

Школа для электрика. Курс молодого бойца



«Теория без практики мертва, практика без теории слепа»

**Сборник статей
по материалам сайта «Школа для электрика»
- <http://electricalschool.info/>**

Содержание

Про разность потенциалов, электродвижущую силу и напряжение	3
Что такое электрический ток	7
Действие электрического тока на человека	10
Электрический ток в жидкостях и газах	14
Что такое шаговое напряжение	19
Электрическое сопротивление проводников	22
Последовательное и параллельное соединение сопротивлений	26
Про магнитное поле, соленоиды и электромагниты	33
Электрическое поле, электростатическая индукция, емкость и конденсаторы	39
Что такое переменный ток и чем он отличается от тока постоянного	46
Электромагнитная индукция	54
Вихревые токи	58
Самоиндукция и взаимоиндукция	61
Принцип действия и устройство однофазного трансформатора	65
Катушка индуктивности в цепи переменного тока	71
Активное сопротивление и катушка индуктивности в цепи переменного тока	76
Конденсатор в цепи переменного тока	80
Активное сопротивление и конденсатор в цепи переменного тока	84
Резонанс напряжений	85
Резонанс токов	89
Электродвигатели постоянного тока	92
Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей	97
Схемы подключения магнитного пускателя для управления асинхронным электродвигателем	103

Про разность потенциалов, электродвижущую силу и напряжение

Разность потенциалов

Известно, что одно тело можно нагреть больше, а другое меньше. Степень нагрева тела называется его температурой. Подобно этому, одно тело можно наэлектризовать больше другого. **Степень электризации тела характеризует величину, называемую электрическим потенциалом или просто потенциалом тела.**



Что значит наэлектризовать тело? Это значит сообщить ему **электрический заряд**, т. е. прибавить к нему некоторое количество электронов, если мы тело заряжаем отрицательно, или отнять их от него, если мы тело заряжаем положительно. В том и другом случае тело будет обладать определенной степенью электризации, т. е. тем или иным потенциалом, причем тело, заряженное положительно, обладает положительным потенциалом, а тело, заряженное отрицательно, — отрицательным потенциалом.

Разность уровней электрических зарядов двух тел принято называть **разностью электрических потенциалов** или просто **разностью потенциалов**.

Следует иметь в виду, что если два одинаковых тела заряжены одноименными зарядами, но одно больше, чем другое, то между ними также будет существовать разность потенциалов.

Кроме того, разность потенциалов существует между двумя такими телами, одно из которых заряжено, а другое не имеет заряда. Так, например, если какое-либо тело, изолированное от земли, имеет некоторый потенциал, то разность потенциалов между ним и землей (потенциал которой принято считать равным нулю) численно равна потенциалу этого тела.

Итак, если два тела заряжены таким образом, что потенциалы их неодинаковы, между ними неизбежно существует разность потенциалов.

Всем известное **явление электризации** расчески при трении ее о волосы есть не что иное, как создание разности потенциалов между расческой и волосами человека.



Действительно, при трении расчески о волосы часть электронов переходит на расческу, заряжая ее отрицательно, волосы же, потеряв часть электронов, заряжаются в той же степени, что и расческа, но положительно. Созданная таким образом разность потенциалов может быть сведена к нулю прикосновением расчески к волосам. Этот обратный переход электронов легко

обнаруживается на слух, если наэлектризованную расческу приблизить к уху. Характерное потрескивание будет свидетельствовать о происходящем разряде.

Говоря выше о разности потенциалов, мы имели в виду два заряженных тела, однако **разность потенциалов можно получить и между различными частями (точками) одного и того же тела.**

Так, например, рассмотрим, что произойдет в куске медной проволоки, если под действием какой-либо внешней силы нам удастся свободные электроны, находящиеся в проволоке, переместить к одному концу ее. Очевидно, на другом конце проволоки получится недостаток электронов, и тогда между концами проволоки возникнет разность потенциалов.

Стоит нам прекратить действие внешней силы, как электроны тотчас же, в силу притяжения разноименных зарядов, устремятся к концу проволоки, заряженному положительно, т. е. к месту, где их недостает, и в проволоке вновь наступит электрическое равновесие.

Электродвижущая сила и напряжение

Для поддержания электрического тока в проводнике необходим какой-то внешний источник энергии, который все время поддерживал бы разность потенциалов на концах этого проводника.

Такими источниками энергии служат так называемые **источники электрического тока**, обладающие определенной **электродвижущей силой**, которая создает и длительное время поддерживает разность потенциалов на концах проводника.

Электродвижущая сила (сокращенно ЭДС) обозначается буквой E. Единицей измерения ЭДС служит вольт. У нас в стране вольт сокращенно обозначается буквой "В", а в международном обозначении — буквой "V".

Итак, чтобы получить непрерывное течение электрического тока, нужна электродвижущая сила, т. е. нужен источник электрического тока.

Первым таким источником тока был так называемый "вольтов столб", который состоял из ряда медных и цинковых кружков, проложенных кожей, смоченной в подкисленной воде. Таким образом, одним из способов получения электродвижущей силы является химическое взаимодействие некоторых веществ, в результате чего химическая энергия превращается в энергию электрическую. Источники тока, в которых таким путем создается электродвижущая сила, называются **химическими источниками тока.**

В настоящее время химические источники тока — **гальванические элементы и аккумуляторы** — широко применяются в электротехнике и электроэнергетике.

Другим основным источником тока, получившим широкое распространение во всех областях электротехники и электроэнергетики, являются **генераторы**.



Генераторы устанавливаются на электрических станциях и служат единственным источником тока для питания электроэнергией промышленных предприятий, электрического освещения городов, электрических железных дорог, трамвая, метро, троллейбусов и т. д.

Как у химических источников электрического тока (элементов и аккумуляторов), так и у генераторов действие электродвижущей силы совершенно одинаково. Оно заключается в том, что ЭДС создает на зажимах источника тока разность потенциалов и поддерживает ее длительное время.

Эти зажимы называются полюсами источника тока. Один полюс источника тока испытывает всегда недостаток электронов и, следовательно, обладает положительным зарядом, другой полюс испытывает избыток электронов и, следовательно, обладает отрицательным зарядом.

Соответственно этому один полюс источника тока называется положительным (+), другой — отрицательным (—).



Источники тока служат для питания электрическим током различных приборов — потребителей тока. Потребители тока при помощи проводников соединяются с полюсами источника тока, образуя замкнутую электрическую цепь. **Разность потенциалов, которая устанавливается между полюсами источника тока при замкнутой электрической цепи, называется напряжением и обозначается буквой U .**

Единицей измерения напряжения, так же как и ЭДС, служит вольт.

Если, например, надо записать, что напряжение источника тока равно 12 вольтам, то пишут: $U = 12 \text{ В}$.

Для измерения ЭДС или напряжения применяется прибор, называемый **вольтметром**.

Чтобы измерить ЭДС или напряжение источника тока, надо вольтметр подключить непосредственно к его полюсам. При этом, если электрическая цепь разомкнута, то вольтметр покажет ЭДС источника тока. Если же замкнуть цепь, то вольтметр уже покажет не ЭДС, а напряжение на зажимах источника тока.

ЭДС, развиваемая источником тока, всегда больше напряжения на его зажимах.

Ну а если Вам хочется узнать больше, а кроме этого **получить “заточенные” под практические дела знания и умения**, сэкономив при этом массу времени на освоении базовых основ электротехники и электроники, то я Вам настоятельно рекомендую обратить внимание на замечательный и уникальный в своем роде мультимедийный DVD-диск Михаила Ванюшина **["В мир электричества как в первый раз"](#)**.

Основная информация на этом диске представлена в **видеоформате**. Видео курс ведёт настоящий мастер своего дела. В видеороликах Вы сможете увидеть примеры выполнения различных практических работ и различных интересных экспериментов. Практика обычно всё-таки полезнее чистой теории.

Всегда очень полезно понаблюдать за действиями профессионала. Тем более что в любой момент вы можете остановить воспроизведение или откатить его назад и просмотреть его деяния снова.

Так что, с помощью этого диска Вы сможете сразу осваивать материал на уровне не только знаний, но и на уровне навыков, а значит, эффективность такого обучения будет гораздо выше. Нюансы и сложности, которые при первом просмотре Вы не заметите, при повторении будут сразу же видны.

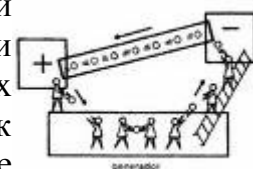
Вы можете сразу же действовать. Вы можете сразу попробовать делать то же, что и делает автор курса. Так что видео курс позволит Вам эффективно и быстро освоить нужный материал и получить навыки практических действий.

Посетите прямо сейчас сайт видео-курса и узнайте о нём больше: <http://electricalschool.info/ElectrikDisk.php>



Что такое электрический ток

Электрический ток — направленное движение электрически заряженных частиц под воздействием электрического поля. Такими частицами могут являться: в проводниках — электроны, в электролитах — ионы (катионы и анионы), в полупроводниках — электроны и, так называемые, "дырки" ("электронно-дырочная проводимость"). Также существует "ток смещения", протекание которого обусловлено процессом заряда емкости, т.е. изменением разности потенциалов между обкладками. Между обкладками никакого движения частиц не происходит, но ток через конденсатор протекает.



Различают постоянный и переменный ток. Постоянный ток — это ток, направление которого не изменяется со временем. Направление же переменного тока изменяется во времени. Величиной, характеризующей переменный ток, является частота (в системе СИ измеряется в герцах), в том случае, когда его сила изменяется периодически. Переменный ток высокой частоты вытесняется на поверхность проводника. Токи высокой частоты применяются в машиностроении для термообработки поверхностей деталей и сварки, в металлургии для плавки металлов.

Ток характеризуется силой тока, которая в системе СИ измеряется в амперах (А), и плотностью тока, которая в системе СИ измеряется в амперах на квадратный метр. Один ампер соответствует перемещению через поперечное сечение проводника в течение одной секунды (с) заряда электричества величиной в один кулон (Кл):

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

В общем случае, обозначив ток буквой i , а заряд q , получим:

$$i = dq / dt.$$

По типу носителей электрических зарядов и среды их перемещения различают токи проводимости и токи смещения. Проводимость делят на электронную и ионную. Для установившихся режимов различают два вида токов: постоянный и переменный. Постоянным называют ток, который может изменяться по величине, но не изменяет своего знака сколь угодно долгое время. Переменным называют ток, который периодически изменяется как по величине, так и по знаку. Переменные токи подразделяют на синусоидальные и несинусоидальные. Синусоидальным называют ток, изменяющийся по гармоническому закону:

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где I_m , - амплитудное (наибольшее) значение тока, А,

Скорость изменения переменного тока характеризуется его частотой, определяемой как число полных повторяющихся колебаний в единицу времени. Частота обозначается буквой f и измеряется в герцах (Гц). Так, частота тока в сети 50 Гц соответствует 50 полным колебаниям в секунду. Угловая частота ω - скорость изменения тока в радианах в секунду и связана с частотой простым соотношением:

$$\omega = 2\pi f$$

Установившиеся (фиксированные) значения постоянного и переменного токов обозначают прописной буквой I неустановившиеся (мгновенные) значения - буквой i . Условно положительным направлением тока считают направление движения положительных зарядов.

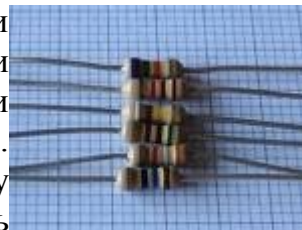
Переменный ток

Переменный ток — это ток, который изменяется по закону синуса с течением времени.

Под переменным током также подразумевают ток в обычных одно- и трёхфазных сетях. В этом случае параметры переменного тока изменяются по гармоническому закону.

Поскольку переменный ток изменяется во времени, простые способы решения задач, пригодные для цепей постоянного тока, здесь непосредственно неприменимы. При очень высоких частотах заряды могут совершать колебательное движение — перетекать из одних мест цепи в другие и обратно. При этом, в отличие от цепей постоянного тока, токи в последовательно соединённых проводниках могут оказаться неодинаковыми. Ёмкости, присутствующие в цепях переменного тока, усиливают этот эффект. Кроме того, при изменении тока сказываются эффекты самоиндукции, которые становятся существенными даже при низких частотах, если используются катушки с большой индуктивностью. При сравнительно низких частотах цепи переменного тока можно по-прежнему рассчитывать с помощью правил Кирхгофа, которые, однако, необходимо соответствующим образом модифицировать.

Цепь, в которую входят разные резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы, можно рассматривать, как если бы она состояла из обобщённых резистора, конденсатора и катушки индуктивности, соединённых последовательно. Рассмотрим свойства такой цепи, подключённой к генератору синусоидального переменного тока. Чтобы сформулировать правила, позволяющие рассчитывать цепи переменного тока, нужно найти соотношение между падением напряжения и током для каждого из компонентов такой цепи.



Конденсатор играет совершенно разные роли в цепях переменного и постоянного токов. Если, например, к цепи подключить электрохимический элемент, то конденсатор начнёт заряжаться, пока напряжение на нём не станет равным ЭДС элемента. Затем зарядка прекратится и ток упадёт до нуля. Если же цепь подключена к генератору переменного тока, то в один полупериод электроны будут вытекать из левой обкладки конденсатора и накапливаться на правой, а в другой — наоборот. Эти перемещающиеся электроны и представляют собой переменный ток, сила которого одинакова по обе стороны конденсатора. Пока частота переменного тока не очень велика, ток через резистор и катушку индуктивности также одинаков.

В устройствах-потребителях переменного тока переменный ток часто выпрямляется выпрямителями для получения постоянного тока.

Проводники электрического тока

Материал, в котором течёт ток, называется проводником. Некоторые материалы при низких температурах переходят в состояние сверхпроводимости. В таком состоянии они не оказывают почти никакого сопротивления току, их сопротивление стремится к нулю. Во всех остальных случаях проводник оказывает сопротивление течению тока и в результате часть энергии электрических частиц превращается в тепло. Силу тока можно рассчитать по закону Ома для участка цепи и закону Ома для полной цепи.

Скорость движения частиц в проводниках зависит от материала проводника, массы и заряда частицы, окружающей температуры, приложенной разности потенциалов и составляет величину, намного меньшую скорости света. Несмотря на это, скорость распространения собственно электрического тока равна скорости света в данной среде, то есть скорости распространения фронта электромагнитной волны.

Как ток влияет на организм человека

Ток, пропущенный через организм человека или животного, может вызвать электрические ожоги, фибрилляцию или смерть. С другой стороны, электрический ток используют в реанимации; для лечения психических заболеваний, особенно депрессии; электростимуляцию определённых областей головного мозга применяют для лечения таких заболеваний, как болезнь Паркинсона и эпилепсия; водитель ритма,

стимулирующий сердечную мышцу импульсным током, используют при брадикардии. В организме человека и животных ток используется для передачи нервных импульсов.

По технике безопасности, минимально ощутимый человеком ток составляет 1 мА. Опасным для жизни человека ток становится начиная с силы примерно 0,01 А. Смертельным для человека ток становится начиная с силы примерно 0,1 А. Безопасным считается напряжение менее 42 В.

Действие электрического тока на человека

Как электрический ток действует на человека

Факт действия электрического тока на человека был установлен в последней четверти XVIII века. Опасность этого действия впервые установил изобретатель электрохимического высоковольтного источника напряжения В. В. Петров. Описание первых промышленных электротравм появилось значительно позже: в 1863 г. — от постоянного тока и в 1882 г. — от переменного.



Электрический ток, электротравмы и электротравматизм

Под электротравмой понимают травму, вызванную действием электрического тока или электрической дуги.

Электротравматизм характеризуют такие особенности: защитная реакция организма появляется только после попадания человека под напряжение, т. е. когда электрический ток уже протекает через его организм; электрический ток действует не только в местах контактов с телом человека и на пути прохождения через организм, но и вызывает рефлекторное действие, проявляющееся в нарушении нормальной деятельности сердечно-сосудистой и нервной системы, дыхания и т. д. Электротравму человек может получить как при непосредственном контакте с токоведущими частями, так и при поражении напряжением прикосновения или шага, через электрическую дугу.

Электротравматизм по сравнению с другими видами производственного травматизма составляет небольшой процент, однако по числу травм с тяжелым, и особенно летальным, исходом занимает одно из первых мест. Наибольшее число электротравм (60—70 %) происходит при работе на электроустановках напряжением до 1000 В. Это объясняется широким распространением таких электроустановок и сравнительно низким уровнем электротехнической подготовки лиц, эксплуатирующих их. Электроустановок напряжением свыше 1000 В в



эксплуатации значительно меньше, и обслуживает их специально обученный персонал, что и обуславливает меньшее количество электротравм.

Причины поражения человека электрическим током

Причины поражения человека электрическим током следующие: прикосновение к неизолированным токоведущим частям; к металлическим частям оборудования, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции; к неметаллическим предметам, оказавшимся под напряжением; поражение током напряжения шага и через дугу.

Виды поражений человека электрическим током

Электрический ток, протекающий через организм человека, воздействует на него термически, электролитически и биологически. Термическое действие характеризуется нагревом тканей, вплоть до ожогов; электролитическое — разложением органических жидкостей, в том числе и крови; биологическое действие электрического тока проявляется в нарушении биоэлектрических процессов и сопровождается раздражением и возбуждением живых тканей и сокращением мышц.



Различают два вида поражения организма электрическим током: электрические травмы и электрические удары.

Электрические травмы — это местные поражения тканей и органов: электрические ожоги, электрические знаки и электрометаллизация кожи.

Электрические ожоги возникают в результате нагрева тканей человека протекающим через него электрическим током силой более 1 А. Ожоги могут быть поверхностные, когда поражаются кожные покровы, и внутренние — при поражении глуболежащих тканей тела. По условиям возникновения различают контактные, дуговые и смешанные ожоги.

Электрические знаки представляют собой пятна серого или бледно-желтого цвета в виде мозоли на поверхности кожи в месте контакта с токоведущими частями. Электрические знаки, как правило, безболезненны и с течением времени сходят.



Электрометаллизация кожи — это пропитывание поверхности кожи частицами металла при его разбрызгивании или испарении под действием электрического тока. Пораженный участок кожи имеет шероховатую поверхность, окраска которой определяется цветом соединений металла, попавшего на кожу. Электрометаллизация кожи не представляет собой опасности и с течением времени исчезает, как и электрические знаки. Большую опасность представляет металлизация глаз.

К электрическим травмам, кроме того, относятся **механические повреждения** в результате произвольных судорожных сокращений мышц при протекании тока (разрывы кожи, кровеносных сосудов и нервов, вывихи суставов, переломы костей), а также **электроофтальмия** — воспаление глаз в результате действия ультрафиолетовых лучей электрической дуги.

Электрический удар представляет собой возбуждение живых тканей электрическим током, сопровождающееся произвольным судорожным сокращением мышц. По исходу электрические удары условно разделяют на пять групп: без потери сознания; с потерей сознания, но без нарушения сердечной деятельности и дыхания; с потерей сознания и нарушением сердечной деятельности или дыхания; клиническая смерть и электрический шок.



Клиническая, или «мнимая», смерть — это переходное состояние от жизни к смерти. В состоянии клинической смерти сердечная деятельность прекращается и дыхание останавливается. Длительность клинической смерти 6...8 мин. По истечении этого времени происходит гибель клеток коры головного мозга, жизнь угасает и наступает необратимая биологическая смерть. Признаки клинической смерти: остановка или фибрилляция сердца (и, как следствие, отсутствие пульса), отсутствие дыхания, кожный покров синеватый, зрачки глаз резко расширены из-за кислородного голодания коры головного мозга и не реагируют на свет.

Электрический шок — это тяжелая нервно-рефлекторная реакция организма на раздражение электрическим током. При шоке возникают глубокие расстройства дыхания, кровообращения, нервной системы и других систем организма. Сразу после действия тока наступает фаза возбуждения организма: появляется реакция на боль, повышается артериальное давление и др. Затем наступает фаза торможения: истощается нервная система, снижается артериальное давление, ослабевает дыхание, падает и учащается пульс, возникает состояние депрессии. Шоковое состояние может длиться от нескольких десятков минут до суток, а затем может наступить выздоровление или биологическая смерть.

Пороговые значения электрического тока

Электрический ток различной силы оказывает различное действие на человека. Выделены пороговые значения электрического тока: пороговый ощутимый ток — 0,6...1,5 мА при переменном токе частотой 50 Гц и 5... 7 мА при постоянном токе; пороговый неотпускающий ток (ток, вызывающий при прохождении через человека непреодолимые судорожные сокращения мышц руки, в которой зажат проводник) — 10...15 мА при 50 Гц и 50...80 мА при постоянном токе; пороговый фибрилляционный ток (ток, вызывающий при прохождении через организм фибрилляцию сердца) — 100 мА при 50 Гц и 300 мА при постоянном электрическом токе.

От чего зависит степень действия электрического тока на организм человека

Исход поражения также зависит от длительности протекания тока через человека. С увеличением длительности нахождения человека под напряжением эта опасность увеличивается.

Индивидуальные особенности организма человека значительно влияют на исход поражения при электротравмах. Например, неотпускающий ток для одних людей может быть пороговым ощутимым для других. Характер действия тока одной и той же силы зависит от массы человека и его физического развития. Установлено, что для женщин пороговые значения тока примерно в 1,5 раза ниже, чем для мужчин.

Степень действия тока зависит от состояния нервной системы и всего организма. Так, в состоянии возбуждения нервной системы, депрессии, болезни (особенно болезней кожи, сердечно-сосудистой системы, нервной системы и др.) и опьянения люди более чувствительны к протекающему через них току.

Значительную роль играет и «фактор внимания». Если человек подготовлен к электрическому удару, то степень опасности резко снижается, в то время как неожиданный удар приводит к более тяжелым последствиям.

Существенно влияет на исход поражения путь тока через тело человека. Опасность поражения особенно велика, если ток, проходя через жизненно важные органы — сердце, легкие, головной мозг, — действует непосредственно на эти органы. Если ток не проходит через эти органы, то его действие на них только рефлекторное и

вероятность поражения меньше. Установлены наиболее часто встречающиеся пути тока через человека, так называемые «петли тока». В большинстве случаев цепь тока через человека возникает по пути правая рука — ноги. Однако утрату трудоспособности более чем на три рабочих дня вызывает протекание тока по пути рука — рука — 40 %, путь тока правая рука — ноги — 20 %, левая рука — ноги — 17 %, остальные пути встречаются реже.



Что опаснее - переменный или постоянный электрический ток?

Опасность переменного тока зависит от частоты этого тока. Исследованиями установлено, что токи в диапазоне от 10 до 500 Гц практически одинаково опасны. С дальнейшим увеличением частоты значения пороговых токов повышаются. Заметное снижение опасности поражения человека электрическим током наблюдается при частотах более 1000 Гц.

Постоянный ток менее опасен и пороговые значения его в 3 - 4 раза выше, чем переменного тока частотой 50 Гц. Однако при разрыве цепи постоянного тока ниже порогового осязаемого возникают резкие болевые ощущения, вызываемые током переходного процесса. Положение о меньшей опасности постоянного тока по сравнению с переменным справедливо при напряжениях до 400 В. В диапазоне 400...600 В опасности постоянного и переменного тока частотой 50 Гц практически одинаковы, а с дальнейшим увеличением напряжения относительная опасность постоянного тока увеличивается. Это объясняется физиологическими процессами действия на живую клетку.

Следовательно, действие электрического тока на организм человека многообразно и зависит от многих факторов.

Электрический ток в жидкостях и газах

Электрический ток в жидкостях

В металлическом проводнике электрический ток образуется направленным движением свободных электронов и что при этом никаких изменений вещества, из которого проводник сделан, не происходит.



Такие проводники, в которых прохождение электрического тока не сопровождается химическими изменениями их вещества, называются **проводниками первого рода**. К ним относятся все металлы, уголь и ряд других веществ.

Но есть в природе и такие проводники электрического тока, в которых во время прохождения тока происходят химические явления. Эти проводники называются **проводниками второго рода**. К ним относятся главным образом различные растворы в воде кислот, солей и щелочей.

Если в стеклянный сосуд налить воды и прибавить в нее несколько капель серной кислоты (или какой-либо другой кислоты или щелочи), а затем взять две металлические пластины и присоединить к ним проводники опустив эти пластины в сосуд, а к другим концам проводников подключить источник тока через выключатель и амперметр, то произойдет выделение газа из раствора, причем оно будет продолжаться непрерывно, пока замкнута цепь т.к. подкисленная вода действительно является проводником. Кроме того, пластины начнут покрываться пузырьками газа. Затем эти пузырьки будут отрываться от пластин и выходить наружу.

При прохождении по раствору электрического тока происходят химические изменения, в результате которых выделяется газ.

Проводники второго рода называются **электролитами**, а явление, происходящее в электролите при прохождении через него электрического тока, — **электролизом**.

Металлические пластины, опущенные в электролит, называются электродами; одна из них, соединенная с положительным полюсом источника тока, называется **анодом**, а другая, соединенная с отрицательным полюсом, — **катодом**.

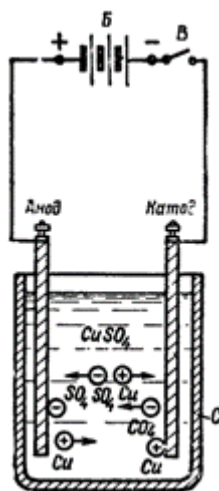
Чем же обуславливается прохождение электрического тока в жидком проводнике? Оказывается, в таких растворах (электролитах) молекулы кислоты (щелочи, соли) под действием растворителя (в данном случае воды) распадаются на две составные части, причем **одна частица молекулы имеет положительный электрический заряд, а другая отрицательный**.

Частицы молекулы, обладающие электрическим зарядом, называются **ионами**. При растворении в воде кислоты, соли или щелочи в растворе возникает большое количество как положительных, так и отрицательных ионов.

Теперь должно стать понятным, почему через раствор прошел электрический ток, ведь между электродами, соединенными с источником тока, создана разность потенциалов, иначе говоря, один из них оказался заряженным положительно, а другой отрицательно. Под действием этой разности потенциалов положительные ионы начали перемещаться по направлению к отрицательному электроду — катоду, а отрицательные ионы — к аноду.

Таким образом, хаотическое движение ионов стало упорядоченным встречным движением отрицательных ионов в одну сторону и положительных в другую. Этот процесс переноса зарядов и составляет течение электрического тока через электролит и происходит до тех пор, пока имеется разность потенциалов на электродах. С исчезновением разности потенциалов прекращается ток через электролит, нарушается упорядоченное движение ионов, и вновь наступает хаотическое движение.

В качестве примера рассмотрим явление электролиза при пропускании электрического тока через раствор медного купороса CuSO_4 с опущенными в него медными электродами.



Явление электролиза при прохождении тока через раствор медного купороса: С - сосуд с электролитом, Б — источник тока, В — выключатель

Здесь также будет встречное движение ионов к электродам. Положительным ионом будет ион меди (Cu), а отрицательным — ион кислотного остатка (SO_4). Ионы меди при соприкосновении с катодом будут разряжаться (присоединяя к себе недостающие электроны), т. е. превращаться в нейтральные молекулы чистой меди, и в виде тончайшего (молекулярного) слоя отлагаться на катоде.

Отрицательные ионы, достигнув анода, также разряжаются (отдают излишние электроны). Но при этом они вступают в химическую реакцию с медью анода, в

результате чего к кислотному остатку SO_4 присоединяется молекула меди Cu и образуется молекула медного купороса CuSO_4 , возвращаемая обратно электролиту.

Так как этот химический процесс протекает длительное время, то на катоде отлагается медь, выделяющаяся из электролита. При этом электролит вместо ушедших на катод молекул меди получает новые молекулы меди за счет растворения второго электрода — анода.

Тот же самый процесс происходит, если вместо медных взяты цинковые электроды, а электролитом служит раствор цинкового купороса ZnSO_4 . Цинк также будет переноситься с анода на катод.

Таким образом, **разница между электрическим током в металлах и жидких проводниках** заключается в том, что в металлах переносчиками зарядов являются только свободные электроны, т. е. отрицательные заряды, тогда как в электролитах [электричество](#) переносится разноименно заряженными частицами вещества — ионами, двигающимися в противоположных направлениях. Поэтому говорят, что **электролиты обладают ионной проводимостью.**



Явление электролиза было открыто в 1837 г. Б. С. Якоби, который производил многочисленные опыты по исследованию и усовершенствованию химических источников тока. Якоби установил, что один из электродов, помещенных в раствор медного купороса, при прохождении через него электрического тока покрывается медью.

Это явление, названное **гальванопластикой**, находит сейчас чрезвычайно большое практическое применение. Одним из примеров тому может служить покрытие металлических предметов тонким слоем других металлов, т. е. никелирование, золочение, серебрение и т. д.

Электрический ток в газах

Газы (в том числе и воздух) в обычных условиях не проводят электрический ток. Например, голые [провода воздушных линий](#), будучи подвешены параллельно друг другу, оказываются изолированными один от другого слоем воздуха.

Однако под воздействием высокой температуры, большой разности потенциалов и других причин газы, подобно жидким проводникам, **ионизируются**, т. е. в них появляются в большом количестве частицы молекул газа, которые, являясь переносчиками электричества, способствуют прохождению через газ электрического тока.

Но вместе с тем ионизация газа отличается от ионизации жидкого проводника. Если в жидкости происходит распад молекулы на две заряженные части, то в газах под действием ионизации от каждой молекулы всегда отделяются электроны и остается ион в виде положительно заряженной части молекулы.

Стоит только прекратить ионизацию газа, как он перестанет быть проводящим, тогда как жидкость всегда остается проводником электрического тока. Следовательно, проводимость газа — явление временное, зависящее от действия внешних причин.



Однако есть и другой вид разряда, называемый **дуговым разрядом** или просто [электрической дугой](#). Явление электрической дуги было открыто в начале 19-го столетия первым русским электротехником В. В. Петровым.

В. В. Петров, проделывая многочисленные опыты, обнаружил, что между двумя древесными углями, соединенными с источником тока, возникает непрерывный электрический разряд через воздух, сопровождаемый ярким светом. В своих трудах В. В. Петров писал, что при этом "темный покой достаточно ярко освещен быть может". Так впервые был получен электрический свет, практически применил который еще один русский ученый-электротехник Павел Николаевич Яблочков.

"Свеча Яблочкова", работа которой основана на использовании электрической дуги, совершила в те времена настоящий переворот в электротехнике.



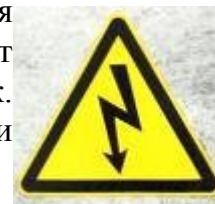
Дуговой разряд применяется как источник света и в наши дни, например в прожекторах и проекционных аппаратах. Высокая температура дугового разряда позволяет использовать его для [устройства дуговой печи](#). В настоящее время дуговые печи, питаемые током очень большой силы, применяются в ряде областей промышленности: для выплавки стали, чугуна, ферросплавов, бронзы и т.д. А в 1882 году Н. Н. Бенардосом дуговой разряд впервые был использован для резки и сварки металла.

В газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизаторах напряжения, для получения электронных и ионных пучков используется так называемый **тлеющий газовый разряд**.

Искровой разряд применяется для измерения больших разностей потенциалов с помощью шарового разрядника, электродами которого служат два металлических шара с полированной поверхностью. Шары раздвигают, и на них подается измеряемая разность потенциалов. Затем шары сближают до тех пор, пока между ними не проскочит искра. Зная диаметр шаров, расстояние между ними, давление, температуру и влажность воздуха, находят разность потенциалов между шарами по специальным таблицам. Этим методом можно измерять с точностью до нескольких процентов разности потенциалов порядка десятков тысяч вольт.

Что такое шаговое напряжение

Шаговым напряжением (напряжением шага) называется напряжение между двумя точками цепи тока, находящимися одна от другой на расстоянии шага, на которых одновременно стоит человек. Шаговое напряжение зависит от удельного сопротивления грунта и силы протекающего через него тока.



В области защитных устройств от поражения током — заземления, зануления и др. — интерес представляют в первую очередь напряжения между точками на

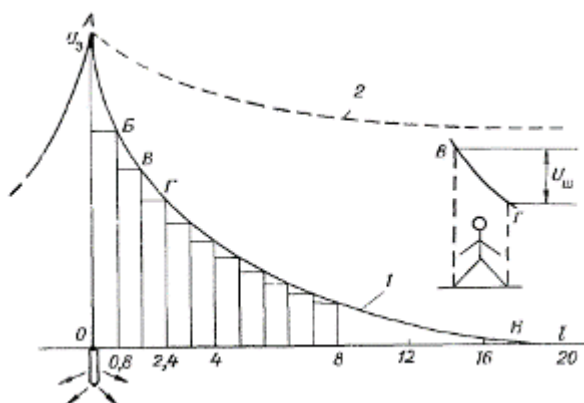
поверхности земли (или иного основания, на котором стоит человек) в зоне растекания тока с заземлителя.

Шаговое напряжение при одиночном заземлителе

Шаговое напряжение определяется отрезком, длина которого зависит от формы потенциальной кривой, т.е. от типа заземлителя, и изменяется от некоторого максимального значения до нуля с изменением расстояния от заземлителя.

Допустим, что в земле в точке О размещен один заземлитель (электрод) и через этот заземлитель проходит ток замыкания на землю. Вокруг заземлителя образуется зона растекания тока по земле, т. е. зона земли, за пределами которой электрический потенциал, обусловленный токами заземления на землю, может быть условно принят равным нулю.

Причина этого явления заключается в том, что объем земли, через который проходит ток замыкания на землю, по мере удаления от заземлителя увеличивается, при этом происходит растекание тока в земле. На расстоянии 20 м и более от заземлителя объем земли настолько возрастает, что плотность тока становится весьма малой, напряжение между точками земли и точками еще более удаленными не обнаруживается сколько нибудь ощутимо.



Распределение напряжения на различных расстояниях от заземлителя: 1 — потенциальная кривая 2 — кривая характеризующая изменение шагового напряжения

Если измерить напряжение U_3 между точками, находящимися на разных расстояниях в любом направлении от заземлителя, а затем построить график зависимости этих напряжений от расстояния до заземлителя, то получится потенциальная кривая) Если разбить линию ОН на участки длиной 0,8 м, что соответствует длине шага человека, то ноги его могут оказаться в точках разного потенциала Чем ближе к заземлителю, тем напряжение между этими точками на земле будет больше ($U_{аб} > U_{бв}$; $U_{бв} > U_{вг}$)

Шаговое напряжение для точек В и Г определяется как [разность потенциалов](#) между этими точками

$$U_{ш} = U_{в} - U_{г} = U_{з}B$$

где B — коэффициент напряжения шага, учитывающий форму потенциальной кривой 1. Наибольшие значения напряжения шага и коэффициента B будут при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит на заземлителе, а другая нога на расстоянии шага.

Кривая 2 характеризует изменение шагового напряжения.

Опасное шаговое напряжение может, например, возникнуть вблизи упавшего на землю и находящегося под напряжением провода. В этом случае запрещается приближаться к проводу, лежащему на земле, на расстояние ближе 8 - 10 м.



Шаговое напряжение отсутствует, если человек стоит или на линии равного потенциала или вне зоны растекания тока.

Максимальные значения шагового напряжения будут при наименьшем расстоянии от заземлителя, когда человек одной ногой стоит непосредственно на заземлителе, а другой — на расстоянии шага от него. Объясняется это тем, что потенциал вокруг заземлителей распределяется по вогнутым кривым и, следовательно, наибольший перепад оказывается, как правило, в начале кривой.

Наименьшие значения шагового напряжения будут при бесконечно большом удалении от заземлителя, а практически за пределами поля растекания тока, т.е. дальше 20 м.

Шаговое напряжение при групповом заземлителе

В пределах площади, на которой размещены электроды группового заземлителя, шаговое напряжение меньше, чем при использовании одиночного заземлителя. Шаговое напряжение также изменяется от некоторого максимального значения до нуля — при удалении от электродов.

Максимальное шаговое напряжение будет, как и при одиночном заземлителе, в начале потенциальной кривой, т.е. когда человек одной ногой стоит непосредственно

на электроде (или на участке земли, под которым зарыт электрод), а другой — на расстоянии шага от электрода.

Минимальное шаговое напряжение соответствует случаю, когда человек стоит на «точках» с одинаковыми потенциалами.

Опасность шагового напряжения

При попадании под шаговое напряжение возникают непроизвольные судорожные сокращения мышц ног и как следствие этого падение человека на землю. В этот момент прекращается действие на человека шагового напряжения и возникает иная, более тяжелая ситуация: вместо нижней петли в теле человека образуется новый, более опасный путь тока, обычно от рук к ногам и создается реальная угроза смертельного поражения током. При попадании в область действия шагового напряжения необходимо выходить из опасной зоны минимальными шажками ("гусиным шагом").



Особо опасно шаговое напряжение для крупного рогатого скота, т.к. расстояние шага у этих животных очень велико и соответственно велико напряжение, под которое они попадают. Нередки случаи гибели скота от шагового напряжения.

Электрическое сопротивление проводников

Понятие об электрическом сопротивлении и проводимости

Любое тело, по которому протекает электрический ток, оказывает ему определенное сопротивление. **Свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока называется электрическим сопротивлением.**



Электронная теория так объясняет сущность электрического сопротивления металлических проводников. Свободные электроны при движении по проводнику бесчисленное количество раз встречают на своем пути атомы и другие электроны и, взаимодействуя с ними, неизбежно теряют часть своей энергии. Электроны испытывают как бы сопротивление своему движению. Различные металлические проводники, имеющие различное атомное строение, оказывают различное сопротивление электрическому току.

Точно тем же объясняется сопротивление жидких проводников и газов прохождению электрического тока. Однако не следует забывать, что в этих веществах не электроны, а заряженные частицы молекул встречают сопротивление при своем движении.

Сопротивление обозначается латинскими буквами R или r .

За единицу электрического сопротивления принят ом.

Ом есть сопротивление столба ртути высотой 106,3 см с поперечным сечением 1 мм² при температуре 0° С.

Если, например, электрическое сопротивление проводника составляет 4 ом, то записывается это так: $R = 4$ ом или $r = 4$ ом.

Для измерения сопротивлений большой величины принята единица, называемая мегомом.

Один мегом равен одному миллиону ом.

Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток, и, наоборот, чем меньше сопротивление проводника, тем легче электрическому току пройти через этот проводник.

Следовательно, для характеристики проводника (с точки зрения прохождения через него электрического тока) можно рассматривать не только его сопротивление, но и величину, обратную сопротивлению и называемую, проводимостью.



Электрической проводимостью называется способность материала пропускать через себя электрический ток.

Так как проводимость есть величина, обратная сопротивлению, то и выражается она как $1/R$, обозначается проводимость латинской буквой g .

Влияние материала проводника, его размеров и окружающей температуры на величину электрического сопротивления

Сопротивление различных проводников зависит от материала, из которого они изготовлены. Для характеристики электрического сопротивления различных материалов введено понятие так называемого удельного сопротивления.

Удельным сопротивлением называется сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм². Удельное сопротивление обозначается буквой греческого алфавита ρ . Каждый материал, из которого изготавливается проводник, обладает своим удельным сопротивлением.

Например, удельное сопротивление меди равно 0,0175, т. е. медный проводник длиной 1 м и сечением 1 мм² обладает сопротивлением 0,0175 ом. Удельное сопротивление алюминия равно 0,029, удельное сопротивление железа - 0,135, удельное сопротивление константана - 0,48, удельное сопротивление нихрома - 1-1,1.



Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине, т. е. чем длиннее проводник, тем больше его электрическое сопротивление.

Сопротивление проводника обратно пропорционально площади его поперечного сечения, т. е. чем толще проводник, тем его сопротивление меньше, и, наоборот, чем тоньше проводник, тем его сопротивление больше.

Чтобы лучше понять эту зависимость, представьте себе две пары сообщающихся сосудов, причем у одной пары сосудов соединяющая трубка тонкая, а у другой — толстая. Ясно, что при заполнении водой одного из сосудов (каждой пары) переход ее в другой сосуд по толстой трубке произойдет гораздо быстрее, чем по тонкой, т. е. толстая трубка окажет меньшее сопротивление течению воды. Точно так же и электрическому току легче пройти по толстому проводнику, чем по тонкому, т. е. первый оказывает ему меньшее сопротивление, чем второй.

Электрическое сопротивление проводника равно удельному сопротивлению материала, из которого этот проводник сделан, умноженному на длину проводника и деленному на площадь поперечного сечения проводника:

$$R = \rho l / S,$$

где - R - сопротивление проводника, ом, l - длина в проводника в м, S - площадь поперечного сечения проводника, мм².

Площадь поперечного сечения круглого проводника вычисляется по формуле:

$$S = \pi d^2 / 4$$

где π - постоянная величина, равная 3,14; d - диаметр проводника.

А так определяется длина проводника:

$$l = S R / \rho,$$

Эта формула дает возможность определить длину проводника, его сечение и удельное сопротивление, если известны остальные величины, входящие в формулу.

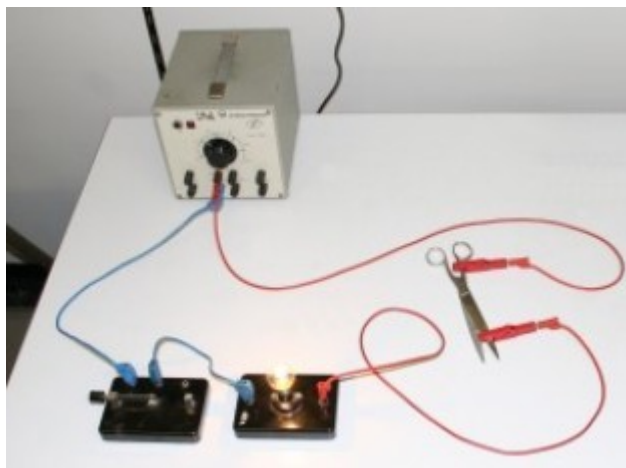
Если же необходимо определить площадь поперечного сечения проводника, то формулу приводят к следующему виду:

$$S = \rho l / R$$

Преобразуя ту же формулу и решив равенство относительно ρ , найдем удельное сопротивление проводника:

$$\rho = R S / l$$

Последней формулой приходится пользоваться в тех случаях, когда известны сопротивление и размеры проводника, а его материал неизвестен и к тому же трудно определим по внешнему виду. Для этого надо определить удельное сопротивление проводника и, пользуясь таблицей, найти материал, обладающий таким удельным сопротивлением.



Еще одной причиной, влияющей на сопротивление проводников, является **температура**.

Установлено, что с повышением температуры сопротивление металлических проводников возрастает, а с понижением уменьшается. Это увеличение или уменьшение сопротивления для проводников из чистых металлов почти одинаково и в среднем равно 0,4% на 1°C. Сопротивление жидких проводников и угля с увеличением температуры уменьшается.

Электронная теория строения вещества дает следующее объяснение увеличению сопротивления металлических проводников с повышением температуры. При нагревании проводник получает тепловую энергию, которая неизбежно передается всем атомам вещества, в результате чего возрастает интенсивность их движения. Возросшее движение атомов создает большее сопротивление направленному движению свободных электронов, отчего и возрастает сопротивление проводника. С понижением же температуры создаются лучшие условия для направленного движения электронов, и сопротивление проводника уменьшается. Этим объясняется интересное явление — **сверхпроводимость металлов**.



Сверхпроводимость, т. е. уменьшение сопротивления металлов до нуля, наступает при огромной отрицательной температуре -273°C , называемой абсолютным нулем. При температуре абсолютного нуля атомы металла как бы застывают на месте, совершенно не препятствуя движению электронов.

Последовательное и параллельное соединение сопротивлений

Последовательное соединение сопротивлений

Возьмем три постоянных сопротивления R_1 , R_2 и R_3 и включим их в цепь так, чтобы конец первого сопротивления R_1 был соединен с началом второго сопротивления R_2 , конец второго — с началом третьего R_3 , а к началу первого сопротивления и к концу третьего подведем проводники от источника тока (рис. 1).



Такое соединение сопротивлений называется последовательным. Очевидно, что ток в такой цепи будет во всех ее точках один и тот же.

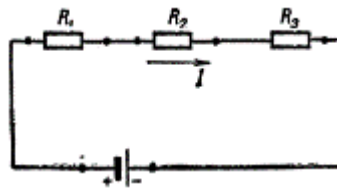


Рис 1. Последовательное соединение сопротивлений

Как определить общее сопротивление цепи, если все включенные в нее последовательно сопротивления мы уже знаем? Используя положение, что напряжение U на зажимах источника тока равно сумме падений напряжений на участках цепи, мы можем написать:

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

где

$$U_1 = IR_1 \quad U_2 = IR_2 \quad \text{и} \quad U_3 = IR_3$$

или

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

Вынеся в правой части равенства I за скобки, получим $IR = I(R_1 + R_2 + R_3)$.

Поделив теперь обе части равенства на I , будем окончательно иметь $R = R_1 + R_2 + R_3$

Таким образом, мы пришли к выводу, что при последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных участков.

Проверим этот вывод на следующем примере. Возьмем три постоянных сопротивления, величины которых известны (например, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$ и $R_3 = 50 \text{ Ом}$). Соединим их последовательно (рис. 2) и подключим к источнику тока, ЭДС которого равна 60 В (внутренним сопротивлением источника тока пренебрегаем).

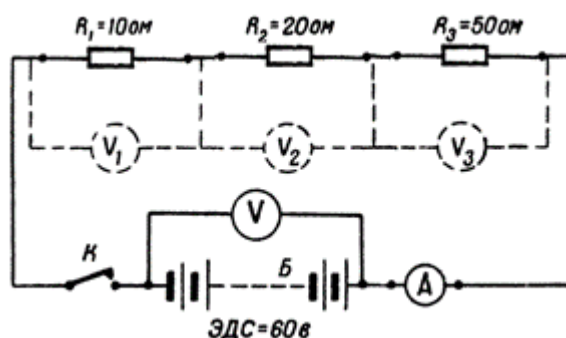


Рис. 2. Пример последовательного соединения трех сопротивлений

Подсчитаем, какие показания должны дать приборы, включенные, как показано на схеме, если замкнуть цепь. Определим внешнее сопротивление цепи: $R = 10 + 20 + 50 = 80 \text{ Ом}$.

Найдем ток в цепи [по закону Ома](#): $60 / 80 = 0,75 \text{ А}$

Зная ток в цепи и сопротивления ее участков, определим падение напряжения на каждом участке цепи $U_1 = 0,75 \times 10 = 7,5 \text{ В}$, $U_2 = 0,75 \times 20 = 15 \text{ В}$, $U_3 = 0,75 \times 50 = 37,5 \text{ В}$.

Зная падение напряжений на участках, определим общее падение напряжения во внешней цепи, т. е. напряжение на зажимах источника тока $U = 7,5 + 15 + 37,5 = 60 \text{ В}$.

Мы получили таким образом, что $U = 60 \text{ В}$, т. е. несуществующее равенство ЭДС источника тока и его напряжения. Объясняется это тем, что мы пренебрегли внутренним сопротивлением источника тока.

Замкнув теперь ключ выключатель К, можно убедиться по приборам, что наши подсчеты примерно верны.



Параллельное соединение сопротивлений

Возьмем два постоянных сопротивления R_1 и R_2 и соединим их так, чтобы начала этих сопротивлений были включены в одну общую точку а, а концы — в другую общую точку б. Соединив затем точки а и б с источником тока, получим замкнутую электрическую цепь. Такое соединение сопротивлений называется параллельным соединением.

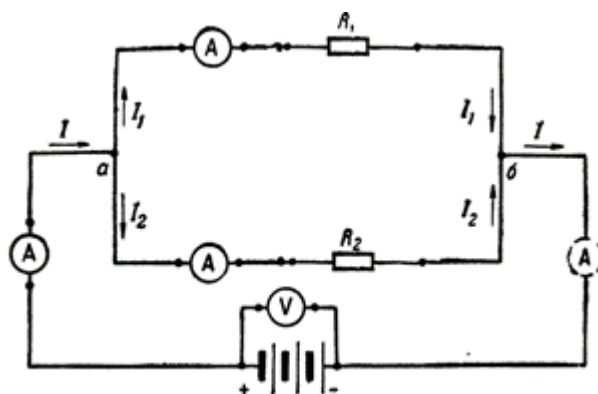


Рис 3. Параллельное соединение сопротивлений

Проследим течение тока в этой цепи. От положительного полюса источника тока по соединительному проводнику ток дойдет до точки а. В точке а он разветвится, так как здесь сама цепь разветвляется на две отдельные ветви: первую ветвь с сопротивлением R_1 и вторую — с сопротивлением R_2 . Обозначим токи в этих ветвях соответственно через I_1 и I_2 . Каждый из этих токов пойдет по своей ветви до точки б. В этой точке произойдет слияние токов в один общий ток, который и придет к отрицательному полюсу источника тока.

Таким образом, при параллельном соединении сопротивлений получается разветвленная цепь. Посмотрим, какое же будет соотношение между токами в составленной нами цепи.

Включим амперметр между положительным полюсом источника тока (+) и точкой а и заметим его показания. Включив затем амперметр (показанный «а рисунке пунктиром») в провод, соединяющий точку б с отрицательным полюсом источника тока (—), заметим, что прибор покажет ту же величину силы тока.

Значит, **сила тока в цепи до ее разветвления** (до точки а) равна **силе тока после разветвления цепи** (после точки б).

Будем теперь включать амперметр поочередно в каждую ветвь цепи, запоминая показания прибора. Пусть в первой ветви амперметр покажет силу тока I_1 , а во второй — I_2 . Сложив эти два показания амперметра, мы получим суммарный ток, по величине равный току I до разветвления (до точки а).

Следовательно, **сила тока, протекающего до точки разветвления, равна сумме сил токов, утекающих от этой точки.** $I = I_1 + I_2$ Выражая это формулой, получим

Это соотношение, имеющее большое практическое значение, носит название **закона разветвленной цепи.**

Рассмотрим теперь, каково будет соотношение между токами в ветвях.

Включим между точками а и б вольтметр и посмотрим, что он нам покажет. Во-первых, вольтметр покажет напряжение источника тока, так как он подключен, как это видно из рис. 3, непосредственно к зажимам источника тока. Во-вторых, вольтметр покажет падения напряжений U_1 и U_2 на сопротивлениях R_1 и R_2 , так как он соединен с началом и концом каждого сопротивления.

Следовательно, при параллельном соединении сопротивлений напряжение на зажимах источника тока равно падению напряжения на каждом сопротивлении.

Это дает нам право написать, что $U = U_1 = U_2$,

где U — напряжение на зажимах источника тока; U_1 — падение напряжения на сопротивлении R_1 , U_2 — падение напряжения на сопротивлении R_2 . Вспомним, что падение напряжения на участке цепи численно равно произведению силы тока, протекающего через этот участок, на сопротивление участка $U = IR$.

Поэтому для каждой ветви можно написать: $U_1 = I_1R_1$ и $U_2 = I_2R_2$, но так как $U_1 = U_2$, то и $I_1R_1 = I_2R_2$.

Применяя к этому выражению правило пропорции, получим $I_1 / I_2 = U_2 / U_1$ т. е. ток в первой ветви будет во столько раз больше (или меньше) тока во второй ветви, во сколько раз сопротивление первой ветви меньше (или больше) сопротивления второй ветви.

Итак, мы пришли к важному выводу, заключающемуся в том, что **при параллельном соединении сопротивлений общий ток цепи разветвляется на токи, обратно пропорциональные величинам сопротивлений параллельных ветвей.** Иначе говоря, **чем больше сопротивление ветви, тем меньший ток потечет через нее, и, наоборот, чем меньше сопротивление ветви, тем больший ток потечет через эту ветвь.**

Убедимся в правильности этой зависимости на следующем примере. Соберем схему, состоящую из двух параллельно соединенных сопротивлений R_1 и R_2 , подключенных к источнику тока. Пусть $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом и $U = 3$ В.

Подсчитаем сначала, что покажет нам амперметр, включенный в каждую ветвь:

$$I_1 = U / R_1 = 3 / 10 = 0,3 \text{ A} = 300 \text{ mA}$$

$$I_2 = U / R_2 = 3 / 20 = 0,15 \text{ A} = 150 \text{ mA}$$

$$\text{Общий ток в цепи } I = I_1 + I_2 = 300 + 150 = 450 \text{ mA}$$

Проделанный нами расчет подтверждает, что при параллельном соединении сопротивлений ток в цепи разветвляется обратно пропорционально сопротивлениям.

Действительно, $R_1 = 10 \text{ Ом}$ вдвое меньше $R_2 = 20 \text{ Ом}$, при этом $I_1 = 300 \text{ mA}$ вдвое больше $I_2 = 150 \text{ mA}$. Общий ток в цепи $I = 450 \text{ mA}$ разветвился на две части так, что большая его часть ($I_1 = 300 \text{ mA}$) пошла через меньшее сопротивление ($R_1 = 10 \text{ Ом}$), а меньшая часть ($I_2 = 150 \text{ mA}$) — через большее сопротивление ($R_2 = 20 \text{ Ом}$).

Такое разветвление тока в параллельных ветвях сходно с течением жидкости по трубам. Представьте себе трубу А, которая в каком-то месте разветвляется на две трубы Б и В различного диаметра (рис. 4). Так как диаметр трубы Б больше диаметра трубок В, то через трубу Б в одно и то же время пройдет больше воды, чем через трубу В, которая оказывает потоку воды большее сопротивление.

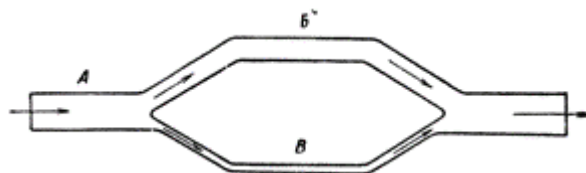


Рис. 4. Через тонкую трубу в один и тот же промежуток времени пройдет воды меньше, чем через толстую

Рассмотрим теперь, чему будет равно общее сопротивление внешней цепи, состоящей из двух параллельно соединенных сопротивлений.

Под этим **общим сопротивлением внешней цепи надо понимать такое сопротивление, которым можно было бы заменить при данном напряжении цепи оба параллельно включенных сопротивления, не изменяя при этом тока до разветвления.** Такое сопротивление называется **эквивалентным сопротивлением.**

Вернемся к цепи, показанной на рис. 3, и посмотрим, чему будет равно эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных сопротивлений. Применяя к этой цепи закон Ома, мы можем написать: $I = U/R$, где I — ток во внешней цепи (до точки разветвления), U — напряжение внешней цепи, R — сопротивление внешней цепи, т. е. эквивалентное сопротивление.

Точно так же для каждой ветви $I_1 = U_1 / R_1$, $I_2 = U_2 / R_2$, где I_1 и I_2 — токи в ветвях; U_1 и U_2 — напряжение на ветвях; R_1 и R_2 — сопротивления ветвей.

$$\text{По закону разветвленной цепи: } I = I_1 + I_2$$

$$\text{Подставляя значения токов, получим } U / R = U_1 / R_1 + U_2 / R_2$$

Так как при параллельном соединении $U = U_1 = U_2$, то можем написать $U / R = U / R_1 + U / R_2$

Вынеся U в правой части равенства за скобки, получим $U / R = U (1 / R_1 + 1 / R_2)$

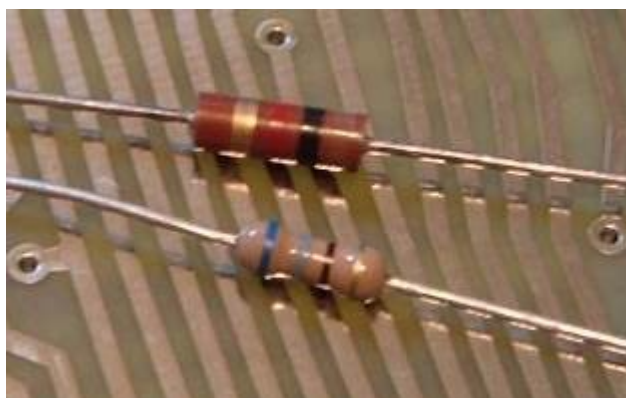
Разделив теперь обе части равенства на U , будем окончательно иметь $1 / R = 1 / R_1 + 1 / R_2$

Помня, что **проводимостью называется величина, обратная сопротивлению**, мы можем сказать, что в полученной формуле $1 / R$ - проводимость внешней цепи; $1 / R_1$ проводимость первой ветви; $1 / R_2$ - проводимость второй ветви.

На основании этой формулы делаем вывод: **при параллельном соединении проводимость внешней цепи равна сумме проводимостей отдельных ветвей.**

Следовательно, **чтобы определить эквивалентное сопротивление включенных параллельно сопротивлений, надо определить проводимость цепи и взять величину, ей обратную.**

Из формулы также следует, что проводимость цепи больше проводимости каждой ветви, а это значит, что **эквивалентное сопротивление внешней цепи меньше наименьшего из включенных параллельно сопротивлений.**



Рассматривая случай параллельного соединения сопротивлений, мы взяли наиболее простую цепь, состоящую из двух ветвей. Однако на практике могут встретиться случаи, когда цепь состоит из трех и более параллельных ветвей. Как же поступать в этих случаях?

Оказывается, все полученные нами соотношения остаются справедливыми и для цепи, состоящей из любого числа параллельно соединенных сопротивлений.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим следующий пример.

Возьмем три сопротивления $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$ и $R_3 = 60 \text{ Ом}$ и соединим их параллельно. Определим эквивалентное сопротивление цепи (рис. 5).

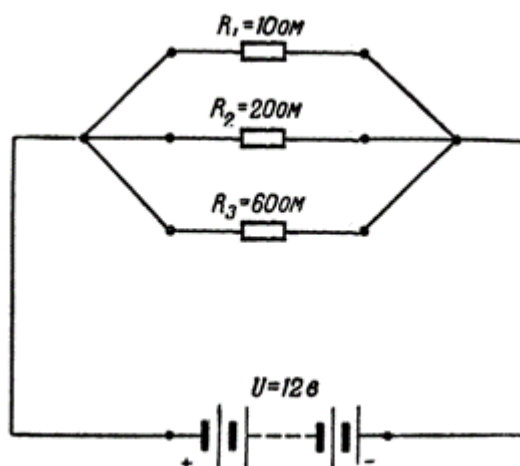


Рис. 5. Цепь с тремя параллельно соединенными сопротивлениями

Применяя для этой цепи формулу $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, можем написать $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$ и, подставляя известные величины, получим $1/R = 1/10 + 1/20 + 1/60$

Сложим эти дроби: $1/R = 10/60 = 1/6$, т. е. проводимость цепи $1/R = 1/6$. Следовательно, эквивалентное сопротивление $R = 6$ Ом.

Таким образом, эквивалентное сопротивление меньше наименьшего из включенных параллельно в цепь сопротивлений, т. е. меньше сопротивления R_1 .

Посмотрим теперь, действительно ли это сопротивление является эквивалентным, т. е. таким, которое могло бы заменить включенные параллельно сопротивления в 10, 20 и 60 Ом, не изменяя при этом силы тока до разветвления цепи.

Допустим, что напряжение внешней цепи, а следовательно, и напряжение на сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 равно 12 В. Тогда сила токов в ветвях будет: $I_1 = U/R_1 = 12/10 = 1,2$ А $I_2 = U/R_2 = 12/20 = 0,6$ А $I_3 = U/R_3 = 12/60 = 0,2$ А

Общий ток в цепи получим, пользуясь формулой $I = I_1 + I_2 + I_3 = 1,2 + 0,6 + 0,2 = 2$ А.

Проверим по формуле закона Ома, получится ли в цепи ток силой 2 А, если вместо трех параллельно включенных известных нам сопротивлений включено одно эквивалентное им сопротивление 6 Ом.

$$I = U/R = 12/6 = 2 \text{ А}$$

Как видим, найденное нами сопротивление $R = 6$ Ом действительно является для данной цепи эквивалентным.

В этом можно убедиться и на измерительных приборах, если собрать схему с взятыми нами сопротивлениями, измерить ток во внешней цепи (до разветвления),

затем заменить параллельно включенные сопротивления одним сопротивлением 6 Ом и снова измерить ток. Показания амперметра и в том и в другом случае будут примерно одинаковыми.

На практике могут встретиться также параллельные соединения, для которых рассчитать эквивалентное сопротивление можно проще, т. е. не определяя предварительно проводимостей, сразу найти сопротивление.

Например, если соединены параллельно два сопротивления R_1 и R_2 , то формулу $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ можно преобразовать так: $1/R = (R_2 + R_1) / R_1 R_2$ и, решая равенство относительно R , получить $R = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$, т. е. при параллельном соединении двух сопротивлений эквивалентное сопротивление цепи равно произведению включенных параллельно сопротивлений, деленному на их сумму.

Про магнитное поле, соленоиды и электромагниты

Магнитное поле электрического тока

Магнитное поле создается не только естественными или искусственными постоянными магнитами, но и проводником, если по нему проходит электрический ток. Следовательно, существует связь между магнитными и электрическими явлениями.

Убедиться в том, что вокруг проводника, по которому проходит ток, образуется магнитное поле, нетрудно. Над подвижной магнитной стрелке параллельно ей поместите прямолинейный проводник и пропустите через него электрический ток. Стрелка займет положение, перпендикулярное проводнику.

Какие же силы могли заставить повернуться магнитную стрелку? Очевидно, силы магнитного поля, возникшего вокруг проводника. Выключите ток, и магнитная стрелка займет свое обычное положение. Это говорит о том, что с выключением тока исчезло и магнитное поле проводника.



Таким образом, проходящий по проводнику электрический ток создает магнитное поле. Чтобы узнать, в какую сторону отклонится магнитная стрелка, применяют правило правой руки. **Если расположить над проводником правую руку ладонью вниз так, чтобы направление тока совпадало с направлением пальцев, то отогнутый большой палец покажет направление отклонения северного полюса магнитной стрелки, помещенной под проводником.** Пользуясь этим правилом и зная полярность стрелки, можно определить также направление тока в проводнике.

Магнитное поле прямолинейного проводника имеет форму концентрических кругов. Если расположить над проводником правую руку ладонью вниз так, чтобы ток как бы выходил из пальцев, то отогнутый большой палец укажет на северный полюс магнитной стрелки. Такое поле называется круговым магнитным полем.

Направление силовых линий кругового поля зависит от направления электрического тока в проводнике и определяется так называемым **правилом «буравчика»**. **Если буравчик мысленно ввинчивать по направлению тока, то направление вращения его ручки будет совпадать с направлением магнитных силовых линий поля.** Применяя это правило, можно узнать направление тока в проводнике, если известно направление силовых линий поля, созданного этим током.

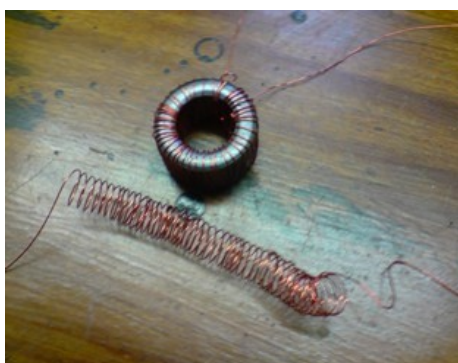
Возвращаясь к опыту с магнитной стрелкой, можно убедиться в том, что она всегда располагается своим северным концом по направлению силовых линий магнитного поля.

Итак, вокруг прямолинейного проводника, по которому проходит электрический ток, возникает магнитное поле. Оно имеет форму концентрических кругов и называется круговым магнитным полем.

Соленоид. Магнитное поле соленоида

Магнитное поле возникает вокруг любого проводника независимо от его формы при условии, что по проводнику проходит электрический ток.

В электротехнике мы имеем дело с различного рода катушками, состоящими из ряда витков. Для изучения интересующего нас магнитного поля катушки рассмотрим сначала, какую форму имеет магнитное поле одного витка.



Представим себе виток толстого провода, пронизывающий лист картона и присоединенный к источнику тока. Когда через виток проходит электрический ток, то вокруг каждой отдельной части витка образуется круговое магнитное поле. По правилу «буравчика» нетрудно определить, что магнитные силовые линии внутри витка имеют одинаковое направление (к нам или от нас, в зависимости от направления тока в витке), причем они выходят с одной стороны витка и входят в другую сторону. Ряд таких витков, имеющих форму спирали, представляет собой так называемый **соленоид (катушку)**.

Вокруг соленоида, при прохождении через него тока, образуется магнитное поле. Оно получается в результате сложения магнитных полей каждого витка и по форме напоминает магнитное поле прямолинейного магнита. Силовые линии магнитного поля соленоида, так же как и в прямолинейном магните, выходят из одного конца соленоида и возвращаются в другой. Внутри соленоида они имеют одинаковое направление. Таким образом, концы соленоида обладают полярностью. Тот конец, из которого выходят силовые линии, является **северным полюсом** соленоида, а конец, в который силовые линии входят, — его **южным полюсом**.

Полюса соленоида можно определить по **правилу правой руки**, но для этого надо знать направление тока в его витках. **Если наложить на соленоид правую руку ладонью вниз, так чтобы ток как бы выходил из пальцев, то отогнутый большой палец укажет на северный полюс соленоида.** Из этого правила следует, что полярность соленоида зависит от направления тока в нем. В этом нетрудно убедиться практически, поднеся к одному из полюсов соленоида магнитную стрелку и затем изменив направление тока в соленоиде. Стрелка моментально повернется на 180° , т. е. укажет на то, что полюсы соленоида изменились.

Соленоид обладает свойством втягивать в себя легкие железные предметы. Если внутрь соленоида поместить стальной брусок, то через некоторое время под действием магнитного поля соленоида брусок намагнитится. Этот способ применяют при изготовлении [постоянных магнитов](#).



Электромагниты

[Электромагнит](#) представляет собой катушку (соленоид) с помещенным внутрь нее железным сердечником. Формы и размеры электромагнитов разнообразны, однако общее устройство всех их одинаково.



Катушка электромагнита представляет собой каркас, изготовленный чаще всего из пресшпана или фибры и имеющий различные формы в зависимости от назначения электромагнита. На каркас намотана в несколько слоев медная изолированная проволока — обмотка электромагнита. Она имеет различное число витков и изготавливается из проволоки различного диаметра, в зависимости от назначения электромагнита.

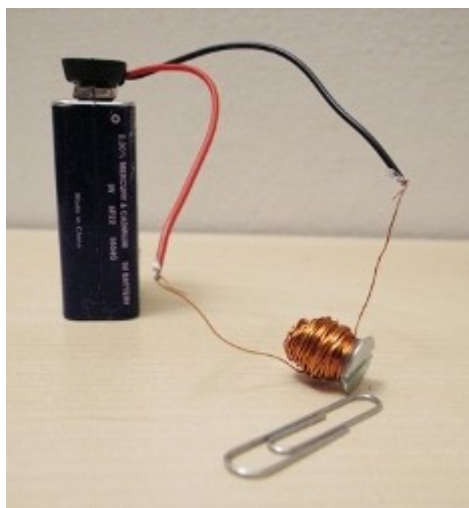
Для предохранения изоляции обмотки от механических повреждений обмотку покрывают одним или несколькими слоями бумаги или каким-либо другим изолирующим материалом. Начало и конец обмотки выводят наружу и присоединяют к выводным клеммам, укрепленным на каркасе, или к гибким проводникам с наконечниками на концах.

Катушка электромагнита насажена на сердечник из мягкого, отожженного железа или сплавов железа с кремнием, никелем и т. д. Такое железо обладает наименьшим остаточным [магнетизмом](#). Сердечники чаще всего делают составными из тонких листов, изолированных друг от друга. Формы сердечников могут быть различными, в зависимости от назначения электромагнита.

Если по обмотке электромагнита пропустить электрический ток, то вокруг обмотки образуется магнитное поле, которое намагничивает сердечник. Так как сердечник сделан из мягкого железа, то он намагнитится мгновенно. Если затем выключить ток, то магнитные свойства сердечника также быстро исчезнут, и он перестанет быть магнитом. Полюсы электромагнита, как и соленоида, определяются по правилу правой руки. Если в обмотке электромагнита изменить направление тока, то в соответствии с этим изменится и полярность электромагнита.

Действие электромагнита подобно действию постоянного магнита. Однако между ними есть большая разница. **Постоянный магнит всегда обладает магнитными свойствами, а электромагнит — только тогда, когда по его обмотке проходит электрический ток.**

Кроме того, сила притяжения постоянного магнита неизменна, так как неизменен магнитный поток постоянного магнита. Сила же притяжения электромагнита не является величиной постоянной. Один и тот же электромагнит может обладать различной силой притяжения. **Сила притяжения всякого магнита зависит от величины его магнитного потока.**



Сила притяжения электромагнита, а следовательно, и его магнитный поток зависят от величины тока, проходящего через обмотку этого электромагнита. Чем больше ток, тем больше сила притяжения электромагнита, и, наоборот, чем меньше ток в обмотке электромагнита, тем с меньшей силой он притягивает к себе магнитные тела.



Но для различных по своему устройству и размерам электромагнитов сила их притяжения зависит не только от величины тока в обмотке. Если, например, взять два электромагнита одинакового устройства и размеров, но один с небольшим числом витков обмотки, а другой — с гораздо большим, то нетрудно убедиться, что при одном и том же токе сила притяжения последнего будет гораздо больше. Действительно, чем больше число витков обмотки, тем большее при данном токе создается вокруг этой обмотки магнитное поле, так как оно складывается из магнитных полей каждого витка. Значит, магнитный поток электромагнита, а следовательно, и сила его притяжения будут тем больше, чем большее количество витков имеет обмотка.

Есть еще одна причина, влияющая на величину магнитного потока электромагнита. Это — качество его магнитной цепи. Магнитной цепью называется путь, по которому замыкается магнитный поток. Магнитная цепь обладает определенным **магнитным сопротивлением**. Магнитное сопротивление зависит от магнитной проницаемости среды, через которую проходит магнитный поток. **Чем больше магнитная проницаемость этой среды, тем меньше ее магнитное сопротивление.**



Так как магнитная проницаемость ферромагнитных тел (железа, стали) во много раз больше магнитной проницаемости воздуха, поэтому выгоднее делать электромагниты так, чтобы их магнитная цепь не содержала в себе воздушных участков. Производство силы тока на число витков обмотки электромагнита

называется **магнитодвижущей силой**. Магнитодвижущая сила измеряется числом ампер-витков.

Например, по обмотке электромагнита, имеющего 1200 витков, проходит ток силой 50 ма. Магнитодвижущая сила такого электромагнита равна $0,05 \times 1200 = 60$ ампер-витков.

Действие магнитодвижущей силы аналогично действию электродвижущей силы в электрической цепи. Подобно тому как ЭДС является причиной возникновения электрического тока, магнитодвижущая сила создает магнитный поток в электромагните. Точно так же, как в электрической цепи с увеличением ЭДС увеличивается ток в цепи, так и в магнитной цепи с увеличением магнитодвижущей силы увеличивается магнитный поток.

Действие **магнитного сопротивления** аналогично действию электрического сопротивления цепи. Как с увеличением сопротивления электрической цепи уменьшается ток, так и в магнитной цепи **увеличение магнитного сопротивления вызывает уменьшение магнитного потока**.

Зависимость магнитного потока электромагнита от магнитодвижущей силы и его магнитного сопротивления можно выразить формулой, аналогичной формуле закона Ома: магнитодвижущая сила = (магнитный поток/ магнитное сопротивление)

Магнитный поток равен магнитодвижущей силе, деленной на магнитное сопротивление.

Число витков обмотки и магнитное сопротивление для каждого электромагнита есть величина постоянная. Поэтому магнитный поток данного электромагнита изменяется только с изменением тока, проходящего по обмотке. Так как сила притяжения электромагнита обуславливается его магнитным потоком, то, чтобы увеличить (или уменьшить) силу притяжения электромагнита, надо соответственно увеличить (или уменьшить) ток в его обмотке.

Поляризованный электромагнит

Поляризованный электромагнит представляет собой соединение постоянного магнита с электромагнитом. Он устроен таким образом. К полюсам постоянного магнита прикреплены так называемые полюсные надставки из мягкого железа. Каждая полюсная надставка служит сердечником электромагнита, на нее насаживается катушка с обмоткой. Обе обмотки соединяются между собой последовательно.

Так как полюсные надставки непосредственно присоединены к полюсам постоянного магнита, то они обладают магнитными свойствами и при отсутствии тока в обмотках; при этом сила притяжения их неизменна и обуславливается магнитным потоком постоянного магнита.

Действие поляризованного электромагнита заключается в том, что при прохождении тока по его обмоткам сила притяжения его полюсов возрастает или уменьшается в зависимости от величины и направления тока в обмотках. На этом свойстве поляризованного электромагнита основано действие [электромагнитных поляризованных реле](#) и других электротехнических устройств.

Действие магнитного поля на проводник с током

Если в магнитное поле поместить проводник так, чтобы он был расположен перпендикулярно силовым линиям поля, и пропустить по этому проводнику электрический ток, то проводник придет в движение и будет выталкиваться из магнитного поля.

В результате взаимодействия магнитного поля с электрическим током проводник приходит в движение, т. е. электрическая энергия превращается в механическую.

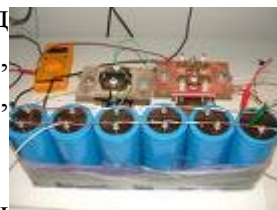
Сила, с которой проводник выталкивается из магнитного поля, зависит от величины магнитного потока магнита, силы тока в проводнике и длины той части проводника, которую пересекают силовые линии поля. Направление действия этой силы, т. е. направление движения проводника, зависит от направления тока в проводнике и определяется по правилу левой руки.

Если держать ладонь левой руки так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии поля, а вытянутые четыре пальца были обращены по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление движения проводника. Применяя это правило, надо помнить, что силовые линии поля выходят из северного полюса магнита.

Электрическое поле, электростатическая индукция, емкость и конденсаторы

Понятие об электрическом поле

Известно, что в пространстве, окружающем электрические заряды, действуют силы электрического поля. Многочисленные опыты над заряженными телами полностью подтверждают это. Пространство, окружающее любое заряженное тело, является электрическим полем, в котором действуют электрические силы.



Направление сил поля называют силовыми линиями электрического поля. Поэтому условно считают, что **электрическое поле есть совокупность силовых линий.**

Силовые линии поля обладают определенными свойствами:

- силовые линии выходят всегда из положительно заряженного тела, а входят в тело, заряженное отрицательно;
- они выходят во все стороны перпендикулярно поверхности заряженного тела и перпендикулярно входят в него;
- силовые линии двух одноименно заряженных тел как бы отталкиваются одна от другой, а разноименно заряженных — притягиваются.

Силовые линии электрического поля всегда разомкнуты, так как они обрываются на поверхности заряженных тел. Электрически заряженные тела взаимодействуют друг с другом: разноименно заряженные притягиваются, а одноименно заряженные отталкиваются.

Сила притяжения или отталкивания зависит от величины зарядов тел и от расстояния между ними.

Если в пространстве между телами будет не воздух, а какой-нибудь другой диэлектрик, т. е. непроводник электричества, то сила взаимодействия между телами уменьшится.

Величина, характеризующая свойства диэлектрика и показывающая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами увеличится, если данный диэлектрик заменить воздухом, называется относительной диэлектрической проницаемостью данного диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость равна: для воздуха и газов - 1; для эбонита - 2 - 4; для слюды 5 - 8; для масла 2 - 5; для бумаги 2 - 2,5; для парафина - 2 - 2,6.

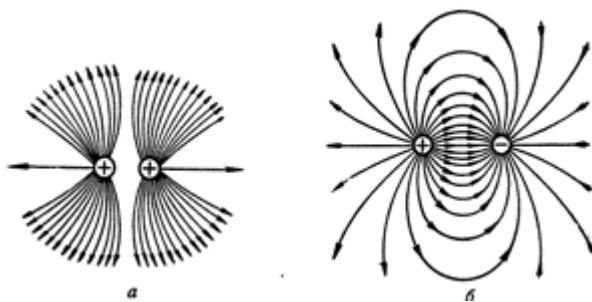


Рис. 1 Электростатическое поле двух заряженных тел: а - тела заряжены одноименно, б - тела заряжены разноименно

Электростатическая индукция

Если проводящему телу А шарообразной формы, изолированному от окружающих предметов, сообщить отрицательный электрический заряд, т. е. создать в нем избыток электронов, то этот заряд равномерно распределится по поверхности тела. Так происходит потому, что электроны, отталкиваясь один от другого, стремятся выйти на поверхность тела.

Поместим незаряженное тело Б, также изолированное от окружающих предметов, в поле тела А. Тогда на поверхности тела Б появятся электрические заряды, причем на стороне, обращенной к телу А, образуется заряд, противоположный заряду тела А (положительный), а на другой стороне — заряд, одноименный с зарядом тела А (отрицательный). Электрические заряды, распределяясь таким образом, остаются на поверхности тела Б до тех пор, пока оно находится в поле тела А. Если тело Б вынести из поля или удалить тело А, то электрический заряд на поверхности тела Б нейтрализуется. Такой способ электризации на расстоянии называется **электростатической индукцией** или **электризацией посредством влияния**.

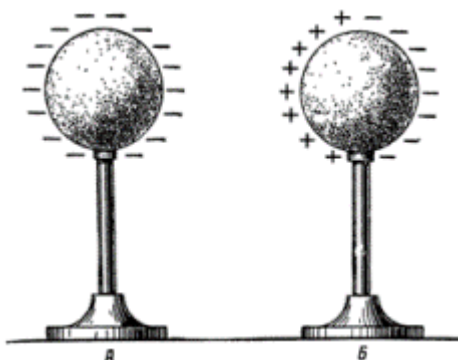


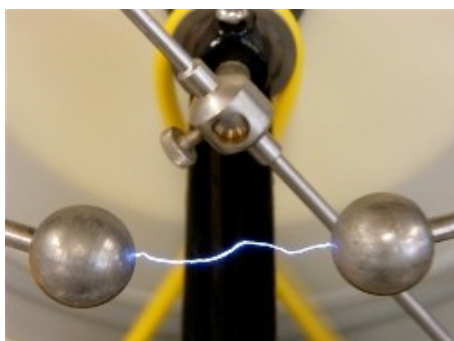
Рис. 2 Явление электростатической индукции

Очевидно, что такое наэлектризованное состояние тела является вынужденным и поддерживается исключительно действием сил электрического поля, созданного телом А.

Если проделать то же самое, когда тело А будет заряжено положительно, то свободные электроны с руки человека устремятся к телу Б, нейтрализуют его положительный заряд, и тело Б окажется заряженным отрицательно.

Чем выше будет степень электризации тела А, т. е. чем выше его потенциал, тем до большего потенциала можно наэлектризовать посредством электростатической индукции тело Б.

Таким образом, мы пришли к выводу, что явление электростатической индукции дает возможность при определенных условиях накапливать электричество на поверхности проводящих тел.



Каждое тело можно зарядить до известного предела, т. е. до определенного потенциала; повышение потенциала сверх предельного влечет за собой разряд тела в окружающую атмосферу. Для разных тел необходимо различное количество электричества, чтобы довести их до одного и того же потенциала. Иначе говоря, **различные тела вмещают различное количество электричества, т. е. обладают разной электрической емкостью (или просто емкостью).**

Электрической емкостью называется способность тела вмещать в себе определенное количество электричества, повышая при этом свой потенциал до определенной величины. Чем больше поверхность тела, тем больший электрический заряд может вместить в себя это тело.

Если тело имеет форму шара, то емкость его находится в прямой зависимости от радиуса шара. Емкость измеряют фарадами.

Фарада — емкость такого тела, которое, получив заряд электричества в один кулон, повышает свой потенциал на один вольт. 1 фарада = 1 000 000 микрофарад.

Электрическая емкость, т. е. свойство проводящих тел накапливать в себе электрический заряд, широко используется в электротехнике. На этом свойстве основано устройство [электрических конденсаторов](#).



Емкость конденсатора

Конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), изолированных одна от другой прослойкой воздуха или каким-либо другим диэлектриком (слодой, бумагой и т. д.).

Если одной из пластин сообщить положительный заряд, а другой — отрицательный, т. е. противоположно зарядить их, то заряды пластин, взаимно притягиваясь, будут удерживаться на пластинах. Это позволяет сосредоточить на пластинах гораздо большее количество электричества, чем если бы заряжать их в удалении одна от другой.

Следовательно, **конденсатор** может служить устройством, запаасающим на своих обкладках значительное количество электричества. Иначе говоря, конденсатор— это **накопитель электрической энергии**.

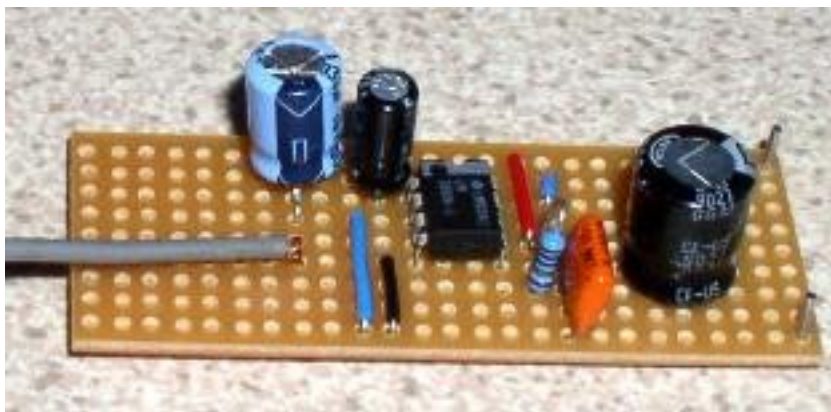
Емкость конденсатора равна:

$$C = \epsilon S / 4\pi l$$

где C — емкость; ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S — площадь одной пластины в см^2 , π — постоянное число, равное 3,14; l — расстояние между пластинами в см.

Из этой формулы видно, что с увеличением площади пластин емкость конденсатора увеличивается, а с увеличением расстояния между ними уменьшается.

Поясним эту зависимость. Чем больше площадь пластин, тем большее количество электричества они способны вместить, а следовательно, и емкость конденсатора будет большей.



При уменьшении расстояния между пластинами возрастает взаимное влияние (индукция) между их зарядами, что позволяет сосредоточить на пластинах большее количество электричества, а следовательно, увеличить емкость конденсатора.

Таким образом, если мы хотим получить конденсатор большой емкости, мы должны брать пластины большой площади и изолировать их между собой тонким слоем диэлектрика.

Формула показывает также, что с увеличением диэлектрической проницаемости диэлектрика емкость конденсатора увеличивается.

Следовательно, конденсаторы, равные по своим геометрическим размерам, но содержащие в себе различные диэлектрики, имеют различную емкость.

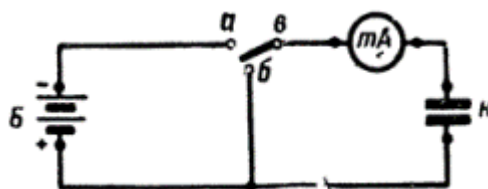
Если, например, взять конденсатор с воздушным диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого равна единице, и поместить между его пластинами слюду с диэлектрической проницаемостью 5, то емкость конденсатора возрастет в 5 раз.

Вот почему для получения больших емкостей в качестве диэлектриков используют такие материалы, как слюда, бумага, пропитанная парафином, и др., диэлектрическая проницаемость которых значительно больше, чем у воздуха.

В соответствии с этим различают следующие типы конденсаторов: воздушные, с твердым диэлектриком и с жидким диэлектриком.

Заряд и разряд конденсатора. Ток смещения

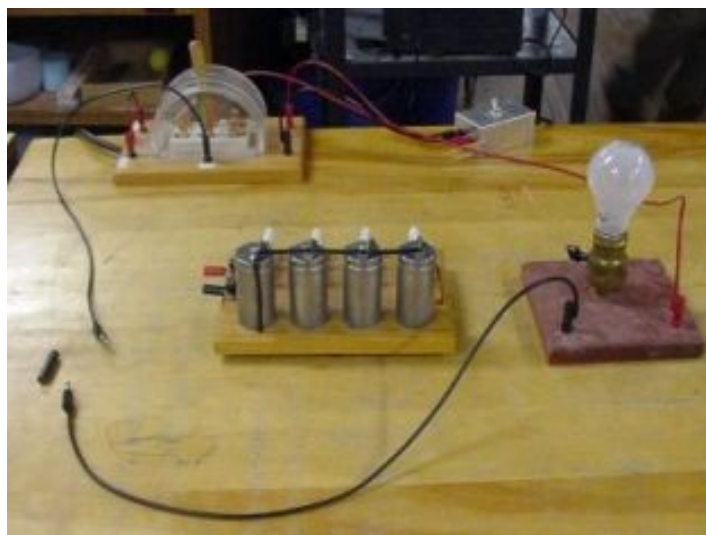
Включим конденсатор постоянной емкости в цепь. При установке переключателя на контакт а конденсатор будет включен в цепь батареи. Стрелка миллиамперметра в момент включения конденсатора в цепь отклонится и затем станет на нуль.



Конденсатор в цепи постоянного тока

Следовательно, по цепи прошел электрический ток в определенном направлении. Если теперь переключатель поставить на контакт б (т. е. замкнуть обкладки), то стрелка миллиамперметра отклонится в другую сторону и опять станет на нуль. Следовательно, по цепи также прошел ток, но уже другого направления. Разберем это явление.

Когда конденсатор был подключен к батарее, он заряжался, т. е. его обкладки получали одна положительный, а другая отрицательный заряды. Заряд продолжался до тех пор, пока разность потенциалов между обкладками конденсатора не сравнялась с напряжением батареи. Миллиамперметр, включенный последовательно в цепь, показал ток заряда конденсатора, который прекратился, как только зарядился конденсатор.



Когда же конденсатор отключили от батареи, он остался заряженным, и разность потенциалов между его обкладками была равна напряжению батареи.

Однако, как только замкнули конденсатор, он начал разряжаться, и по цепи пошел ток разряда, но уже в направлении, обратном току заряда. Это продолжалось до тех пор, пока не исчезла разность потенциалов между обкладками, т. е. пока конденсатор не разрядился.

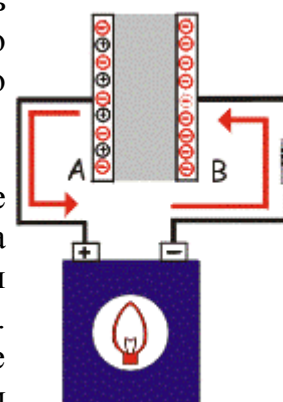
Следовательно, если конденсатор включить в цепь постоянного тока, то в цепи пойдет ток только в момент заряда конденсатора, а в дальнейшем тока в цепи не будет, так как цепь будет разорвана диэлектриком конденсатора.

Поэтому говорят, что **«конденсатор не пропускает постоянного тока»**.

Количество электричества (Q), которое можно сосредоточить на пластинах конденсатора, его емкость (C) и величина подводимого к конденсатору напряжения (U) связаны следующей зависимостью: $Q = CU$.

Эта формула показывает, что чем больше емкость конденсатора, тем большее количество электричества можно сосредоточить на нем, не повышая сильно напряжения на его обкладках.

Повышение напряжения при неизменной емкости также приводит к увеличению запасаемого конденсатором количества электричества. Однако если к обкладкам конденсатора подвести большое напряжение, то конденсатор может быть «пробит», т. е. под действием этого напряжения диэлектрик в каком-то месте разрушится и пропустит через себя ток. Конденсатор при этом прекратит свое действие. Чтобы избежать порчи конденсаторов, на них указывают величину допустимого рабочего напряжения.



Явление поляризации диэлектрика

Разберем теперь, **что происходит в диэлектрике при заряде и разряде конденсатора и почему от диэлектрической проницаемости диэлектрика зависит величина емкости?**

Ответ на этот вопрос дает нам электронная теория строения вещества.

В диэлектрике, как во всяком изоляторе, нет свободных электронов. В атомах диэлектрика электроны прочно связаны с ядром, поэтому напряжение, приложенное к пластинам конденсатора, не вызывает в его диэлектрике направленного движения электронов, т. е. электрического тока, как это бывает в проводниках.

Однако под действием сил электрического поля, созданного заряженными пластинами, электроны, вращающиеся вокруг ядра атома, смещаются в сторону положительно заряженной пластины конденсатора. Атом при этом как бы вытягивается по направлению силовых линий поля. Такое состояние атомов диэлектрика называют поляризованным, а само явление — поляризацией диэлектрика.

При разряде конденсатора поляризованное состояние диэлектрика нарушается, т. е. пропадает вызванное поляризацией смещение электронов относительно ядра, и атомы приходят в свое обычное неполяризованное состояние. Установлено, что присутствие диэлектрика ослабляет поле между пластинами конденсатора.

Различные диэлектрики под действием одного и того же электрического поля поляризуются в различной степени. Чем легче поляризуется диэлектрик, тем он больше ослабляет поле. Поляризация воздуха, например, приводит к меньшему ослаблению поля, чем поляризация любого другого диэлектрика.

Но ослабление поля между пластинами конденсатора позволяет сосредоточить на них большее количество электричества Q при одном и том же напряжении U , что в свою очередь, приводит к увеличению емкости конденсатора, так как $C = Q / U$.

Итак, мы пришли к выводу — **чем больше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем большей емкостью обладает конденсатор, содержащий в своем составе этот диэлектрик.**

Смещение электронов в атомах диэлектрика, происходящее, как мы уже говорили, под действием сил электрического поля, образует в диэлектрике, в первый момент действия поля, электрический ток, называемый **током смещения**. Так он назван потому, что в отличие от тока проводимости в металлических проводниках, **ток смещения образуется лишь смещением электронов, передвигающихся в пределах своих атомов.**

Наличие этого тока смещения приводит к тому, что конденсатор, подключенный к источнику переменного тока, становится его проводником.

Что такое переменный ток и чем он отличается от тока постоянного

Переменный ток, в отличие от тока постоянного, непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, причем изменения эти происходят периодически, т. е. точно повторяются через равные промежутки времени.

Чтобы вызвать в цепи такой ток, используются **источники переменного тока, создающие переменную ЭДС, периодически изменяющуюся по величине и направлению**. Такие источники называются **генераторами переменного тока**.

На рис. 1 показана схема устройства (модель) простейшего генератора переменного тока.

Прямоугольная рамка, изготовленная из медной проволоки, укреплена на оси и при помощи ременной передачи вращается в поле магнита. Концы рамки припаяны к медным контактным кольцам, которые, вращаясь вместе с рамкой, скользят по контактным пластинам (щеткам).

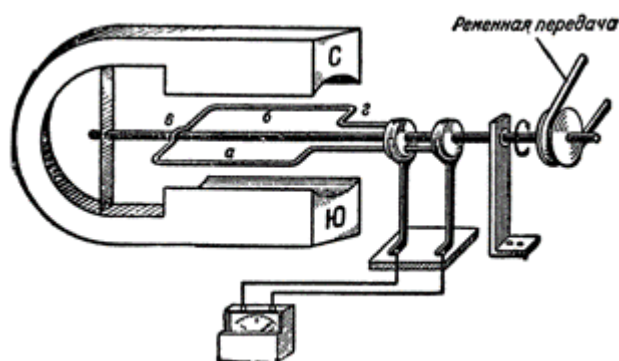


Рисунок 1. Схема простейшего генератора переменного тока

Убедимся в том, что такое устройство действительно является **источником переменной ЭДС**.

Предположим, что магнит создает между своими полюсами равномерное магнитное поле, т. е. такое, в котором плотность магнитных силовых линий в любой части поля одинаковая. вращаясь, рамка пересекает силовые линии магнитного поля, и в каждой из ее сторон а и б индуцируются ЭДС.

Стороны же в и г рамки — нерабочие, так как при вращении рамки они не пересекают силовых линий магнитного поля и, следовательно, не участвуют в создании ЭДС.

В любой момент времени ЭДС, возникающая в стороне а, противоположна по направлению ЭДС, возникающей в стороне б, но в рамке обе ЭДС действуют согласно и в сумме составляют общую ЭДС, т. е. индуктируемую всей рамкой.

В этом нетрудно убедиться, если использовать для определения направления ЭДС известное нам правило правой руки.

Для этого надо ладонь правой руки расположить так, чтобы она была обращена в сторону северного полюса магнита, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения той стороны рамки, в которой мы хотим определить направление ЭДС. Тогда направление ЭДС в ней укажут вытянутые пальцы руки.

Для какого бы положения рамки мы ни определяли направление ЭДС в сторонах а и б, они всегда складываются и образуют общую ЭДС в рамке. При этом с каждым оборотом рамки направление общей ЭДС изменяется в ней на обратное, так как каждая из рабочих сторон рамки за один оборот проходит под разными полюсами магнита.

Величина ЭДС, индуктируемой в рамке, также изменяется, так как изменяется скорость, с которой стороны рамки пересекают силовые линии магнитного поля. Действительно, в то время, когда рамка подходит к своему вертикальному положению и проходит его, скорость пересечения силовых линий сторонами рамки бывает наибольшей, и в рамке индуктируется наибольшая ЭДС. В те моменты времени, когда рамка проходит свое горизонтальное положение, ее стороны как бы скользят вдоль магнитных силовых линий, не пересекая их, и ЭДС не индуктируется.

Таким образом, при равномерном вращении рамки в ней будет индуктироваться ЭДС, периодически изменяющаяся как по величине, так и по направлению.

ЭДС, возникающую в рамке, можно измерить прибором и использовать для создания тока во внешней цепи.

Используя явление электромагнитной индукции, можно получить переменную ЭДС и, следовательно, переменный ток.

Переменный ток для промышленных целей и для освещения вырабатывается мощными генераторами, приводимыми во вращение паровыми или водяными турбинами и двигателями внутреннего сгорания.



Графическое изображение постоянного и переменного токов

Графический метод дает возможность наглядно представить процесс изменения той или иной переменной величины в зависимости от времени.

Построение графиков переменных величин, меняющихся с течением времени, начинают с построения двух взаимно перпендикулярных линий, называемых осями графика. Затем на горизонтальной оси в определенном масштабе откладывают отрезки времени, а на вертикальной, также в некотором масштабе, — значения той величины, график которой собираются построить (ЭДС, напряжения или тока).

На рис. 2 графически изображены постоянный и переменный токи. В данном случае мы откладываем значения тока, причем вверх по вертикали от точки пересечения осей O откладываются значения тока одного направления, которое принято называть положительным, а вниз от этой точки — противоположного направления, которое принято называть отрицательным.

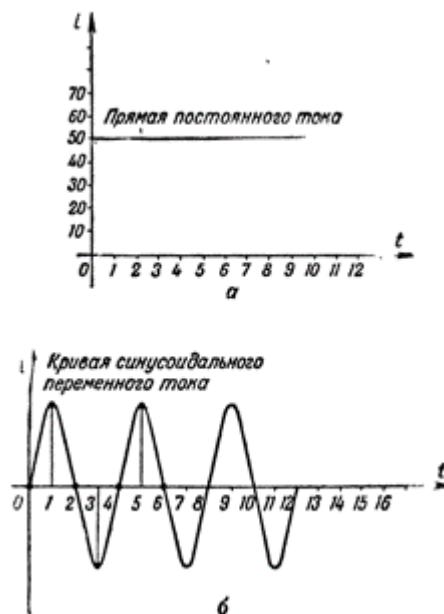


Рисунок 2. Графическое изображение постоянного и переменного тока

Сама точка O служит одновременно началом отсчета значений тока (по вертикали вниз и вверх) и времени (по горизонтали вправо). Иначе говоря, этой точке соответствует нулевое значение тока и тот начальный момент времени, от которого мы намереваемся проследить, как в дальнейшем будет изменяться ток.

Убедимся в правильности построенного на рис. 2, а графика постоянного тока величиной 50 мА.

Так как этот ток постоянный, т. е. не меняющий с течением времени своей величины и направления, то различным моментам времени будут соответствовать одни и те же значения тока, т. е. 50 мА. Следовательно, в момент времени, равный нулю, т. е. в начальный момент нашего наблюдения за током, он будет равен 50 мА. Отложив по вертикальной оси вверх отрезок, равный значению тока 50 мА, мы получим первую точку нашего графика.

То же самое мы обязаны сделать и для следующего момента времени, соответствующего точке 1 на оси времени, т. е. отложить от этой точки вертикально вверх отрезок, также равный 50 мА. Конец отрезка определит нам вторую точку графика.

Проделав подобное построение для нескольких последующих моментов времени, мы получим ряд точек, соединение которых даст прямую линию, являющуюся графическим изображением постоянного тока величиной 50 мА.



Построение графика переменной ЭДС

Перейдем теперь к изучению графика переменной ЭДС. На рис. 3 в верхней части показана рамка, вращающаяся в магнитном поле, а внизу дано графическое изображение возникающей переменной ЭДС.

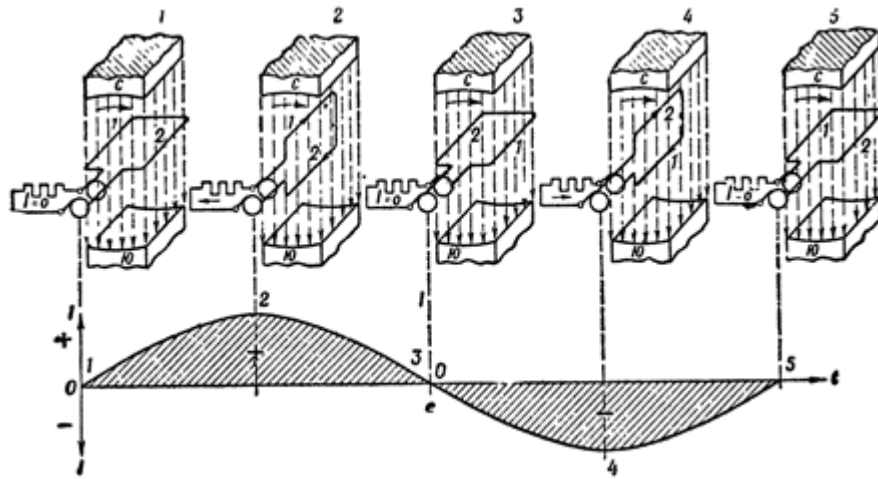


Рисунок 3. Построение графика переменной ЭДС

Начнем равномерно вращать рамку по часовой стрелке и проследим за ходом изменения в ней ЭДС, приняв за начальный момент горизонтальное положение рамки.

В этот начальный момент ЭДС будет равна нулю, так как стороны рамки не пересекают магнитных силовых линий. На графике это нулевое значение ЭДС, соответствующее моменту $t = 0$, изобразится точкой 1.

При дальнейшем вращении рамки в ней начнет появляться ЭДС и будет возрастать по величине до тех пор, пока рамка не достигнет своего вертикального положения. На графике это возрастание ЭДС изобразится плавной поднимающейся вверх кривой, которая достигает своей вершины (точка 2).

По мере приближения рамки к горизонтальному положению ЭДС в ней будет убывать и упадет до нуля. На графике это изобразится спадающей плавной кривой.

Следовательно, за время, соответствующее половине оборота рамки, ЭДС в ней успела возрасти от нуля до наибольшей величины и вновь уменьшиться до нуля (точка 3).

При дальнейшем вращении рамки в ней вновь возникнет ЭДС и будет постепенно возрастать по величине, однако направление ее уже изменится на обратное, в чем можно убедиться, применив правило правой руки.

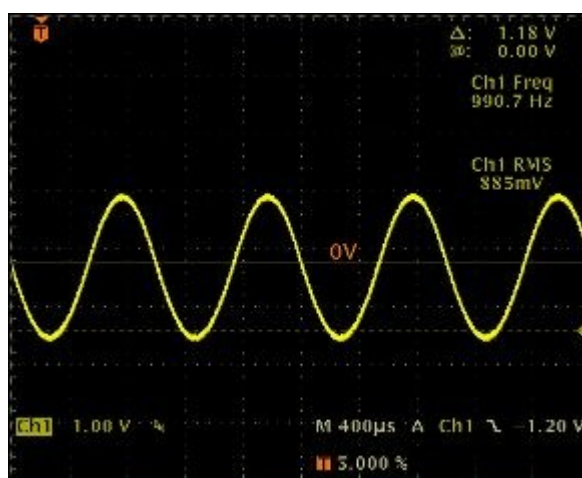
График учитывает изменение направления ЭДС тем, что кривая, изображающая ЭДС, пересекает ось времени и располагается теперь ниже этой оси. ЭДС возрастает опять-таки до тех пор, пока рамка не займет вертикальное положение. Затем начнется убывание ЭДС, и величина ее станет равной нулю, когда рамка вернется в свое первоначальное положение, совершив один полный оборот. На графике это выразится тем, что кривая ЭДС, достигнув в обратном направлении своей вершины (точка 4), встретится затем с осью времени (точка 5).

На этом заканчивается один цикл изменения ЭДС, но если продолжать вращение рамки, тотчас же начинается второй цикл, в точности повторяющий первый, за которым, в свою очередь, последует третий, а потом четвертый, и так до тех пор, пока мы не остановим вращение рамки.

Таким образом, за каждый оборот рамки ЭДС, возникающая в ней, совершает полный цикл своего изменения.

Если же рамка будет замкнута на какую-либо внешнюю цепь, то по цепи потечет переменный ток, график которого будет по виду таким же, как и график ЭДС.

Полученная нами волнообразная кривая называется **синусоидой**, а ток, ЭДС или напряжение, изменяющиеся по такому закону, называются **синусоидальными**.



Сама кривая названа синусоидой потому, что она является графическим изображением переменной тригонометрической величины, называемой синусом.

Синусоидальный характер изменения тока — самый распространенный в электротехнике, поэтому, говоря о переменном токе, в большинстве случаев имеют в виду синусоидальный ток.

Для сравнения различных переменных токов (ЭДС и напряжений) существуют величины, характеризующие тот или иной ток. Они называются **параметрами переменного тока**.

Период, амплитуда и частота — параметры переменного тока

Переменный ток характеризуется двумя параметрами — **периодом** и **амплитудой**, зная которые мы можем судить, какой это переменный ток, и построить график тока.

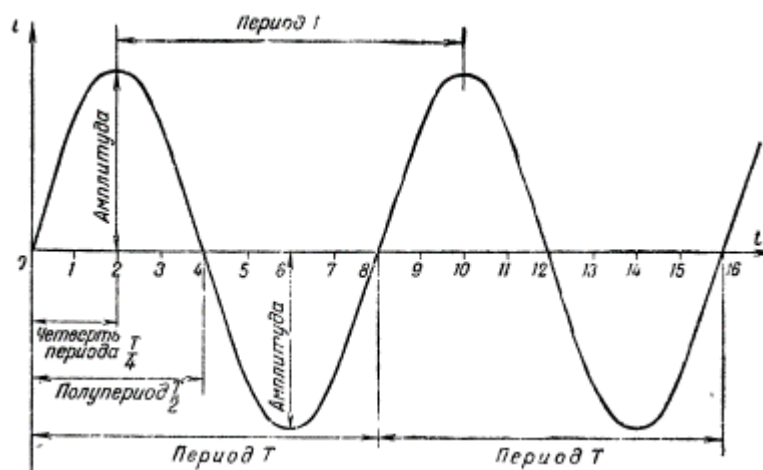


Рисунок 4. Кривая синусоидального тока

Промежуток времени, на протяжении которого совершается полный цикл изменения тока, называется периодом. Период обозначается буквой T и измеряется в секундах.

Промежуток времени, на протяжении которого совершается половина полного цикла изменения тока, называется полупериодом. Следовательно, период изменения тока (ЭДС или напряжения) состоит из двух полупериодов. Совершенно очевидно, что все периоды одного и того же переменного тока равны между собой.

Как видно из графика, в течение одного периода своего изменения ток достигает дважды максимального значения.

Максимальное значение переменного тока (ЭДС или напряжения) называется его амплитудой или амплитудным значением тока.

I_m , E_m и U_m — общепринятые обозначения амплитуд тока, ЭДС и напряжения.

Мы прежде всего обратили внимание на амплитудное значение тока, однако, как это видно из графика, существует бесчисленное множество промежуточных его значений, меньших амплитудного.

Значение переменного тока (ЭДС, напряжения), соответствующее любому выбранному моменту времени, называется его мгновенным значением.

i , e и u — общепринятые обозначения мгновенных значений тока, ЭДС и напряжения.

Мгновенное значение тока, как и амплитудное его значение, легко определить с помощью графика. Для этого из любой точки на горизонтальной оси, соответствующей интересующему нас моменту времени, проведем вертикальную линию до точки пересечения с кривой тока; полученный отрезок вертикальной прямой определит значение тока в данный момент, т. е. мгновенное его значение.

Очевидно, что мгновенное значение тока по истечении времени $T/2$ от начальной точки графика будет равно нулю, а по истечении времени - $T/4$ его амплитудному значению. Ток также достигает своего амплитудного значения; но уже в обратном направлении, по истечении времени, равного $3/4 T$.

Итак, график показывает, как с течением времени меняется ток в цепи, и что каждому моменту времени соответствует только одно определенное значение как величины, так и направления тока. При этом значение тока в данный момент времени в одной точке цепи будет точно таким же в любой другой точке этой цепи.

Число полных периодов, совершаемых током в 1 секунду, называется **частотой переменного тока** и обозначается латинской буквой f .

Чтобы определить частоту переменного тока, т. е. узнать, **сколько периодов своего изменения ток совершил в течение 1 секунды**, необходимо 1 секунду разделить на время одного периода $f = 1/T$. Зная частоту переменного тока, можно определить период: $T = 1/f$

Частота переменного тока измеряется единицей, называемой герцем.

Если мы имеем переменный ток, частота изменения которого равна 1 герцу, то период такого тока будет равен 1 секунде. И, наоборот, если период изменения тока равен 1 секунде, то частота такого тока равна 1 герцу.

Итак, мы определили параметры переменного тока — **период, амплитуду и частоту**, — которые позволяют отличать друг от друга различные переменные токи, ЭДС и напряжения и строить, когда это необходимо, их графики.

При определении сопротивления различных цепей переменному току использовать еще одна вспомогательную величину, характеризующую переменный ток, так называемую угловую или круговую частоту.

Круговая частота обозначается буквой ω и связана с частотой f соотношением $\omega = 2\pi f$

Поясним эту зависимость. При построении графика переменной ЭДС мы видели, что за время одного полного оборота рамки происходит полный цикл изменения ЭДС. Иначе говоря, для того чтобы рамке сделать один оборот, т. е. повернуться на 360° , необходимо время, равное одному периоду, т. е. T секунд. Тогда за 1 секунду рамка совершает $360^\circ/T$ оборота. Следовательно, $360^\circ/T$ есть угол, на который поворачивается рамка в 1 секунду, и выражает собой скорость вращения рамки, которую принято называть **угловой или круговой скоростью**.

Но так как период T связан с частотой f соотношением $f=1/T$, то и круговая скорость может быть выражена через частоту и будет равна $\omega = 360^\circ f$.

Итак, мы пришли к выводу, что $\omega = 360^\circ f$. Однако для удобства пользования круговой частотой при всевозможных расчетах угол 360° , соответствующий одному обороту, заменяют его радиальным выражением, равным 2π радиан, где $\pi=3,14$. Таким образом, окончательно получим $\omega = 2\pi f$. Следовательно, чтобы определить круговую частоту переменного тока (ЭДС или напряжения), надо частоту в герцах умножить на постоянное число 6,28.

Электромагнитная индукция

Возникновение в проводнике ЭДС индукции

Если поместить в магнитное поле проводник и перемещать его так, чтобы он при своем движении пересекал силовые линии поля, то в проводнике возникнет электродвижущая сила, называемая **ЭДС индукции**.



ЭДС индукции возникнет в проводнике и в том случае, если сам проводник останется неподвижным, а перемещаться будет магнитное поле, пересекая проводник своими силовыми линиями.

Если проводник, в котором наводится ЭДС индукции, замкнуть на какую-либо внешнюю цепь, то под действием этой ЭДС по цепи потечет ток, называемый **индукционным током**.

Явление индуктирования ЭДС в проводнике при пересечении его силовыми линиями магнитного поля называется **электромагнитной индукцией**.

Электромагнитная индукция — это обратный процесс, т. е. превращение механической энергии в электрическую.

Явление электромагнитной индукции нашло широчайшее применение в [электротехнике](#). На использовании его основано устройство различных электрических машин.



Величина и направление ЭДС индукции

Рассмотрим теперь, каковы будут величина и направление индуктированной в проводнике ЭДС.

Величина ЭДС индукции зависит от количества силовых линий поля, пересекающих проводник в единицу времени, т. е. от скорости движения проводника в поле.

Величина индуктированной ЭДС находится в прямой зависимости от скорости движения проводника в магнитном поле.

Величина индуктированной ЭДС зависит также и от длины той части проводника, которая пересекается силовыми линиями поля. Чем большая часть проводника пересекается силовыми линиями поля, тем большая ЭДС индуктируется в проводнике. И, наконец, чем сильнее магнитное поле, т. е. чем больше его индукция, тем большая ЭДС возникает в проводнике, пересекающем это поле.

Итак, величина ЭДС индукции, возникающей в проводнике при его движении в магнитном поле, прямо пропорциональна индукции магнитного поля, длине проводника и скорости его перемещения.

Зависимость эта выражается формулой $E = Blv$,

где E — ЭДС индукции; B — магнитная индукция; l — длина проводника; v — скорость движения проводника.

Следует твердо помнить, что **в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, ЭДС индукции возникает только в том случае, если этот проводник пересекается магнитными силовыми линиями поля.** Если же проводник перемещается вдоль силовых линий поля, т. е. не пересекает, а как бы скользит по ним, то никакой ЭДС в нем не индуктируется. Поэтому приведенная выше формула справедлива только в том случае, когда проводник перемещается перпендикулярно магнитным силовым линиям поля.

Направление индуктированной ЭДС (а также и тока в проводнике) зависит от того, в какую сторону движется проводник. Для определения направления индуктированной ЭДС существует правило правой руки.

Если держать ладонь правой руки так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии поля, а отогнутый большой палец указывал бы направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление действия индуктированной ЭДС и направление тока в проводнике

ЭДС индукции в катушке

Мы уже говорили, что для создания в проводнике ЭДС индукции необходимо перемещать в магнитном поле или сам проводник, или магнитное поле. В том и другом случае проводник должен пересекаться магнитными силовыми линиями поля, иначе ЭДС индуктироваться не будет. **Индуктированную ЭДС, а следовательно, и индукционный ток можно получить не только в прямолинейном проводнике, но и в проводнике, свитом в катушку.**

При движении внутри катушки постоянного магнита в ней индуктируется ЭДС за счет того, что магнитный поток магнита пересекает витки катушки, т. е. точно так же, как это было при движении прямолинейного проводника в поле магнита.

Если магнит опускать в катушку медленно, то возникающая в ней ЭДС будет настолько мала, что стрелка прибора может даже не отклониться. Если же, наоборот, магнит быстро ввести в катушку, то отклонение стрелки будет большим. Значит, величина индуктируемой ЭДС, а следовательно, и сила тока в катушке зависят от скорости движения магнита, т. е. от того, насколько быстро силовые линии поля пересекают витки катушки. Если теперь поочередно вводить в катушку с одинаковой скоростью сначала сильный магнит, а затем слабый, то можно заметить, что при сильном магните стрелка прибора будет отклоняться на больший угол. Значит, **величина индуктируемой ЭДС, а следовательно, и сила тока в катушке зависят от величины магнитного потока магнита.**

И, наконец, если вводить с одинаковой скоростью один и тот же магнит сначала в катушку с большим числом витков, а затем со значительно меньшим, то в первом случае стрелка прибора отклонится на больший угол, чем во втором. Значит, величина индуктируемой ЭДС, а следовательно, и сила тока в катушке зависят от числа ее витков. Те же результаты можно получить, если вместо постоянного магнита применять электромагнит.

Направление ЭДС индукции в катушке зависит от направления перемещения магнита. О том, как определять направление ЭДС индукции, говорит закон, установленный Э. Х. Ленцем.

Закон Ленца для электромагнитной индукции

Всякое изменение магнитного потока внутри катушки сопровождается возникновением в ней ЭДС индукции, причем чем быстрее изменяется магнитный поток, пронизывающий катушку, тем большая ЭДС в ней индуктируется.

Если катушка, в которой создана ЭДС индукции, замкнута на внешнюю цепь, то по виткам ее идет индукционный ток, создающий вокруг проводника магнитное поле, в силу чего катушка превращается в соленоид. Получается таким образом, что

изменяющееся внешнее магнитное поле вызывает в катушке индукционный ток, которой, в свою очередь, создает вокруг катушки свое магнитное поле — поле тока.

Изучая это явление, Э. Х. Ленц установил закон, определяющий направление индукционного тока в катушке, а следовательно, и направление ЭДС индукции. **ЭДС индукции, возникающая в катушке при изменении в ней магнитного потока, создает в катушке ток такого направления, при котором магнитный поток катушки, созданный этим током, препятствует изменению постороннего магнитного потока.**

Закон Ленца справедлив для всех случаев индуктирования тока в проводниках, независимо от формы проводников и от того, каким способом достигается изменение внешнего магнитного поля.

Индукционные токи в массивных проводниках

Изменяющийся магнитный поток способен индуктировать ЭДС не только в витках катушки, но и в массивных металлических проводниках. Пронизывая толщу массивного проводника, магнитный поток индуктирует в нем ЭДС, создающую индукционные токи. Эти так называемые вихревые токи распространяются по массивному проводнику и накоротко замыкаются в нем.



Сердечники трансформаторов, магнитопроводы различных электрических машин и аппаратов представляют собой как раз те массивные проводники, которые нагреваются возникающими в них индукционными токами. Явление это нежелательно, поэтому для уменьшения величины индукционных токов части электрических машин и сердечники трансформаторов делают не массивными, а состоящими из тонких листов, изолированных один от другого бумагой или слоем изоляционного лака. Благодаря этому преграждается путь распространения вихревых токов по массе проводника.

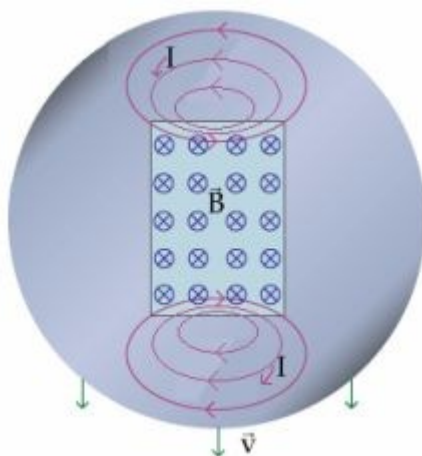
Но иногда на практике вихревые токи используются и как токи полезные. На использовании этих токов основана, например, работа [индукционных нагревательных печей](#), [счетчиков электрической энергии](#) и так называемых магнитных успокоителей подвижных частей электроизмерительных приборов.

Вихревые токи

В электрических аппаратах, приборах и машинах металлические детали иногда движутся в магнитном поле или неподвижные металлические детали пересекаются силовыми линиями меняющегося по величине магнитного поля. В этих металлических деталях индуцируется ЭДС самоиндукции.

Под действием этих э. д. с. в массе металлической детали протекают **вихревые токи (токи Фуко)**, которые замыкаются в массе, образуя вихревые контуры токов. Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, что является бесполезной тратой энергии.

Пусть имеется сердечник из металлического материала. Поместим на этот сердечник катушку, по которой пропустим переменный ток. Вокруг катушки окажется переменный магнитный ток, пересекающий сердечник. При этом в сердечнике станет наводиться индуцированная ЭДС, которая, в свою очередь, вызывает в сердечнике токи, называемые вихревыми. Эти вихревые токи нагревают сердечник. Так как электрическое сопротивление сердечника невелико, то наводимые в сердечниках индуцированные токи могут оказываться достаточно большими, а нагрев сердечника - значительным.



Возникновение токов Фуко (вихревых токов)

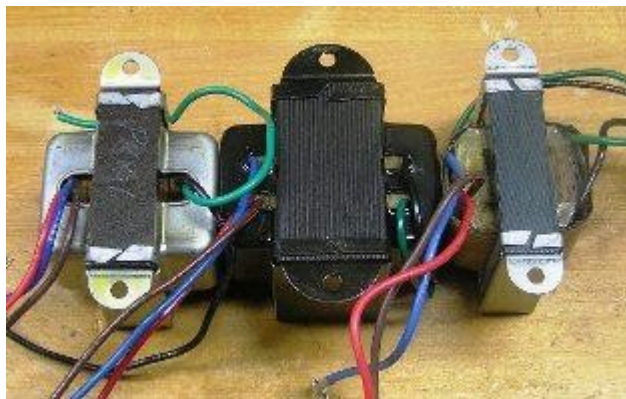
Впервые вихревые токи были обнаружены французским учёным Д.Ф. Араго (1786 - 1853) в 1824 г. в медном диске, расположенном на оси под вращающейся магнитной стрелкой. За счёт вихревых токов диск приходил во вращение. Это явление, названное явлением Араго, было объяснено несколько лет спустя М. Фарадеем с позиций открытого им закона электромагнитной индукции.

Вихревые токи были подробно исследованы французским физиком Фуко (1819—1868) и названы его именем. Он назвал явление нагревания металлических тел, вращаемых в магнитном поле, вихревыми токами.

Способы уменьшения токов Фуко

Мощность, затрачиваемая на нагрев сердечника вихревыми токами, бесполезно снижает КПД технических устройств электромагнитного типа.

Чтобы уменьшить мощность вихревых токов, увеличивают электрическое сопротивление магнитопровода, для этого сердечники набирают из отдельных тонких (0,1- 0,5 мм) пластин, изолированных друг от друга с помощью специального лака или окалины. В материал сердечника вводят специальные добавки, также увеличивающие его электрическое сопротивление.



Шихтованный магнитопровод трансформатора

Сердечники некоторых катушек (бобин) набирают из кусков отожженной железной проволоки. Полоски железа располагают параллельно линиям магнитного потока. Вихревые же токи, протекающие в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, ограничиваются изолирующими прокладками. Для магнитопроводов приборов и устройств, работающих на высокой частоте, применяют магнетодиэлектрики. Чтобы снизить вихревые токи в проводах, последние изготавливают в виде жгута из отдельных жил, изолированных друг от друга.



Лицендрат - это система переплетенных медных проводов, в которой каждая жила изолирована от соседних. Лицендрат предназначен для использования на высокочастотных токах для предотвращения возникновения паразитных токов и токов Фуко.

Применение токов Фуко

Полезное применение вихревые токи нашли в устройстве магнитного тормоза диска электрического счетчика. Вращаясь, диск пересекает магнитные силовые линии постоянного магнита. В плоскости диска возникают вихревые токи, которые, в свою очередь, создают свои магнитные потоки в виде трубочек вокруг вихревого тока. Взаимодействуя с основным полем магнита, эти потоки тормозят диск.

В ряде случаев, применяя вихревые токи, можно использовать технологические операции, которые невозможно применить без токов высокой частоты. Например, при изготовления вакуумных приборов и устройств из баллона необходимо тщательно откачать воздух и иные газы. Однако в металлической арматуре, находящейся внутри баллона, имеются остатки газа, которые можно удалить только после заваривания баллона. Для полного обезгаживания арматуры вакуумный прибор помещают в поле высокочастотного генератора, в результате действия вихревых токов арматура нагревается до сотен градусов, остатки газа при этом нейтрализуются.

Вихревые токи находят полезное применение также при [индукционной плавке металлов](#) и поверхностной закалке токами высокой частоты.

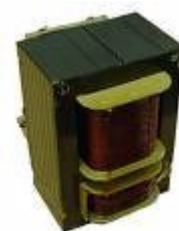


Использование вихревых токов при индукционной закалке металлов

Самоиндукция и взаимная индукция

ЭДС самоиндукции

Изменяющийся по величине ток всегда создает изменяющееся магнитное поле, которое, в свою очередь, всегда индуцирует ЭДС. При всяком изменении тока в катушке (или вообще в проводнике) в ней самой индуцируется ЭДС **самоиндукции**.



Когда ЭДС в катушке индуцируется за счет изменения собственного магнитного потока, величина этой ЭДС зависит от скорости изменения тока. Чем больше скорость изменения тока, тем больше ЭДС самоиндукции.

Величина ЭДС самоиндукции зависит также от числа витков катушки, густоты их намотки и размеров катушки. Чем больше диаметр катушки, число ее витков и густота намотки, тем больше ЭДС самоиндукции. Эта зависимость ЭДС самоиндукции от скорости изменения тока в катушке, числа ее витков и размеров имеет большое значение в электротехнике.

Направление ЭДС самоиндукции определяется по закону Ленца. **ЭДС самоиндукции имеет всегда такое направление, при котором она препятствует изменению вызвавшего ее тока.**

Иначе говоря, убывание тока в катушке влечет за собой появление ЭДС самоиндукции, направленной по направлению тока, т. е. препятствующей его убыванию. И, наоборот, при возрастании тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, направленная против тока, т. е. препятствующая его возрастанию.

Не следует забывать, что если ток в катушке не изменяется, то никакой ЭДС самоиндукции не возникает. Явление самоиндукции особенно резко проявляется в цепи, содержащей в себе катушку с железным сердечником, так как железо значительно увеличивает магнитный поток катушки, а следовательно, и величину ЭДС самоиндукции при его изменении.

Индуктивность

Итак, нам известно, что величина ЭДС самоиндукции в катушке, кроме скорости изменения тока в ней, зависит также от размеров катушки и числа ее витков.

Следовательно, различные по своей конструкции катушки при одной и той же скорости изменения тока способны индуцировать в себе различные по величине ЭДС самоиндукции.

Чтобы различать катушки между собой по их способности индуцировать в себе ЭДС самоиндукции, введено понятие **индуктивности катушек**, или **коэффициента самоиндукции**.

Индуктивность катушки есть величина, характеризующая свойство катушки индуцировать в себе ЭДС самоиндукции.

Индуктивность данной катушки есть величина постоянная, не зависящая как от силы проходящего по ней тока, так и от скорости его изменения.

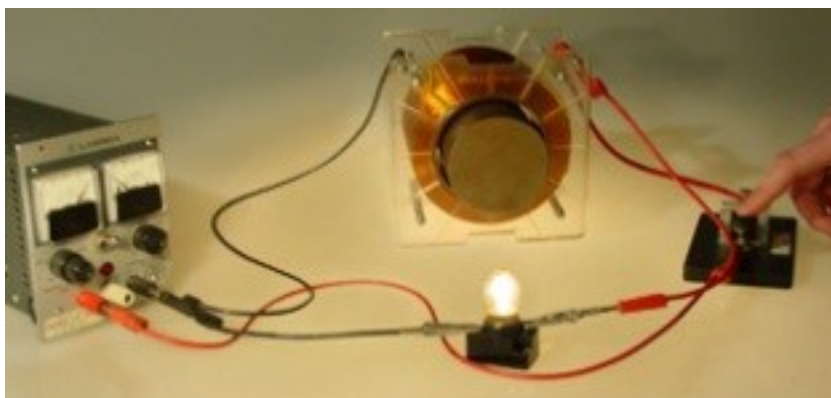
Генри — это индуктивность такой катушки (или проводника), в которой при изменении силы тока на 1 ампер в 1 секунду возникает ЭДС самоиндукции в 1 вольт.

На практике иногда нужна катушка (или обмотка), не обладающая индуктивностью. В этом случае провод наматывают на катушку, предварительно сложив его вдвойне. Такой способ намотки называется **бифилярным**.

ЭДС взаимной индукции

Итак, мы знаем, что ЭДС индукции в катушке можно вызвать и не перемещая в ней электромагнит, а изменяя лишь ток в его обмотке. Но что чтобы вызвать ЭДС индукции в одной катушке за счет изменения тока в другой, совершенно не обязательно вставлять одну из них внутрь другой, а можно расположить их рядом

И в этом случае при изменении тока в одной катушке возникающий переменный магнитный поток будет пронизывать (пересекать) витки другой катушки и вызовет в ней ЭДС.



Взаимоиндукция дает возможность связывать между собой посредством магнитного поля различные электрические цепи. Такую связь принято называть **индуктивной связью**.

Величина ЭДС взаимной индукции зависит прежде всего от того, с какой скоростью изменяется ток в первой катушке. Чем быстрее изменяется в ней ток, тем создается большая ЭДС взаимной индукции.

Кроме того, величина ЭДС взаимной индукции зависит от величины индуктивности обеих катушек и от их взаимного расположения, а также от **магнитной проницаемости окружающей среды**.

Следовательно, **различные по своей индуктивности и взаимному расположению катушки и в различной среде способны вызывать одна в другой различные по величине ЭДС взаимной индукции.**

Чтобы иметь возможность различать между собой различные пары катушек по их способности взаимно индуцировать ЭДС, введено понятие о **взаимоиндуктивности** или **коэффициенте взаимной индукции**.

Обозначается она взаимной индуктивностью буквой M . Единицей ее измерения, так же как и индуктивности, служит генри.

Генри — это такая взаимдуктивность двух катушек, при которой изменение тока в одной катушке на 1 ампер в 1 секунду вызывает в другой катушке ЭДС взаимдукции, равную 1 вольту.

На величину ЭДС взаимдукции влияет магнитная проницаемость окружающей среды. Чем больше магнитная проницаемость среды, по которой замыкается переменный магнитный поток, связывающий катушки, тем сильнее индуктивная связь катушек и больше величина ЭДС взаимдукции.

На явлении взаимдукции основана работа такого важного электротехнического устройства, как трансформатор.



Принцип действия трансформатора

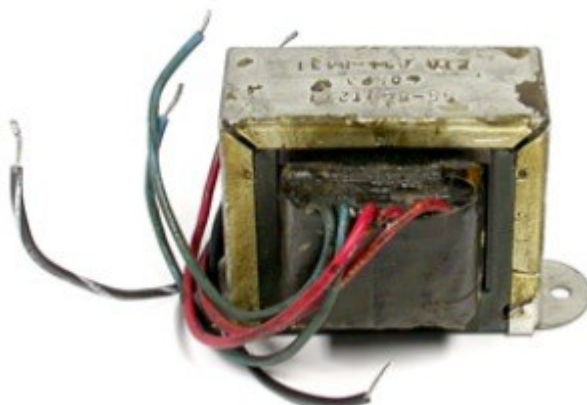
Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции и заключается в следующем. На железный сердечник наматывают две обмотки, одну из них соединяют с источником переменного тока, а другую — с потребителем тока (сопротивлением).

Обмотка, соединенная с источником переменного тока, создает в сердечнике переменный магнитный поток, который в другой обмотке индуцирует ЭДС.

Обмотку, соединенную с источником переменного тока, называют первичной, а обмотку, к которой присоединяется потребитель, — вторичной. Но так как переменный магнитный поток пронизывает одновременно обе обмотки, то в каждой из них индуцируются переменные ЭДС.

Величина ЭДС каждого витка, как и ЭДС всей обмотки, зависит от величины магнитного потока, пронизывающего виток, и скорости его изменения. Скорость изменения магнитного потока зависит исключительно от частоты переменного тока, постоянной для данного тока. Постоянна для данного трансформатора также и величина магнитного потока. Поэтому в рассматриваемом трансформаторе ЭДС в каждой обмотке зависит только от количества витков в ней.

Отношение первичного напряжения ко вторичному равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Это отношение называется коэффициентом трансформации (K).



Если к одной из обмоток трансформатора подано напряжение сети, то с другой обмотки будет снято напряжение, большее или меньшее напряжения сети во столько раз, во сколько раз больше или меньше количество витков вторичной обмотки.

Если со вторичной обмотки снимается напряжение, большее, чем поданное к первичной обмотке, то такой трансформатор называется **повышающим**. Наоборот, если со вторичной обмотки снимается напряжение, меньше первичного, то такой трансформатор называется **понижающим**. Каждый трансформатор может быть использован как повышающий и как понижающий.

Коэффициент трансформации обычно указывается в паспорте трансформатора как отношение высшего напряжения к низшему, т. е. он всегда больше единицы.

Принцип действия и устройство однофазного трансформатора

Работа однофазного трансформатора вхолостую

Трансформаторами в электротехнике называют такие электротехнические устройства, в которых электрическая энергия переменного тока от одной неподвижной катушки из проводника передается другой неподвижной же катушке из проводника, не связанной с первой электрически.



Звеном, передающим энергию от одной катушки другой, является магнитный поток, сцепляющийся с обеими катушками и непрерывно меняющийся по величине и по направлению.

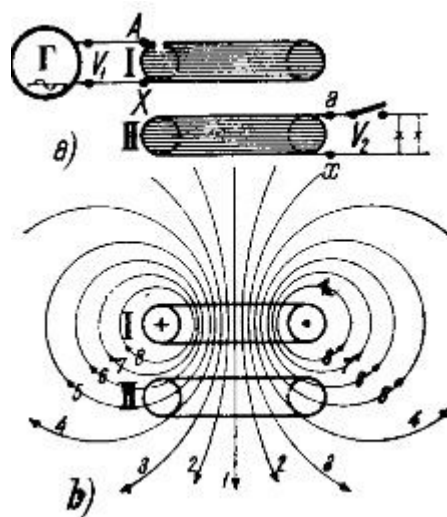


Рис. 1.

На рис. 1а изображен простейший трансформатор, состоящий из двух катушек / и //, расположенных коаксиально одна над другой. К катушке / подводится переменный ток от генератора переменного тока Г. Эта катушка называется первичной катушкой или первичной обмоткой. С катушкой //, называемой вторичной катушкой или вторичной обмоткой, соединяется цепь приемниками электрической энергии.



Принцип действия трансформатора

Действие трансформатора заключается в следующем. При прохождении тока в первичной катушке / ею создается магнитное поле, силовые линии которого пронизывают не только создавшую их катушку, но частично и вторичную катушку //. Примерная картина распределения силовых линий, создаваемых первичной катушкой, изображена на рис. 1б.

Как видно из рисунка, все силовые линии замыкаются вокруг проводников катушки /, но часть их на рис. 1б силовые линии 1, 2, 3, 4 замыкаются также вокруг

проводников катушки //. Таким образом катушка // является магнитно связанной с катушкой / при посредстве магнитных силовых линий.

Степень магнитной связи катушек / и //, при коаксиальном расположении их, зависит от расстояния между ними: чем дальше катушки друг от друга, тем меньше магнитная связь между ними, ибо тем меньше силовых линий катушки / сцепляется с катушкой //.

Так как через катушку / проходит, как мы предполагаем, переменный ток, т. е. ток, меняющийся во времени по какому-то закону, например по закону синуса, то и магнитное поле, им создаваемое, также будет меняться во времени по тому же закону.

Например, когда ток в катушке / проходит через наибольшее значение, то и магнитный поток, им создаваемый, также проходит через наибольшее значение; когда ток в катушке / проходит через нуль, меняя свое направление, то и магнитный поток проходит через нуль, также меняя свое направление.

В результате изменения тока в катушке / обе катушки / и // пронизываются магнитным потоком, непрерывно меняющим свою величину и свое направление. Согласно основному закону электромагнитной индукции при всяком изменении пронизывающего катушку магнитного потока в катушке индуцируется переменная электродвижущая сила. В нашем случае в катушке / индуцируется электродвижущая сила самоиндукции, а в катушке // индуцируется электродвижущая сила взаимоиндукции.

Если концы катушки // соединить с цепью приемников электрической энергии (см. рис. 1а), то в этой цепи появится ток; следовательно приемники получат электрическую энергию. В то же время к катушке / от генератора направится энергия, почти равная энергии, отдаваемой в цепь катушкой //. Таким образом электрическая энергия от одной катушки будет передаваться в цепь второй катушки, совершенно не связанной с первой катушкой гальванически (металлически). Средством передачи энергии в этом случае является только переменный магнитный поток.

Изображенный на рис. 1а трансформатор весьма несовершенен, ибо между первичной катушкой / и вторичной катушкой // магнитная связь невелика.

Магнитная связь двух обмоток, вообще говоря, оценивается отношением магнитного потока, сцепляющегося с обеими обмотками, к потоку, создаваемому одной катушкой.

Из рис. 1б видно, что только часть силовых линий катушки / замыкается вокруг катушки //. Другая часть силовых линий (на рис. 1б — линии 6, 7, 8) замыкается только вокруг катушки /. Эти силовые линии в передаче электрической энергии от первой катушки ко второй совершенно не участвуют, они образуют так называемое поле рассеяния.

Для того чтобы увеличить магнитную связь между первичной и вторичной обмотками и одновременно уменьшить магнитное сопротивление для прохождения магнитного потока, обмотки технических трансформаторов располагают на совершенно замкнутых железных сердечниках.

Первым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 2 **однофазный трансформатор так называемого стержневого типа**. У него первичные и вторичные катушки c_1 и c_2 расположены на железных стержнях a — a , соединенных с торцов железными же накладками b — b , называемыми ярами. Таким образом два стержня a , a и два яра b , b образуют замкнутое железное кольцо, в котором и проходит магнитный поток, сцепляющийся с первичной и вторичной обмотками. Это железное кольцо называется сердечником трансформатора.

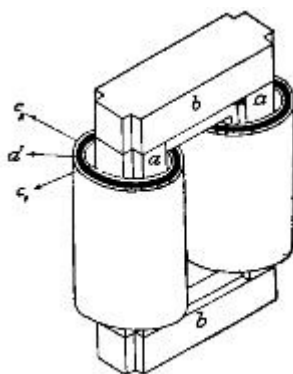


Рис. 2.

Вторым примером выполнения трансформаторов может служить схематически изображенный на рис. 3 **однофазный трансформатор так называемого броневоего типа**. У этого трансформатора первичные и вторичные обмотки c , состоящие каждая из ряда плоских катушек, расположены на сердечнике образуемом двумя стержнями двух железных колец a и $б$. Кольца a и $б$, окружая обмотки, покрывают их почти целиком как бы броней, поэтому описываемый трансформатор и называется броневым. Магнитный поток, проходящий внутри обмоток c , разбивается на две равные части, замыкающиеся каждое в своем железном кольце.

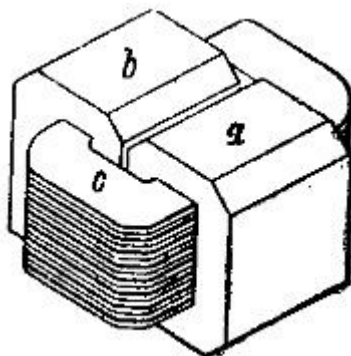


Рис. 3

Применением железных замкнутых магнитных цепей у трансформаторов добиваются значительного снижения потока рассеяния. У таких трансформаторов потоки, сцепляющиеся с первичной и вторичной обмотками, почти равны друг другу. Предполагая, что первичная и вторичная обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, мы можем на основании общего закона индукции для мгновенных значений электродвижущих сил обмоток написать выражения:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт};$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

В этих выражениях w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток, а $d\Phi_t$ — величина изменения пронизывающей катушки магнитного потока за элемент времени dt , следовательно есть скорость изменения магнитного потока. Из последних выражений можно получить следующее отношение:

$$e_1 / e_2 = w_1 / w_2$$

т. е. индуктируемые в первичной, и вторичной катушках / и // мгновенные электродвижущие силы относятся друг к другу так же, как числа витков катушек. Последнее заключение справедливо не только по отношению к мгновенным значениям электродвижущих сил, но и к их наибольшим и действующим значениям.

Электродвижущая сила, индуктируемая в первичной, катушке, будучи электродвижущей силой самоиндукции, почти целиком уравнивает приложенное к той же катушке напряжение. Если через E_1 и U_1 обозначить действующие значения электродвижущей силы первичной катушки и приложенного к ней напряжения, то можно написать:

$$E_1 = U_1$$

Электродвижущая сила, индуктируемая во вторичной катушке, равна в рассматриваемом случае напряжению на концах этой катушки.

Если, аналогично предыдущему, через E_2 и U_2 обозначить действующие значения электродвижущей силы вторичной катушки и напряжения на ее концах, то можно написать:

$$E_2 = U_2$$

Следовательно, приложив к одной катушке трансформатора некоторое напряжение, можно на концах другой катушки получить любое напряжение, стоит только взять подходящее отношение между числами витков этих катушек. В этом и заключается основное свойство трансформатора.

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки называется **коэффициентом трансформации трансформатора**. Коэффициент трансформации мы будем обозначать k_t .

Следовательно можно написать:

$$E_1/E_2 = U_1/U_2 = w_1/w_2 = k_t$$

Трансформатор, у которого коэффициент трансформации меньше единицы, называется повышающим трансформатором, ибо у него напряжение вторичной обмотки, или так называемое вторичное напряжение, больше напряжения первичной обмотки, или так называемого первичного напряжения. **Трансформатор, у которого коэффициент трансформации больше единицы, называется понижающим трансформатором**, ибо у него вторичное напряжение меньше первичного.



Работа однофазного трансформатора под нагрузкой

При холостой работе трансформатора магнитный поток создается током первичной обмотки или, вернее, магнитодвижущей силой первичной обмотки. Так как магнитная цепь трансформатора выполняется из железа и потому имеет небольшое магнитное сопротивление, а число витков первичной обмотки берется обычно большим, то ток холостой работы трансформатора невелик, он составляет 5—10% нормального.

Если замкнуть вторичную обмотку на какое-либо сопротивление, то с появлением тока во вторичной обмотке появится и магнитодвижущая сила этой обмотки.

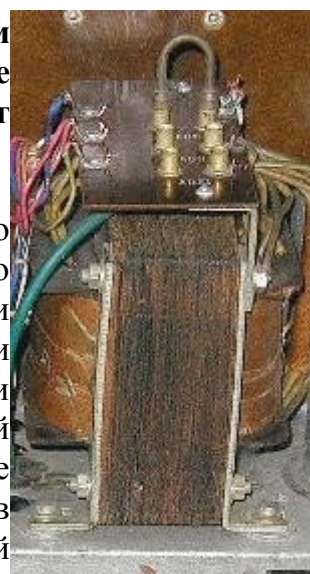
Согласно закону Ленца магнитодвижущая сила вторичной обмотки действует против магнитодвижущей силы первичной обмотки

Казалось бы, что магнитный поток в этом случае должен уменьшаться, но если к первичной обмотке подведено постоянное по величине напряжение, то уменьшения магнитного потока почти не произойдет.

В самом деле, электродвижущая сила, индуктируемая в первичной обмотке, при нагрузке трансформатора почти равна приложенному напряжению. Эта электродвижущая сила пропорциональна магнитному потоку. Следовательно, если первичное напряжение постоянно по величине, то и электродвижущая сила при нагрузке должна остаться почти той же, какой она была при холостой работе трансформатора. Это обстоятельство имеет следствием почти полное постоянство магнитного потока при любой нагрузке.

Итак, при постоянном по величине первичном напряжении магнитный поток трансформатора почти не меняется с изменением нагрузки и может быть принят равным магнитному потоку при холостой работе.

Магнитный поток трансформатора может сохранить свою величину при нагрузке лишь потому, что с появлением тока во вторичной обмотке увеличивается и ток в первичной обмотке и при том настолько, что разность магнитодвижущих сил или ампервитков первичной и вторичной обмоток остается почти равной магнитодвижущей силе или ампервиткам при холостой работе. Таким образом появление во вторичной обмотке размагничивающей магнитодвижущей силы или ампервитков сопровождается автоматическим увеличением магнитодвижущей силы первичной обмотки.



Так как для создания магнитного потока трансформатора требуется, как было указано выше, небольшая магнитодвижущая сила, то можно сказать, что увеличение вторичной магнитодвижущей силы сопровождается почти таким же по величине увеличением первичной магнитодвижущей силы.

Следовательно, можно написать: $I_2 w_2 = I_1 w_1$

Из этого равенства получается вторая основная характеристика трансформатора, а именно, отношение: $I_1/I_2 = w_2/w_1 = 1/k_t$, где k_t — коэффициент трансформации.

Таким образом, отношение токов первичной и вторичной обмоток трансформатора равно единице, деленной на его коэффициент трансформации.

Итак, основные характеристики трансформатора заключаются в отношениях $E_1/E_2 = w_1/w_2 = k_t$ и $I_1/I_2 = w_2/w_1 = 1/k_t$

Если перемножить левые части отношений между собой и правые части между собой, то получим $I_1 E_1 / I_2 E_2 = 1$ и $I_1 E_1 = I_2 E_2$

Последнее равенство дает третью характеристику трансформатора, которую можно выразить словами так: **отдаваемая вторичной обмоткой трансформатора мощность в вольт-амперах, почти равна мощности, подводимой к первичной обмотке также в вольт-амперах.**

Если пренебречь потерями энергии в меди обмоток и в железе сердечника трансформатора, то можно сказать, что вся мощность, подводимая к первичной обмотке трансформатора от источника энергии, передается вторичной обмотке его, причем передатчиком служит магнитный поток.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Рассмотрим цепь, содержащую в себе **катушку индуктивности**, и предположим, что активное сопротивление цепи, включая провод катушки, настолько мало, что им можно пренебречь. В этом случае подключение катушки к источнику постоянного тока вызвало бы его короткое замыкание, при котором, как известно, сила тока в цепи оказалась бы очень большой.

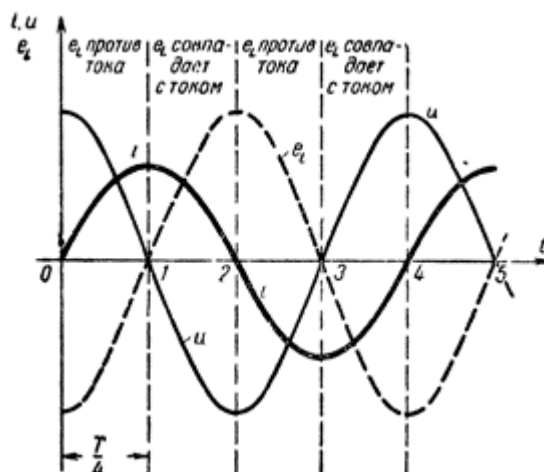


Иначе обстоит дело, когда катушка присоединена к источнику переменного тока. Короткого замыкания в этом случае не происходит. Это говорит о том, что **катушка индуктивности оказывает сопротивление проходящему по ней переменному току.**

Каков характер этого сопротивления и чем оно обуславливается?

Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним явление самоиндукции. Всякое изменение тока в катушке вызывает появление в ней ЭДС самоиндукции, препятствующей изменению тока. Величина ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна величине индуктивности катушки и скорости изменения тока в ней. Но так как переменный ток непрерывно изменяется, то **непрерывно возникающая в катушке ЭДС самоиндукции создает сопротивление переменному току.**

Для уяснения процессов, происходящих в цепи переменного тока с катушкой индуктивности, обратимся к графику. На рисунке 1 построены кривые линии, характеризующие соответственно ток в цепи, напряжение на катушке и возникающую в ней ЭДС самоиндукции. Убедимся в правильности произведенных на рисунке построений.



Цепь переменного тока с катушкой индуктивности

С момента $t = 0$, т. е. с начального момента наблюдения за током, он начал быстро возрастать, но по мере приближения к своему максимальному значению скорость нарастания тока уменьшалась. В момент, когда ток достиг максимальной величины, скорость его изменения на мгновение стала равной нулю, т. е. прекратилось изменение тока. Затем ток начал сначала медленно, а потом быстро убывать и по истечении второй четверти периода уменьшился до нуля. Скорость же изменения тока за эту четверть периода, возрастая от нуля, достигла наибольшей величины тогда, когда ток станет равным нулю.

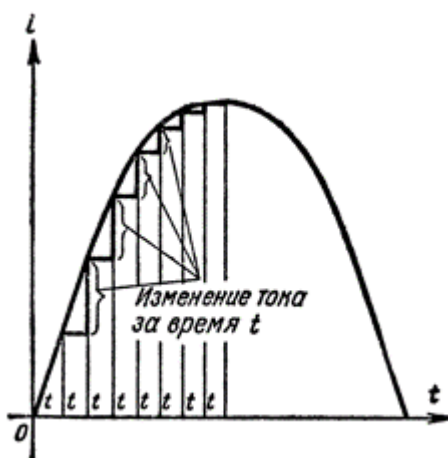


Рисунок 2. Характер изменений тока во времени в зависимости от величины тока

Из построений на рисунке 2 видно, что при переходе кривой тока через ось времени увеличение тока за небольшой отрезок времени t больше, чем за этот же отрезок времени, когда кривая тока достигает своей вершины.

Следовательно, **скорость изменения тока уменьшается по мере увеличения тока и увеличивается по мере его уменьшения, независимо от направления тока в цепи.**

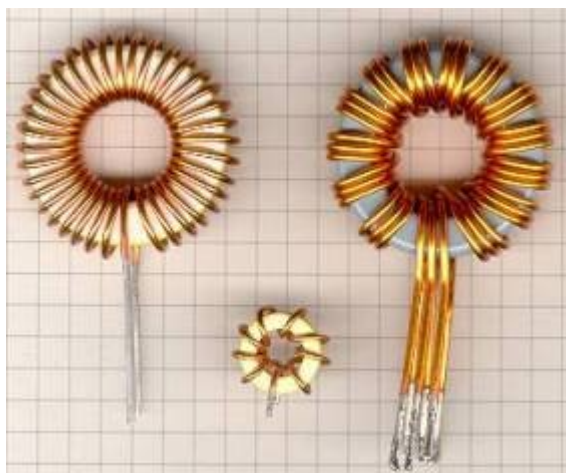
Очевидно, и ЭДС самоиндукции в катушке должна быть наибольшей тогда, когда скорость изменения тока наибольшая, и уменьшаться до нуля, когда прекращается его изменение. Действительно, на графике кривая ЭДС самоиндукции e_L за первую четверть периода, начиная от максимального значения, упала до нуля (см. рис. 1).

На протяжении следующей четверти периода ток от максимального значения уменьшался до нуля, однако скорость его изменения постепенно возрастала и была наибольшей в момент, когда ток стал равным нулю. Соответственно и ЭДС самоиндукции за время этой четверти периода, появившись вновь в катушке, постепенно возрастала и оказалась максимальной к моменту, когда ток стал равным нулю.

Однако направление свое ЭДС самоиндукции изменила на обратное, так как возрастание тока в первой четверти периода сменилось во второй четверти его убыванием.

Продолжив дальше построение кривой ЭДС самоиндукции, мы убеждаемся в том, что за период изменения тока в катушке и ЭДС самоиндукции совершит в ней полный период своего изменения. Направление ее определяется законом Ленца: при возрастании тока ЭДС самоиндукции будет направлена против тока (первая и третья четверти периода), а при убывании тока, наоборот, совпадать с ним по направлению (вторая и четвертая четверти периода).

Таким образом, **ЭДС самоиндукции, вызываемая самим переменным током, препятствует его возрастанию и, наоборот, поддерживает его при убывании.**



Обратимся теперь к графику напряжения на катушке (см. рис. 1). На этом графике синусоида напряжения на зажимах катушки изображена равной и противоположной синусоиде ЭДС самоиндукции. Следовательно, напряжение на зажимах катушки в любой момент времени равно и противоположно ЭДС самоиндукции, возникающей в ней. Напряжение это создается генератором переменного тока и идет на то, чтобы погасить действие в цепи ЭДС самоиндукции.

Таким образом, **в катушке индуктивности, включенной в цепь переменного тока, создается сопротивление прохождению тока.** Но так как такое сопротивление вызывается в конечном счете **индуктивностью катушки**, то и называется оно **индуктивным сопротивлением**.

Индуктивное сопротивление обозначается через X_L и измеряется, как и активное сопротивление, в омах.

Индуктивное сопротивление цепи тем больше, чем больше частота источника тока, питающего цепь, и чем больше индуктивность цепи. Следовательно, индуктивное сопротивление цепи прямо пропорционально частоте тока и индуктивности цепи; определяется оно по формуле $X_L = \omega L$, где ω — круговая частота, определяемая произведением $2\pi f$. — индуктивность цепи в гн.

[Закон Ома](#) для цепи переменного тока, содержащей индуктивное сопротивление, звучит так: **величина тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению цепи**, т. е. $I = U / X_L$, где I и U — действующие значения тока и напряжения, а X_L — индуктивное сопротивление цепи.

Рассматривая графики изменения тока в катушке. ЭДС самоиндукции и напряжения на ее зажимах, мы обратили внимание на то, что изменение этих величин не совпадает по времени. Иначе говоря, синусоиды тока, напряжения и ЭДС самоиндукции оказались для рассматриваемой нами цепи сдвинутыми по времени одна относительно другой. В технике переменных токов такое явление принято называть **сдвигом фаз**.

Если же две переменные величины изменяются по одному и тому же закону (в нашем случае по синусоидальному) с одинаковыми периодами, одновременно достигают своего максимального значения как в прямом, так и в обратном направлении, а также одновременно уменьшаются до нуля, то такие переменные величины имеют одинаковые фазы или, как говорят, совпадают по фазе.

В качестве примера на рисунке 3 приведены совпадающие по фазе кривые изменения тока и напряжения. Такое совпадение фаз мы всегда наблюдаем в цепи переменного тока, состоящей только из активного сопротивления.

В том случае, когда цепь содержит индуктивное сопротивление, фазы тока и напряжения, как это видно из рис. 1 не совпадают, т. е. имеется сдвиг фаз между этими переменными величинами. Кривая тока в этом случае как бы отстает от кривой напряжения на четверть периода.

Следовательно, **при включении катушки индуктивности в цепь переменного тока в цепи появляется сдвиг фаз между током и напряжением, причем ток отстает по фазе от напряжения на четверть периода.** Это значит, что максимум тока наступает через четверть периода после того, как наступил максимум напряжения.

ЭДС же самоиндукции находится в противофазе с напряжением на катушке, отставая, в свою очередь, от тока на четверть периода. При этом период изменения тока, напряжения, а также и ЭДС самоиндукции не меняется и остается равным периоду изменения напряжения генератора, питающего цепь. Сохраняется также и синусоидальный характер изменения этих величин.

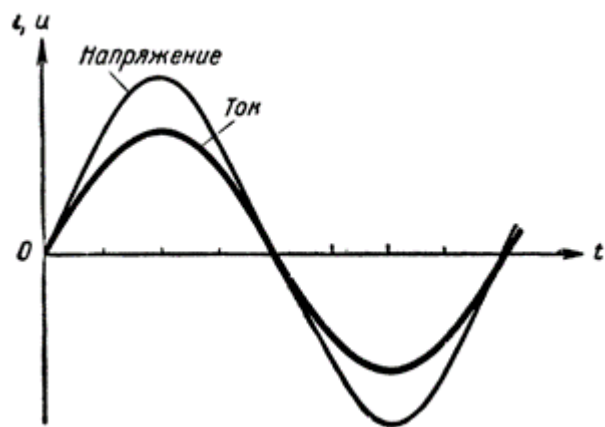


Рисунок 3. Совпадение по фазе тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением

Выясним теперь, каково отличие нагрузки генератора переменного тока активным сопротивлением от нагрузки его индуктивным сопротивлением.

Когда цепь переменного тока содержит в себе лишь одно активное сопротивление, то энергия источника тока поглощается в активном сопротивлении, нагревая проводник.

Когда же цепь не содержит активного сопротивления (мы условно считаем его равным нулю), а состоит лишь из индуктивного сопротивления катушки, энергия источника тока расходуется не на нагрев проводов, а только на создание ЭДС самоиндукции, т. е. она превращается в энергию магнитного поля. Однако переменный ток непрерывно изменяется как по величине, так и по направлению, а следовательно, и магнитное поле катушки непрерывно изменяется в такт с изменением тока. В первую четверть периода, когда ток возрастает, цепь получает энергию от источника тока и запасает ее в магнитном поле катушки. Но как только ток, достигнув своего максимума, начинает убывать, он поддерживается за счет энергии, запасенной в магнитном поле катушки посредством ЭДС самоиндукции.

Таким образом, источник тока, отдав в течение первой четверти периода часть своей энергии в цепь, в течение второй четверти получает ее обратно от катушки, выполняющей при этом роль своеобразного источника тока. Иначе говоря, цепь переменного тока, содержащая только индуктивное сопротивление, не потребляет энергии: в данном случае происходит колебание энергии между источником и цепью. Активное же сопротивление, наоборот, поглощает в себе всю энергию, сообщенную ему источником тока.

Говорят, что катушка индуктивности, в противоположность омическому сопротивлению, не активна по отношению к источнику переменного тока, т. е. **реактивна**. Поэтому индуктивное сопротивление катушки называют также **реактивным сопротивлением**.



Активное сопротивление и катушка индуктивности в цепи переменного тока

Рассматривая цепь переменного тока, содержащую только индуктивное сопротивление, мы предполагали равным нулю активное сопротивление этой цепи.

Однако в действительности как провод самой катушки, так и соединительные провода обладают хотя и небольшим, но активным сопротивлением, поэтому цепь неизбежно потребляет энергию источника тока.

Поэтому при определении общего сопротивления внешней цепи нужно складывать ее реактивное и активное сопротивления. Но складывать эти два различных по своему характеру сопротивления нельзя.

В этом случае полное сопротивление цепи переменному току находят путем геометрического сложения.

Строят прямоугольный треугольник (см. рисунок 1) одной стороной которого служит величина индуктивного сопротивления, а другой - величина активного сопротивления. Искомое полное сопротивление цепи определится третьей стороной треугольника.

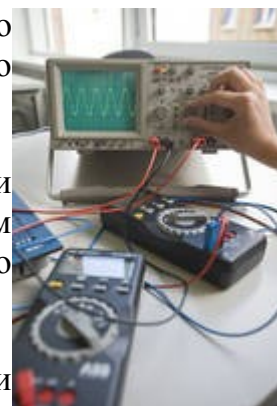




Рисунок 1. Определение полного сопротивления цепи, содержащей индуктивное и активное сопротивление

Полное сопротивление цепи обозначается латинской буквой Z и измеряется в омах. Из построения видно, что полное сопротивление всегда больше индуктивного и активного сопротивлений, отдельно взятых.

Алгебраическое выражение полного сопротивления цепи имеет вид:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

где Z — общее сопротивление, R — активное сопротивление, X_L — индуктивное сопротивление цепи.

Таким образом, **полное сопротивление цепи переменному току, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений, равно корню квадратному из суммы квадратов активного и индуктивного сопротивлений этой цепи.**

Закон Ома для такой цепи выразится формулой $I = U / Z$, где Z — общее сопротивление цепи.

Разберем теперь, какое будет напряжение, если цепь, кроме и и сдвиг фаз между током и на индуктивности, обладает также сравнительно большим активным сопротивлением. На практике такой цепью может служить, например, цепь, содержащая катушку индуктивности без железного сердечника, намотанную из тонкой проволоки (дрессель высокой частоты).

В этом случае сдвиг фаз между током и напряжением составит уже не четверть периода (как это было в цепи только с индуктивным сопротивлением), а значительно меньше; причем чем больше будет активное сопротивление, тем меньший получится сдвиг фаз.

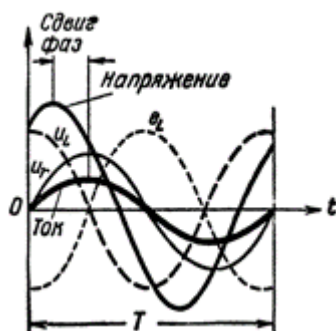


Рисунок 2. Ток и напряжение в цепи, содержащей R и L

Теперь и сама ЭДС самоиндукции не находится в противофазе с напряжением источника тока, так как сдвинута относительно напряжения уже не на половину периода, а меньше. Кроме того, напряжение, создаваемое источником тока на зажимах катушки, не равно ЭДС самоиндукции, а больше нее на величину падения напряжения в активном сопротивлении провода катушки. Иначе говоря, напряжение на катушке состоит как бы из двух слагающих:

- u_L — реактивной слагающей напряжения, уравнивающей действие ЭДС самоиндукции,
- u_R — активной слагающей напряжения, идущей на преодоление активного сопротивления цепи.

Если бы мы включили в цепь последовательно с катушкой большое активное сопротивление, то сдвиг фаз настолько бы уменьшился, что синусоида тока почти догнала бы синусоиду напряжения и разность фаз между ними была бы едва заметна. В этом случае амплитуда слагающей u_L была бы больше амплитуды слагающей u_R .

Точно так же можно уменьшить сдвиг фаз и даже совсем свести его к нулю, если уменьшить каким-либо способом частоту генератора. Уменьшение частоты приведет к уменьшению ЭДС самоиндукции, а следовательно, и к уменьшению вызываемого ею сдвига фаз между током и напряжением в цепи.



Мощность цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности

Цепь переменного тока, содержащая катушку, не потребляет энергии источника тока и что в цепи происходит процесс обмена энергией между генератором и цепью.

Разберем теперь, как будет обстоит дело с мощностью, потребляемой такой цепью.

Мощность, потребляемая в цепи переменного тока, равна произведению тока на напряжение, но так как ток и напряжение есть переменные величины, то и мощность будет также переменной. При этом значение мощности для каждого момента времени мы сможем определить, если умножим величину тока на величину напряжения, соответствующую данному моменту времени.

Чтобы получить график мощности, мы должны перемножить величины отрезков прямых линий, определяющие ток и напряжение в различные моменты времени. Такое построение и приведено на рис. 3, а. Пунктирная волнообразная кривая p показывает нам, как изменяется мощность в цепи переменного тока, содержащей только индуктивное сопротивление.

При построении этой кривой использовалось следующее **правило алгебраического умножения**: при умножении положительной величины на отрицательную получается отрицательная величина, а при перемножении двух отрицательных или двух положительных — положительная величина.

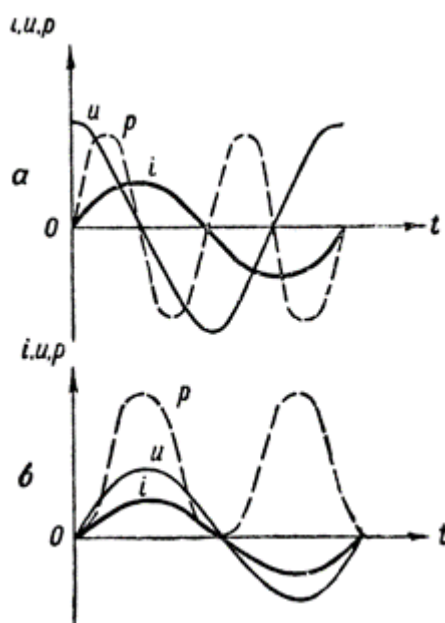


Рисунок 3. Графики мощности: а - в цепи содержащей индуктивное сопротивление, б - тоже, активное сопротивление

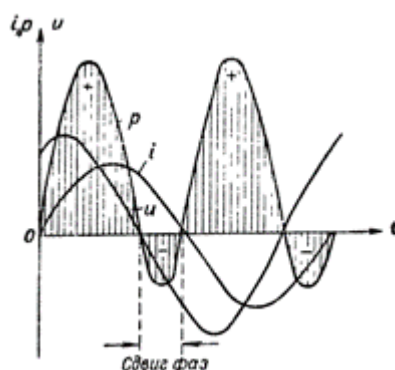


Рисунок 4. График мощности для цепи, содержащей R и L

Кривая мощности в этом случае расположена выше оси времени. Это значит, что обмена энергией между генератором и цепью не происходит, а следовательно, мощность, отдаваемая генератором в цепь, полностью потребляется цепью.

На рис. 4 изображен график мощности для цепи, содержащей в себе одновременно индуктивное и активное сопротивления. В этом случае также происходит обратный переход энергии из цепи к источнику тока, однако в значительно меньшей степени, чем в цепи с одним индуктивным сопротивлением.

Рассмотрев приведенные выше графики мощности, мы приходим к выводу, что только сдвиг фаз между током и напряжением в цепи создает "отрицательную" мощность. При этом, чем больше будет сдвиг фаз между током и напряжением в цепи тем потребляемая цепью мощность будет меньше, и, наоборот, чем меньше сдвиг фаз, тем потребляемая цепью мощность будет больше.

Конденсатор в цепи переменного тока

Соберем цепь с [конденсатором](#), в которой генератор переменного тока создает синусоидальное напряжение. Разберем последовательно, что произойдет в цепи, когда мы замкнем ключ. Начальным будем считать тот момент, когда напряжение генератора равно нулю.



В первую четверть периода напряжение на зажимах генератора будет возрастать, начиная от нуля, и конденсатор начнет заряжаться. В цепи появится ток, однако в первый момент заряда конденсатора, несмотря на то, что напряжение на его пластинах только что появилось и еще очень мало, ток в цепи (ток заряда) будет наибольшим. По мере же увеличения заряда конденсатора ток в цепи убывает и доходит до нуля в момент, когда конденсатор полностью зарядится. При этом напряжение на пластинах конденсатора, строго следуя за напряжением генератора, становится к этому моменту максимальным, но обратного знака, т. е. направлено навстречу напряжению генератора.

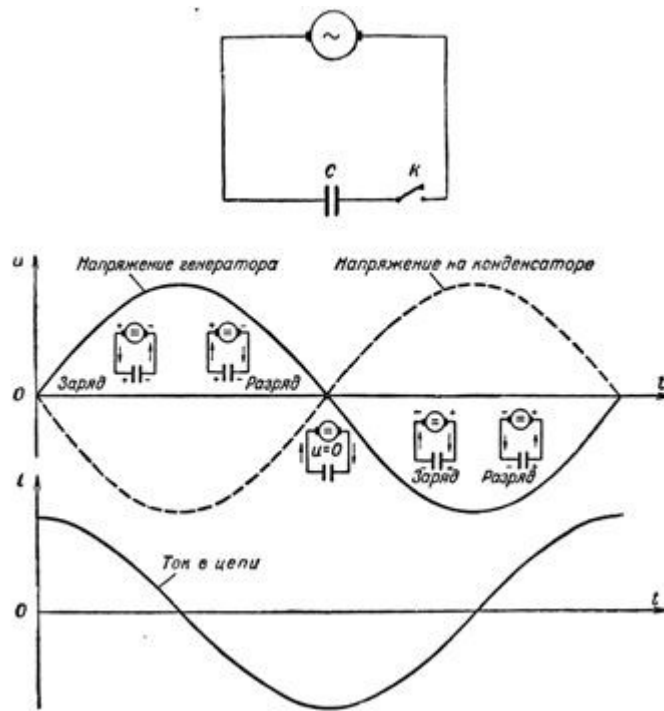


Рис. 1. Изменение тока и напряжения в цепи с емкостью

Таким образом, ток с наибольшей силой устремляется в свободный от заряда конденсатор, но тут же начинает убывать по мере заполнения зарядами пластин конденсатора и падает до нуля, полностью зарядив его.

Сравним это явление с тем, что происходит с потоком воды в трубе, соединяющей два сообщающихся сосуда (рис. 2), один из которых наполнен, а другой пустой. Стоит только выдвинуть заслонку, преграждающую путь воде, как вода сразу же из левого сосуда под большим напором устремится по трубе в пустой правый сосуд. Однако тотчас же напор воды в трубе начнет постепенно ослабевать, вследствие выравнивания уровней в сосудах, и упадет до нуля. Течение воды прекратится.

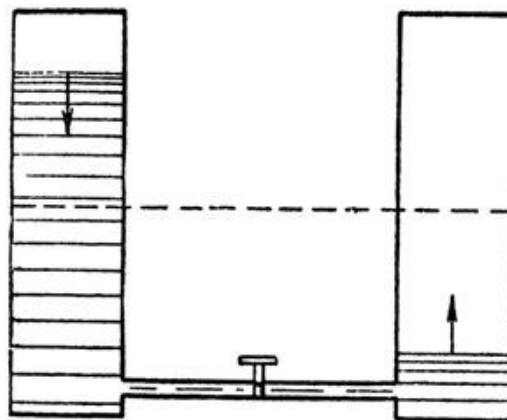


Рис. 2. Изменение напора воды в трубе, соединяющей сообщающиеся сосуды, сходно с изменением тока в цепи во время заряда конденсатора

Подобно этому и ток сначала устремляется в незаряженный конденсатор, а затем постепенно ослабевает по мере его заряда.

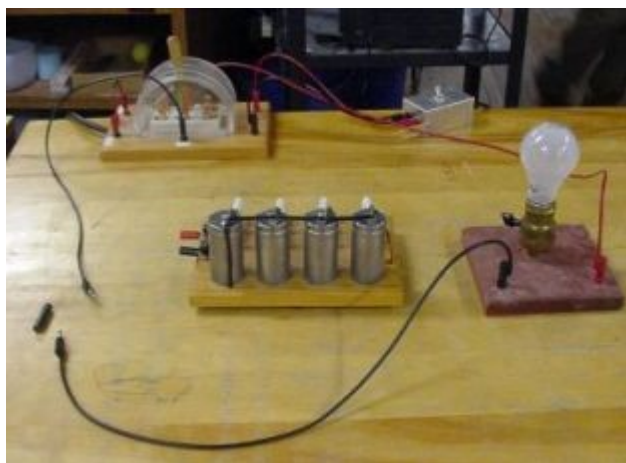
С началом второй четверти периода, когда напряжение генератора начнет сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее убывать, заряженный конденсатор будет разряжаться на генератор, что вызовет в цепи ток разряда. По мере убывания напряжения генератора конденсатор все больше и больше разряжается и ток разряда в цепи возрастает. Направление тока разряда в этой четверти периода противоположно направлению тока заряда в первой четверти периода. Соответственно этому кривая тока, пройдя нулевое значение, располагается уже теперь ниже оси времени.

К концу первого полупериода напряжение на генераторе, а также и на конденсаторе быстро приближается к нулю, а ток в цепи медленно достигает своего максимального значения. Вспомнив, что величина тока в цепи тем больше, чем больше величина переносимого по цепи заряда, станет ясным, почему ток достигает максимума тогда, когда напряжение на пластинах конденсатора, а следовательно, и заряд конденсатора быстро убывают.

С началом третьей четверти периода конденсатор вновь начинает заряжаться, но полярность его пластин, так же как и полярность генератора, изменяется «а обратную», а ток, продолжая течь в том же направлении, начинает по мере заряда конденсатора убывать. В конце третьей четверти периода, когда напряжения на генераторе и конденсаторе достигают своего максимума, ток становится равным нулю.

В последнюю четверть периода напряжение, уменьшаясь, падает до нуля, а ток, изменив свое направление в цепи, достигает максимальной величины. На этом и заканчивается период, за которым начинается следующий, в точности повторяющий предыдущий, и т. д.

Итак, **под действием переменного напряжения генератора дважды за период происходят заряд конденсатора (первая и третья четверти периода) и дважды его разряд (вторая и четвертая четверти периода).** Но так как чередующиеся один за другим заряды и разряды конденсатора сопровождаются каждый раз прохождением по цепи зарядного и разрядного токов, то мы можем заключить, что по цепи с емкостью проходит переменный ток.



Убедиться в этом можно на следующем простом опыте. Подключите к сети переменного тока через лампочку электрического освещения мощностью 25 Вт конденсатор емкостью 4—6 мкф. Лампочка загорится и не погаснет до тех пор, пока не будет разорвана цепь. Это говорит о том, что по цепи с емкостью проходил переменный ток. Однако проходил он, конечно, не сквозь диэлектрик конденсатора, а в каждый момент времени представлял собой или ток заряда или ток разряда конденсатора.

Диэлектрик же, как нам известно, поляризуется под действием электрического поля, возникающего в нем при заряде конденсатора, и поляризация его исчезает, когда конденсатор разряжается.

При этом диэлектрик с возникающим в нем током смещения служит для переменного тока своего рода продолжением цепи, а для постоянного разрывает цепь. Но ток смещения образуется только в пределах диэлектрика конденсатора, и поэтому сквозного переноса зарядов по цепи не происходит.

Сопротивление, оказываемое конденсатором переменному току, зависит от величины емкости конденсатора и от частоты тока.

Чем больше емкость конденсатора, тем больший заряд переносится по цепи за время заряда и разряда конденсатора, а следовательно, и тем больший будет ток в цепи. Увеличение же тока в цепи свидетельствует о том, что уменьшилось ее сопротивление.

Следовательно, с увеличением емкости уменьшается сопротивление цепи переменному току.

Увеличение частоты тока увеличивает величину переносимого по цепи заряда, так как заряд (а равно и разряд) конденсатора должен произойти быстрее, чем при низкой частоте. В то же время увеличение величины переносимого в единицу времени заряда равносильно увеличению тока в цепи, а следовательно, уменьшению ее сопротивления.

Если же мы каким-либо способом будем постепенно уменьшать частоту переменного тока и сведем ток к постоянному, то сопротивление конденсатора, включенного в цепь, будет постепенно возрастать и станет бесконечно большим (разрыв цепи) к моменту появления в цепи постоянного тока.

Следовательно, с увеличением частоты уменьшается сопротивление конденсатора переменному току.

Подобно тому как сопротивление катушки переменному току называют индуктивным, сопротивление конденсатора принято называть емкостным.

Таким образом, **емкостное сопротивление тем больше, чем меньше емкость цепи и частота питающего ее тока.**

Емкостное сопротивление обозначается через X_c и измеряется в омах.

Зависимость емкостного сопротивления от частоты тока и емкости цепи определяется формулой $X_c = 1/\omega C$, где ω — круговая частота, равная произведению $2\pi f$, C — емкость цепи в фарадах.

Емкостное сопротивление, как и индуктивное, является реактивным по своему характеру, так как конденсатор не потребляет энергии источника тока.

Формула закона Ома для цепи с емкостью имеет вид $I = U/X_c$, где I и U — действующие значения тока и напряжения; X_c — емкостное сопротивление цепи.

Свойство конденсаторов оказывать большое сопротивление токам низкой частоты и легко пропускать токи высокой частоты широко используется в схемах аппаратуры связи.

С помощью конденсаторов, например, достигается необходимое для работы схем разделение постоянных токов и токов низкой частоты от токов высокой частоты.

Если нужно преградить путь току низкой частоты в высокочастотную часть схемы, последовательно включается конденсатор небольшой емкости. Он оказывает большое сопротивление низкочастотному току и в то же время легко пропускает ток высокой частоты.

Если же надо не допустить ток высокой частоты, например, в цепь питания радиостанции, то используется конденсатор большой емкости, включаемый параллельно источнику тока. Ток высокой частоты в этом случае проходит через конденсатор, минуя цепь питания радиостанции.

Активное сопротивление и конденсатор в цепи переменного тока

На практике часто встречаются случаи, когда в цепи последовательно с емкостью включено активное сопротивление. Общее сопротивление цепи в этом случае определяется по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$$

Следовательно, полное сопротивление цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений, переменному току равно корню квадратному из суммы квадратов активного и емкостного сопротивлений этой цепи.

Закон Ома остается справедливым и для этой цепи $I = U/Z$.

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие фазовые соотношения между током и напряжением в цепи, содержащей емкостное и активное сопротивления.

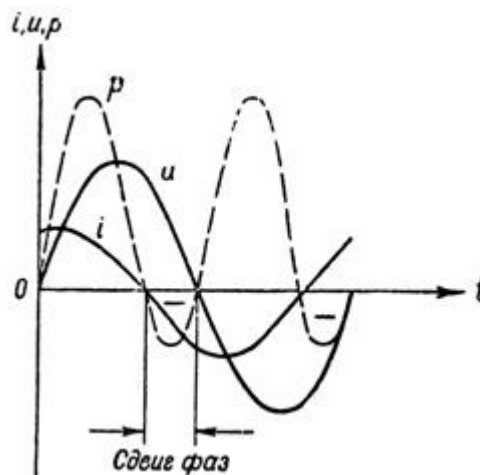
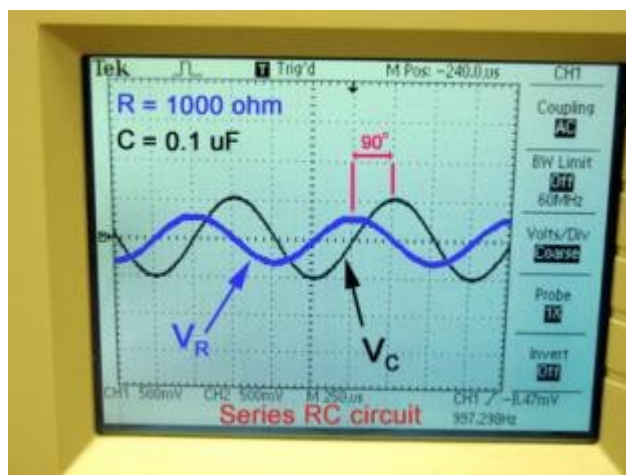


Рис. 3. Ток, напряжение и мощность в цепи с конденсатором и активным сопротивлением

Как видно из рисунка, ток в этом случае опережает напряжение уже не на четверть периода, а меньше, так как активное сопротивление нарушило чисто емкостный (реактивный) характер цепи, о чем свидетельствует уменьшенный сдвиг фаз. Теперь уже напряжение на зажимах цепи определится как сумма двух слагающих: реактивной слагающей напряжения u_c , идущей на преодоление емкостного сопротивления цепи, и активной слагающей напряжения преодолевающей активное ее сопротивление.

Чем больше будет активное сопротивление цепи, тем меньший сдвиг фаз получится между током и напряжением.

Кривая изменения мощности в цепи (см. рис. 3) дважды за период приобрела отрицательный знак, что является, как нам уже известно, следствием реактивного характера цепи. Чем менее реактивная цепь, тем меньше сдвиг фаз между током и напряжением и тем большую мощность источника тока эта цепь потребляет.



Резонанс напряжений

Если в цепь переменного тока включены последовательно катушка индуктивности и [конденсатор](#), то они по-своему воздействуют на генератор, питающий цепь, и на фазовые соотношения между током и напряжением.



Катушка индуктивности вносит сдвиг фаз, при котором ток отстает от напряжения на четверть периода, конденсатор же, наоборот, заставляет напряжение в цепи отставать по фазе от тока на четверть периода. Таким образом, действие индуктивного сопротивления на сдвиг фаз между током и напряжением в цепи противоположно действию емкостного сопротивления.

Это приводит к тому, что общий сдвиг фаз между током и напряжением в цепи зависит от соотношения величин индуктивного и емкостного сопротивлений.

Если величина емкостного сопротивления цепи больше индуктивного, то цепь носит емкостный характер, т. е. напряжение отстает по фазе от тока. Если же, наоборот, индуктивное сопротивление цепи больше емкостного, то напряжение опережает ток, и, следовательно, цепь носит индуктивный характер.

Общее реактивное сопротивление $X_{\text{общ}}$ рассматриваемой нами цепи определяется путем сложения индуктивного сопротивления катушки X_L и емкостного сопротивления конденсатора X_C .

Но так как действие этих сопротивлений в цепи противоположно, то одному из них, а именно X_C приписывается знак минус, и общее реактивное сопротивление определяется по формуле:

$$X_{\text{общ}} = X_L - X_C, X_L = \omega L, X_C = 1 / \omega C$$

Применив к этой цепи закон Ома, получим:

$$I = U / X_{\text{общ}}$$

Формулу эту можно преобразовать следующим образом:

$$U = I X_{\text{общ}} = I (X_L - X_C) = I X_L - I X_C$$

В полученном равенстве $I X_L$ — действующее значение слагающей общего напряжения цепи, идущей на преодоление индуктивного сопротивления цепи, а $I X_C$ — действующее значение слагающей общего напряжения цепи, идущей на преодоление емкостного сопротивления.

Таким образом, общее напряжение цепи, состоящей из последовательного соединения катушки и конденсатора, можно рассматривать как состоящее из двух слагаемых, величины которых зависят от величин индуктивного и емкостного сопротивлений цепи.

Мы считали, что такая цепь не обладает активным сопротивлением. Однако в тех случаях, когда активное сопротивление цепи не настолько уже мало, чтобы им можно было пренебречь, общее сопротивление цепи определяется следующей формулой:

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

где R — общее активное сопротивление цепи, $X_L - X_C$ — ее общее реактивное сопротивление. Переходя к формуле закона Ома, мы вправе написать: $U = I / Z$



Резонанс напряжений в цепи переменного тока

Индуктивное и емкостное сопротивления, соединенные последовательно, вызывают в цепи переменного тока меньший сдвиг фаз между током и напряжением, чем если бы они были включены в цепь по отдельности.

Иначе говоря, от одновременного действия этих двух различных по своему характеру реактивных сопротивлений в цепи происходит компенсация (взаимное уничтожение) сдвига фаз.

Полная компенсация, т. е. полное уничтожение сдвига фаз между током и напряжением в такой цепи, наступит тогда, когда индуктивное сопротивление окажется равным емкостному сопротивлению цепи, т. е. когда $X_L = X_C$ или, что то же, когда $\omega L = 1 / \omega C$.

Цепь в этом случае будет вести себя как чисто активное сопротивление, т. е. как будто в ней нет ни катушки, ни конденсатора. Величина этого сопротивления определится суммой активных сопротивлений катушки и соединительных проводов. При этом действующее значение тока в цепи будет наибольшим и определится формулой закона Ома $I = U / R$, где вместо Z теперь поставлено R .

Одновременно с этим действующие напряжения как на катушке $U_L = IX_L$ так и на конденсаторе $U_C = IX_C$ окажутся равными и будут максимально большой величины. При малом активном сопротивлении цепи эти напряжения могут во много раз превысить общее напряжение U на зажимах цепи. Это интересное явление называется в электротехнике **резонансом напряжений**.

На рис. 1 приведены кривые напряжений, тока и мощности при резонансе напряжений в цепи.

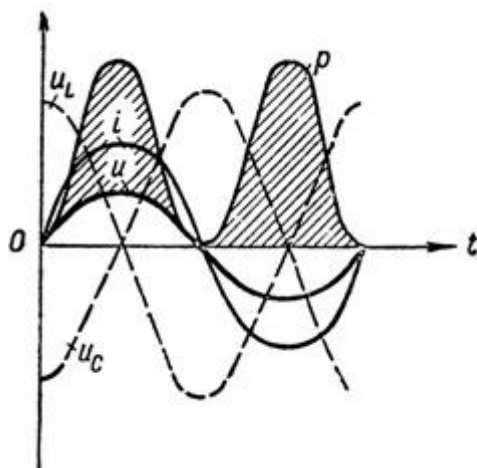


График тока напряжений и мощности при резонансе напряжений

Следует твердо помнить, что сопротивления X_L и X_C являются переменными, зависящими от частоты тока, и стоит хотя бы немного изменить частоту его, например, увеличить, как $X_L = \omega L$ возрастет, а $X_C = 1 / \omega C$ уменьшится, и тем самым в цепи сразу нарушится резонанс напряжений, при этом наряду с активным сопротивлением в цепи появится и реактивное. То же самое произойдет, если изменить величину индуктивности или емкости цепи.

При резонансе напряжений мощность источника тока будет затрачиваться только на преодоление активного сопротивления цепи, т. е. на нагрев проводников.

Действительно, в цепи с одной катушкой индуктивности происходит колебание энергии, т. е. периодический переход энергии из генератора в магнитное поле катушки. В цепи с конденсатором происходит то же самое, но за счет энергии электрического поля конденсатора. В цепи же с конденсатором и катушкой индуктивности при **резонансе напряжений** ($X_L = X_C$) энергия, раз запасенная цепью, периодически переходит из катушки в конденсатор и обратно и на долю источника тока выпадает только расход энергии, необходимый для преодоления активного сопротивления цепи. Таким образом, **обмен энергии происходит между конденсатором и катушкой почти без участия генератора.**

Стоит только нарушить **резонанс напряжений** в цепи, как энергия магнитного поля катушки станет не равной энергии электрического поля конденсатора, и в процессе обмена энергии между этими полями появится избыток энергии, который периодически будет то поступать из источника в цепь, то возвращаться ему обратно цепью.

Явление это очень сходно с тем, что происходит в часовом механизме. Маятник часов мог бы непрерывно колебаться и без помощи пружины (или груза в часах-ходиках), если бы не силы трения, тормозящие его движение.

Пружина же, сообщая маятнику в нужный момент часть своей энергии, помогает ему преодолеть силы трения, чем и достигается непрерывность колебаний.

Подобно этому и в электрической цепи, при явлении резонанса в ней, источник тока расходует свою энергию только на преодоление активного сопротивления цепи, тем самым поддерживая в ней колебательный процесс.

Итак, мы приходим к выводу, что **цепь переменного тока, состоящая из генератора и последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора, при определенных условиях $X_L = X_C$ превращается в колебательную систему.** Такая цепь получила название **колебательного контура.**

Из равенства $X_L = X_C$ можно определить значения частоты генератора, при которой наступает явление **резонанса напряжений:**

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Значение емкости и индуктивности цепи, при которых наступает резонанс напряжений:

$$L_{\text{рез}} = 1 / \omega^2 C, C_{\text{рез}} = 1 / \omega^2 L$$

Таким образом, изменяя любую из этих трех величин ($f_{\text{рез}}$, L и C), можно вызвать в цепи резонанс напряжений, т. е. превратить цепь в колебательный контур.

Пример полезного применения резонанса напряжений: входной контур приемника настраивается конденсатором переменной емкости (или вариометром) таким образом, что в нем возникает резонанс напряжений. Этим достигается необходимое для нормальной работы приемника большое повышение напряжения на катушке по сравнению с напряжением в цепи, созданным антенной.

Наряду с полезным использованием явления резонанса напряжений в электротехнике технике часто бывают случаи, когда резонанс напряжений вреден. Большое повышение напряжения на отдельных участках цепи (на катушке или на конденсаторе) по сравнению с напряжением генератора может привести к порче отдельных деталей и измерительных приборов.



Резонанс токов

Параллельное включение конденсатора и катушки индуктивности в цепь переменного тока

Рассмотрим явления в цепи переменного тока, содержащей генератор, конденсатор и катушку индуктивности, соединенные параллельно. Предположим при этом, что активным сопротивлением цепь не обладает.



Очевидно, в такой цепи напряжение как на катушке, так и на конденсаторе в любой момент времени равно напряжению, развиваемому генератором.

Общий же ток в цепи складывается из токов в ее разветвлениях. Ток в индуктивной ветви отстает по фазе от напряжения на четверть периода, а ток в емкостной ветви опережает его на те же четверть периода. Поэтому токи в ветвях в любой момент времени оказываются сдвинутыми по фазе один относительно другого на полупериода, т. е. находятся в противофазе. Таким образом токи в ветвях в любой момент времени направлены навстречу один другому, а общий ток в неразветвленной части цепи равен разности их.

Это дает нам право написать равенство $I = I_L - I_C$

где I - действующее значение общего тока в цепи, I_L и I_C - действующие значения токов в ветвях.

Пользуясь законом Ома для определения действующих значений тока в ветвях, получим:

$$I_L = U / X_L \text{ и } I_C = U / X_C$$

Если в цепи преобладает индуктивное сопротивление, т. е. X_L больше X_C , ток в катушке меньше тока в конденсаторе; следовательно, ток в неразветвленном участке цепи носит емкостной характер, и цепь в целом для генератора будет емкостной. И, наоборот, при X_C большем X_L , ток в конденсаторе меньше тока в катушке; следовательно, ток в неразветвленном участке цепи имеет индуктивный характер, и цепь в целом для генератора будет индуктивной.

При этом не следует забывать, что в том и другом случае нагрузка реактивная, т. е. цепь не потребляет энергии генератора.

Резонанс токов

Рассмотрим теперь случай, когда у параллельно соединенных конденсатора и катушки оказались равными их реактивные сопротивления, т. е. $X_L = X_C$.

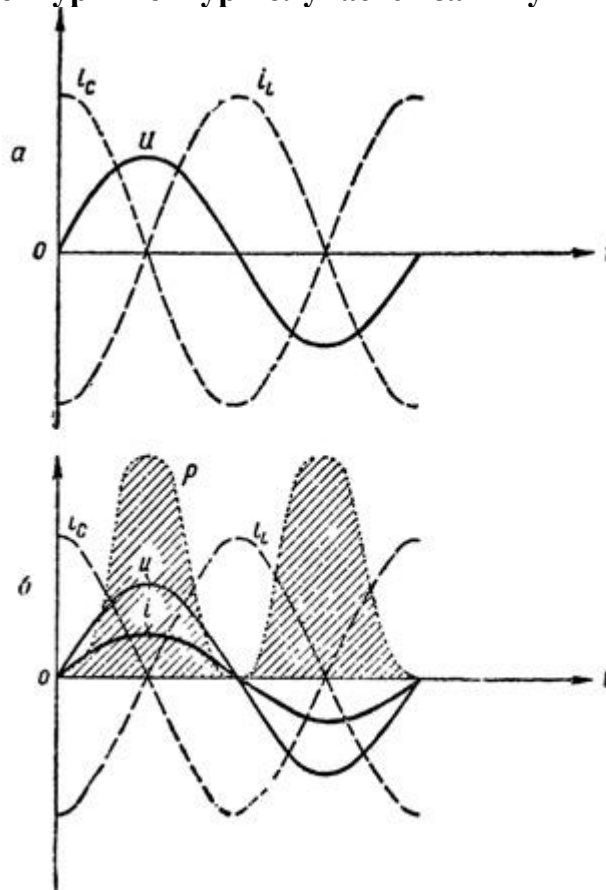
Если мы, как и прежде, будем считать, что катушка и конденсатор не обладают активным сопротивлением, то при равенстве их реактивных сопротивлений ($X_L = X_C$) общий ток в неразветвленной части цепи окажется равным нулю, тогда как в ветвях будут протекать равные токи наибольшей величины. В цепи в этом случае наступает явление резонанса токов.

При резонансе токов действующие значения токов в каждом разветвлении, определяемые отношениями $I_L = U / X_L$ и $I_C = U / X_C$ будут равны между собой, так $X_L = X_C$.

Вывод, к которому мы пришли, может показаться на первый взгляд довольно странным. Действительно, генератор нагружен двумя сопротивлениями, а тока в неразветвленной части цепи нет, тогда как в самих сопротивлениях протекают равные и притом наибольшие по величине токи.

Объясняется это поведением магнитного поля катушки и электрического поля конденсатора. При резонансе токов, как и при резонансе напряжений, происходит колебание энергии между полем катушки и полем конденсатора. Генератор, сообщив однажды энергию цепи, сказывается как бы изолированным. Его можно было бы совсем отключить, и ток в разветвленной части цепи поддерживался бы без генератора энергией, которую в самом начале запасла цепь. Равно и напряжение на зажимах цепи оставалось бы точно таким, какое развивал генератор.

Таким образом, и при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора мы получили колебательный контур, отличающийся от описанного выше только тем, что генератор, создающий колебания, не включен непосредственно в контур и контур получается замкнутым.



Графики токов, напряжения и мощности в цепи при резонансе токов: а — активное сопротивление равно нулю, цепь мощности не потребляет; б — цепь обладает активным сопротивлением, в неразветвленной части цепи появился ток, цепь потребляет мощность

Значения L , C и f , при которых наступает резонанс токов, определяются, как и при резонансе напряжений (если пренебречь активным сопротивлением контура), из равенства:

$$\omega L = 1 / \omega C$$

Следовательно:

$$f_{рез} = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$$

$$L_{рез} = 1 / \omega^2 C$$

$$C_{рез} = 1 / \omega^2 L$$

Изменяя любую из этих трех величин, можно добиться равенства $X_L = X_C$, т. е. превратить цепь в колебательный контур.

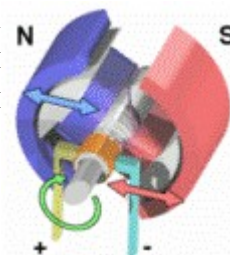
Итак, мы получили замкнутый колебательный контур, в котором можно вызвать электрические колебания, т. е. переменный ток. И если бы не активное сопротивление, которым обладает всякий колебательный контур, в нем непрерывно мог бы существовать переменный ток. Наличие же активного сопротивления приводит к тому, что колебания в контуре постепенно затухают и, чтобы поддержать их, необходим источник энергии - генератор переменного тока.

В цепях несинусоидального тока резонансные режимы возможны для различных гармоничных составляющих.

Резонанс токов широко используется в практике. Явление резонанса токов используется в полосовых фильтрах как электрическая «пробка», задерживающая определенную частоту. Так как току с частотой f оказывается значительное сопротивление, то и падение напряжения на контуре при частоте f будет максимальным. Это свойство контура получило название избирательность, оно используется в радиоприемниках для выделения сигнала конкретной радиостанции. Колебательный контур, работающий в режиме резонанса токов, является одним из основных узлов электронных генераторов.

Электродвигатели постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока применяют в тех электроприводах, где требуется большой диапазон регулирования скорости, большая точность поддержания скорости вращения привода, регулирования скорости вверх от номинальной.



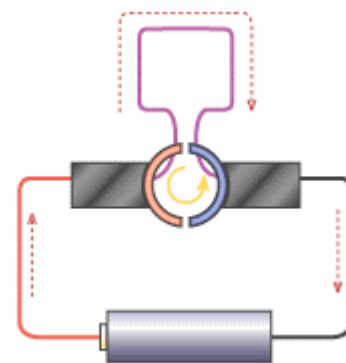
Как устроены электродвигатели постоянного тока

Работа электрического двигателя постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции. Из основ электротехники известно, что на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, определяемая по правилу левой руки:

$$F = BIL,$$

где I — ток, протекающий по проводнику, B — индукция магнитного поля; L — длина проводника.

При пересечении проводником магнитных силовых линий машины в нем наводится электродвижущая сила, которая по отношению к току в проводнике направлена против него, поэтому она называется обратной или противодействующей (противо-э. д. с). Электрическая мощность в двигателе преобразуется в механическую и частично тратится на нагревание проводника.



Конструктивно все электрические двигатели постоянного тока состоят из индуктора и якоря, разделенных воздушным зазором.

Индуктор электродвигателя постоянного тока служит для создания неподвижного магнитного поля машины и состоит из станины, главных и добавочных полюсов. Станина служит для крепления основных и добавочных полюсов и является элементом магнитной цепи машины. На главных полюсах расположены обмотки возбуждения, предназначенные для создания магнитного поля машины, на добавочных полюсах - специальная обмотка, служащая для улучшения условий коммутации.

Якорь электродвигателя постоянного тока состоит из магнитной системы, собранной из отдельных листов, рабочей обмотки, уложенной в пазы, и коллектора служащего для подвода к рабочей обмотке постоянного тока.

Коллектор представляет собой цилиндр, насаженный на вал двигателя и избранный из изолированных друг от друга медных пластин. На коллекторе имеются

выступы-петушки, к которым припаяны концы секций обмотки якоря. Съем тока с коллектора осуществляется с помощью щеток, обеспечивающих скользящий контакт с коллектором. **Щетки** закреплены в **щеткодержателях**, которые удерживают их в определенном положении и обеспечивают необходимое нажатие щетки на поверхность коллектора. Щетки и щеткодержатели закреплены на траверсе, связанной с корпусом электродвигателя.

Коммутация в электродвигателях постоянного тока

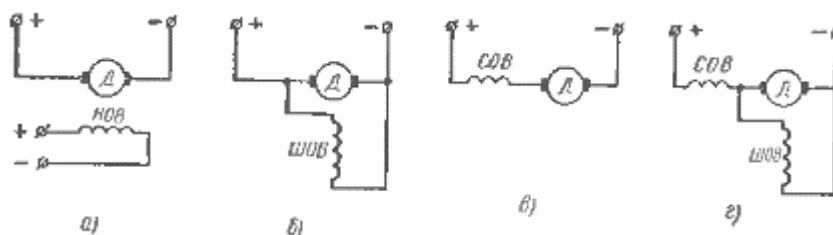
В процессе работы электродвигателя постоянного тока щетки, скользя по поверхности вращающегося коллектора, последовательно переходят с одной коллекторной пластины на другую. При этом происходит переключение параллельных секций обмотки якоря и изменение тока в них. Изменение тока происходит в то время, когда виток обмотки замкнут щеткой накоротко. Этот процесс переключения и явления, связанные с ним, называются **коммутацией**.

В момент коммутации в короткозамкнутой секции обмотки под влиянием собственного магнитного поля наводится э. д. с. самоиндукции. Результирующая э. д. с. вызывает в короткозамкнутой секции дополнительный ток, который создает неравномерное распределение плотности тока на контактной поверхности щеток. Это обстоятельство считается основной причиной искрения коллектора под щеткой. Качество коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки и определяется по шкале степеней искрения.



Способы возбуждения электродвигателей постоянного тока

Под возбуждением электрических машин понимают создание в них магнитного поля, необходимого для работы электродвигателя. Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока показаны на рисунке.



Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока: а - независимое, б - параллельное, в - последовательное, г - смешанное

По способу возбуждения электрические двигатели постоянного тока делят на четыре группы:

1. С независимым возбуждением, у которых обмотка возбуждения НОВ питается от постороннего источника постоянного тока.
2. С параллельным возбуждением (шунтовые), у которых обмотка возбуждения ШОВ включается параллельно источнику питания обмотки якоря.
3. С последовательным возбуждением (серийные), у которых обмотка возбуждения СОВ включена последовательно с якорной обмоткой.
4. Двигатели со смешанным возбуждением (компаундные), у которых имеется последовательная СОВ и параллельная ШОВ обмотки возбуждения.

Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска двигателя якорь неподвижен и противо-э. д. с. индукция в якоре равна нулю, поэтому $I_p = U / R_{я}$.

Сопротивление цепи якоря невелико, поэтому пусковой ток превышает в 10 - 20 раз и более номинальный. Это может вызвать значительные электродинамические усилия в обмотке якоря и чрезмерный ее перегрев, поэтому пуск двигателя производят с помощью [пусковых реостатов](#) - активных сопротивлений, включаемых в цепь якоря.

Двигатели мощностью до 1 кВт допускают прямой пуск.

Величина сопротивления пускового реостата выбирается по допустимому пусковому току двигателя. Реостат выполняют ступенчатым для улучшения плавности пуска электродвигателя.

В начале пуска вводится все сопротивление реостата. По мере увеличения скорости якоря возникает противо-э. д. с, которая ограничивает пусковые токи. Постепенно выводя ступень за ступенью сопротивление реостата из цепи якоря, увеличивают подводимое к якору напряжение.

Регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока

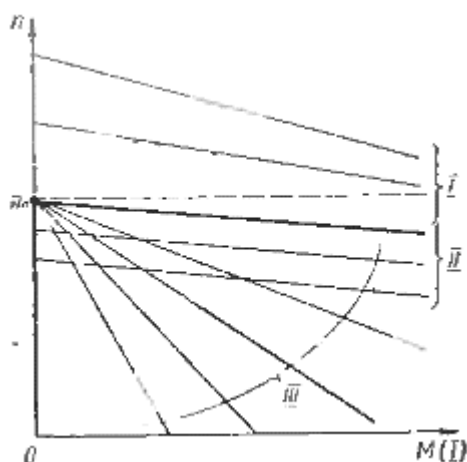
Частота вращения двигателя постоянного тока:

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

где U — напряжение питающей сети; I_a — ток якоря; R_a — сопротивление цепи якоря; k_c — коэффициент, характеризующий магнитную систему; Φ — магнитный поток электродвигателя.

Из формулы видно, что частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно регулировать тремя путями: изменением потока возбуждения электродвигателя, изменением подводимого к электродвигателю напряжения и изменением сопротивления в цепи якоря.

Наиболее широкое применение получили первые два способа регулирования, третий способ применяют редко: он неэкономичен, скорость двигателя при этом значительно зависит от колебаний нагрузки. Механические характеристики, которые при этом получаются, показаны на рисунке.



Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при различных способах регулирования частоты вращения

Жирная прямая — это естественная зависимость скорости от момента на валу, или, что то же, от тока якоря. Прямая естественной механической характеристики несколько отклоняется от горизонтальной штриховой линии. Это отклонение называют нестабильностью, нежесткостью, иногда статизмом. Группа непараллельных прямых I соответствует регулированию скорости возбуждением, параллельные прямые II получаются в результате изменения напряжения якоря, наконец, веер III — это результат введения в цепь якоря активного сопротивления.

Величину тока возбуждения двигателя постоянного тока можно регулировать с помощью реостата или любого устройства, активное сопротивление которого можно изменять по величине, например транзистора. При увеличении сопротивления в цепи ток возбуждения уменьшается, частота вращения двигателя увеличивается. При ослаблении магнитного потока механические характеристики располагаются выше естественной (т. е. выше характеристики при отсутствии реостата). Повышение частоты вращения двигателя вызывает усиление искрения под щетками. Кроме того, при работе электродвигателя с ослабленным потоком уменьшается устойчивость его

работы, особенно при переменных нагрузках на валу. Поэтому пределы регулирования скорости таким способом не превышают 1,25 - 1,3 от номинальной.

Регулирование изменением напряжения требует источника постоянного тока, например генератора или преобразователя. Такое регулирование используют во всех промышленных системах электропривода: генератор - двигатель постоянного тока (Г - ДПТ), электромашинный усилитель - двигатель постоянного тока (ЭМУ - ДПТ), магнитный усилитель - двигатель постоянного тока (МУ - ДПТ), [тиристорный преобразователь](#) - двигатель постоянного тока (Т - ДПТ).



Торможение электродвигателей постоянного тока

В электроприводах с электродвигателями постоянного тока применяют три способа торможения: динамическое, рекуперативное и торможение противовключением.

Динамическое торможение электродвигателя постоянного тока осуществляется путем замыкания обмотки якоря двигателя накоротко или через [резистор](#). При этом электродвигатель постоянного тока начинает работать как генератор, преобразуя запасенную им механическую энергию в электрическую. Эта энергия выделяется в виде тепла в сопротивлении, на которое замкнута обмотка якоря. Динамическое торможение обеспечивает точный останов электродвигателя.

Рекуперативное торможение электродвигателя постоянного тока осуществляется в том случае, когда включенный в сеть электродвигатель вращается исполнительным механизмом со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода. Тогда э. д. с, наведенная в обмотке двигателя, превысит значение напряжения сети, ток в обмотке двигателя изменит направление на противоположное. Электродвигатель переходит на работу в генераторном режиме, отдавая энергию в сеть. Одновременно на его валу возникает тормозной момент. Такой режим может быть получен в приводах подъемных механизмов при опускании груза, а также при регулировании скорости двигателя и во время тормозных процессов в электроприводах постоянного тока.



Рекуперативное торможение двигателя постоянного тока является наиболее экономичным способом, так как в этом случае происходит возврат в сеть электроэнергии. В электроприводе металлорежущих станков этот способ применяют при регулировании скорости в системах Г - ДПТ и ЭМУ - ДПТ.

Торможение противовключением электродвигателя постоянного тока осуществляется путем изменения полярности напряжения и тока в обмотке якоря. При взаимодействии тока якоря с магнитным полем обмотки возбуждения создается тормозной момент, который уменьшается по мере уменьшения частоты вращения электродвигателя. При уменьшении частоты вращения электродвигателя до нуля электродвигатель должен быть отключен от сети, иначе он начнет разворачиваться в обратную сторону.

Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей

Электрические машины, преобразующие электрическую энергию переменного тока в механическую энергию, называются **электродвигателями переменного тока**.



В промышленности наибольшее распространение получили **асинхронные двигатели трехфазного тока**. Рассмотрим устройство и принцип действия этих двигателей.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля.

Для уяснения работы такого двигателя сделаем следующий опыт.

Укрепим подковообразный магнит на оси таким образом, чтобы его можно было вращать за ручку. Между полюсами магнита расположим на оси медный цилиндр, могущий свободно вращаться.

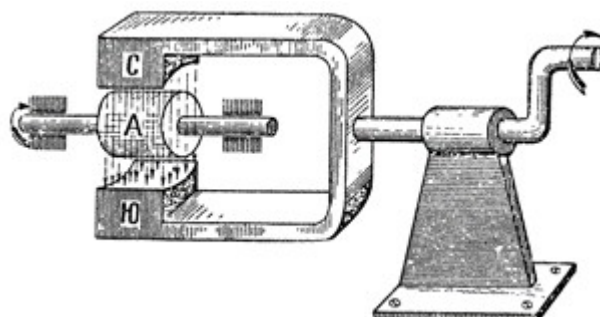


Рисунок 1. Простейшая модель для получения вращающегося магнитного поля

Начнем вращать магнит за ручку по часовой стрелке. Поле магнита также начнет вращаться и при вращении будет пересекать своими силовыми линиями медный цилиндр. В цилиндре, по закону электромагнитной индукции, возникнут вихревые токи, которые создадут свое собственное магнитное поле — поле цилиндра. Это поле будет взаимодействовать с магнитным полем постоянного магнита, в результате чего цилиндр начнет вращаться в ту же сторону, что и магнит.

Установлено, что скорость вращения цилиндра несколько меньше скорости вращения поля магнита.

Действительно, если цилиндр вращается с той же скоростью, что и магнитное поле, то магнитные силовые линии не пересекают его, а следовательно, в нем не возникают вихревые токи, вызывающие вращение цилиндра.

Скорость вращения магнитного поля принято называть синхронной, так как она равна скорости вращения магнита, а скорость вращения цилиндра — **асинхронной** (несинхронной). Поэтому сам двигатель получил название **асинхронного двигателя**. Скорость вращения цилиндра (ротора) отличается от синхронной скорости вращения магнитного поля на небольшую величину, называемую **скольжением**.

Обозначив скорость вращения ротора через n_1 и скорость вращения поля через n мы можем подсчитать **величину скольжения в процентах** по формуле:

$$s = (n - n_1) / n.$$

В приведенном выше опыте вращающееся магнитное поле и вызванное им вращение цилиндра мы получали благодаря вращению постоянного магнита, поэтому такое устройство еще не является **электродвигателем**. Надо заставить электрический ток создавать вращающееся магнитное поле и использовать его для вращения ротора. Задачу эту в свое время блестяще разрешил М. О. Доливо-Добровольский. Он предложил использовать для этой цели трехфазный ток.

Устройство асинхронного электродвигателя М. О. Доливо-Добровольского

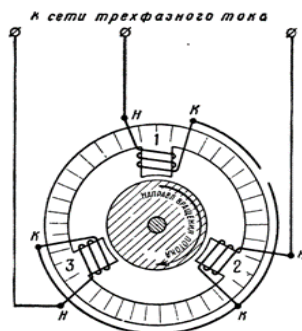


Рисунок 2. Схема асинхронного электродвигателя Доливо-Добровольского

На полюсах железного сердечника кольцевой формы, называемого **статором электродвигателя**, помещены три обмотки, сети трехфазного тока 0 расположенные одна относительно другой под углом 120° .

Внутри сердечника укреплен на оси металлический цилиндр, называемый **ротором электродвигателя**.

Если обмотки соединить между собой так, как показано на рисунке, и подключить их к сети трехфазного тока, то общий магнитный поток, создаваемый тремя полюсами, окажется вращающимся.

На рисунке 3 показан график изменения токов в обмотках двигателя и процесс возникновения вращающегося магнитного поля.

Рассмотрим - подробнее этот процесс.

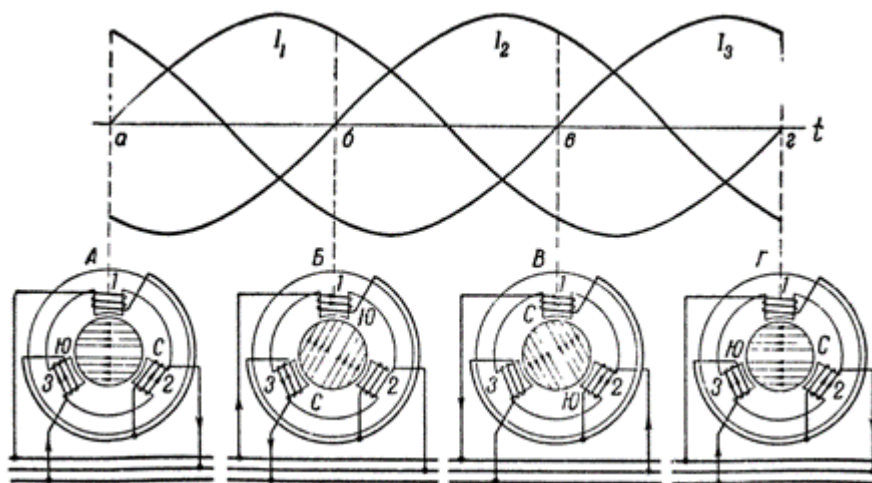
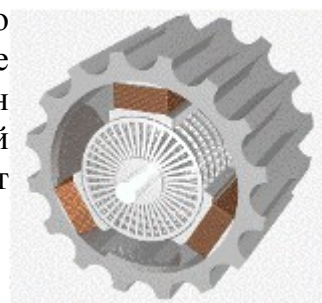


Рисунок 3. Получение вращающегося магнитного поля

В положении «А» на графике ток в первой фазе равен нулю, во второй фазе он отрицателен, а в третьей положителен. Ток по катушкам полюсов потечет в направлении, указанном на рисунке стрелками.

Определив по правилу правой руки направление созданного током магнитного потока, мы убедимся, что на внутреннем конце полюса (обращенном к ротору) третьей катушки будет создан южный полюс (Ю), а на полюсе второй катушки — северный полюс (С). Суммарный магнитный поток будет направлен от полюса второй катушки через ротор к полюсу третьей катушки.



В положении «Б» на графике ток во второй фазе равен нулю, в первой фазе он положителен, а в третьей отрицателен. Ток, протекая по катушкам полюсов, создает на конце первой катушки южный полюс (Ю), на конце третьей катушки северный полюс (С). Суммарный магнитный поток теперь будет направлен

от третьего полюса через ротор к первому полюсу, т. е. полюсы при этом переместятся на 120° .

В положении «В» на графике ток в третьей фазе равен нулю, во второй фазе он положителен, а в первой отрицателен. Теперь ток, протекая по первой и второй катушкам, создаст на конце полюса первой катушки — северный полюс (С), а на конце полюса второй катушки — южный полюс (Ю), т. е. полярность суммарного магнитного поля переместится еще на 120° . В положении «Г» на графике магнитное поле переместится еще на 120° .

Таким образом, суммарный магнитный поток будет менять свое направление с изменением направления тока в обмотках статора (полюсов).

При этом за один период изменения тока в обмотках магнитный поток сделает полный оборот. Вращающийся магнитный поток будет увлекать за собой цилиндр, и мы получим таким образом асинхронный электродвигатель.

Напомним, что на рисунке 3 обмотки статора соединены «звездой», однако вращающееся магнитное поле образуется и при соединении их «треугольником».

Если мы поменяем местами обмотки второй и третьей фаз, то магнитный поток изменит направление своего вращения на обратное.

Такого же результата можно добиться, не меняя местами обмотки статора, а направляя ток второй фазы сети в третью фазу статора, а третью фазу сети — во вторую фазу статора.

Таким образом, **изменить направление вращения магнитного поля можно переключением двух любых фаз.**

Мы рассмотрели **устройство асинхронного двигателя, имеющего на статоре три обмотки.** В этом случае вращающееся магнитное поле двухполюсное и число его оборотов в одну секунду равно числу периодов изменения тока в одну секунду.

Если на статоре разместить по окружности шесть обмоток, то будет создано **четыреполюсное вращающееся магнитное поле.** При девяти обмотках поле будет шестиполюсным.

При частоте трехфазного тока f , равной 50 периодам в секунду, или 3000 в минуту, число оборотов n вращающегося поля в минуту будет:

при двухполюсном статоре $n = (50 \times 60) / 1 = 3000$ об/мин,

при четырехполюсном статоре $n = (50 \times 60) / 2 = 1500$ об/мин,

при шестиполюсным статоре $n = (50 \times 60) / 3 = 1000$ об/мин,

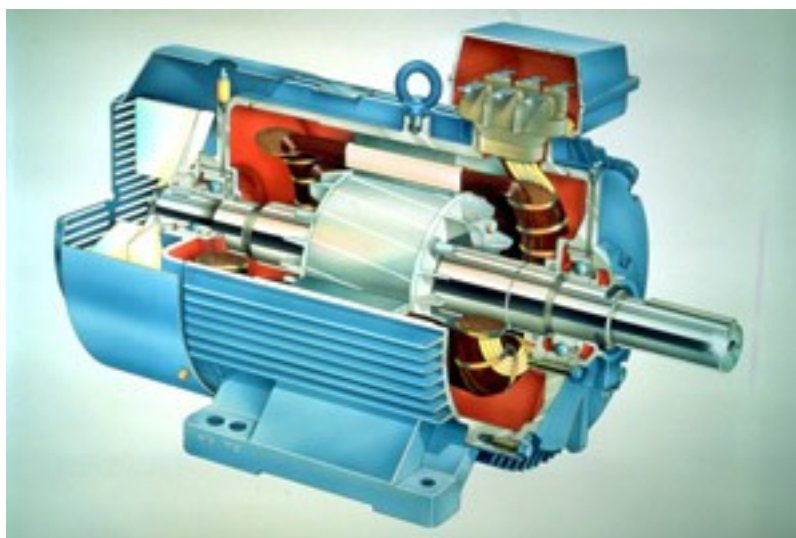


при числе пар полюсов статора, равном p : $n = (f \times 60) / p$,

Итак, мы установили скорость вращения магнитного поля и зависимость ее от числа обмоток на статоре двигателя.

Ротор же двигателя будет, как нам известно, несколько отставать в своем вращении.

Однако отставание ротора очень небольшое. Так, например, при холостом ходе двигателя разность скоростей составляет всего 3%, а при нагрузке 5 - 7%. Следовательно, обороты асинхронного двигателя при изменении нагрузки изменяются в очень небольших пределах, что является одним из его достоинств.

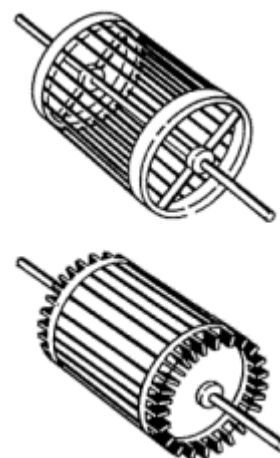


Рассмотрим теперь устройство асинхронных электродвигателей

Статор современного асинхронного электродвигателя имеет невыраженные полюсы, т. е. внутренняя поверхность статора сделана совершенно гладкой.

Чтобы уменьшить потери на вихревые токи, сердечник статора набирают из тонких штампованных стальных листов. Собранный сердечник статора закрепляют в стальном корпусе.

В пазы статора закладывают обмотку из медной проволоки. Фазовые обмотки статора электродвигателя соединяются «звездой» или «треугольником», для чего все начала и концы обмоток выводятся на корпус — на специальный изоляционный щиток. Такое устройство статора очень удобно, так как позволяет включать его обмотки на разные стандартные напряжения.

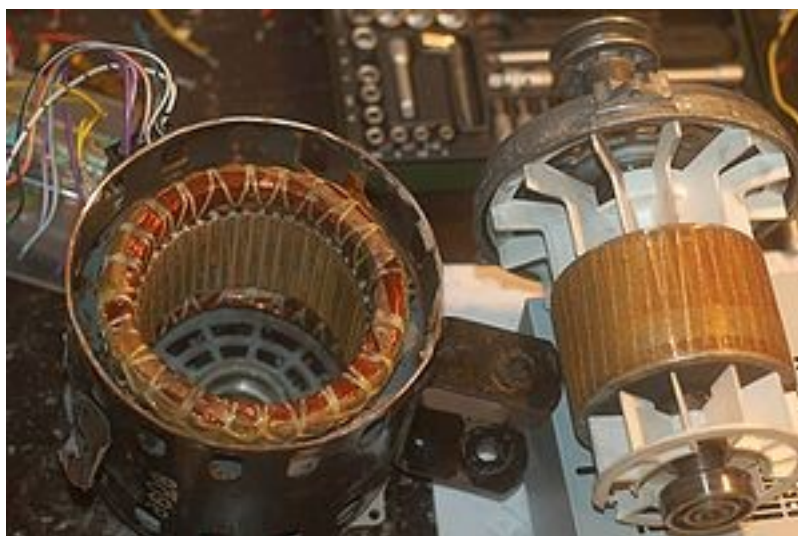


Ротор асинхронного двигателя, подобно статору, набирается из штампованных листов стали. В пазы ротора закладывается обмотка.

В зависимости от конструкции ротора асинхронные электродвигатели делятся на **двигатели с короткозамкнутым ротором и фазным ротором**.

Обмотка короткозамкнутого ротора сделана из медных стержней, закладываемых в пазы ротора. Торцы стержней соединены при помощи медного кольца. Такая обмотка называется обмоткой типа «беличьей клетки». Заметим, что медные стержни в пазах не изолируются.

В некоторых двигателях «беличью клетку» заменяют литым ротором.



[Асинхронный двигатель с фазным ротором](#) (с контактными кольцами) применяется обычно в электродвигателях большой мощности и в тех случаях; когда необходимо, чтобы электродвигатель создавал большое усилие при трогании с места. Достигается это тем, что в обмотки фазного двигателя включается [пусковой реостат](#).

Короткозамкнутые асинхронные двигатели пускаются в ход двумя способами:

- 1) Непосредственным подключением трехфазного напряжения сети к статору двигателя. Этот способ самый простой и наиболее популярный.
- 2) Снижением напряжения, подводимого к обмоткам статора. Напряжение снижают, например, переключая обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

Пуск двигателя в ход происходит при соединении обмоток статора «звездой», а когда ротор достигнет нормального числа оборотов, обмотки статора переключаются на соединение «треугольником».

Ток в подводящих проводах при этом способе пуска двигателя уменьшается в 3 раза по сравнению с тем током, который возник бы при пуске двигателя прямым включением в сеть с обмотками статора, соединенными «треугольником». Однако этот способ пригоден лишь в том случае, если статор рассчитан для нормальной работы при соединении его обмоток «треугольником».



Наиболее простым, дешевым и надежным является **асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором**, но этот двигатель обладает некоторыми недостатками — малым усилием при трогании с места и большим пусковым током. Эти недостатки в значительной мере устраняются применением фазного ротора, но применение такого ротора значительно удорожает двигатель и требует пускового реостата.

Схемы подключения магнитного пускателя для управления асинхронным электродвигателем

Магнитный пускатель представляет собой простейший комплект аппаратов для дистанционного управления электродвигателями и кроме самого контактора часто имеет кнопочную станцию и аппараты защиты.



Схема подключения нереверсивного магнитного пускателя

На рис. 1, а, б показаны соответственно монтажная и принципиальная схемы включения нереверсивного магнитного пускателя для управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. На монтажной схеме границы одного аппарата обводят штриховой линией. Она удобна для монтажа аппаратуры и поиска неисправностей. Читать эти схемы трудно, так как они содержат много пересекающихся линий.

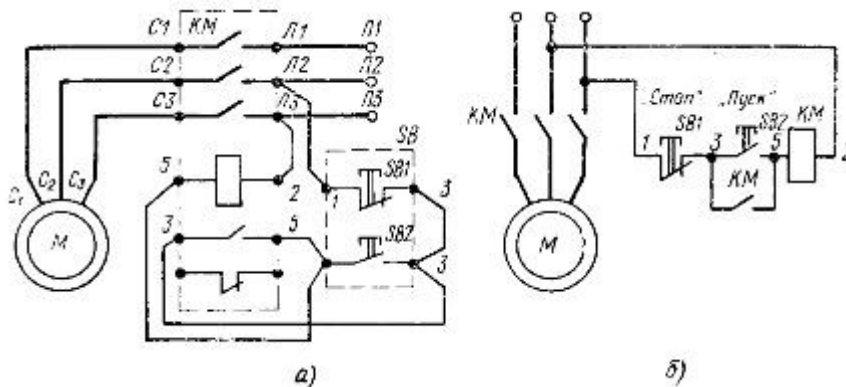


Рис. 1. Схема включения нереверсивного магнитного пускателя: а - монтажная схема включения пускателя, электрическая принципиальная схема включения пускателя

На принципиальной схеме все элементы одного магнитного пускателя имеют одинаковые буквенно-цифровые обозначения. Это позволяет не связывать вместе условные изображения катушки контактора и контактов, добиваясь наибольшей простоты и наглядности схемы.

Нереверсивный магнитный пускатель имеет контактор КМ с тремя главными замыкающими контактами (Л1 - С1, Л2 - С2, Л3 - С3) и одним вспомогательным замыкающим контактом (3-5).

Главные цепи, по которым протекает ток электродвигателя, принято изображать жирными линиями, а цепи питания катушки пускателя (или цепи управления) с наибольшим током — тонкими линиями.



Принцип действия схемы включения нереверсивного магнитного пускателя

Для включения электродвигателя М необходимо кратковременно нажать кнопку SB2 «Пуск». При этом по цепи катушки магнитного пускателя, потечет ток, якорь притянется к сердечнику. Это приведет к замыканию главных контактов в цепи питания электродвигателя. Одновременно замкнется вспомогательный контакт 3 - 5, что создаст параллельную цепь питания катушки магнитного пускателя.

Если теперь кнопку «Пуск» отпустить, то катушка магнитного пускателя будет включена через собственный вспомогательный контакт. Такую схему называют схемой самоблокировки. Она обеспечивает так называемую нулевую защиту электродвигателя. Если в процессе работы электродвигателя напряжение в сети исчезнет или значительно снизится (обычно более чем на 40% от номинального

значения), то магнитный пускатель отключается и его вспомогательный контакт размыкается.

После восстановления напряжения для включения электродвигателя необходимо повторно нажать кнопку «Пуск». Нулевая защита предотвращает непредвиденный, самопроизвольный пуск электродвигателя, который может привести к аварии.

Аппараты ручного управления (рубильники, конечные выключатели) нулевой защитой не обладают, поэтому в системах управления станочным приводом обычно применяют управление с использованием магнитных пускателей.

Для отключения электродвигателя достаточно нажать кнопку SB1 «Стоп». Это приводит к размыканию цепи самопитания и отключению катушки магнитного пускателя.

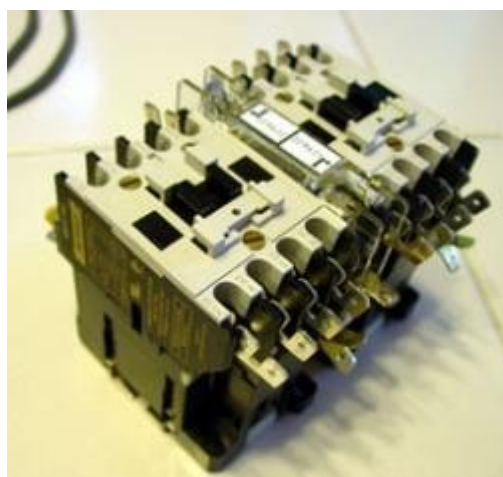


Схема подключения реверсивного магнитного пускателя

В том случае, когда необходимо использовать два направления вращения электродвигателя, применяют реверсивный магнитный пускатель, принципиальная схема которого изображена на рис. 2, а.

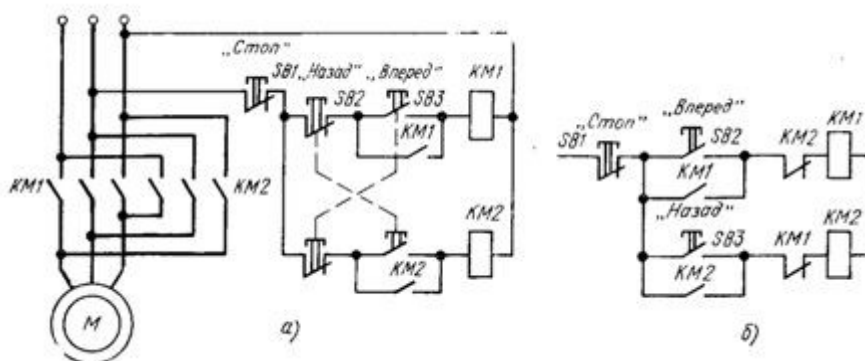


Рис. 2. Схемы включения реверсивного магнитного пускателя

Принцип действия схем включения реверсивного магнитного пускателя

Для изменения направления вращения асинхронного электродвигателя необходимо изменить порядок чередования фаз статорной обмотки.



В реверсивном магнитном пускателе используют два контактора: КМ1 и КМ2. Из схемы видно, что при случайном одновременном включении обоих контакторов в цепи главного тока произойдет короткое замыкание. Для исключения этого схема снабжена блокировкой.

Если после нажатия кнопки SB3 «Вперед» к включения контактора КМ1 нажать кнопку SB2 «Назад», то размыкающий контакт этой кнопки отключит катушку контактора КМ1, а замыкающий контакт подаст питание в катушку контактора КМ2. Произойдет реверсирование электродвигателя.

Электрическая схема цепи управления реверсивного пускателя с блокировкой на вспомогательных размыкающих контактах изображена на рис. 2, б.

В этой схеме включение одного из контакторов, например КМ1, приводит к размыканию цепи питания катушки другого контактора КМ2. Для реверса необходимо предварительно нажать кнопку SB1 «Стоп» и отключить контактор КМ1. Для надежной работы схемы необходимо, чтобы главные контакты контактора КМ1 разомкнулись раньше, чем произойдет замыкание размыкающих вспомогательных контактов в цепи контактора КМ2. Это достигается соответствующей регулировкой положения вспомогательных контактов по ходу якоря.

В серийных магнитных пускателях часто применяют двойную блокировку по приведенным выше принципам. Кроме того, реверсивные магнитные пускатели могут иметь механическую блокировку с перекидным рычагом, препятствующим одновременному срабатыванию электромагнитов контакторов. В этом случае оба контактора должны быть установлены на общем основании.

Другие полезные электронные книги и диски:



[Видеокурс по электротехнике и основам электроники](#)

Качественный обучающий видеокурс по электротехнике. Эффект присутствия!

«Про электричество для чайников»



В этой электронной книге изложены сведения, которые должен знать каждый, независимо есть ли у него электротехническое образование или нет! Правовые аспекты, знакомство с квартирной электропроводкой, коммутационной аппаратурой, установочными изделиями, полезные советы по экономии электроэнергии, основы электробезопасности и многое другое.

Электронная книга в формате PDF. Имеется возможность распечатать ее на принтере.

Автор книги - Труб Иосиф Израилевич Инженер-электрик. Работал в электрических сетях. Специализировался на устройствах релейной защиты и электроавтоматики. Автор двух книг из серии "Библиотека электромонтёра".

Скачать эту электронную книгу можно, перейдя по ссылке

[«Про электричество для чайников»](#)

«Все, что каждый квалифицированный электрик должен знать про электромагнитные реле, пускатели и контакторы»

Электронная книга «Все, что каждый квалифицированный электрик должен знать про электромагнитные реле, пускатели и контакторы» написана на основе статей, опубликованных ранее на сайте [«Школа для электрика»](http://electricalschool.info)



В книге рассмотрены устройство, принцип действия, технические характеристики, правила выбора, особенности в работе и принципы наладки эксплуатации электромагнитных аппаратов дистанционного управления: электромагнитных реле, пускателей, контакторов, исполнительных и грузоподъемных электромагнитов и электромагнитных муфт.

Скачать эту электронную книгу можно, перейдя по ссылке

[Все, что каждый квалифицированный электрик должен знать про электромагнитные реле, пускатели и контакторы](#)

«Плавкие предохранители: устройство, технические характеристики, принципы выбора, эксплуатация и ремонт»



Плавкие предохранители — это аппараты, защищающие установки от перегрузок и токов короткого замыкания. Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, включаемая в рассечку защищаемой цепи, и дугогасительное устройство, гасящее дугу, возникающую после плавления вставки.

В сборник статей "Плавкие предохранители: устройство, технические характеристики, принципы выбора, эксплуатация и ремонт" входят избранные материалы сайта ["Школа для электрика"](http://electricalschool.info) посвященные этой теме.

Скачать эту электронную книгу можно, перейдя по ссылке

[Плавкие предохранители: устройство, технические характеристики, принципы выбора, эксплуатация и ремонт](#)



[Все номера бесплатного электронного журнала «Я электрик!» с приложениями за 2007 – 2010 гг.](#)

Полезные ссылки:

- [Школа для электрика – большой образовательный сайт по электротехнике](#)
- [Электронная электротехническая библиотека](#)
- [Бесплатная почтовая рассылка «Электротехническая энциклопедия»](#)
- [В мир электричества – как в первый раз. Обучающий видеокурс](#)