



*Российская Академия Наук*

**О.Е. Баксанский, С.Э. Демидов**

**Краткий исторический очерк  
развития электротехники**

Москва 2017

УДК 62-1  
ББК 31.2  
Б19

ISBN 978-5-906906-11-3

© Российская академия наук, 2017  
© О.Е. Баксанский, С.Э. Демидов, 2017

# Краткий исторический очерк развития электротехники

О.Е. Баксанский, С.Э. Демидов

Решающая роль в современном научно-техническом прогрессе принадлежит электрификации. Как известно, под электрификацией понимается широкое внедрение электрической энергии в производство и быт, и сегодня нет такой области техники, где в том или ином виде не использовалась электрическая энергия в будущем. Ее применение будет еще более расширяться.

Под электротехникой в широком смысле слова подразумевается область науки и техники, использующая электрические и магнитные явления для практических целей.

Это общее определение электротехники можно раскрыть более подробно, выделив те основные области, в которых используют электрические и магнитные явления: преобразование энергии природы (энергетическая); превращение вещества природы (технологическая); получение и передача сигналов или информации (информационная). Поэтому более полно электротехнику можно определить как область науки и техники, использующую электрические и магнитные явления для осуществления процессов преобразования энергии и превращения вещества, а также для передачи сигналов и информации.

В последние десятилетия из электротехники выделилась промышленная электроника с тремя ее направлениями: информационное, энергетическое и технологическое, – которые с каждым годом приобретают все большее значение в ускорении научно-технического прогресса.

В развитии электротехники условно можно выделить следующие шесть этапов<sup>1</sup>.

## ***1. Становление электростатики (до 1800 г.).***

К этому периоду относятся первые наблюдения электрических и магнитных явлений, создание первых электростатических машин и приборов, исследования атмосферного электричества, разработка первых теорий электричества, установление закона Кулона, зарождение электромедицины.

---

<sup>1</sup> <http://www.electrolibrary.info/history/jetapy.htm>.

## ***2. Закладка фундамента электротехники, ее научных основ (1800–1830).***

Начало этого периода ознаменовано созданием вольтова столба – первого электрохимического генератора, а вслед за ним «огромной наипаче батареи» В.В. Петрова, с помощью которой им была получена электрическая дуга и сделано много новых открытий. Важнейшими достижениями этого периода является открытие основных свойств электрического тока, законов Ампера, Био – Савара, Ома, создание прообраза электродвигателя, первого индикатора электрического тока (мультипликатора), установление связей между электрическими и магнитными явлениями.

## ***3. Зарождение электротехники (1830–1870).***

Самым знаменательным событием этого периода явилось открытие М. Фарадеем явления электромагнитной индукции, создание первого электромашинного генератора. Разрабатываются разнообразные конструкции электрических машин и приборов, формулируются законы Ленца и Кирхгофа, создаются первые источники электрического освещения, первые электроавтоматические приборы, зарождается электроизмерительная техника. Однако широкое практическое применение электрической энергии было невозможно из-за отсутствия экономичного электрического генератора.

## ***4. Становление электротехники как самостоятельной отрасли техники (1870–1890 гг.).***

Создание первого измышленного электромашинного генератора с самовозбуждением (динамо-машины) открывает новый этап в развитии электротехники, которая становится самостоятельной отраслью техники.

В связи с развитием промышленности, ростом городов возникает острая потребность в электрическом освещении, начинается строительство «домовых» электрических станций, вырабатывающих постоянный ток. Электрическая энергия становится товаром, и все более остро ощущается необходимость централизованного производства и экономичной передачи электроэнергии на значительные расстояния. Решить эту проблему на базе постоянного тока было нельзя из-за невозможности трансформации постоянного тока.

Значительным стимулом к внедрению переменного тока явилось изобретение «электрической свечи» П.Н. Яблочковым и разработка им схемы дробления электрической энергии посредством

---

индукционных катушек, представлявших собой трансформатор с разомкнутой магнитной системой. Однако однофазные двигатели были непригодны для целей промышленного электропривода.

Одновременно разрабатываются способы передачи электрической энергии на большие расстояния посредством значительного повышения напряжения линий электропередачи.

Дальнейшее развитие электрического освещения способствовало совершенствованию электрических машин и трансформаторов. В середине 80-х г. началось серийное производство однофазных трансформаторов с замкнутой магнитной системой (М. Дери, О. Блати, К. Циперновский).

Идея П.Н. Яблочкова о централизованном производстве и распределении электроэнергии претворяется в жизнь, начинается строительство центральных электростанций переменного тока. Однако развивающееся производство требовало комплексного решения сложнейшей научно-технической проблемы: экономичной передачи электроэнергии на дальние расстояния и создания экономичного и надежного электрического двигателя, удовлетворяющего требованиям промышленного электропривода. Эта проблема была успешно решена на основе многофазных, в частности трехфазных, систем.

### ***5. Становление и развитие электрификации (с 1891 г.).***

Важнейшей предпосылкой разработки трехфазных систем явилось открытие (1888) явления вращающегося магнитного поля. Первые многофазные двигатели были двухфазными.

Трехфазная система оказалась наиболее рациональной, так как имела ряд преимуществ как перед однофазными цепями, так и перед другими многофазными системами. В разработку трехфазных систем большой вклад сделали ученые и инженеры разных стран. Но как будет показано далее, наибольшая заслуга принадлежит М.О. Доливо-Добровольскому, сумевшему придать своим работам практический характер, создавшему трехфазные синхронные генераторы и асинхронные двигатели, трансформаторы.

Убедительной иллюстрацией преимуществ трехфазных цепей была знаменитая лауфен-франкфуртская электропередача (1891), сооруженная при активном участии Доливо-Добровольского.

С этого времени начинается бурное развитие электрификации: строятся мощные электростанции, возрастает напряжение электропередач, разрабатываются новые конструкции электрических машин, аппаратов и приборов. Электрический двигатель занима-

ет господствующее положение в системе промышленного привода. Процесс электрификации постепенно охватывает все новые области производства: развивается электрометаллургия, электротермия, электрохимия. Электрическая энергия начинает все более широко использоваться в самых разнообразных отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту.

Широкое применение переменного тока потребовало теоретического осмысления и математического описания физических процессов, происходящих в электрических машинах, линиях электропередачи, трансформаторах. Расширяются исследования явлений в цепях переменного тока с помощью векторных и круговых диаграмм.

Огромную прогрессивную роль в анализе процессов в цепях сыграл комплексный метод, предложенный в 1893–1897 гг. Ч. П. Штейнмецом.

С развитием крупных энергосистем и увеличением дальности электропередач возникла серьезная научно-техническая проблема обеспечения устойчивости параллельной работы генераторов электростанции, которая была решена отечественными и зарубежными учеными. Теоретические основы электротехники становятся базой учебных дисциплин в вузах и фундаментом научных исследований в области электротехники.

### ***6. Зарождение и развитие электроники (первая четверть XX в.).***

Рост потребности в постоянном токе (электрохимия, электротранспорт и др.) вызвал необходимость в развитии преобразовательной техники, что привело к зарождению, а затем бурному развитию промышленной электроники.

Электротехника становится базой для разработки автоматизированных систем управления энергетическими и производственными процессами. Создание разнообразных электронных, в особенности микрoeлектронных устройств позволяет коренным образом повысить эффективность автоматизации процессов вычислений, обработки информации, осуществлять моделирование сложных физических явлений, решение логических задач и др. при значительном снижении габаритов, устройств, повышении их надежности и экономичности.

Значительный прогресс в электронике наметился после создания больших интегральных схем (БИС). Быстродействие их измеряется миллиардными долями секунды, а минимальные размеры

---

составляют 2–3 мкм. Внедрение БИС привело к созданию микропроцессоров, осуществляющих цифровую обработку информации по программе, и микроЭВМ.

Быстрое развитие микроэлектроники обусловило возникновение и заметный прогресс новой области науки и техники – информатики. Уже в начале 80-х годов как в нашей стране, так и за рубежом стали изготавливать микропроцессоры и микроЭВМ в одном кристалле. Все это дает огромный эффект в повышении надежности, снижении габаритов и потребляемой энергии микроэлектронных устройств, используемых в различных производственных процессах, автоматизированных системах управления, на транспорте, в бытовых устройствах.

## История электротехники в датах. 1600–1850 гг.<sup>2</sup>

Даты	События в истории электротехники
1600	Первое сочинение о магнитных и электрических явлениях, написанное английским ученым У. Гильбертом, в котором он ввел в науку термин «электричество», назвав «электрическими» тела, способные электризоваться
1650	Создана первая электростатическая машина
1745	Создана лейденская банка (конденсатор), электроизмерительный прибор <b>Ломоносова</b> , электрический указатель <b>Г. В. Рихмана</b> – первый прибор непосредственной оценки
1785	Кулон впервые использовал крутильные весы для электрических и магнитных измерений – один из наиболее точных приборов своего времени
Конец XVIII в.	Установлен закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов (закон Кулона), открыто явление электростатической индукции, доказан электрический характер грозовых явлений в атмосфере, разработан ряд теорий электричества, обнаружено действие электричества на живые организмы, сделаны попытки установления связи между электрическими и магнитными явлениями
конец XVIII – начало XIX вв.	В многочисленных научных трудах описывались разнообразные электростатические машины и приборы, предназначенные для электролечения

---

<sup>2</sup> <http://www.electrolibrary.info/history/hronologiya.htm>.

*продолжение таблицы*

1799	Итальянским ученым <b>А. Вольта</b> создан первый источник постоянного электрического тока – вольтов столб
1800	Англичанами <b>А. Карлейлем</b> и <b>У. Никольсоном</b> впервые осуществлен электролиз воды, а затем и других жидкостей
1803	В труде <b>В.В. Петрова</b> «Известие о гальвани-вольтовых опытах», изданном в 1803 г., впервые указывается на возможность применения электрической дуги для целей освещения, плавки металлов и восстановления металлов из их окислов
1807	Открытие <b>Х. Дэви</b> электролитического способа получения щелочных металлов – калия и натрия, ранее неизвестных в чистом виде; в 1808 г. Дэви таким же путем получил магний, барий, стронций, кальций
1820	<b>Х. Эрстед</b> установил связь магнитного поля с порождающим его током. Были обнаружены ( <b>Д.Ф. Араго</b> ) явление намагничивания проводника протекающим по нему током, а также усиление эффекта намагничивания при замене прямолинейного проводника проволоочной спиралью – соленоидом. Французскими учеными <b>Ж.Б. Био</b> и <b>Ф. Саваром</b> установлен закон действия тока на магнит
1821	Открытие термоэлектричества ( <b>Т. Зеебек</b> ). Г. Дэви показал, что проводимость зависит от материала и температуры проводника. Он также отметил зависимость проводимости от площади сечения проводника. <b>Фарадей</b> установил, что электрический ток, проходящий по проводнику, может заставить этот проводник совершать вращение вокруг магнита или вызывать вращение магнита вокруг проводника. Следовательно, опыт Фарадея являлся наглядной иллюстрацией принципиальной возможности построения электродвигателя
1824	В книге <b>П. Барлоу</b> «Исследование магнитных притяжений» описывалось устройство, известное под названием «колесо Барлоу» и являющееся одним из исторических памятников истории развития электродвигателя
1826–1827	Разработка основ электродинамики и установление электрической природы магнетизма <b>А. Ампером</b> . Электродинамическая теория Ампера изложена им в сочинении «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», изданном в Париже
1827	Немецкий физик <b>Г.С. Ом</b> устанавливает известный закон электрической цепи, носящий его имя. Результаты исследований Ома были опубликованы в 1827 г. в работе «Гальваническая цепь, разработанная математически доктором Г.С. Омом»
1828–1832	<b>П.Л. Шиллингом</b> был разработан первый телеграф. Этот телеграф был основан на визуальном приеме кодовых знаков



окончание таблицы

1831	<b>М. Фарадей</b> показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв явление электромагнитной индукции. Полгода спустя это же явление наблюдалось независимо от Фарадея американским физиком <b>Д. Генри</b>
1832	Установление закона о направлении индуктированного тока, сформулированного <b>Э.Х. Ленцем</b> . Этот закон позволил Ленцу сформулировать важный для электротехники принцип – обратимость генераторного и двигательного режимов электрической машины. Анонимным изобретателем создан первый однофазный синхронный многополюсный генератор
1833–1834	Открытие <b>Фарадеем</b> законов электролиза. Терминология, предложенная Фарадеем (электрод, анод, катод), сохранилось до настоящего времени
1834	Американский физик <b>Д. Генри</b> опубликовал статью «О качательном движении, производимом магнитным притяжением и отталкиванием», в которой он описал построенный им электродвигатель. В этом устройстве впервые сделана попытка использовать притяжение разноименных и отталкивание одноименных магнитных полюсов для получения непрерывного движения (в данном случае качательного). <b>Б.С. Якоби</b> построил и описал первый двигатель с вращательным движением якоря
1837	В процессе разработки проекта подводной телеграфной линии Петергоф – Кронштадт <b>Шиллингом</b> был впервые применен каучук для изолирования подводного кабеля, а также указана возможность использования воды или земли в качестве обратного провода
1838	<b>Э.Х. Ленц</b> практически осуществил обратимость электрической машины постоянного тока, заставив ее работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. <b>Б.С. Якоби</b> открыл гальванопластику, которая позволила получать электролизом точные копии с поверхности предметов и сразу же нашла практическое применение в полиграфии, медальерном деле и других отраслях промышленности
1841–1842	Русский ученый <b>Э.Х. Ленц</b> и английский ученый <b>Дж.П. Джоуль</b> независимо друг от друга нашли количественные характеристики теплового действия тока (закон Джоуля – Ленца)
1844	Создана первая дуговая лампа ( <b>Ж.Б.Л. Фуко</b> ). Была построена между Вашингтоном и Балтимором первая линия телеграфа <b>Морзе</b>
1847	Немецким физиком <b>Г.Р. Кирхгофом</b> были сформулированы два закона для разветвленных электрических цепей (законы Кирхгофа)
1850	<b>Б.С. Якоби</b> разработана конструкция буквопечатающего телеграфа

## Электрический ток

*Электрическим током называется направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц.*

Это определение электрического тока, которое наиболее часто можно встретить в различных учебных пособиях и справочниках. Оно, безусловно, правильное, однако есть необходимость сделать некоторые уточнения. На основании этого определения может возникнуть представление, что электрический ток – это заряженные частицы, движущиеся стройными рядами параллельно друг другу в каком-то одном направлении, но это не так.

Во-первых, частицы движутся беспорядочно (как и все другие частицы, из которых состоит вещество), но при электрическом токе, на это движение накладывается смещение всех частиц в каком-то одном направлении.

Во-вторых, при электрическом токе решающим является результирующий перенос электрического заряда, а его не всегда переносят непосредственно частицы (это могут быть «дырки»; с ними мы познакомимся, когда займемся изучением полупроводников).

Рассмотрим условия, при которых может возникнуть электрический ток. Поскольку электрический ток это, по сути, перенос электрических зарядов, то необходимы объекты-носители этих зарядов (заряд сам по себе, без носителя, существовать не может). Чаще всего носителями являются заряженные частицы. Все вещества состоят из частиц, значительная часть которых заряжена (электроны и протоны в составе атомов), но, чтобы частица смогла перемещать заряд, она должна быть свободна. Первым условием существования электрического тока является наличие *свободных заряженных частиц*. Вещества, молекулярная структура которых такова, что заряженные частицы внутри них могут свободно беспорядочно перемещаться называются *проводниками*. Вторым условием существования электрического тока является *наличие сторонней силы*, вынуждающей беспорядочно движущиеся заряженные частицы одновременно смещаться в каком-то направлении. Как правило, источником такой силы является электрическое поле, создаваемое внутри проводника *источником питания*.

Электрический ток относится к разряду явлений, которые человек не может наблюдать визуально – мы не можем отличить провод, по которому течет электрический ток, от провода, в котором его нет. О наличии электрического тока можно судить только по его воздействиям на окружающую среду, а именно вокруг про-

водника с током можно обнаружить магнитное поле (с помощью магнитной стрелки, например); проводник, по которому течет ток, нагревается; протекание тока через некоторые вещества изменяет их химический состав... Именно эти проявления электрического тока в первую очередь и были исследованы.

Исторически так сложилось, что большинство полезных действий электрического тока человек научился использовать до того, как было выяснено, что именно представляет электрический ток, как и с помощью чего происходит перенос заряда в проводнике. То есть основные электротехнические устройства и способы расчета электрических цепей были изобретены до понимания ученым сообществом физической сути явления «электрический ток». Так оказалось, что принятое исследователями положительное направление электрического тока от «+» к «-» не всегда соответствует реальному движению зарядов. *Для расчета электрических цепей реальное направление движения заряженных частиц не имеет принципиального значения.*

Количественной характеристикой явления «электрический ток» является **сила тока**.

***Сила тока показывает, какой суммарный заряд протекает через поперечное сечение проводника за единицу времени.***

Это определение выражается формулой

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

где

$I$  – сила тока;

$q$  – модуль электрического заряда;

$t$  – время.

Единицей измерения силы тока в СИ принят 1 *ампер* (А), учитывая, что заряд измеряется в *кулонах* (Кл), а время в *секундах* (с):

$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}.$$

Необходимо отметить, что данная формула справедлива только для постоянного тока. Если ток изменяется со временем, то в каждый момент времени количество зарядов, протекающее через поперечное сечение проводника, разное. В этом случае формула для расчета силы тока должна быть уточнена:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (1.2)$$

или (еще более точно)

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (1.3)$$

$$i = q'(t). \quad (1.4)$$

## Электрические цепи

*Электрическая цепь представляет собой совокупность соединенных между собой элементов (устройств), в которой обеспечены условия для протекания электрического тока.*

Условий для протекания электрического тока два.

**Первое** – наличие свободных заряженных частиц. Это условие обеспечивается в любом проводнике, а также в любом электро-техническом устройстве в рабочем состоянии.

**Второе** – наличие внутри цепи сторонней силы принуждающей заряженные частицы к движению. Как правило, эта сила возникает в результате существования электрического поля внутри цепи, которое создается источниками электродвижущей силы (ЭДС).

Все элементы, из которых состоит электрическая цепь, условно можно разделить на три группы.

**Первая** – *источники тока*. В эту группу входят устройства, создающие электрическое поле внутри цепи, к ним относятся гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы электрического тока... Во всех этих устройствах происходит преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля. Вне зависимости от конкретного вида их принято называть источниками ЭДС.

**Вторая** – *приемники электрической энергии (электроприемники)*. В эту группу входят элементы, которые преобразуют энергию электрического поля в какой-нибудь, удобный для непосредственного использования, вид энергии (механическую, тепловую, световую, химическую...).

**Третья** – *управляющие элементы*. Это элементы, обеспечивающие передачу электроэнергии от источника к приёмнику (провода, стабилизирующие устройства...).

Для расчета электрической цепи ее удобно изобразить графически с помощью условных обозначений (сделать принципиальную схему цепи). Вид и размеры условных обозначений элементов электрических цепей определяется ГОСТами (табл. 1).

Электрические цепи бывают не разветвленными и разветвленными. *Ветвью* электрической цепи называют участок цепи, через который протекает один и тот же ток. Место соединения более двух ветвей называют *узлом*.

Любой замкнутый путь электрического тока называют *контуром* электрической цепи.

Не разветвленная цепь (схема простейшей цепи представлена на рис. 1) не имеет узлов и состоит из одной ветви и одного контура. Разветвленные (сложные) цепи могут иметь неограниченное количество ветвей и контуров. Например, в цепь, схема которой изображена на рис. 2, состоит из трех ветвей – *efab*, *eb* и *edce*; трех контуров – *abefa*, *bcdeb* и *acdfa*; также в ней имеется два узла в точках *b* и *e*.

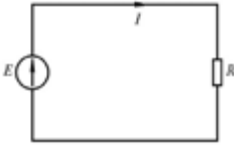


Рис. 1. Схема простейшей (не разветвленной) цепи

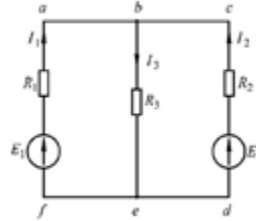


Рис. 2. Схема разветвленной (сложной) цепи

## Электрическое сопротивление

Любой элемент электрической цепи так или иначе препятствует протеканию электрического тока. Это вызывается разными причинами, изучение которых выходит за рамки данного курса. Нас будут интересовать лишь внешние проявления этого свойства, которое количественно характеризуется *электрическим сопротивлением*.

Сопротивление проводника зависит от геометрических размеров проводника, свойств вещества, из которого проводник изготовлен, а также от температуры проводника. Все это выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.1)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника;  $\rho$  – удельное сопротивление вещества, из которого изготовлен проводник;  $l$  – длина проводника;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

За единицу измерения электрического сопротивления в СИ принят 1 Ом.

Удельное сопротивление вещества определяется с помощью экспериментов, на основании которых составляются справочные таблицы (табл. 2). Оно зависит от температуры. Как правило, в таблицах для массового использования указывается удельное сопротивление веществ при температуре 20 °С. Чаще всего в качестве проводников используются металлы. В небольших диапазонах температур их удельное сопротивление изменяется незначительно, поэтому при расчетах электрических цепей допустимо использовать таблицы для массового использования и не учитывать зависимость сопротивления проводника от температуры.

За единицу измерения удельного сопротивления вещества в СИ принят 1 Ом·м, однако для практического использования эта единица неудобна, поскольку при ее использовании поперечное сечение проводника необходимо выражать, как того требует СИ, в м<sup>2</sup>, что тоже не очень удобно, и на практике удельное сопротивление допустимо выражать в Ом·мм<sup>2</sup>/м, соответственно площадь поперечного сечения – в мм<sup>2</sup>.

Помимо электрического сопротивления, при расчетах некоторых электрических цепей используют величину *электрическая проводимость*, обратную электрическому сопротивлению:

$$g = \frac{1}{R}. \quad (3.2)$$

За единицу электрической проводимости принят 1 *сименс* (См).

Устройство обладающее заданным электрическим сопротивлением (постоянным или переменным) называется *резистором*.

### Электродвижущая сила

Одним из условий существования электрического тока является наличие электрического поля внутри электрической цепи. Для этого необходимо, чтобы на ее концах была разность потенциалов или электрическое напряжение. Это электрическое напряжение создает источник тока. Источник тока – это устройство, которое предназначено для преобразования какого-либо вида энергии (механической, химической, световой...) в энергию электрического поля.

Основной характеристикой источника тока является *электродвижущая сила*, сокращенно ЭДС. Часто для упрощения источника тока называют источниками ЭДС. Величину ЭДС принято обозначать буквой  $E$ . На рис. 3 показано, как изображается источник ЭДС на схемах.

Электродвижущая сила – это величина, которая характеризует энергию, которую может обеспечить источник тока для перемещения единичного заряда по замкнутой цепи. За счет этой энергии электрическое поле совершает работу по перемещению электрических зарядов от одного полюса источника до другого. Работа, которую совершает электрическое поле по перемещению единичного заряда по цепи вне источника, характеризуется внешним напряжением  $U$ , а внутри источника – внутренним  $U_r$ . Таким образом, справедливо следующее соотношение:



Рис. 3. Изображение источника ЭДС на схемах

$$E = U + U_r. \quad (4.1)$$

ЭДС, так же как и электрическое напряжение, измеряется в *вольтах*.

## Закон Ома

Участок электрической цепи, по которой протекает электрический ток, характеризуется тремя основными параметрами: электрическим сопротивлением, электрическим напряжением на концах участка и силой тока. Именно эти параметры, в совокупности, определяют интенсивность внешних проявлений электрического тока. На конкретном участке цепи эти три величины взаимосвязаны. Количественное соотношение этих величин впервые сумел установить французский физик Георг Ом, поэтому впоследствии оно было названо законом Ома.

Для участка цепи, не содержащего источник тока, это соотношение выглядит так:

$$U = IR, \quad (5.1)$$

где  $U$  – электрическое напряжение на концах участка;  $I$  – сила тока на участке;  $R$  – полное электрическое сопротивление участка.

Для полной цепи (замкнутой цепи содержащей источник тока) закон Ома выглядит иначе. Замкнутая цепь, содержащая источ-

ник тока состоит из двух частей – цепь вне источника тока, её называют внешней цепью и источник тока. Источник тока, как и любой другой элемент электрической цепи, обладает электрическим сопротивлением. Его называют внутренним сопротивлением источника тока. С учетом вышеуказанного выражение закона Ома для полной цепи записывается так:

$$E = IR + Ir \quad (5.2)$$

где  $E$  – ЭДС источника тока;  $I$  – сила тока в цепи;  $R$  – полное электрическое сопротивление внешней цепи;  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока.

Нетрудно заметить что это выражение и формула (4.1), по сути, одно и то же.

### Соединения элементов электрической цепи

Элементы электрической цепи можно соединить между собой последовательно или параллельно.

*Последовательное соединение (неразветвленный участок электрической цепи).*

При последовательном соединении начало каждого последующего элемента соединяется с концом предыдущего.

Такой тип соединения имеет следующие свойства.

Общее сопротивление участка последовательно соединенных элементов рассчитывается по формуле

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (6.1)$$

Напряжение на участке равно сумме напряжений на отдельных элементах цепи:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (6.2)$$

Сила тока  $I$  одинакова на всем последовательном участке цепи.

*Параллельное соединение (разветвленный участок электрической цепи).*

При параллельном соединении соединяются между собой все начала элементов и так же соединяются их концы.

Этот тип соединения имеет такие свойства.



Общее сопротивление такого участка рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (6.3)$$

Часто вместо сопротивления используется обратная ему величина – **проводимость**:

$$g = \frac{1}{R}. \quad (6.4)$$

Для расчета общей проводимости применяется формула

$$g = g_1 + g_2 + \dots + g_n. \quad (6.5)$$

Нередко встречаются частные случаи параллельных соединений:

а) параллельно соединены только два элемента, тогда общее сопротивление можно рассчитать по формуле

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (6.6)$$

б) все соединенные элементы имеют одинаковые сопротивления  $R_n$ , количество самих элементов –  $n$ :

$$R = \frac{R_n}{n}. \quad (6.7)$$

Напряжение на всех элементах последовательной цепи одинаково  $U$ .

Общая сила тока  $I$  равна сумме сил тока во всех её ветвях  $I_n$ :

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (6.8)$$

На практике цепи имеют как последовательно соединенные участки, так и параллельно, и для расчета параметров цепей необходимо применять комбинации из вышеуказанных формул.

## Расчет электрической цепи

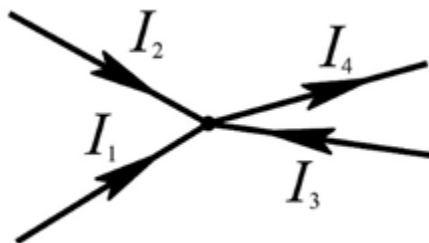
Расчет электрической цепи подразумевает нахождение токов, протекающих во всех ветвях цепи. Для решения этой задачи применяют *законы(правила) Кирхгофа*.

### Первый закон Кирхгофа

*Алгебраическая сумма токов ветвей для любого узла электрической цепи равна нулю.*

При составлении уравнения первого закона Кирхгофа токи, текущие к узлу, считаются положительными, от узла – отрицательными.

Пример, см. рис.

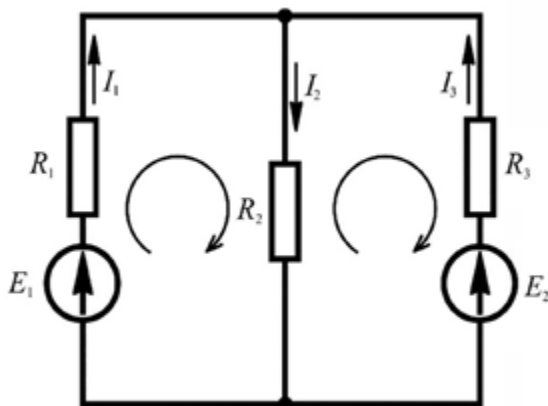


$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad (7.1)$$

### Второй закон Кирхгофа

*Алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре электрической цепи равна сумме падений напряжения на всех элементах этого контура.*

Для того чтобы разобраться, как использовать эти законы, рассмотрим пример цепи (см. рис.).



Эта цепь содержит три ветви, и соответственно для ее расчета надо найти три тока  $-I_1, I_2, I_3$ . Для этого надо составить систему из трех уравнений.

Сначала произвольно выбираем направления токов во всех ветвях и с учетом выбранных направлений записываем уравнения первого закона Кирхгофа. Если сложная цепь имеет  $n$  узлов, то число уравнений, которые можно составить на основании первого закона Кирхгофа,  $n - 1$ . В нашем примере узлов два, поэтому можно записать только одно уравнение первого закона Кирхгофа. (Записать можно, конечно, уравнения и для каждого узла, но они окажутся равноценными.)

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

Рассматриваем один из контуров цепи, произвольно выбираем направление его обхода и составляем уравнение второго закона Кирхгофа. Если направление ЭДС совпадает с направлением обхода, то ставим знак «+», если противоположно – то «-».

$$E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2$$

Подобным образом поступаем для любого другого контура и составляем еще одно уравнение второго закона Кирхгофа:

$$-E_2 = -I_2 R_2 - I_3 R_3$$

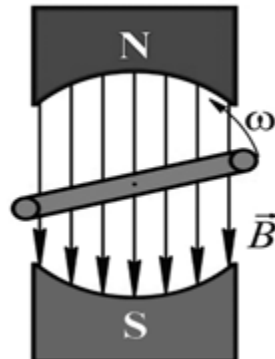
После составления системы уравнений остается решить ее и найти неизвестные величины.

## Электрические цепи переменного тока

### Получение переменного тока

Под термином «переменный ток» мы будем понимать вынужденные колебания электрического тока, которые происходят по синусоидальному закону.

Получить переменный ток можно, вращая проводящую рамку в магнитном поле.



В соответствии с законом электромагнитной индукции в рамке возникает ЭДС:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{t} = -\Phi'(t). \quad (2.1)$$

Если учесть, что магнитный поток через рамку вследствие вращения рамки меняется по закону

$$\Phi = BS \cos\omega t, \quad (2.2)$$

то, продифференцировав (2.2), для ЭДС индукции в рамке получаем уравнение:

$$e = \omega BS \sin\omega t. \quad (2.3)$$

Если к концам рамки подключить электрическую цепь, то по ней потечет синусоидальный переменный ток (так как ЭДС изменяется синусоидально).

### Основные параметры переменного тока

*Мгновенные значения* силы тока –  $i$ , напряжения –  $u$ , электродвижущей силы –  $e$ . Эти параметры зависят от времени и выражаются уравнениями

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.4)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.5)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.6)$$

В этих уравнениях  $I_m$ ,  $U_m$ ,  $E_m$  – амплитудные (или максимальные) значения силы тока, напряжения и электродвижущей силы соответственно.

Для расчета удобства электрических цепей используют *действующие значения* силы тока  $I$ , напряжения  $U$  и ЭДС  $E$ . Действующим значением параметра называют такое значение соответствующего параметра *постоянного тока*, при протекании которого в данной цепи выделяется такое же количество теплоты, что и при протекании описываемого переменного тока.

Амплитудные и действующие значения связаны следующими соотношениями:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.7)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.8)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.9)$$

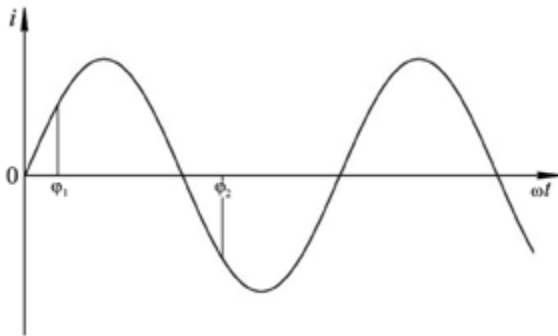
*Циклическая частота* –  $\omega$ . Этот параметр позволяет описывать периодические процессы с помощью уравнений вращательного движения, что весьма удобно. Единица измерения циклической частоты –  $c^{-1}$ .

*Частота* –  $f$ . Частота показывает, какое количество полных циклов изменения совершает величина за единицу времени. Измеряется частота в *герцах* (Гц).

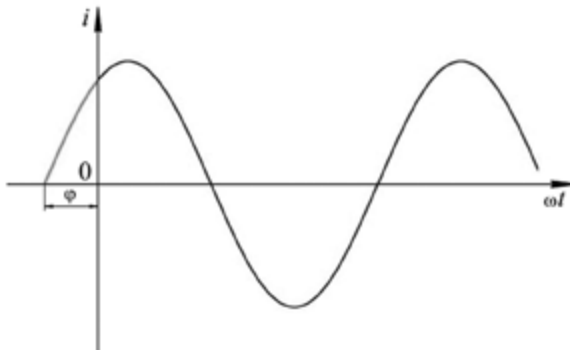
Частота и циклическая частота связаны между собой соотношением:

$$\omega = 2\pi f. \quad (2.10)$$

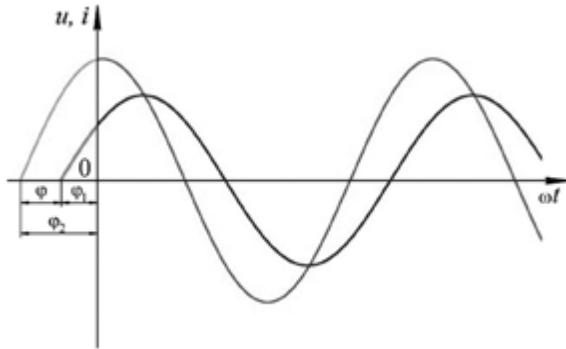
Угловая величина  $\varphi$  характеризует состояние колебательного процесса и называется *фазой колебаний*.



Фаза колебаний в момент начала наблюдений называется *начальной фазой* колебаний. На рисунке показан график колебаний силы тока с начальной фазой  $\varphi$ .

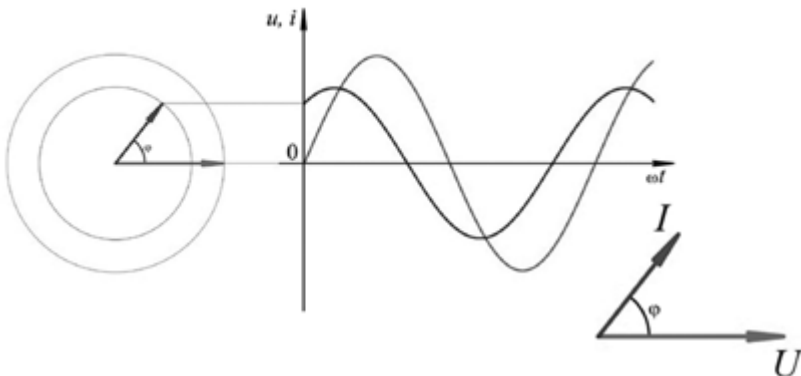


В цепи переменного тока одновременно происходят колебания силы тока и напряжения. В зависимости от свойств элементов, составляющих цепь, начальные фазы этих величин могут не совпадать. Разность между начальными фазами колебаний величин называют *сдвигом фаз* (или *разностью фаз*) (см. рис.).



$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (2.11)$$

Соотношение фаз силы тока и напряжения на элементах цепи переменного тока является очень важной характеристикой и влияет на результат протекания тока по цепи. Поскольку все величины в цепи совершают колебания с одинаковой частотой, то их соотношение удобно наглядно изображать с помощью векторных диаграмм. На векторной диаграмме величина изображается с помощью вектора, модуль которого, в масштабе, равен амплитудному значению величины. Угол между векторами величин соответствует разности фаз между ними (см. рис.).

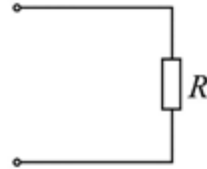


## Нагрузки в цепи переменного тока

### Активное сопротивление в цепи переменного тока

Сопротивление, которое возникает из-за молекулярной структуры проводника, которая препятствует движению заряженных, частиц называют активным.

Здесь нет никаких различий по сравнению с постоянным током. Используя действующие значения силы тока и напряжения, можно пользоваться всеми законами постоянного тока без изменений.

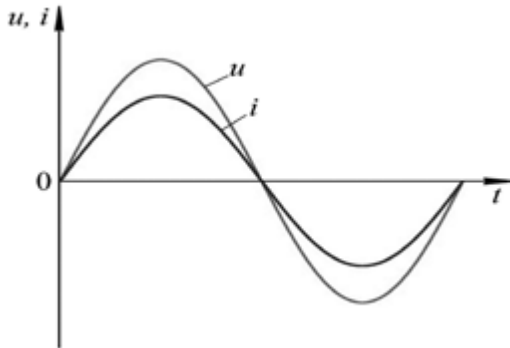


$R$  – активное сопротивление.

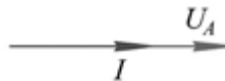
Закон Ома в случае цепи только с активным сопротивлением записывается так:

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

Активное сопротивление никак не влияет на соотношение фаз между силой тока и напряжением. Совмещенные графики этих величин выглядят так:



Векторная диаграмма:



На активном сопротивлении сила тока и напряжение колеблются синфазно (в одинаковых фазах).

В цепях постоянного тока никакого другого сопротивления не существует, иное в цепи переменного.

### Катушка индуктивности в цепи переменного тока.

Проводник, намотанный витками на основу, представляет собой катушку индуктивности.

$L$  – катушка индуктивности.

Для постоянного тока расположение проводника в пространстве значения не имеет (важны только длина и сечение проводника, которые определяют активное сопротивление). Переменный ток создает в каждом витке провода переменный магнитный поток, который, в свою очередь, создает в этом же витке электродвижущую силу, препятствующую приложенной ЭДС извне. Это создает дополнительное препятствие для протекания переменного тока через катушку, которое характеризуется *индуктивным сопротивлением*:

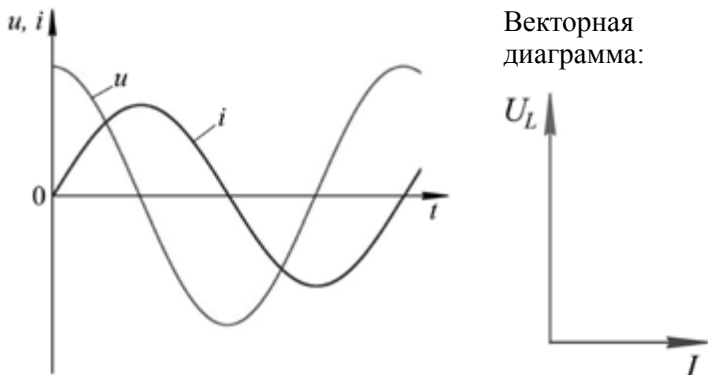
$$X_L = \omega L. \quad (2.12)$$

Индуктивное сопротивление зависит от частоты переменного тока – чем она выше, тем больше индуктивное сопротивление.

Закон Ома для цепи переменного тока, содержащей только индуктивность, записывается так:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.13)$$

Поскольку катушка индуктивности препятствует любым изменениям электрического тока, то сила тока в ней отстает от напряжения. Совмещенные графики этих величин выглядят так:





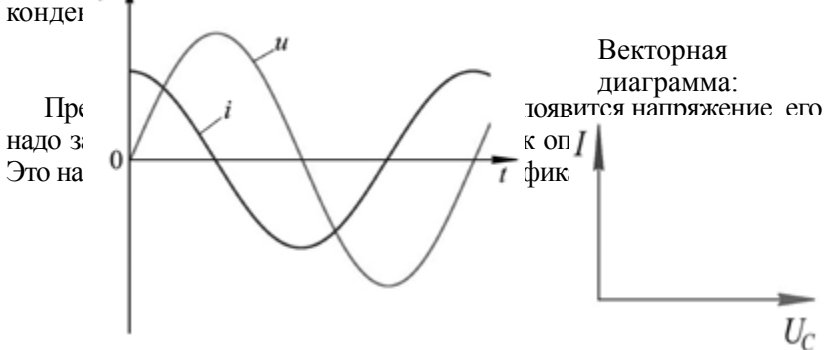
Таким образом, на индуктивности напряжение опережает силу тока на четверть периода, или на

**Конденсатор в цепи переменного тока:** 
$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ гома.} \tag{2.14}$$

Поскольку ток опережает напряжение на четверть периода (это его свойство проводящих вращающихся дисков), требуется отсечь постоянную составляющую тока (для этого конденсатор подает сигнал о направлении изменения напряжения). Это приводит к тому, что он будет постоянно перезаряжаться, что создает ЭДС индукции, которая характеризует емкостное сопротивление  $I = \frac{U}{X_C}$ .

Емкостное сопротивление зависит от частоты переменного тока – чем она выше, тем меньше индуктивное сопротивление.

Закон конденсатора, содержащей только



На емкости напряжение отстает от силы тока четверть периода, или на  $\frac{\pi}{2}$ .

## Мощность в цепи переменного тока

### Цепь с активным сопротивлением

Активная мощность в цепи с активным сопротивлением является постоянной слагаемой мгновенной мощности.

$$P_A = U_A I = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.15)$$

где  $P_A$  – активная мощность (средняя мощность за период).

Эти формулы совпадают с формулами для расчета мощности в цепях постоянного тока. В СИ единица измерения активной мощности – *ватт* (Вт). Именно активная мощность может быть полезной. За счет активной мощности электрическая цепь может совершить полезную работу или выделить энергию в виде количества теплоты.

### Цепь с индуктивностью

В цепи, которая содержит индуктивность, энергия то потребляется, то отдается источнику. Среднее значение мощности переменного тока за период в такой цепи равно нулю. Мощность, создаваемая индуктивностью, является частью *реактивной мощности* и обозначается  $Q_L$ . Чем больше реактивная мощность, тем больше линия загружается бесполезными токами.

$$Q_L = U_L I = P X_L. \quad (2.16)$$

В качестве единицы измерения реактивной мощности часто используют вар (вольт-ампер реактивный). За счет реактивной мощности не может быть совершена полезная работа.

### Цепь с емкостью

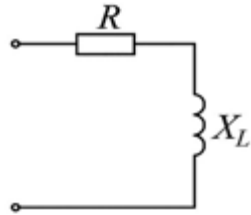
В цепи с емкостью, так же как и в цепи с индуктивностью, происходит постоянный обмен энергией между цепью и источником. Мощность, создаваемая емкостью, тоже является частью *реактивной мощности* и обозначается  $Q_C$ .

$$Q_C = U_C I = P X_C. \quad (2.17)$$

## Неразветвленные цепи переменного тока

### Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

Любая реальная катушка индуктивности, помимо индуктивного сопротивления, всегда обладает активным (катушка состоит из провода, а любой проводник всегда, обладает активным сопротивлением).



$R$  – активное сопротивление;

$X_L$  – индуктивное сопротивление.

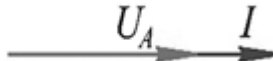
Чтобы определить соотношение фаз между силой тока и напряжением (что, как было уже сказано, очень важно для определения полезного энергетического выхода цепи) надо построить векторную диаграмму.

Разберем подробно этот процесс.

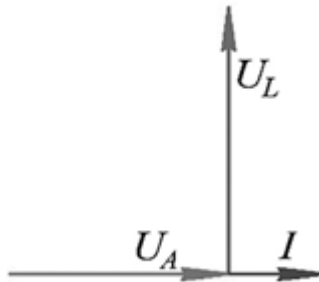
Поскольку цепь последовательная, то сила тока во всех ее участках одинакова. Поэтому начнем построение диаграммы именно с него.



На активном сопротивлении, как известно, сила тока и напряжение синфазны.

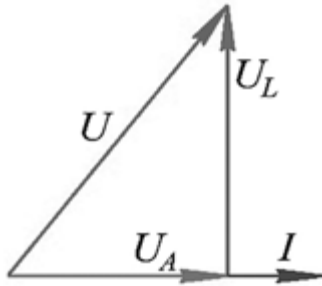


На индуктивности напряжение отстает от тока на  $90^\circ$ .

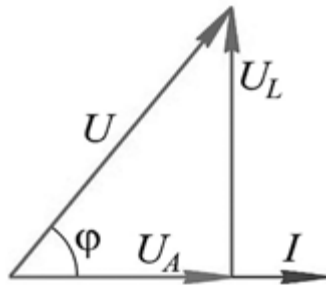


Полное напряжение на данном участке цепи (так как цепь последовательная) получается путем сложения напряжений на ак-

тивном и индуктивном сопротивлениях, только складывать надо векторы, изображающие в масштабе соответствующие величины.



Из полученной диаграммы можно найти разность фаз между силой тока и напряжением –  $\varphi$ .



Мы получили треугольник напряжений, из которого, пользуясь теоремой Пифагора, можно записать выражение для расчета напряжения на зажимах цепи:

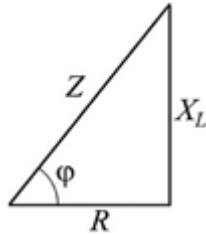
$$U = \sqrt{U_A^2 + U_L^2}. \quad (2.18)$$

Воспользовавшись законом Ома, найдем полное сопротивление цепи:

$$IZ = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2}, \quad (2.19)$$

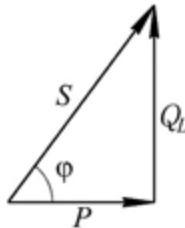
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (2.20)$$

На основании последнего построим треугольник сопротивлений:



Поскольку сопротивления не изменяются, то их изображают обычными отрезками.

Умножив стороны треугольника напряжений на силу тока, получим треугольник мощностей:



Из этого треугольника получим выражение для полной мощности:

$$S = UI = \sqrt{P_A^2 + Q_L^2}. \quad (2.21)$$

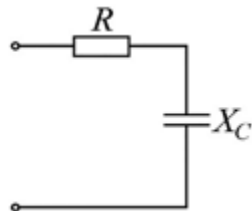
### Цепь с активным сопротивлением и емкостью

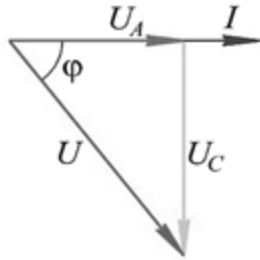
В любой реальной цепи всегда имеются активные потери, не исключение и цепь с емкостью.

$R$  – активное сопротивление;

$X_C$  – индуктивное сопротивление.

Для определения параметров цепи, так же как и в случае с индуктивностью, воспользуемся векторной диаграммой. Строится она аналогичным образом, поэтому не будем здесь подробно рассматривать процесс построения, а приведем результат.





Из этого треугольника получаем выражение для напряжения.

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_C^2}. \quad (2.22)$$

На основании закона Ома

$$IZ = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_C^2} \quad (2.23)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.24)$$

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_C^2}$$

получаем треугольник сопротивлений

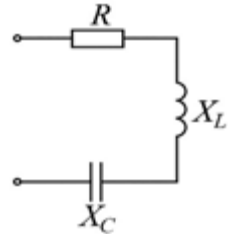
и треугольник мощностей.

Откуда получаем выражение для полной мощности:

$$S = UI = \sqrt{P_A^2 + Q_C^2}. \quad (2.25)$$

**Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью**

Большинство используемых в технике цепей обладают одновременно емкостными и индуктивными свойствами, активным же сопротивлением обладает любая, даже простейшая, электрическая цепь.



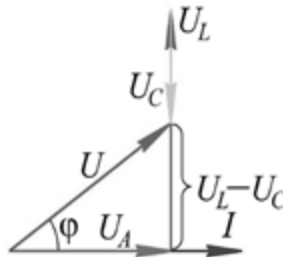
- $R$  – активное сопротивление;
- $X_L$  – индуктивное сопротивление;
- $X_C$  – емкостное сопротивление.

В зависимости от соотношения емкостного и индуктивного сопротивлений необходимо рассмотреть два основных варианта.

Сначала рассмотрим случай, когда  $X_L > X_C$ .

Построим векторную диаграмму:

$$(U_L - U_C)^2 \quad (2.26)$$



На основании теоремы Пифагора получаем выражение для напряжения:

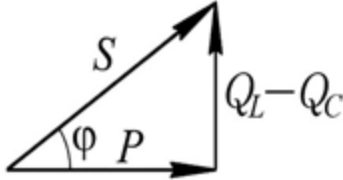
Получаем треугольник сопротивлений:

Выражение для полного сопротивления

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (2.27)$$

Разность между индуктивным и емкостным сопротивлениями называют реактивным сопротивлением:  $X = X_L - X_C$ . В данном случае  $X$  – реактивное сопротивление индуктивного характера.

Умножив стороны треугольника напряжений на силу тока, получим треугольник мощностей:



Разность реактивной мощности  $Q_L$  и реактивной мощности  $Q_C$  называют полной реактивной мощностью.

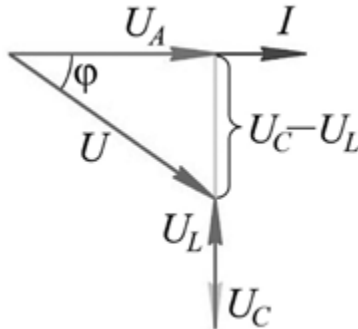
$$Q = Q_L - Q_C \quad (2.28)$$

Полная мощность рассчитывается по формуле

$$S = UI = \sqrt{P_A^2 + Q^2}. \quad (2.27)$$

В другом случае  $X_L < X_C$ . (2.29)

Построим векторную диаграмму:

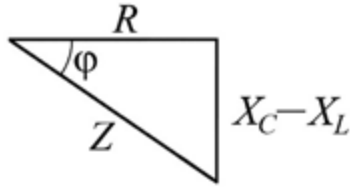


На основании теоремы Пифагора получаем выражение для напряжения:

$$U = \sqrt{U_A^2 + (U_C - U_L)^2}. \quad (2.30)$$



Получаем треугольник сопротивлений:

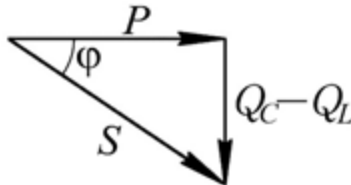


Выражение для полного сопротивления:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}. \quad (2.31)$$

Реактивное сопротивление:  $X = X_C - X_L$ . В этом случае  $X$  – реактивное сопротивление ёмкостного характера.

Умножив стороны треугольника напряжений на силу тока, получим треугольник мощностей:



Полная реактивная мощность.

$$Q = Q_C - Q_L. \quad (2.32)$$

Полная мощность рассчитывается по формуле

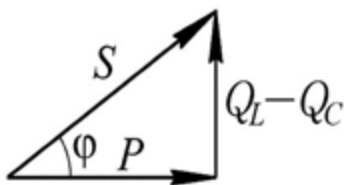
$$S = UI = \sqrt{P_A^2 + Q^2}. \quad (2.33)$$

## Коэффициент мощности

Как было здесь неоднократно изложено, только активная мощность может быть использована в качестве полезной. Поэтому соотношение между активной и реактивной мощностями в цепи является очень важной ее характеристикой. Для количественной оценки этого соотношения используют *коэффициент мощности*.

Если рассмотреть треугольник мощностей, то сразу видно, что угол  $\varphi$  между вектором полной мощности и вектором ак-

тивной мощности (он соответствует разности фаз между силой тока и напряжением) как раз и характеризует это соотношение.



На основании треугольника можно записать следующее соотношение:

$$P = S \cos \varphi \quad (2.34)$$

или

$$P = UI \cos \varphi. \quad (2.35)$$

В этих выражениях  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности. То есть коэффициентом мощности называют косинус разности фаз между силой тока и напряжением. Чем больше  $\cos \varphi$ , тем эффективнее цепь. При использовании электрических сетей в них включают устройства, повышающие коэффициент мощности.

## Трехфазные электрические цепи

### Определение трехфазных систем и получение трехфазного тока

*Трехфазная цепь – совокупность трех однофазных цепей, в которых синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, которые сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ .*

В настоящее время трехфазные системы получили наиболее широкое распространение. Это связано с теми преимуществами, которые дают трехфазные системы в сравнении с однофазными. Основными достоинствами трехфазных систем являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- достаточно простое получение вращающегося магнитного поля с помощью неподвижных обмоток;
- надежность и уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Источником энергии в трехфазной системе является синхронный генератор трехфазного тока.

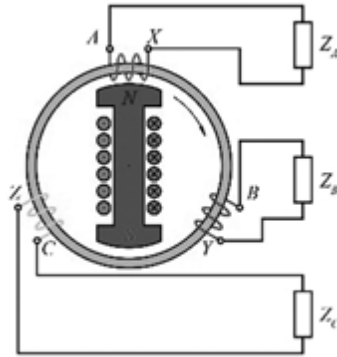
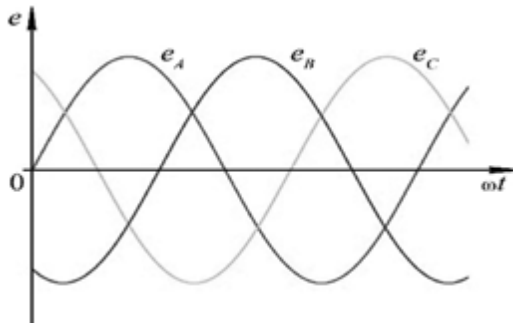


Схема трехфазного генератора показана на рисунке. На неподвижной части генератора, называемой *статором*, расположены три обмотки —  $AX$ ,  $BY$ ,  $CZ$ , которые конструктивно сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . Эти обмотки называют *фазами*.  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — начала обмоток,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — их концы. Внутрь статора на оси расположен *ротор* — вращающаяся часть генератора. Ротор имеет обмотку, через которую течет постоянный электрический ток и представляет собой постоянный электромагнит.

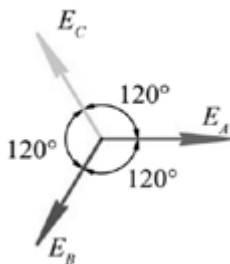
Если за исходную фазу принять обмотку  $AX$  и считать начальное значение ЭДС в ней равным нулю, то для всех фаз генератора можно записать выражения для мгновенных ЭДС:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t + 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t + 240^\circ). \end{aligned}$$

Графически это можно представить так:



или в виде векторной диаграммы:



Так как, по умолчанию, система симметрична, то справедливо выражение:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

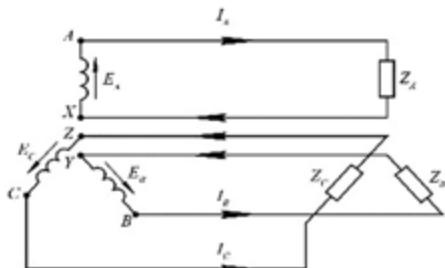
Алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС симметричной системы равна нулю.

Если ротор генератора вращается так, что ЭДС фазы *C* отстает от ЭДС фазы *B*, а та, в свою очередь, от фазы *A*, то такую систему называют *системой прямой последовательности*. У генераторов последовательность чередования фаз никогда не меняется, так как конструктивно их роторы вращаются всегда в одном направлении. Как правило, применяется прямая последовательность чередования фаз.

Последовательность чередования фаз очень важна, так как от нее зависит направление вращения трехфазных двигателей.

### Способы соединения обмоток генератора и фаз приемника

Для получения необходимого результата надо определенным образом соединить фазы генератора и приемника энергии. Существуют два основных способа соединений в трехфазную систему.



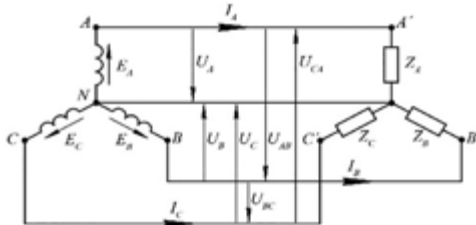
Если каждую фазу генератора независимо соединить с приемниками энергии, то получится несвязанная трехфазная цепь.

Такой способ подключения не дает преимуществ трехфазной системы.

Чтобы сократить число проводов, что при передаче энергии на большие расстояния весьма актуально, применяются электрически связанные трехфазные системы.

### Соединение обмоток «звездой»

При соединении обмоток «звездой» концы обмоток  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  между собой в точке  $N$ , которую называют нейтральной точкой. От точки  $N$  прокладывают к потребителю нейтральный провод, часто называемый нейтралью. Начала обмоток  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , соединяют с потребителями линейными проводами.

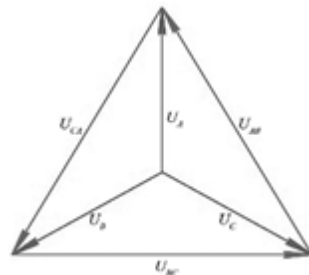


Напряжения между линейными проводами называются *линейными*. Обозначаются  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  (в общем виде). Напряжения между линейными и нейтральными проводами называются *фазными*. Обозначаются  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  (в общем виде  $U_\phi$ ).

Для нахождения соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами строят векторную диаграмму исходя из векторных соотношений

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B, \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C \text{ и } \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A$$

При симметричной системе диаграмма имеет вид равностороннего треугольника.



Из этого следует, что соотношение между линейными и фазными напряжениями:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}. \quad (3.1)$$

Если система симметрична, то при соединении «звездой» линейное напряжение в  $1,73 (\sqrt{3})$  раза больше фазного. Как правило, используются напряжения 220, 380 и 660 В. Соответственно обозначают системы как 380/220 или 660/380 В.

Ток в фазах генератора или приемника называют **фазным током** и обозначается  $I_{\text{ф}}$ . Ток в линейных проводах называют линейным током и обозначается  $I_{\text{л}}$ . При соединении «звездой» линейный ток равен фазному:

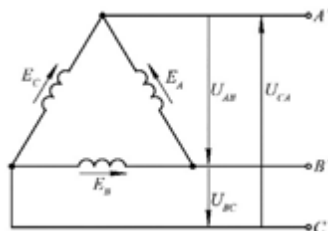
$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}.$$

При симметричной нагрузке, соединенной по схеме «звездой», в нейтральном проводе ток равен нулю, поэтому в некоторых случаях от нейтрального провода можно отказаться и использовать трехпроводную трехфазную сеть.

В общем случае, потребители не являются симметричной системой. Это в отсутствие нейтрального провода приводит к изменению фазных напряжений и как следствие неравномерной нагрузке фаз и выходу из строя потребителей системы. Нейтральный провод обеспечивает выравнивание фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

### Соединение обмоток «треугольником»

При соединении обмоток «треугольником» начало одной обмотки соединяется с концом другой.



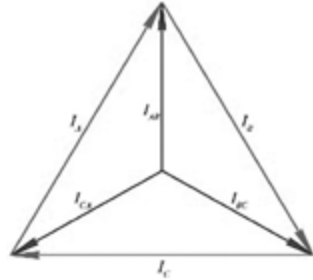
При таком соединении обмоток линейные и фазные напряжения совпадают.

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Линейные токи определяются следующим образом:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

На основании этого можно построить векторную диаграмму



и определить соотношение между линейными и фазными токами при симметричной системе.

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

### Мощность трехфазной системы

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

То же можно сказать и про реактивную мощность:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C.$$

Используя формулы однофазной цепи, можно определить активные и реактивные мощности каждой фазы:

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi;$$

$$Q = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi.$$

Те же величины можно выразить через линейные напряжения и токи:

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi;$$

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

Полная мощность определяется по формуле

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

или

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

О.Е. Баксанский, С.Э. Демидов

**Краткий исторический очерк  
развития электротехники**

Формат 60 x 84/16

Гарнитура Таймс

Усл. печ. л. 2,3. Усл. изд. л. 1,2

Тираж 20 экз.

Издатель – Российская академия наук

Подготовлено к печати

Управлением научно-издательской деятельности РАН

Отпечатано на оборудовании Управления делами РАН

Издано в авторской редакции

Издается в соответствии с распоряжением  
президиума Российской академии наук  
от 24 октября 2017 г. №10106-765,  
распространяется бесплатно.