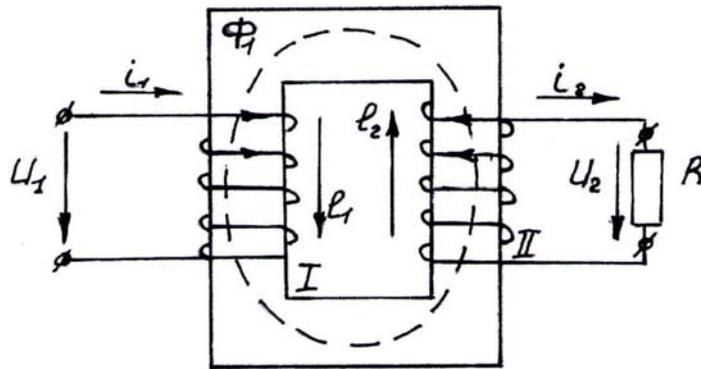


Рис 4.1. Конструкция простейшего трансформатора

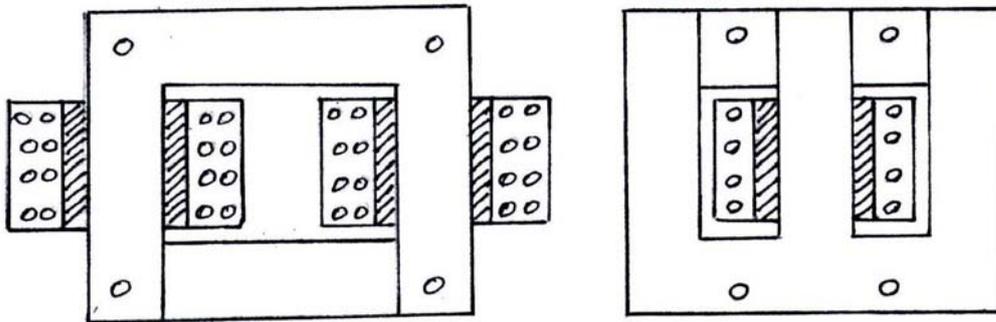


Рис. 4.2. Конструкции трансформаторов

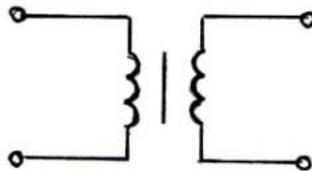


Рис. 4.3. Условное обозначение трансформатора

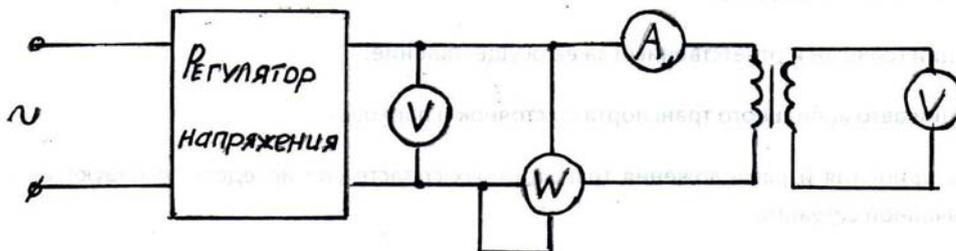


Рис. 4.4. Опыт холостого хода

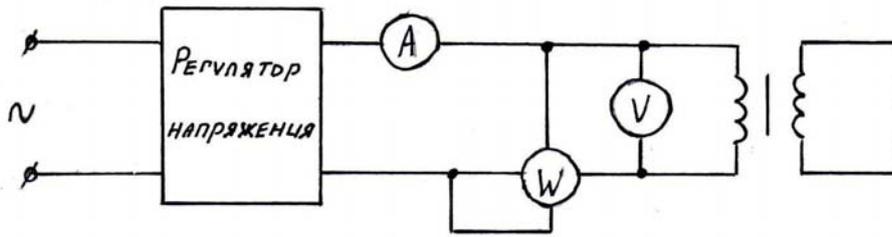


Рис. 4.5. Опыт короткого замыкания

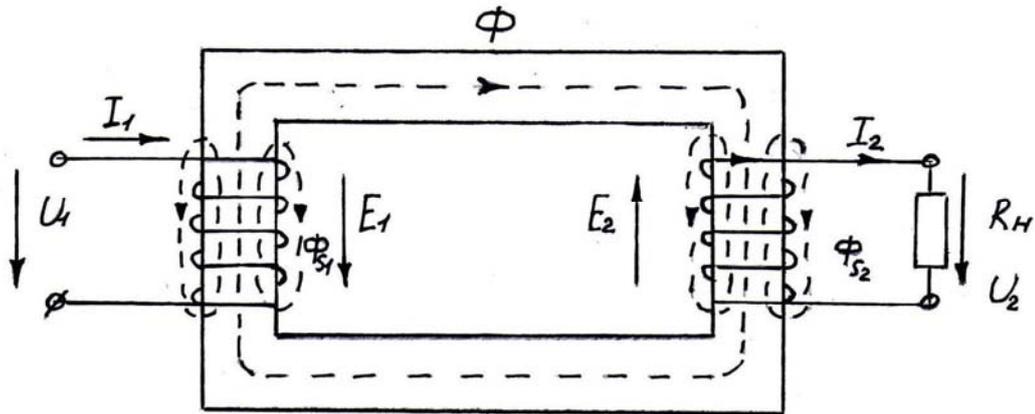


Рис. 4.6. Рабочий режим трансформатора

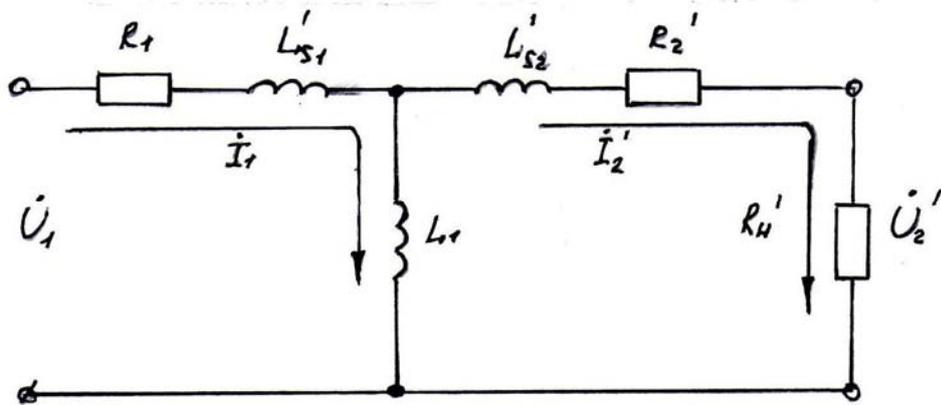


Рис. 4.7. Схема замещения трансформатора

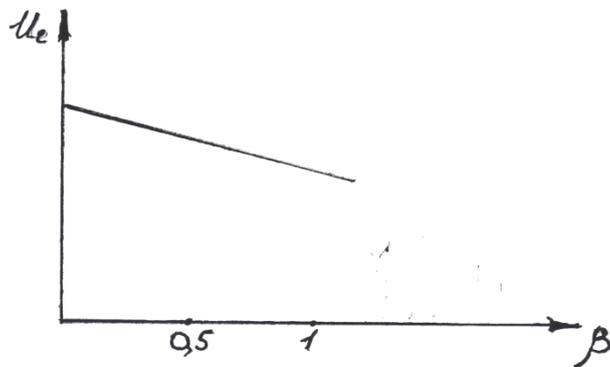


Рис. 4.8. Внешняя характеристика

Тема №5. Электрические машины

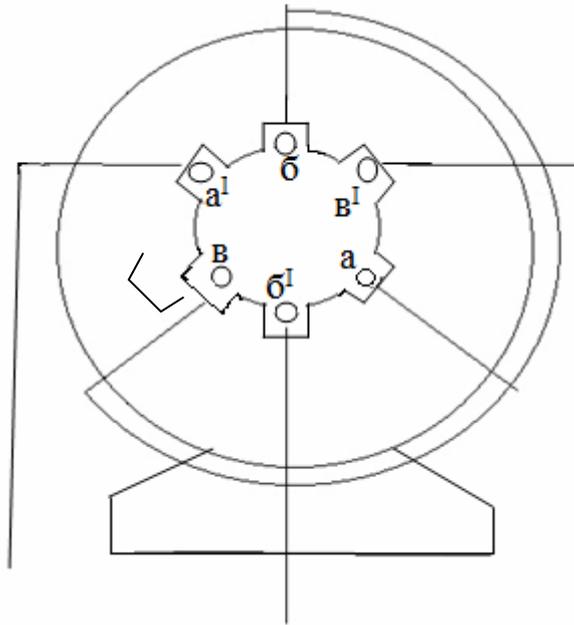


Рис. 5.1. Устройство статора асинхронного двигателя.

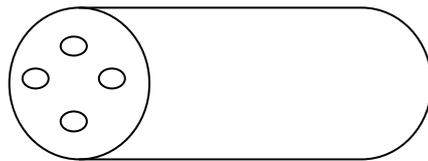


Рис. 5.2. Отверстие в стержне ротора

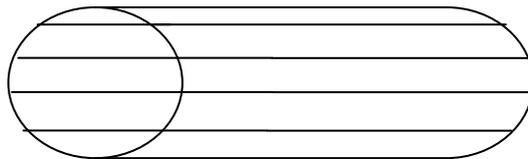


Рис. 5.3. Обмотка ротора

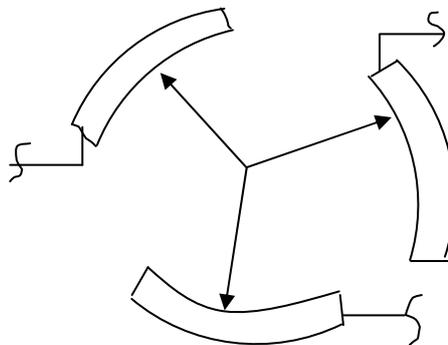


Рис. 5.4. Трёхфазный реостат

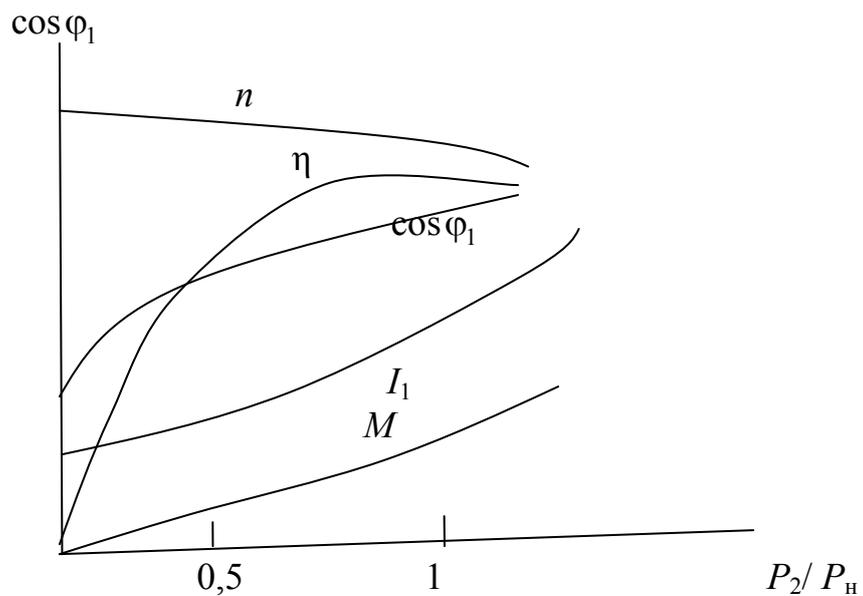


Рис. 5.5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

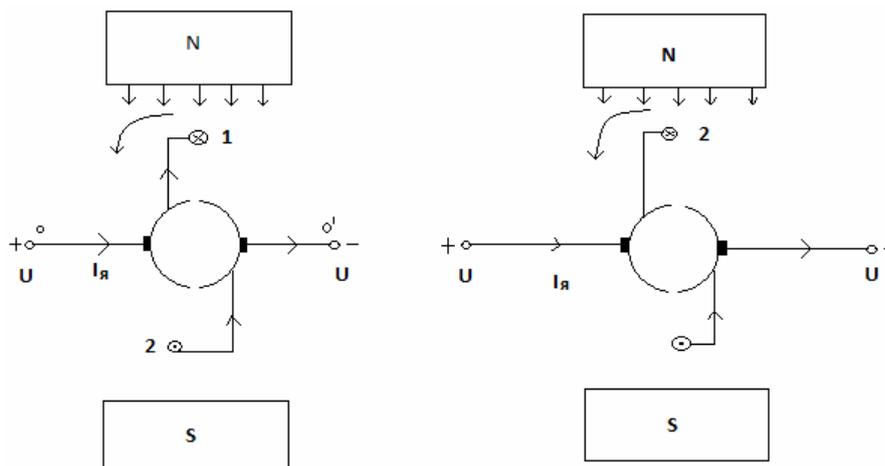


Рис. 5.6. Устройство двигателя постоянного тока

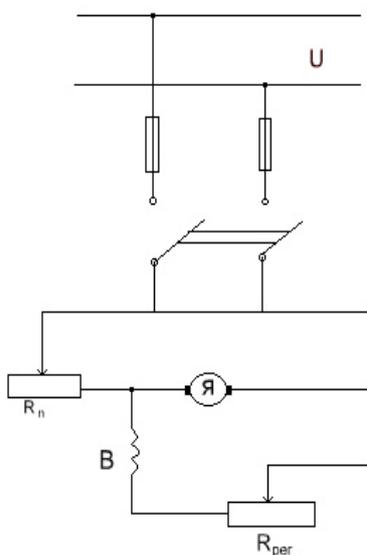


Рис. 5.7. Двигатель с параллельным возбуждением

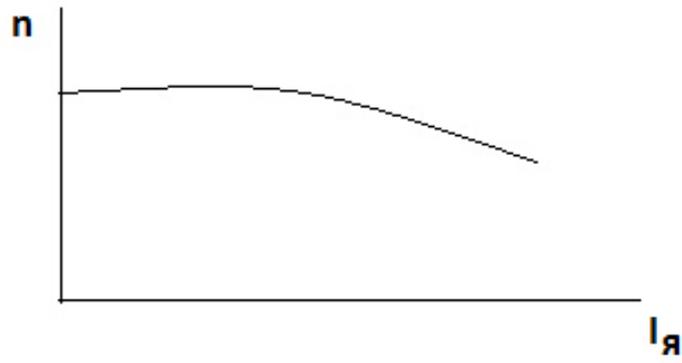


Рис. 5.8. Характеристика двигателя с параллельным возбуждением

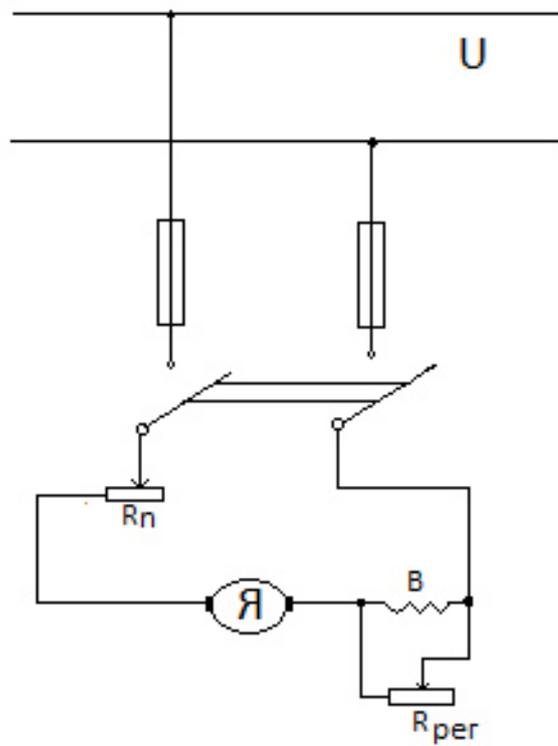


Рис.5.9. Двигатель с последовательным возбуждением

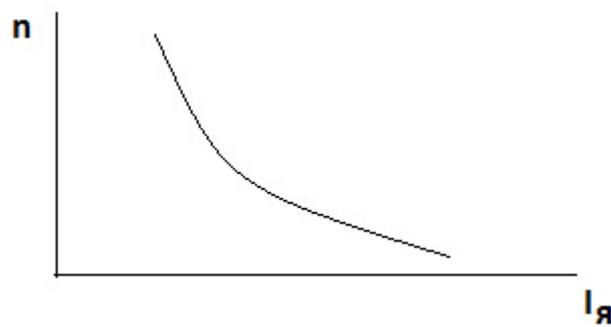


Рис. 5.10. Характеристика двигателя с последовательным возбуждением

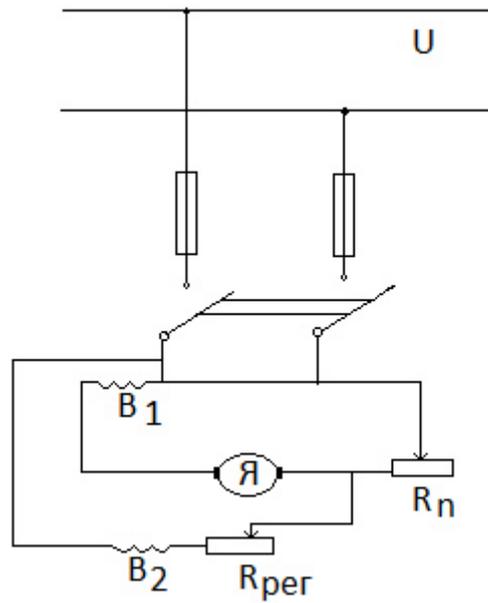


Рис. 5.11. Двигатель со смешанным возбуждением

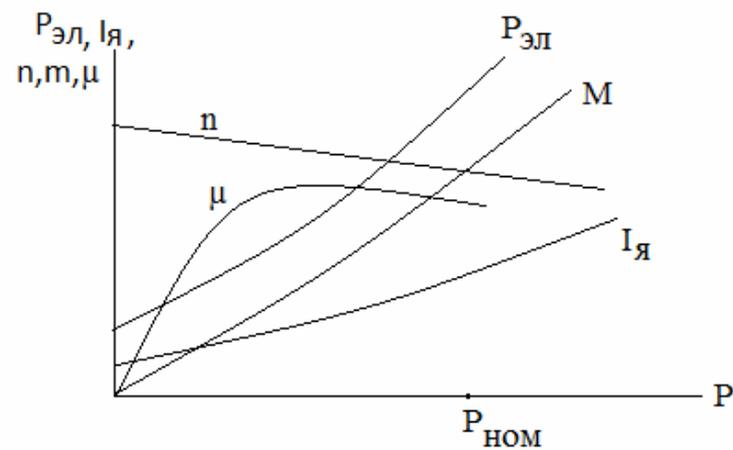


Рис.5.12. Рабочие характеристики двигателя с параллельным возбуждением

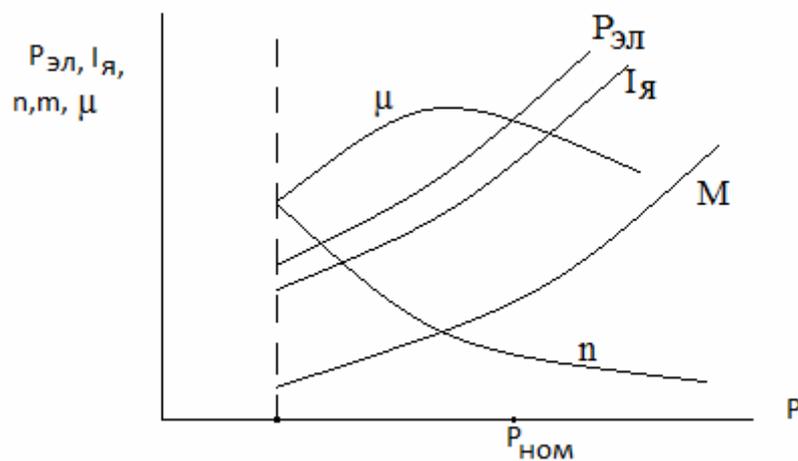


Рис.5.13. Рабочие характеристики двигателя с последовательным возбуждением

Тема №6. Полупроводниковые диоды. Биполярный транзистор

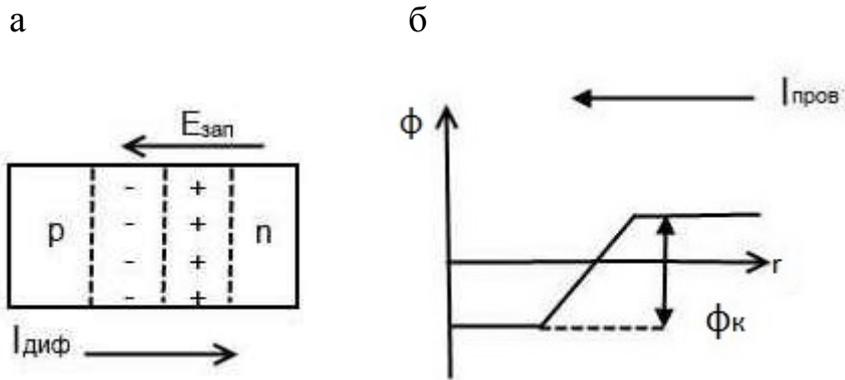


Рис.6.1. Образование *p-n*-перехода

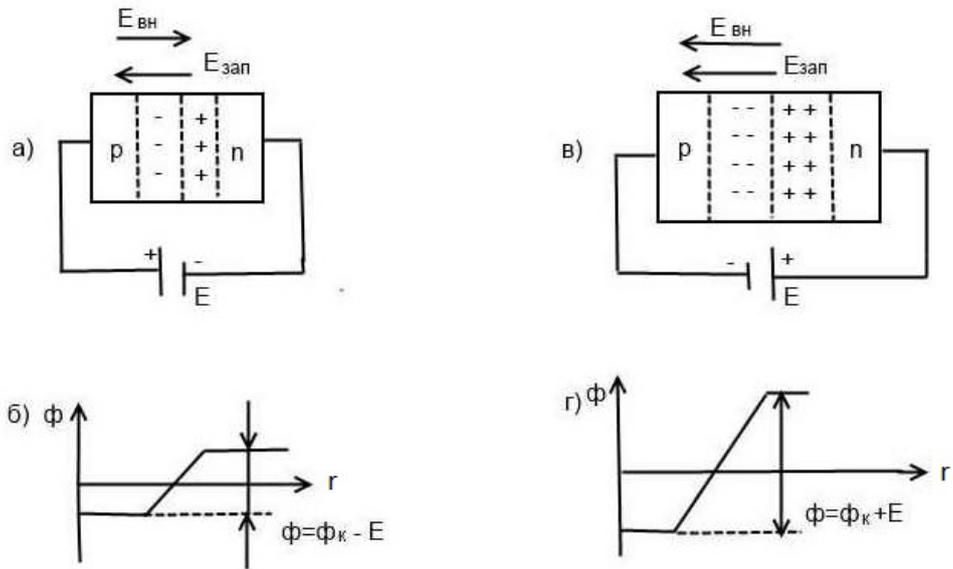


Рис. 6.2. Подключение к *p-n*-переходу внешнего напряжения

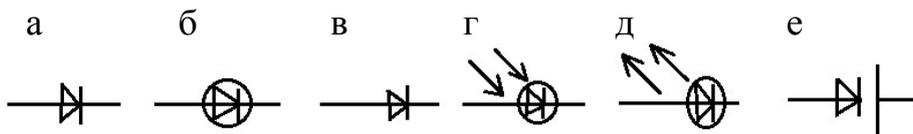


Рис. 6.3. Условные обозначения полупроводниковых диодов: а – выпрямительные диоды; б – сверхвысокочастотные диоды; в – стабилитроны; г – фотодиоды; д – светодиоды; е – варикапы

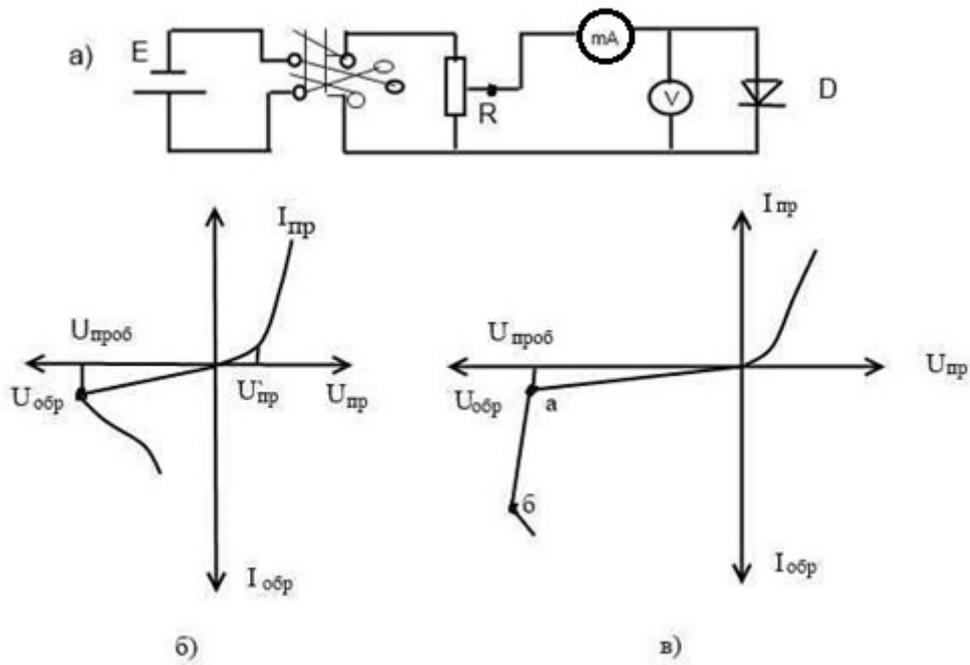


Рис. 6.4. Схема включения, вольт-амперные характеристики диодов

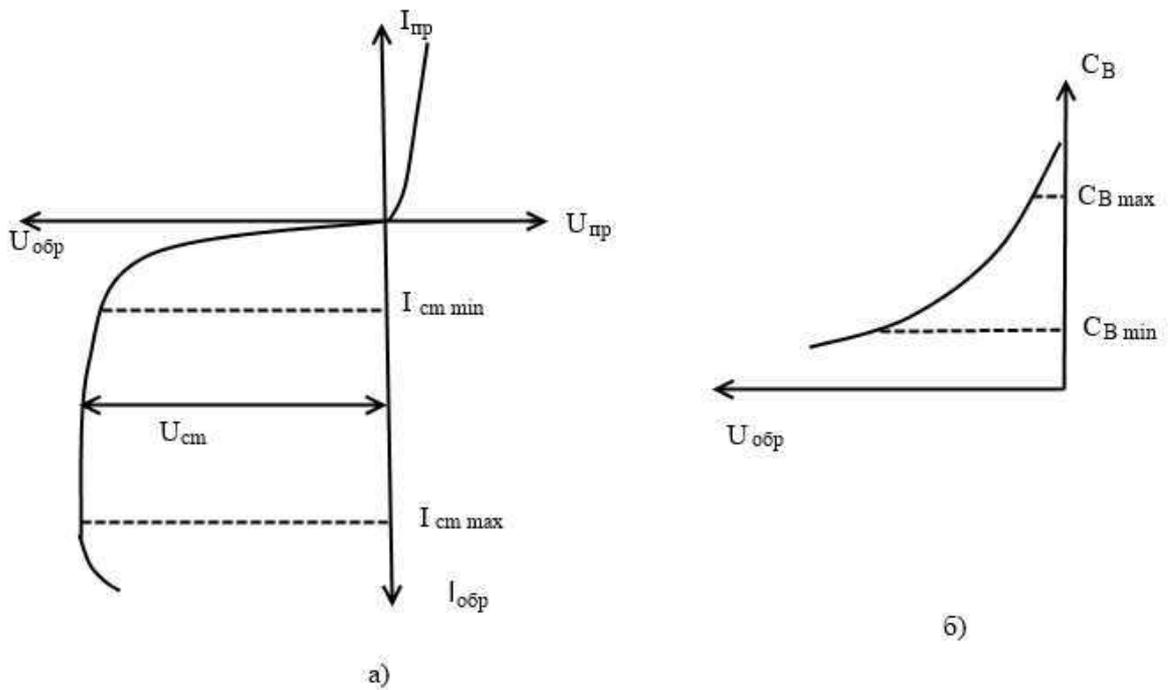


Рис. 6.5. Характеристики специализированных диодов

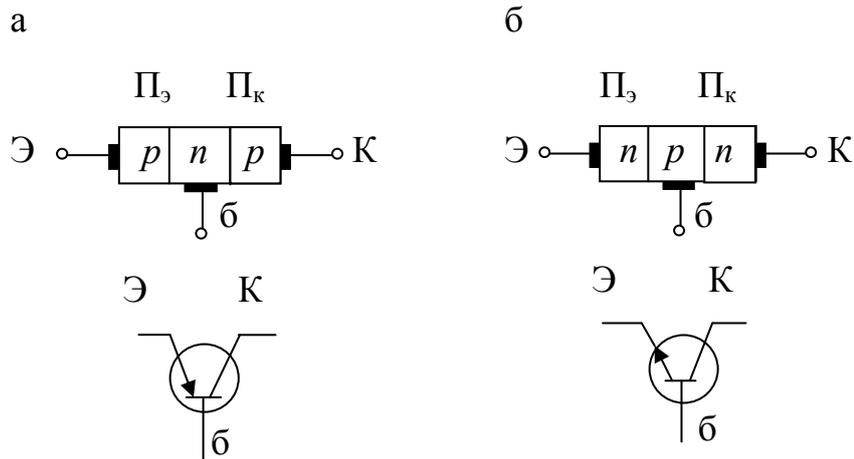


Рис. 6.6 Типы биполярных транзисторов

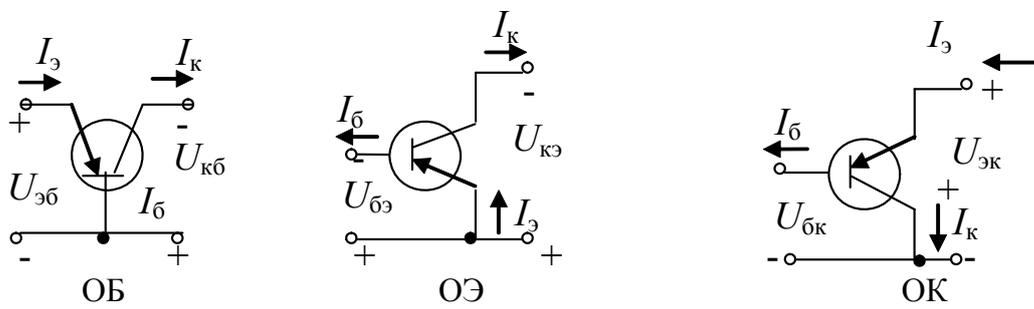


Рис. 6.7. Схемы включения биполярного транзистора

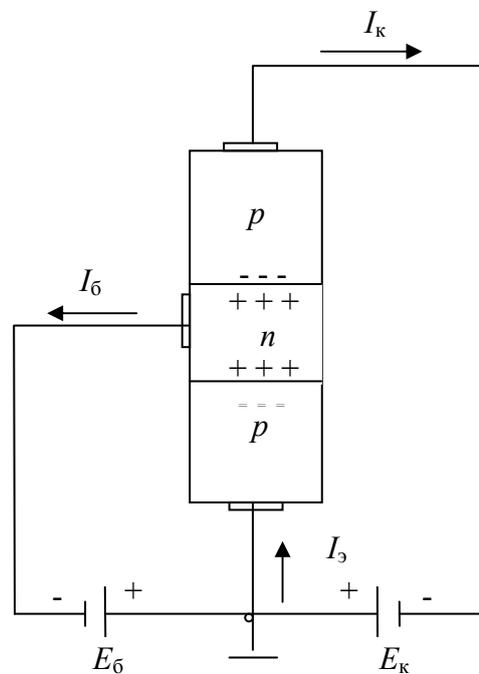


Рис. 6.8. Схема с общим эмиттером

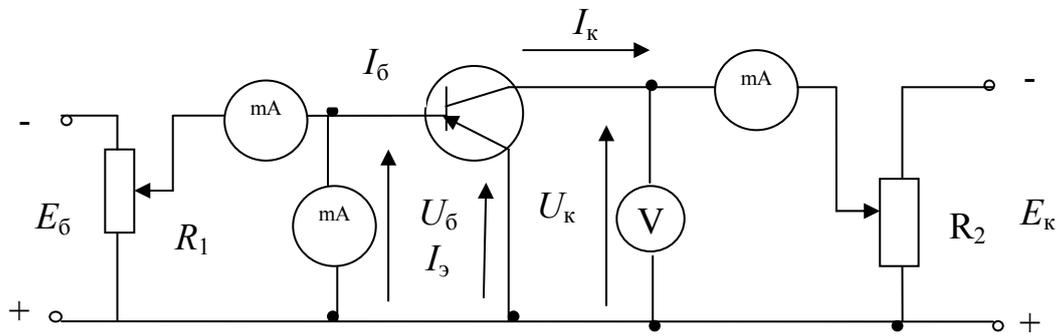


Рис. 6.9. Схема включения биполярного транзистора

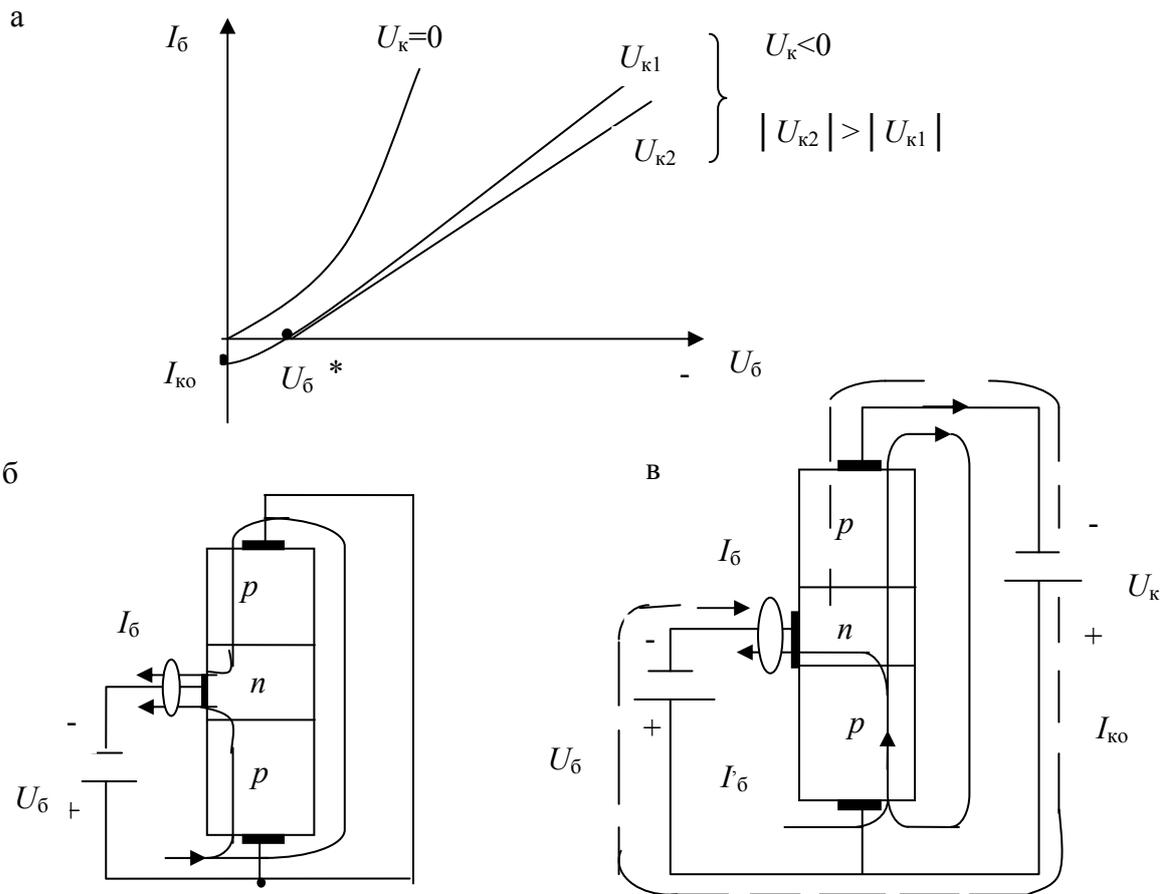


Рис. 6.10 Статические входные характеристики биполярного транзистора

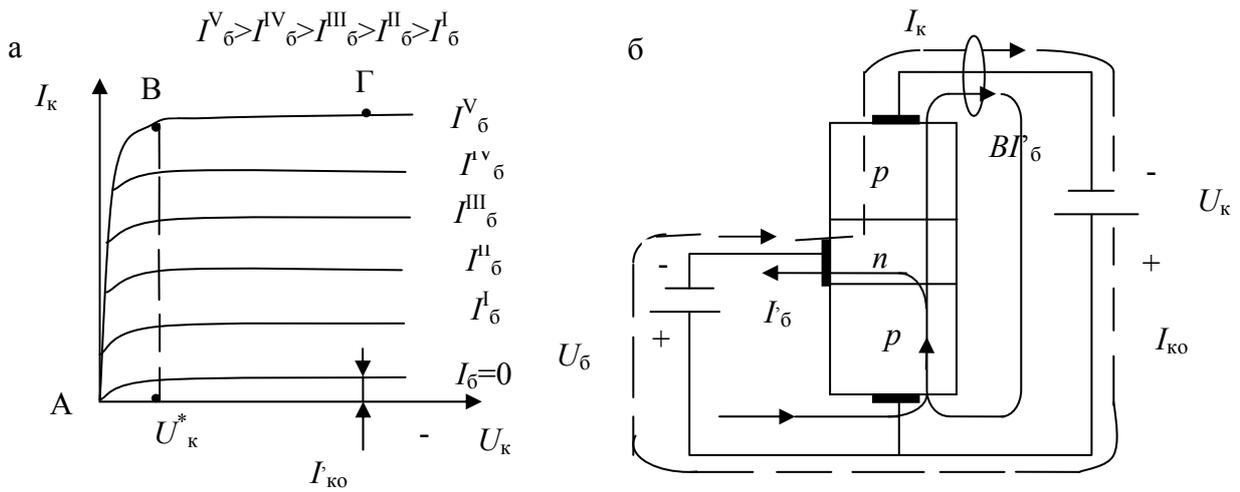


Рис. 6.11. Статические выходные характеристики биполярного транзистора

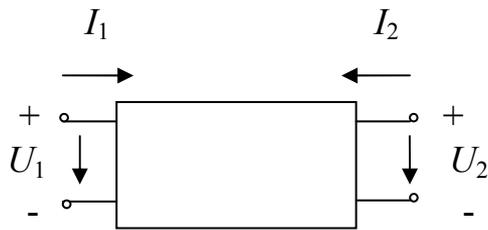


Рис. 6.12. Линейный активный четырехполюсник

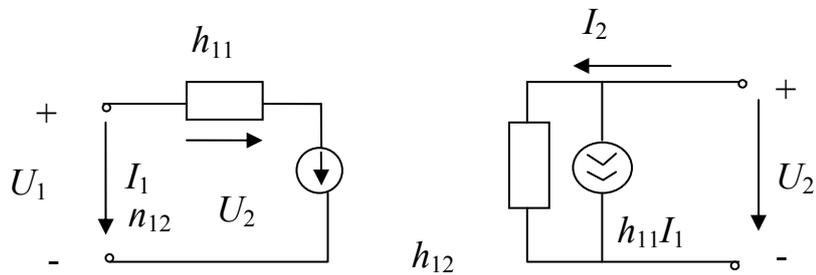


Рис. 6.13. Схема замещения четырехполюсника

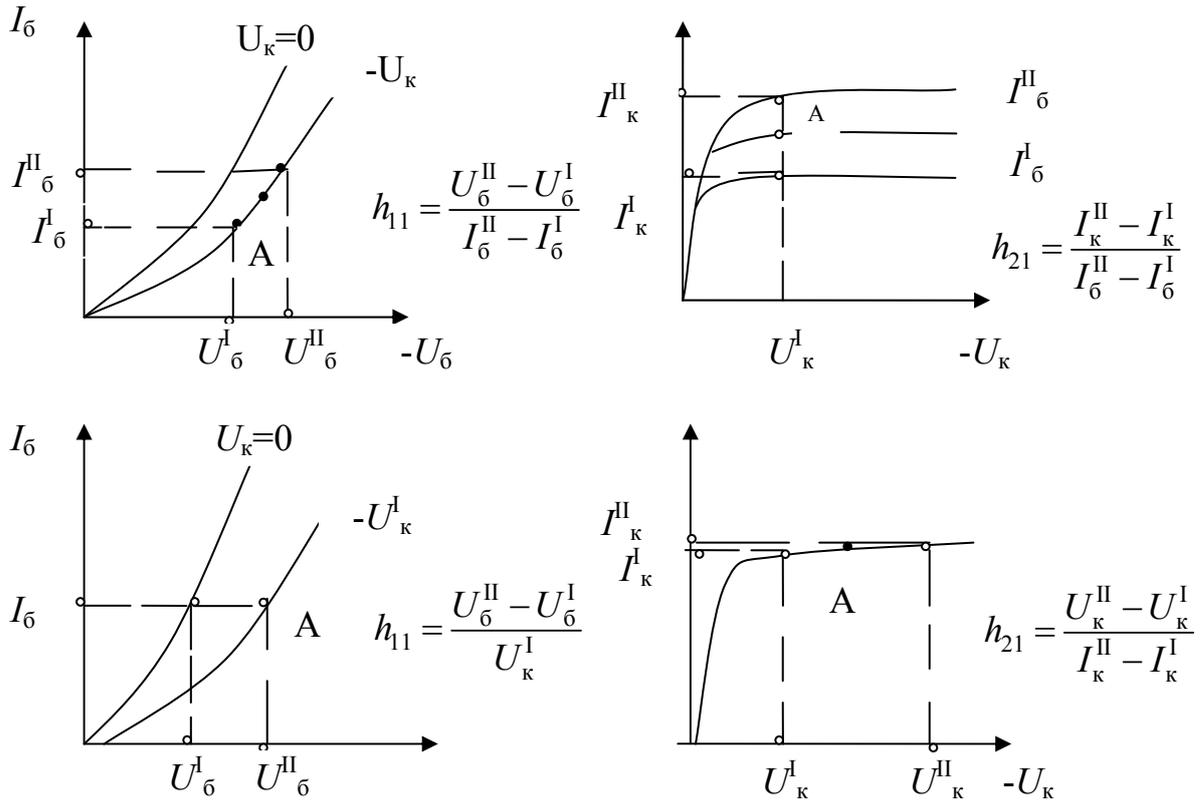


Рис. 6.14. Определение h -параметров по статическим характеристикам

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Общая электротехника и электроника. Ч.1. Электроника [Текст]: учебник / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2015.
2. Электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2014.
3. Основы теории расчета линейных электрических цепей и электро-снабжения объектов [Текст]: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2012.
4. Общая электротехника и электроника. Лабораторный практикум: учебное пособие / Э.М. Пинт [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2016.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Тема №1. Определение электротехники. Общие сведения об электрических цепях и ее элементах. Электрические цепи постоянного тока	6
Тема №2. Однофазный синусоидальный ток и его основные параметры. Электрические цепи однофазного синусоидального тока	16
Тема №3. Электрические цепи трехфазного синусоидального тока	32
Тема №4. Трансформаторы	43
Тема №5. Электрические машины	54
Тема №6. Полупроводниковые диоды. Биполярный транзистор	72
ПРЕЗЕНТАЦИЯ ЛЕКЦИЙ	89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	108

Учебное издание

Пинт Эдуард Михайлович

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
Курс лекций по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация
транспортно-технологических машин и комплексов»
и 23.03.01 «Технология транспортных процессов»

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 1.03.16. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 6,4. Уч.-изд. л. 6,875. Тираж 80 экз.
Заказ №180.



Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.