Содержание курса

[Основные термины и определения электротехники](https://dprm.ru/elektrotehnika/osnovnye-terminy-i-opredelenia)

[Электрическая цепь](https://dprm.ru/elektrotehnika/elektricheskaya-cep)

[Линейные электрические цепи постоянного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/linejnye-elektriceskie-cepi-postoannogo-toka)

[Расчет электрической цепи методом эквивалентных преобразований](https://dprm.ru/elektrotehnika/rascet-elektriceskoj-cepi-metodom-ekvivalentnyh-preobrazovanij)

[Расчет электрической цепи по закону Кирхгофа](https://dprm.ru/elektrotehnika/raschet-elektricheskoj-cepi-po-zakonu-kirhgofa)

[Расчет электрической цепи методом наложения](https://dprm.ru/elektrotehnika/raschet-elektricheskoj-cepi-metodom-nalozenia)

[Метод двух узлов](https://dprm.ru/elektrotehnika/metod-dvuh-uzlov)

[Баланс мощности электрической цепи](https://dprm.ru/elektrotehnika/balans-moshnosti-elektricheskoj-cepi)

[Расчет потенциальной диаграммы](https://dprm.ru/elektrotehnika/raschet-potencialnoj-diagrammy)

[Линейные электрические цепи однофазного синусоидального переменного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/linejnye-elektricheskie-cepi-odnofaznogo-toka)

[Расчет электрических цепей переменного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/rascet-elektriceskih-cepej-peremennogo-toka)

[Алгебраические операции с комплексными числами](https://dprm.ru/elektrotehnika/algebraiceskie-operacii-s-kompleksnymi-cislami)

[Анализ электрического состояния цепи переменного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/analiz-elektriceskogo-sostoania-cepi-peremennogo-toka)

[Анализ цепи с резистивным элементом](https://dprm.ru/elektrotehnika/analiz-cepi-s-rezistivnym-elementom)

[Анализ цепи с катушкой индуктивности](https://dprm.ru/elektrotehnika/analiz-cepi-s-katuskoj-induktivnosti)

[Анализ цепи с конденсатором](https://dprm.ru/elektrotehnika/analiz-cepi-s-kondensatorom)

[Анализ цепи с последовательным соединением элементов R, L, C](https://dprm.ru/elektrotehnika/analiz-cepi-s-posledovatelnym-soedineniem-elementov)

[Мощность цепи синусоидального тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/mosnost-cepi-sinusoidalnogo-toka)

[Коэффициент мощности и его экономическое значение](https://dprm.ru/elektrotehnika/koefficient-mosnosti-i-ego-ekonomiceskoe-znacenie)

[Резонанс в цепях переменного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/rezonans-v-cepyah-peremennogo-toka)

[Характерные особенности резонанса напряжений](https://dprm.ru/elektrotehnika/harakternye-osobennosti-rezonansa-napryazhenij)

[Трехфазные цепи](https://dprm.ru/elektrotehnika/trehfaznye-cepi)

[Мощность трехфазной цепи](https://dprm.ru/elektrotehnika/moschnost-trehfaznoj-cepi)

[Расчет трехфазных цепей](https://dprm.ru/elektrotehnika/raschet-trehfaznyh-cepej)

[Трансформаторы](https://dprm.ru/elektrotehnika/transformator)

[Однофазные трансформаторы](https://dprm.ru/elektrotehnika/odnofaznye-transformatory)

[Трехфазные трансформаторы](https://dprm.ru/elektrotehnika/trehfaznye-transformatory)

[Машины постоянного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/mashina-postojannogo-toka)

[Принцип самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения](https://dprm.ru/elektrotehnika/princip-samovozbuzhdenija-generatora-postojannogo-toka)

[Условия самовозбуждения генератора](https://dprm.ru/elektrotehnika/uslovija-samovozbuzhdenija-generatora)

[Принцип действия двигателя постоянного тока](https://dprm.ru/elektrotehnika/princip-dejstvija-dvigatelja-postojannogo-toka)

[Способы регулирования частоты вращения](https://dprm.ru/elektrotehnika/sposoby-regulirovanija-chastoty-vraschenija-dvigatelja)

[Способы пуска двигателя в ход](https://dprm.ru/elektrotehnika/sposoby-puska-dvigatelja-v-hod)

[Асинхронные машины](https://dprm.ru/elektrotehnika/asinhronnye-mashiny)

[Принцип действия асинхронного двигателя](https://dprm.ru/elektrotehnika/princip-dejstvija-asinhronnogo-dvigatelja)

[Особенности пуска в ход асинхронных двигателей](https://dprm.ru/elektrotehnika/pusk-v-hod-asinhronnyh-dvigatelej)

[Синхронные машины](https://dprm.ru/elektrotehnika/sinhronnye-mashiny)

[Принцип действия синхронного генератора](https://dprm.ru/elektrotehnika/princip-dejstvija-sinhronnogo-generatora)

[Принцип действия синхронного двигателя](https://dprm.ru/elektrotehnika/princip-dejstvija-sinhronnogo-dvigatelja)

[Особенности пуска в ход синхронного двигателя](https://dprm.ru/elektrotehnika/pusk-sinhronnogo-dvigatelja)

[**ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**](https://dprm.ru/elektrotehnika/osnovnye-terminy-i-opredelenia)

**Электрический ток**

Электрический ток (I) это направленное движение свободных носителей электрического заряда. В металлах свободными носителями заряда являются электроны, в плазме, электролите — ионы.

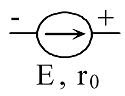
Единица измерения силы тока – ампер (А). Условно за положительное направление тока во внешней цепи принимают направление от положительно заряженного электрода (+) к отрицательно заряженному (-). Если направление тока в ветви неизвестно, то его выбирают произвольно. Если в результате расчета режима цепи, ток будет иметь отрицательное значение, то действительное направление тока противоположно произвольно выбранному.

**Электрическое напряжение**

Электрическое напряжение (U) это характеристика работы сил поля по переносу электрических зарядов через внешние элементы цепи. При этом электрическая энергия преобразуется в другие виды. Единица измерения – вольт (В). За положительное направление напряжения приемника принимают направление, совпадающее с выбранным положительным направлением тока. В электрических цепях и энергетических системах напряжение может иметь значения в пределах от нескольких вольт до сотен тысяч вольт.

**Электродвижущая сила**

Электродвижущая сила Е (ЭДС) характеризует способность индуцированного поля вызывать электрический ток. Единица измерения – вольт (В). Источники энергии могут быть источниками ЭДС и тока. В данном пособии рассматриваются только источники ЭДС. Источник ЭДС характеризуется двумя параметрами: значениями ЭДС (Е) и внутреннего сопротивления (r0). Источник ЭДС, внутренним сопротивлением которого можно пренебречь, называют идеальным источником. Реальный источник ЭДС имеет определенное значение внутреннего сопротивления. У источника ЭДС внутренне сопротивление значительно меньше сопротивления нагрузки (RН) и электрический ток в цепи зависит главным образом от величины ЭДС и сопротивления нагрузки. Источник ЭДС имеет следующие графические обозначения.



Вольтамперная характеристика источника ЭДС имеет вид:

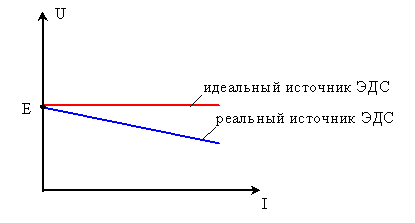


Рис. 1

Зависимость между напряжением на зажимах источника и его ЭДС имеет вид:

U = E — r0 × I (для реального источника ЭДС)

U = E (для идеального источника).

Электрическое сопротивление R это величина, характеризующая противодействие проводящей среды движению свободных электрических зарядов (току). Единица измерения – Ом. Величина, обратная сопротивлению, называется электрической проводимостью G. Единица измерения – сименс (См).

**Электрическое сопротивление**

Электрическое сопротивление проводника определяется по формуле

R=ρl/S

где l – длина;

S – поперечное сечение;

ρ - удельное сопротивление.

По способности проводить электрический ток электротехнические материалы можно разделить на группы: проводники, диэлектрики и полупроводники.

**Проводниковые материалы**

Проводниковые материалы (алюминий, медь, золото, серебро и др.) обладают высокой электропроводностью. Наиболее часто в проводах и кабелях используется алюминий, как наиболее дешевый. Медь имеет большую электропроводимость, но она дороже.

Из проводников следует выделить группу материалов с большим удельным сопротивлением. К ним относятся сплавы ( нихром, фехраль и др.) они используются для изготовления обмоток нагревательных приборов и реостатов. Вольфрам используется в лампах накаливания. Константан и манганин используются в качестве сопротивлений в образцовых приборах.

**Электроизоляционные материалы (диэлектрики)**

Электроизоляционные материалы (диэлектрики) имеют очень малую удельную электрическую проводимость. Они бывают газообразные, жидкие и твердые. Особенно большим разнообразием отличаются твердые диэлектрики. К ним относятся резина, сухое дерево, керамические материалы, пластмассы, картон, пряжа и др. материалы. В качестве конструкционных материалов применяются текстолит и гетинакс. Текстолит это диэлектрический материал основой которого является ткань, пропитанная феноло-формальдегидной смолой. Гетинакс это бумага, пропитанная феноло-формальдегидной смолой.

**Полупроводники**

Полупроводники по электропроводимости занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Простые полупроводниковые вещества – германий, кремний, селен, сложные полупроводниковые материалы — арсенид галлия, фосфид галлия и др. В чистых полупроводниках концентрация носителей заряда – свободных электронов и дырок мала и эти материалы не проводят электрический ток.

Если в полупроводниковый материал ввести примесь (донорную или акцепторную), то есть произвести легирование, то полупроводник становится обладателем или электронной (n) проводимости (избыток электронов), или дырочной (р) проводимости (избыток положительных зарядов – дырок). Если соединить два полупроводника с различными видами проводимости, получим полупроводниковый прибор (диод), который используется для выпрямления переменного тока.

Мощность в электрической цепи характеризует интенсивность преобразования энергии из одного вида в другой в единицу времени. Единица измерения мощности – Ватт (Вт).

Для цепи постоянного тока мощность источника

Pист = E I.

Мощность приемника

Рпр = U × I = R × I2 = U2/R

**Закон электромагнитной индукции**

Закон электромагнитной индукции — устанавливает связь между электрическими и магнитными явлениями, был открыт в 1831 году М. Фарадеем, в 1873 году закон был обобщен и развит Д.Максвеллом:

Если магнитный поток Ф, проходящий сквозь поверхность, ограниченную некоторым контуром, изменяется во времени t, в контуре индуцируется ЭДС e, равная скорости изменения потока

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-529.gif

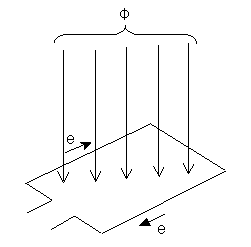


Рис. 2

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

Электрическая цепь состоит из источников и приемников электрической энергии. В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электромагнитную или в электрическую.

Например, в гальванических элементах химическая энергия преобразуются в электрическую, в электрических генераторах механическая энергия преобразуется в электромагнитную. Электрические цепи бывают постоянного или переменного (однофазного или трехфазного) тока.

К линейным цепям относятся цепи, у которых электрическое сопротивление R каждого участка не зависит от значений и направлений тока и напряжения.

В приемниках электрической энергии происходит обратное преобразование. Например, электромагнитная энергия преобразуется в электродвигателе в механическую энергию, в нагревательном элементе в тепловую энергию.

Электрическая цепь содержит, кроме того, вспомогательные элементы, — например, плавкие предохранители, выключатели, разъемы и др.

Электрические цепи принято изображать в виде различного рода схем, которые бывают трех видов: монтажные, принципиальные, схемы замещения.

**Принципиальная схема**

Принципиальными схемами пользуются при изучении, монтаже и ремонте электрических цепей и устройств. Элементы принципиальных схем имеют условные обозначения. Ниже приведены примеры обозначений некоторых элементов.

* резистор

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-224.gif

* выключатель

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-225.gif

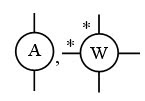
* плавкий предохранитель

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-226.gif

* штепсельный разъем

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-227.gif

* измерительные приборы (амперметр и ваттметр)



* полупроводниковый диод

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-229.gif

* биполярный транзистор p-n-p



**Монтажными схемами** пользуются при изготовлении, монтаже и ремонте электротехнических устройств.

**Схема замещения** это расчетная модель электрической цепи. На ней реальные элементы замещаются идеализированными. Из схемы исключаются все вспомогательные элементы, не влияющие на результаты расчета, например, предохранители, выключатели и др.

Электрические цепи бывают простые и сложные (цепи с разветвлениями).

Участки электрической цепи делятся на активные, содержащие источник электрической энергии и пассивные, не содержащие источника энергии.

**Ветвь** это участок цепи, элементы которого соединены последовательно. Узел электрической цепи это место соединения трех и более ветвей. Контур это любой путь вдоль ветвей электрической цепи, начинающийся и заканчивающийся в одной и той же точке.

Четырехполюсник – часть электрической цепи с двумя парами выделенных выводов.

Режимы работы электрических цепей:

* номинальный (расчетный) режим (Uном; Iном; Pном);
* режим холостого хода обеспечивается при разомкнутой внешней цепи (I=0; U=E);
* режим короткого замыкания обеспечивается при замкнутых накоротко выводах источника. Ток короткого замыкания определяется по формуле:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-231.gif

Для защиты цепи от тока короткого замыкания применяют плавкие предохранители, автоматические выключатели и другие аппараты.

Согласованный режим имеет место, когда сопротивление нагрузки (Rн) равно внутреннему сопротивлению источника Rн=r0. При этом мощность приемника имеет максимальное значение. Этот режим экономически невыгоден из-за низкого коэффициента полезного действия.

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Под постоянным током понимают электрический ток, не изменяющийся во времени t. График постоянного тока изображен на рис. 3.

Электродвигатели постоянного тока широко используются в электротранспорте (в троллейбусах, трамваях, электропоездах) и в других промышленных установках.

Они обеспечивают плавное регулирование частоты вращения якоря в широком диапазоне.

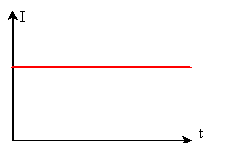


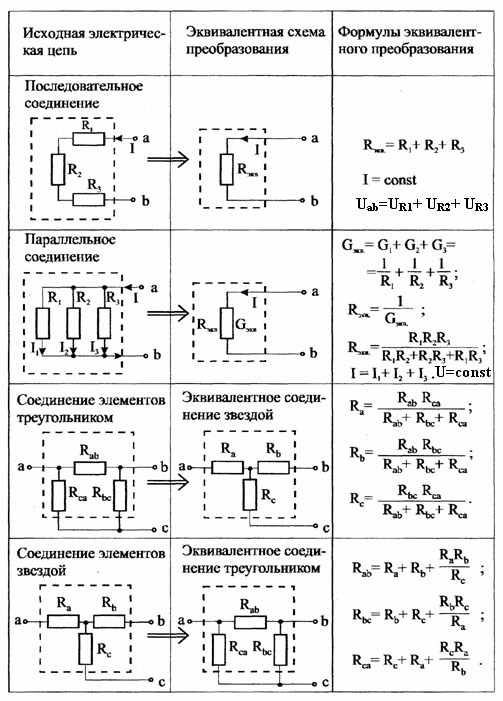
Рис. 3

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Путем эквивалентных преобразований цепи получают неразветвленную цепь, содержащую источник ЭДС и приемник с эквивалентным сопротивлением.

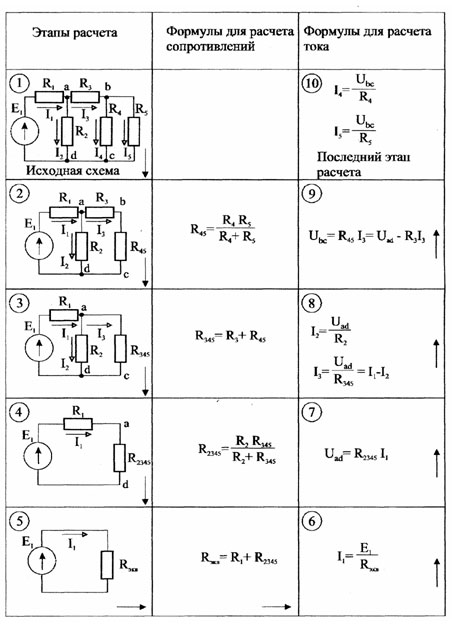
Правила замены двух — и трехполюсников эквивалентными схемами при-ведены в табл. 1. После каждого этапа преобразования рекомендуется заново начертить цепь с учетом выполненных преобразований (см. табл. 2).

Таблица 1 – Эквивалентные преобразования простейших электрических цепей



По закону Ома для полной цепи вычисляют ток в неразветвленной части цепи. Затем находят распределение этого тока по отдельным ветвям.

Таблица 2 – Расчет электрической цепи методом эквивалентных преобразований



**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПО ЗАКОНУ КИРХГОФА**

Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-196.gif

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-197.gif

Расчет многоконтурной линейной электрической цепи, имеющей «b» ветвей с активными и пассивными элементами и «у» узлов, сводится к определению токов отдельных ветвей и напряжений на зажимах элементов, входящих в данную цепь.

Пассивной называется ветвь, не содержащая источника ЭДС. Ветвь, содержащая источник ЭДС, называется активной.

1-й закон Кирхгофа применяют к независимым узлам, т.е. таким, которые отличаются друг от друга хотя бы одной новой ветвью, что позволяет получить (y — I) уравнений.

Недостающие уравнения в количестве b — (у — I) составляют, исходя из второго закона Кирхгофа. Уравнение записывают для независимых контуров, которые отличаются один от другого, по крайней мере, одной ветвью.

Порядок выполнения расчета:

1. выделяют в электрической цепи ветви, независимые узлы и контуры;
2. с помощью стрелок указывают произвольно выбранные положительные направления токов в отдельных ветвях, а также указывают произвольно выбранное направление обхода контура;
3. составляют уравнения по законам Кирхгофа, применяя следующее правило знаков:
4. токи, направленные к узлу цепи, записывают со знаком «плюс», а токи, направленные от узла,- со знаком «минус» (для первого закона Кирхгофа);
5. ЭДС и напряжение на резистивном элементе (RI) берутся со знаком»плюс», если направления ЭДС и тока в ветви совпадают с направлением обхода контура, а при встречном направлении — со знаком «минус»;
6. решая систему уравнений, находят токи в ветвях.

При решении могут быть использованы ЭВМ, методы подстановки или определителей.

Отрицательные значения тока какой-либо ветви указывают на то, что выбранные ранее произвольные направления тока оказались ошибочными. Это следует учитывать, например, при построении потенциальной диаграммы, где следует знать истинное направление тока.

На рис. 4, а изображена исходная электрическая схема, для которой следует рассчитать токи в ветвях. Направления токов и обхода контуров приведены на рис. 4, б.

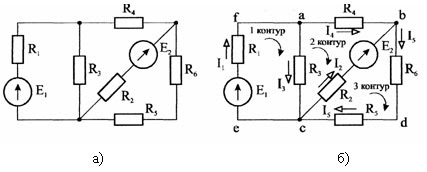
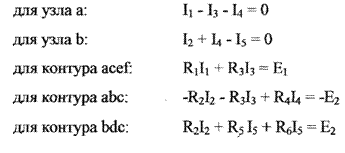


Рис.4

Система уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, имеет вид

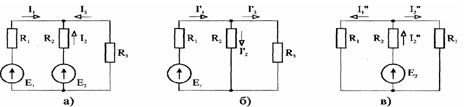


**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ**

Метод наложения основан на принципе суперпозиции, согласно которому ток в любой ветви сложной схемы равен алгебраической сумме частичных токов, вызываемых каждой из ЭДС схемы в отдельности.

По методу наложения рассчитывают токи, возникающие от действия каждой из ЭДС, мысленно удаляя остальные ЭДС из схемы, но оставляя в схеме внутренние сопротивления источников. Затем находят токи в ветвях исходной схемы путем алгебраического сложения частичных токов.

Порядок выполнения расчета рассмотрим на примере схемы, показанной на рис. 6, а.



1. Определяют частичные токи I1‘, I2‘ и I3‘ в ветвях электрической цепи при действии одной ЭДС E1 (ЭДС Е2 исключена из цепи) (рис. 6, б).  
   Направление частичных токов задают в соответствии с направлением ЭДС, расчет токов ведут с использованием метода эквивалентных преобразований.
2. Определяют частичные токи I1«, I2» и I3» при действии ЭДС Е2 (рис.6, в). (ЭДС E1 исключена из цепи).
3. Определяют реальные токи I1, I2 и I3 в ветвях исходной цепи (рис.6, а) как алгебраическую сумму частичных токов при мысленном совмещении цепей, изображенных на рис. 6, б и 6, в.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-193.gif

Частичный ток берется со знаком «плюс», если его направление совпадает с направлением реального тока в исходной цепи, со знаком «минус» — при встречном направлении.

**МЕТОД ДВУХ УЗЛОВ**

Этот метод применяется для расчета электрических цепей с двумя узлами, между которыми включены активные и пассивные цепи (см. рис.7).

Положительные направления токов в ветвях выберем от узла а к узлу в.

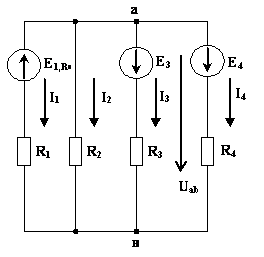


Рис. 7

Вначале по формуле рассчитывается узловое напряжение Uав, а затем по закону Ома рассчитываются токи в ветвях. Принимаем положительное направление напряжения Uав от узла а к узлу в

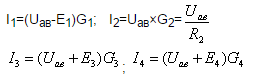
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-149.png

где G1, G2, G3, G4— проводимости ветвей

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-150.png

Если ЭДС в ветви направлена навстречу узловому напряжению Uав, то произведение EG записывается со знаком (+), если согласно – со знаком (-), независимо от положительных направлений токов. Если в ветви нет ЭДС, то произведение EG=0.

Токи в ветвях определяются по формулам:



Рассмотрим вывод формулы для расчета тока I3

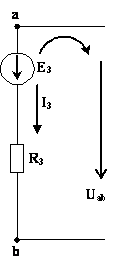
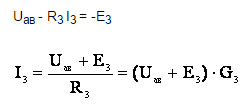


Рис. 8

Для изображенного контура составим уравнение по второму закону Кирхгофа:



**БАЛАНС МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Баланс мощности цепи составляют для проверки расчетов и записывают в виде:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-138.gif

где Ек, Ik и Rk –значения ЭДС источника, тока и сопротивления к – ой ветви;

n – число ветвей, содержащих источники ЭДС;

m– число ветвей электрической цепи.

Баланс мощностей можно сформулировать так: сумма мощностей приемников равна сумме мощностей источников энергии.

В уравнении баланса произведение ЕkIk (мощность источника) подставляют со знаком «плюс», если истинное направление тока, протекающего через источник, и направление ЭДС источника совпадают, и со знаком «минус» – при встречном направлении (источник работает в режиме приемника).

Для электрической цепи, представленной на рис. 5, уравнение баланса мощностей будет иметь вид (при положительных значениях расчетных токов):

E1I1 – E2I2 = I12(R1 + r01) + I22R2 + I32R3 + I42R4 + I52(R5 + R6).

**РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ**

Потенциальной диаграммой называется график зависимости потенциала φ от сопротивления R, полученный при обходе контура.

Расчет потенциалов точек цепи выполняется после определения токов в ветвях одним из рассмотренных выше методов и нахождения истинных направлений токов.

Расчет рекомендуется производить в следующей последовательности.

1. Разбивают электрическую цепь (например, внешний контур) на участки, содержащие резисторы или источники ЭДС, обозначив буквами границы участков.
2. Потенциал одной из точек принимают равным нулю.
3. При обходе контура (направление произвольное) разность потенциалов φA – φB между концами каждого участка вычисляются по формулам, в зависимости от элемента, включенного на рассматриваемом участке цепи:

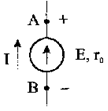
— если на участке включен резистор с сопротивлением R, то формула имеет вид

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-179.gif

При этом следует иметь в виду, что φA > φB, так как направление тока от большего потенциала к меньшему;

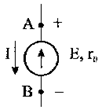
— если участок содержит источник ЭДС с внутренним сопротивлением r0, то возможны два случая:

— источник ЭДС работает в режиме источника питания (ток через источник совпадает с направлением ЭДС), тогда разность потенциалов определяется по формуле



jA — jB = E — r0 I;

— источник ЭДС работает в режиме приемника (направления тока и ЭДС противоположны),



тогда формула примет вид jA — jB = E + r0 I.

Расчетное значение потенциала точки, с которой начат обход контура, должно получиться равным нулю, что является критерием правильности расчета.

При построении потенциальной диаграммы по оси абсцисс в масштабе откладывают последовательно значения сопротивлений резисторов, включенных в контур; по оси ординат — значения потенциалов точек.

Примерный вид потенциальной диаграммы изображен на рис. 9

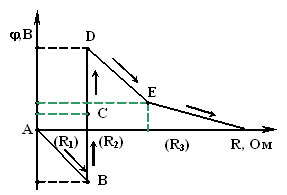


Рис. 9

**ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Под переменным синусоидальным током понимается ток, изменяющийся во времени как по величине, так и по направлению по синусоидальному закону.

Преимущества синусоидального тока перед постоянным:

* легче и дешевле получение;
* его легко передавать на большие расстояния из-за возможности изменять напряжение с помощью трансформатора;
* электрические машины переменного тока дешевле и проще по сравнению с двигателями постоянного тока.

Простейшим генератором синусоидальной ЭДС является проводник в виде прямоугольной рамки, вращающейся с постоянной угловой скоростью w в постоянном однородном магнитном поле. При этом в каждом продольном проводнике рамки (секции электрической обмотки машины) будет наводиться изменяющаяся по синусоидальному закону ЭДС:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-140.gif

где В – магнитная индукция поля;

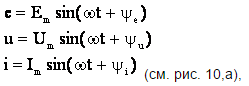
V – линейная скорость движения проводника;

L – длина проводника;

t – время;

w — угловая скорость.

Синусоидальные ЭДС, напряжение и ток в общем случае могут быть записаны в виде:



где е, u, i – мгновенные значения синусоидальных электрических параметров (значения в рассматриваемый момент времени);

Em, Um, Im – амплитудные (максимальные) значения;

yе, yu, yi – начальные фазы – значения аргумента синусоидальной функции в момент начала отсчета времени t=0 (в радианах или градусах);

wt+ye; wt+yu ; wt+yi – фазы, которые отсчитываются от точки перехода синусоидальной функции через нуль к положительному значению.

Величина обратная периоду Т синусоидальной величины называется частотой

*f=1/T*

Единица измерения частоты – Герц (1Гц=1с), в России частота тока в сети – 50 Гц.

Важным параметром в электротехнике является сдвиг фаз между напряжением и током (j). Это алгебраическая величина, определяемая как разность начальных фаз напряжения и тока

j=yu-yi

**Действующее значение** переменного тока I – это такой постоянный ток, который за время равное периоду переменного тока выделяет в проводнике такое же количество тепла, как и протекающий переменный ток.

Существует соотношение между амплитудным и действующим значениями:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-142.png

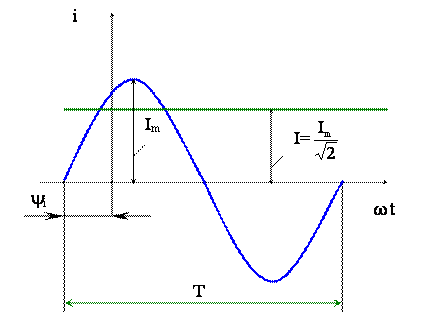
Аналоговые (стрелочные) измерительные приборы проградуированы в действующих значениях.

**Среднее значение** синусоидального тока Iср за полупериод равно величине такого постоянного тока, при котором в течение полупериода через поперечное сечение проводника проходит то же количество электричества Q, что и при переменном токе.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-143.png

Среднее значение синусоидальной величины за период равно нулю.

а)



б)

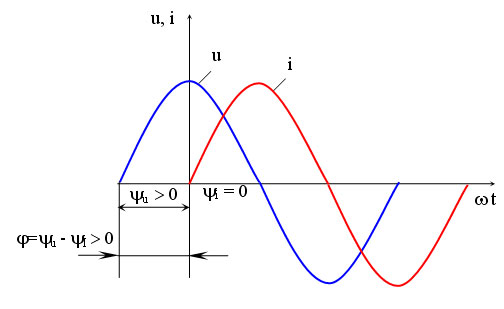


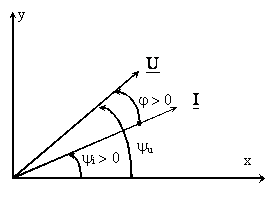
Рис. 10

Из [курса математики](https://online-matematika.ru/kurs) известно, что синусоидальная функция может быть представлена в виде вращающегося вектора, совершающего за время равное периоду один оборот. Векторы, изображающие синусоидальные функции времени, обозначаются буквами, подчеркнутыми снизу (I, U, E) .

Проекция вращающегося вектора на ось ординат представляет собой мгновенное значение электрического синусоидального параметра.

В электротехнике векторы изображают не вращающимися, а неподвижными для момента времени t=0. Масштаб выбирают так, чтобы длина вектора соответствовала действующему значению синусоидального электрического параметра. Угол наклона к оси абсцисс равен начальной фазе. Положительные углы откладываются в направлении против часовой стрелки, а отрицательные – по часовой стрелке.

Векторная диаграмма это совокупность векторов ЭДС, напряжений и токов, изображенных в общей системе координат. Векторная диаграмма дает наглядное представление о действующих значениях, начальных фазах и углах сдвига фаз электрических параметров цепи.



Если на векторной диаграмме yu>yI, то угол сдвига фаз имеет положительное значение (j>0) и напряжение опережает по фазе на угол сдвига фаз j.

Если yu< yI, то j < 0 и напряжение отстает по фазе от тока.

Угол j всегда откладывается от вектора тока I к вектору напряжения U. Положительный угол j откладывается против часовой стрелки, отрицательный – по часовой стрелке.

**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Расчет производится с использованием тех же методов, что и цепей постоянного тока (отличие заключается в использовании комплексных чисел).

Любому вектору A, расположенному на комплексной плоскости, однозначно соответствует комплексное число, которое может быть записано в трех формах: алгебраической, тригонометрической и показательной.

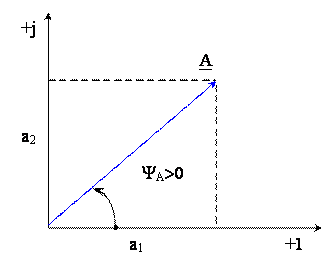
В электротехнике в отличие от [математики](https://online-matematika.ru/kurs) мнимую единицу обозначают j, так как буква i принята для обозначения мгновенного значения тока.

Алгебраическая форма записи комплексного числа:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-186.gif

где а1— проекция вектора на ось действительных чисел (+1,Re);

а2— проекция вектора на ось мнимых чисел (+j,Jm).



Тригонометрическая формула записи

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-188.gif

где А – длина вектора;

ΨA — угол наклона вектора к оси действительных чисел.

Показательная форма записи

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-189.gif

где А – модуль комплексного числа (соответствует действующему значению синусоидальной функции или длине вектора);

ΨA — аргумент комплексного числа (соответствует углу наклона вектора к оси действительных чисел или начальной фазе синусоидальной функции);

е – основание натурального логарифма е=2,718.

Если аргумент комплексного числа положительный, то угол откладывается в направлении движения часовой стрелки, если отрицательный – по часовой стрелке. Комплексные числа называют сопряженными, если их модули равны, а аргументы равны и противоположны по знаку

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-190.gif

**АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ**

При суммировании и вычитании комплексных чисел используют алгебраическую форму записи.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-75.gif

При выполнении действия суммируют отдельно действительные и мнимые части комплексного числа.

При умножении комплексных чисел можно использовать как алгебраическую, так и показательную формы записи

* https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-76.gif
* https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-77.gif

При умножении комплексных чисел в показательной форме модули перемножают, а аргументы складывают.

При делении комплексных чисел можно использовать как показательную так и алгебраическую формы записи

а)

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-78.gif

При делении комплексных чисел в показательной форме их модули делят, а аргументы вычитают.

б)

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-79.gif

При выполнении действия при алгебраической форме записи числитель и знаменатель умножают на сопряженное знаменателю комплексное число.

Этот прием позволяет избавиться от мнимой единицы в знаменателе. Полезно знать следующие соотношения:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-80.gif

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В состав простых цепей переменного тока обычно входят резистивные элементы

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-135.gif

катушки индуктивности

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-136.gif

конденсаторы

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-137.gif

и элементы, соединенные магнитной или емкостной связью с другими цепями.

Прежде чем рассмотреть общий случай, когда цепь содержит все перечисленные элементы, проведем анализ простейших цепей.

**АНАЛИЗ ЦЕПИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

В резистивных элементах электрическая энергия преобразуется в тепловую. Эти элементы характеризуются значением сопротивления R, которое называется активным. Все параметры электрической цепи, обусловленные наличием сопротивления в цепи переменного тока, называются активными. Например, активная составляющая тока и напряжения.

Сопротивление резистивного элемента в цепи переменного тока может отличаться от сопротивления этого элемента в цепи постоянного тока. Это различие обусловлено поверхностным эффектом и зависит от частоты. При частоте 50 Гц различие между значениями сопротивления можно не учитывать. Поверхностный эффект проявляется в том, что плотность тока у поверхности проводника всегда больше, чем во внутренних участках его сечения из-за различия индуктивных сопротивлений.

Если предположить, что цепь с резистором подключена на синусоидальное напряжение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-125.gif

то мгновенное значение можно найти по закону Ома:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-126.gif

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-127.gif

— амплитуда тока.

Из выражений мгновенных значений u и i следует, что в цепи с активным сопротивлением ток и напряжений совпадает по фазе.

В комплексной форме можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-128.gif https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-129.gif

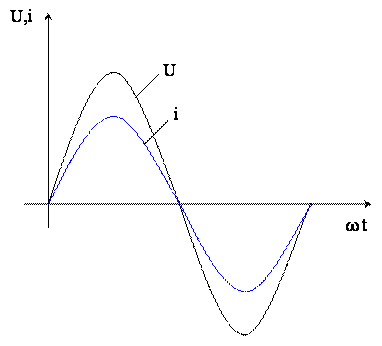
Закон Ома для действующих значений

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-130.gif

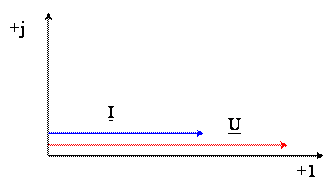
в комплексной форме

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-131.gif

Кривые мгновенных значений i и u при Ψi и Ψa=0



Векторная диаграмма имеет вид



Для упрощения векторная диаграмма может быть представлена в виде

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-134.gif

**АНАЛИЗ ЦЕПИ С КАТУШКОЙ ИНДУКТИВНОСТИ**

Главным параметром, характеризующим катушку, является индуктивность L. Единица измерения индуктивности — Генри (Гн). С энергетической точки зрения индуктивный элемент характеризуется преобразованием электрической энергии в энергию магнитного поля при нарастании тока и обратным преобразовании энергии магнитного поля в электрическую энергию при убывании тока.

Изменение тока в цепи с индуктивностью L вызывает возникновение ЭДС самоиндукции, которая по закону Ленца противодействует изменению тока. При увеличении ЭДС еL действует навстречу току, а при уменьшении – в направлении тока, противодействуя его уменьшению

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-81.gif

Если по цепи протекает ток

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-82.gif

то для ЭДС самоиндукции можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-83.gif

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-84.gif

— амплитуда ЭДС самоиндукции.

Произведение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-85.gif

называется индуктивным сопротивлением.

ЭДС самоиндукции отстает по фазе от тока на угол p/2. Чтобы в цепи протекал ток, требуется иметь на зажимах напряжение, уравновешивающее ЭДС самоиндукции, равное ей по значению и противоположное по знаку.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-86.gif

где

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-87.gif

— амплитуда напряжения.

В комплексной форме можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-88.gif

В цепи с катушкой индуктивности напряжение опережает ток по фазе на угол p/2.

Закон Ома для действующих значений

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-89.gif

Закон Ома в комплексной форме:

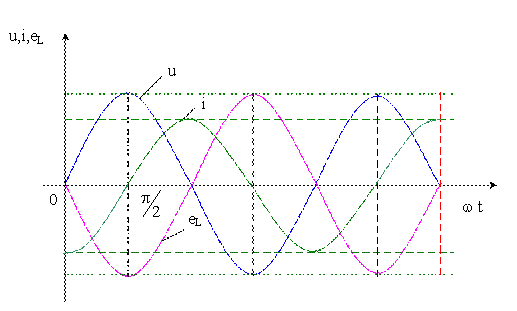
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-90.gif

где

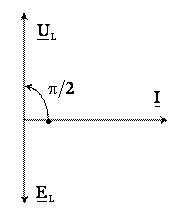
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-91.gif

— комплексное индуктивное сопротивление.

Временные диаграммы u, i, eL



Векторная диаграмма



**АНАЛИЗ ЦЕПИ С КОНДЕНСАТОРОМ**

Конденсатор это два изолированных друг от друга электрода, на которых при приложении напряжения UC накапливаются заряды q противоположного знака q=CUC, где C – электрическая емкость, измеряемая в фарадах.

С энергетической точки зрения емкостный элемент характеризуется преобразованием электрической энергии в энергию электрического поля при нарастании напряжения и обратным преобразованием – энергии электрического поля в электрическую энергию при уменьшении напряжения.

Мгновенный ток в цепи с конденсатором равен скорости изменения заряда конденсатора

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-94.gif

Если к зажимам конденсатора приложено синусоидальное напряжение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-95.gif

ток в цепи

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-96.gif

где

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-97.gif

— амплитуда тока.

В комплексной форме выражение для тока можно представить в виде

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-98.gif

Из приведенных выражений следует, что ток опережает напряжение по фазе на угол p/2.

Величина

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-99.gif

измеряемая в единицах сопротивления и обозначаемая XC, называется емкостным сопротивлением

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-100.gif

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте приложенного напряжения.

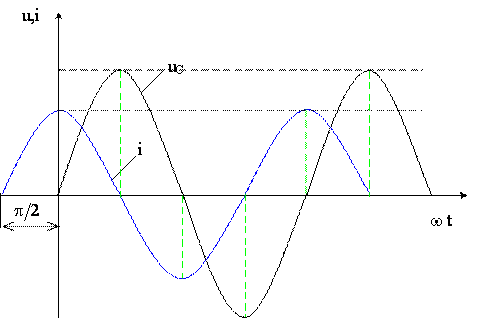
Закон Ома в комплексной форме:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-101.gif

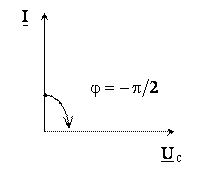
Закон Ома для действующих значений

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-102.gif

Временные диаграммы



Векторная диаграмма



**АНАЛИЗ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

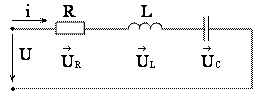
Если к участку с последовательным соединением элементов R, L, C приложено синусоидальное напряжение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-105.gif

то и ток в цепи синусоидальный

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-106.gif

При этом следует иметь в виду, что начальная фаза тока yi будет определяться соотношением R, L, C.



На каждом из элементов будет падать напряжение UR, UL, UC.

По второму закону Кирхгофа для мгновенных значений можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-108.gif

Для комплексных выражений можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-109.gif

Подставив в выражение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-110.gif

Получим закон Ома в комплексной форме:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-111.gif

где

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-112.gif

— комплексное сопротивление;

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-113.gif

— реактивное сопротивление.

Представим комплексное сопротивление Z в показательной форме:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-114.gif

где

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-115.gif

— модуль комплексного сопротивления, который называют полным сопротивлением;

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-116.gif

— аргумент комплексного сопротивления.

Для удобства запоминания формулы строят треугольник сопротивлений



В рассматриваемой цепи знак угла сдвига фаз j между током и напряжением определяется знаком реактивного сопротивления

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-118.gif

то есть соотношением между индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Если XL>XC, то нагрузка в цепи имеет активно-индуктивный характер, то есть ток по фазе отстает от напряжения на угол

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-119.gif

Если XL<XC, то нагрузка имеет активно-емкостный характер, то есть ток по фазе опережает напряжение.

В качестве примера рассмотрим пример построения векторной диаграммы для случая, когда в цепи XL>XC.

Начальную фазу тока примем равной нулю, то есть

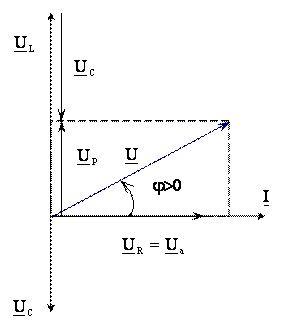
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-120.gif

Для напряжений по второму закону Кирхгофа можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-121.gif

Кроме того, при XL>XC будет соблюдаться условие UL>UC.

Векторная диаграмма будет иметь вид:



https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-123.gif

— реактивная составляющая напряжения U, приложенного к рассматриваемой цепи;

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-124.gif

— активная составляющая напряжения U.

Порядок построения векторной диаграммы:

- строим вектор тока I (при нулевой начальной фазе он расположен горизонтально);

- строим вектор падения напряжения UB на активном сопротивлении (он совпадает по направлению с вектором тока I, сдвиг фаз равен нулю);

- строим вектор падения напряжения UL на индуктивном сопротивлении (он опережает по фазе вектор тока на 90°);

- строим вектор падения напряжения UC на емкостном сопротивлении (конденсатора) (он отстает по фазе от вектора тока на 90°);

- складывая векторы UB, UL, UC, получаем вектор общего напряжения U, который опережает по фазе на угол j>0 вектор тока I, что указывает на активно-индуктивный характер нагрузки.

**МОЩНОСТЬ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

В цепи переменного тока различают три вида мощности.

1. Активная мощность Р, обусловленная наличием в цепи активного сопротивления R.

В активном сопротивлении происходит необратимое преобразование электрической энергии в другие виды, например, в резисторе происходит преобразование электрической энергии в тепловую энергию

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-158.gif

Единица измерения активной мощности – ВАТТ.

2. Реактивная мощность Q, обусловленная наличием реактивных элементов (катушек и конденсаторов)

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-159.gif

Единица измерения ВАр – ВОЛЬТ-АМПЕР реактивный.

На реактивных сопротивлениях ХL и ХC имеет место процесс колебания энергии от катушки индуктивности к конденсатору и наоборот, необратимых преобразований нет.

Для индуктивного элемента QL > 0, для емкостного элемента QC < 0.

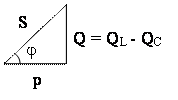
При последовательном соединении L и C суммарная реактивная мощность

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-160.gif

3. Кроме активной и реактивной мощностей, цепь синусоидального тока характеризируется полной мощностью S. Единица измерения ВА (ВОЛЬТ – АМПЕР).

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-161.gif

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-162.gif



Треугольник мощностей

**КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

Коэффициентом мощности называют отношение активной (полезной) мощности к полной мощности S.

cos j = P/S

Он показывает, какая часть электрической энергии, потребляемой из сети используется на выполнение полезной работы. При низком коэффициенте мощности машины переменного тока и трансформаторы, проектируемые на заданную полную мощность, оказываются недоиспользованными по активной мощности, что приводит к непроизводительным капитальным затратам.

Улучшение коэффициента мощности приемников электрической энергии способствует уменьшению потерь энергии в электрических сетях, обмотках трансформаторов и электрических генераторов. Для повышения экономичности систем электроснабжения предприятий в настоящее время устанавливается допустимое значение реактивной мощности и нормируется значение

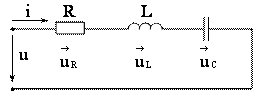
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-139.gif

Этот показатель определяется по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии.

**РЕЗОНАНС В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Резонансом в электрических цепях называется режим участка электрической цепи, содержащей индуктивный (ХL) и емкостной (ХС) элементы, при котором угол сдвига фаз j между напряжением и током равен нулю (j=0). Различают резонанс напряжений и резонанс токов.

В данном пособии будет рассмотрен только резонанс напряжений, который возникает на участке с последовательным соединением R,L,C. При этом индуктивное сопротивление равно емкостному, то есть XL = XC.



Угол сдвига фаз j определяется по формуле:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-201.gif

При j=0 XL = XC или можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-202.gif

Из последнего соотношения следует, что резонанс напряжения в цепи можно достигнуть следующими способами:

- изменением индуктивности L катушки;

- изменением электрической емкости С конденсатора;

- изменением частоты тока f питающей сети.

**ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ**

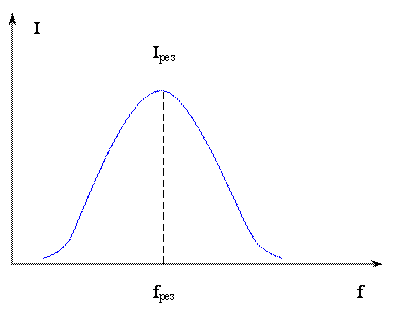
1. Полное сопротивление Z цепи при резонансе равно активному сопротивлению

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-214.gif

2. Результирующий ток в цепи имеет максимальное значение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-215.gif

Зависимость тока I от частоты f имеет вид:



3. Напряжение на участке с активным сопротивлением R равно напряжению питания U и совпадает с ним по фазе U=UR.

4. Активная мощность при резонансе имеет максимальное значение

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-217.gif

Можно предположить, что в цепи существует следующее соотношение между активным (R) и реактивными сопротивлениями (XL и XC)

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-218.gif

тогда можно записать

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-219.gif

То есть напряжения на участках с реактивными элементами (UL и UC) будут больше напряжения питания U.

Свойство усиления напряжения на реактивных элементах при резонансе напряжения используется в технике.

Коэффициент усиления напряжения равен добротности Q контура

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-220.gif

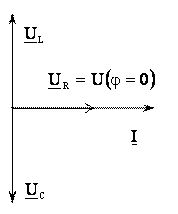
Однако повышенное напряжение на реактивных элементах может привести к пробою электрической изоляции проводов и представлять опасность для обслуживающего персонала.

Векторная диаграмма при резонансе напряжений строится с учетом особенностей режима резонанса

j=0

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-221.gif

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-222.gif

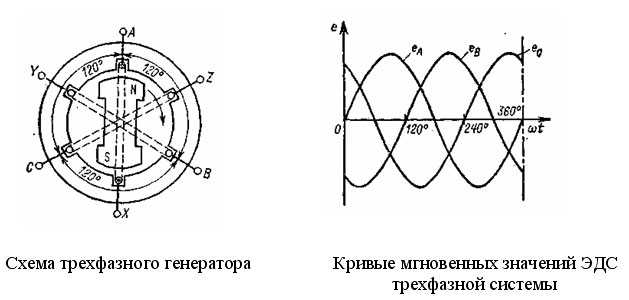


**ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ**

В технике широкое применение находит симметричная трехфазная система, которая представляет собой совокупность трех электрических цепей, в которых действуют ЭДС с одинаковыми частотами и амплитудами и сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120°.

Ее преимущества: меньший расход материала проводов при одинаковой с однофазной системой мощности; простота, надежность и экономичность генераторов и двигателей, возможность иметь напряжения двух разных значений (фазного 220 В и линейного 380 В).

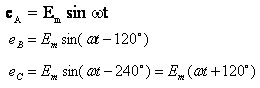
Трехфазную систему предложил, изготовил и применил на практике М.О. Доливо-Добровольский и с 1891 года она стала преобладающей. Простейший синхронный генератор, широко применяемый для получения трехфазного тока имеет на статоре три одинаковые обмотки, сдвинутые в пространстве на угол 120° относительно друг друга. При вращении ротора, выполненного в виде постоянного электромагнита, в обмотках статора наводятся три синусоидальные ЭДС (еА, еВ, еС) одинаковой частоты и с равными амплитудами, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120°. Отдельные обмотки трехфазного генератора называются фазами. Они обозначаются буквами А, В, С.



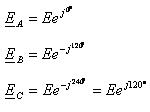
В трехфазной системе сумма мгновенных значений ЭДС фаз в любой момент времени равна нулю

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-206.gif

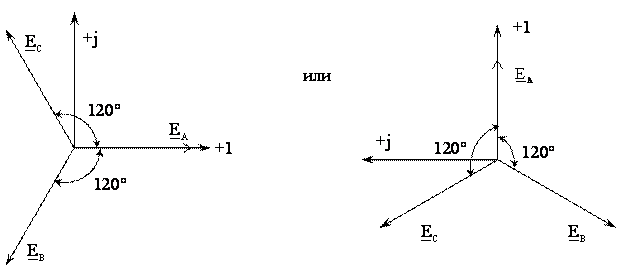
Если начальную фазу ЭДС еА принять равной нулю, то мгновенные значения ЭДС трехфазной системы можно представить в виде:



В комплексной форме действующие значения ЭДС могут быть представлены в виде:



На комплексной плоскости трехфазная система ЭДС может быть изображена в виде трех векторов, сдвинутых на 120° относительно друг друга.



Обмотки трехфазных генераторов соединяют обычно звездой (Y), так как такое соединение дает возможность получить два разных напряжения (линейное и фазное).

Трехфазные приемники электрической энергии могут соединяться звездой (Y) или треугольником (D).

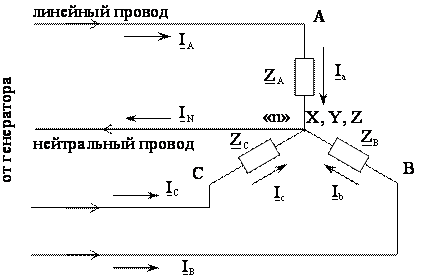
При соединении звездой концы фаз X,Y,Z приемника объединяют в общий узел «n», называемый нейтральной точкой. К началам фаз подводятся линейные провода, от начальной точки выводится нейтральный провод.

При соединении трехфазных генераторов и приемников наиболее распространенными являются схемы:

— звезда (генератор) – звезда (приемник) с нейтральным проводом (связанная четырехпроводная система);

— звезда – звезда без нейтрального провода.

Рассмотрим пример соединения трехфазного приемника звездой с нейтральным проводом.



ZA, ZB, ZC — комплексные сопротивления фаз.

Трехфазная система считается симметричной, если выполняется условие

ZA = ZB = ZC

IA, IB, IC — линейные токи, Ia, Ib, Ic -фазные токи. При соединении трехфазного приемника звездой линейный ток равен фазному IЛ = IФ.

Фазное напряжение UA (Uф) это напряжение между началом А фазы и концом Х фазы.

Линейное напряжение UAB (UЛ) это напряжение между началами двух фаз (фазы А и фазы В) UAB = UA — UB.

При соединении звездой линейное напряжение больше фазного

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-211.gif

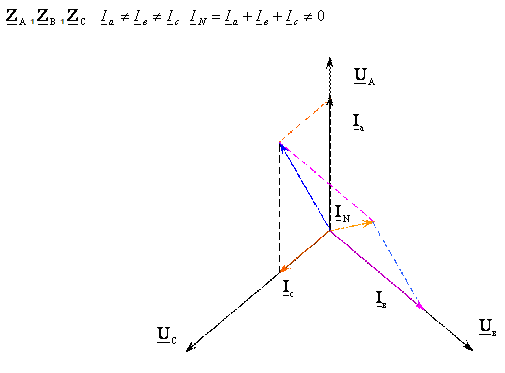
Нейтральный провод в четырехпроводной трехфазной системе соединяет нейтральный точки генератора и приемника. Это приводит к тому, что напряжения на каждой фазе приемника будут равны соответствующим напряжениям генератора. Таким образом, обеспечивается симметрия фазных напряжений несимметричного приемника.

Ток нейтрального провода. Он равен сумме токов трех фаз (для мгновенных значений или комплексных)

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-212.gif

При симметричной нагрузке фаз приемника ток в нейтральном проводе отсутствует и нейтрального провода не требуется. Примером трехфазного приемника с симметричной нагрузкой является трехфазный асинхронный двигатель.

На рисунке изображена векторная диаграмма для случая несимметричной активной нагрузки в фазах трехфазного приемника



В случае несимметричной нагрузки фаз и обрыве нейтрального провода, что является аварийной ситуацией, между нейтральными точками генератора и приемника возникает напряжение, называемое напряжением между нейтралями. Его появление приведет к тому, что нарушится симметрия напряжений фаз трехфазного приемника. На некоторых фазах приемника напряжения могут значительно превысить номинальные, что может привести к выходу из строя бытовых потребителей. Поэтому в нейтральный провод не включают ни плавкие предохранители, ни выключатели.

**МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ**

При симметричной нагрузке фаз активная мощность равна утроенной мощности одной фазы

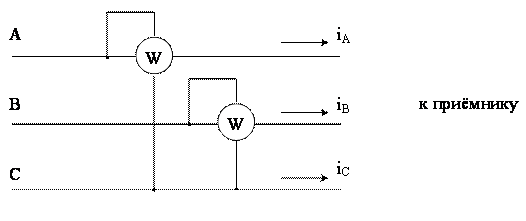
https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-154.gif

При несимметричной нагрузке фаз активная мощность равна сумме показаний ваттметров, включенных в каждую фазу при четырехпроводной системе.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-155.gif

В трехпроводной системе с несимметричной нагрузкой измерение мощности может быть произведено методом двух ваттметров

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-156.gif



**РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ**

Положительные направления токов в линейных проводах принято выбирать от генератора к приемнику, в нейтральном проводе – от приемника к генератору.

При симметричной нагрузке расчет токов сводится к расчету тока одной фазы.

При несимметричной нагрузке фаз токи рассчитываются отдельно для каждой фазы по закону Ома:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-185.gif https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-183.gif https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-184.gif

При этом следует правильно задать начальные фазы напряжений в каждой фазе трехфазного приемника.

**ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного (синусоидального) тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Генераторы на электростанциях вырабатывают электрическую энергию при напряжении порядка 20 кВ в связи с трудностями решения вопроса электрической изоляции в электрических машинах.

Передача электрической энергии на большие расстояния при таких относительно низких напряжениях экономически невыгодна из-за больших потерь в линии. Поэтому на электрических станциях устанавливают силовые трансформаторы, повышающие напряжение до 110 кВ и более.

У потребителей напряжение при помощи трансформаторов понижается несколькими ступенями:

на районных подстанциях до 35 (10) кВ;

на подстанциях предприятий до 10 (6) кВ;

на цеховых подстанциях и подстанциях жилых районов до 380/220 В.

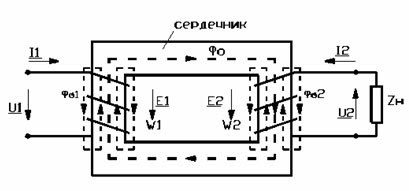
По числу фаз трансформаторы подразделяются на однофазные и трехфазные. Каждая фаза трансформатора имеет первичную обмотку, к которой энергия подводится от источника и вторичную обмотку, с которой энергия поступает к потребителю.

**ОДНОФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Однофазный трансформатор имеет замкнутый ферромагнитный сердечник, на который намотаны первичная и вторичная обмотки с числом витков W1 и W2.

Для уменьшения вихревых токов ферромагнитный сердечник набирается из отдельных пластин электротехнической трансформаторной стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

На схеме трансформатора приняты условно положительные направления всех величин, характеризующих электромагнитные процессы в трансформаторе, исходя из предпосылки, что первичная обмотка трансформатора является приемником электрической энергии, а вторичная обмотка является источником.



Работа трансформатора основана на законе электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток I1, который создает в сердечнике (магнитопроводе) переменный магнитный поток. Замыкаясь в сердечнике, этот поток сцепляется с первичной и вторичной обмотками и индуцирует в них ЭДС, пропорциональные числу витков W:

В первичной обмотке ЭДС самоиндукции

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-165.png

во вторичной обмотке ЭДС взаимоиндукции

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-166.png

При подключении нагрузки Zн к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС в обмотке потечет ток I2, а на выводах установится напряжение U2.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют обмоткой высшего напряжения (ВН). Обмотку, подключенную к сети меньшего напряжения, называют обмоткой низшего напряжения (НН).

Коэффициентом трансформации К трансформатора называют отношение ЭДС обмотки ВН (числа витков Wвн) к ЭДС обмотки НН (числа витков Wнн):

Коэффициент трансформации

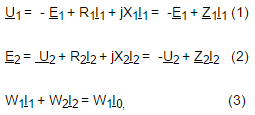
Трансформаторы обладают свойством обратимости, то есть один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего.

Трансформатор – это аппарат переменного тока и на постоянном токе не работает, так как протекающий по первичной обмотке постоянный ток будет создавать постоянный магнитный поток. В соответствии с законом электромагнитной индукции поток должен изменяться как по величине, так и по направлению.

В режиме нагрузки трансформатора первичный и вторичный токи I1, I2 кроме основного магнитного потока Фо, создают магнитные потоки рассеяния Фσ1 и Фσ2, влиянием которых обусловлено существование индуктивных сопротивлений первичной и вторичной обмоток трансформатора Х1 и Х2.

Активное и полное сопротивления первичной обмотки трансформатора обозначаются R1 и Z1, а вторичной -R2 и Z2.

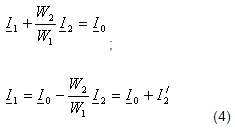
Работа трансформатора в общем случае описывается системой уравнений:



где I0 – ток холостого хода.

Уравнение (1) и (2) представляют собой уравнения равновесия ЭДС первичной и вторичной обмоток, уравнение (3) представляет собой уравнение равновесия намагничивающих сил (I⋅W) трансформатора. Намагничивающая (магнитодвижущая) сила это произведение тока на число витков обмотки.

Выполнив преобразования в уравнении (3) получим:



Из уравнения (4) следует, что ток I1 первичной обмотки трансформатора можно рассматривать состоящим из двух составляющих: одна составляющая I0 определяет, основной магнитный поток Ф0, а вторая составляющая

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-170.png

компенсирует размагничивающее действие тока I2 вторичной обмотки. Из сказанного следует, что магнитный поток в трансформаторе не зависит от тока нагрузки и пропорционален приложенному напряжению.

Если пренебречь током холостого хода I0 (составляет несколько процентов I1) трансформатора, протекающего по первичной обмотке (при разомкнутой вторичной обмотке), то можно считать токи, в обмотках трансформатора обратно пропорциональными числам витков.

Возможны следующие режимы работы трансформатора:

- режим холостого хода;

- режим короткого замыкания (аварийный режим и опыт короткого замыкания);

- режим нагрузки.

В режиме холостого хода трансформатор работает при разомкнутой вторичной обмотке.

При этом существуют следующие соотношения:

I2 = 0; I1 = I0 (ток холостого хода); U2 = Е2

Мощность холостого хода Р0, потребляемая трансформатором из сети, определяется в основном потерями в стали Рс сердечника.

P0≈Pc (составляет 1-2% номинальной мощности)

Потери в стали складываются из потерь на перемагничивание ферромагнитного материала сердечника и потерь на вихревые токи, которые наводятся в сердечнике в соответствии с законом электромагнитной индукции. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник изготавливают из тонких пластин (0,3-0,5 мм), изолированных друг от друга.

Опыт холостого хода трансформатора проводится для определения коэффициента трансформации К и мощности электрических потерь в стали сердечника.

Опыт короткого замыкания трансформатора проводится для определения мощности электрических потерь в обмотках трансформатора (потерь в меди Рм). При проведении опыта короткого замыкания вторичная обмотка трансформатора замыкается накоротко, при этом к первичной обмотке подводится пониженное напряжение U1К, составляющее 5-10% от номинального. Во время проведения опыта контролируют токи в обмотках трансформатора и прекращают опыт, когда токи в обмотках достигнут номинальных значений.

В паспортные данные трансформатора заносится ток холостого хода в процентах от номинального значения, мощность потерь в обмотках и напряжение в опыте короткого замыкания, выраженное в процентах от номинального.

Режимом нагрузки трансформатора называется такой режим его работы, когда вторичная обмотка подключена на сопротивление нагрузки Zн.

Мощность Р1, потребляемая трансформатором из сети в режиме нагрузки определяется по формуле:

Р1 = Р2 + ΣР = Р2 + Р0 + Рм,

где Р2 — мощность нагрузки;

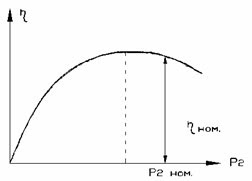
ΣР – суммарные потери трансформатора (в стали и меди).

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора

имеет максимальное значение при равенстве потерь в проводах обмоток и потерь в стали сердечника

Р0=Рм.



Трансформатор конструируется так, чтобы ηmax имел место при наиболее вероятной нагрузке составляющей (0,5 – 0,75) Р2 ном..

У работающего под нагрузкой трансформатора напряжение вторичной U2 отличается от напряжения холостого хода U20 на величину падения напряжения на полном сопротивлении его вторичной обмотки

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-173.png

которая называется изменением напряжения трансформатора

https://dprm.ru/wp-content/uploads/d-174.png

Для трансформаторов, выпускаемых промышленностью, величина ΔU составляет 6-8 % от U2 ном. (вторичного номинального напряжения). Полезно знать, что по напряжению короткого замыкания U1к, полученного в опыте короткого замыкания, можно судить об отклонении напряжения вторичной обмотки трансформатора от его номинального значения при номинальном токе (нагрузке).

Изменение напряжения в трансформаторе зависит не только от значений токов первичной и вторичной обмоток I1 и I2, но и от рода нагрузки (активной, индуктивной или емкостной).

Внешняя характеристика трансформатора это зависимость напряжения U2 вторичной обмотки от протекающего по ней тока I2, U2=f(I2).

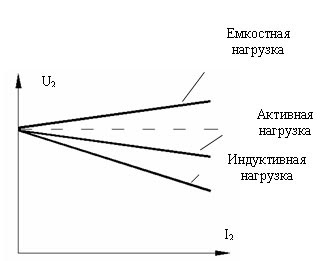


Рис. 13. Внешняя характеристика трансформатора

Векторную диаграмму трансформатора строят на основании уравнений равновесия ЭДС первичной и вторичной обмоток и уравнения равновесия намагничивающих сил трансформатора (уравнения 1, 2, 3).

**ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Трансформирование в трехфазной цепи может быть осуществлено либо группой, состоящей из трех однофазных трансформаторов, либо одним трехфазным трансформатором.

В обоих случаях обмотки фаз высшего и низшего напряжения могут соединяться звездой или треугольником. Если обе обмотки соединены звездой, то такое соединение обозначается Y/Y.

В промышленности нашли применение трехстержневые трансформаторы, которые содержат ярмо и три стержня, на каждом из которых размещены первичная и вторичная обмотки. Обмотки низшего напряжения размещаются ближе к стержню, а обмотки высшего напряжения размещаются поверх обмотки низшего напряжения.

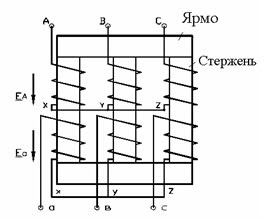
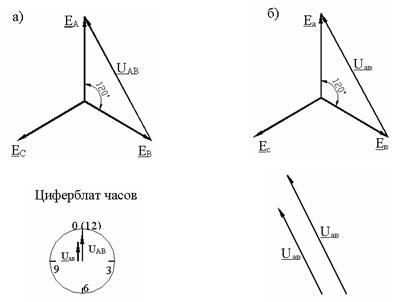


Рис. 14. Схема трехстержневого трехфазного трансформатора

Группа соединения обмоток трехфазного трансформатора определяется углом сдвига фаз между линейными напряжениями обмотки высшего и низшего напряжения (UАВ и Uав). Этот угол записывается в соответствии с расположением стрелок часов. Если вектор линейного напряжения UАВ первичной обмотки (ВН) считать минутной стрелкой и направить ее к цифре 12, а вектор линейного напряжения Uав вторичной обмотки (НН) считать часовой стрелкой, то цифра на циферблате часов, на которую будет указывать часовая стрелка, будет соответствовать группе соединения обмоток.

Рассмотрим в качестве примера схему соединения обмоток трансформатора Y/Y-0 (нулевая группа). Для этого изобразим векторные диаграммы ЭДС и напряжения первичной (а) и вторичной (б) обмоток.



Группа соединения зависит от направления намотки обмотки, маркировки выводов обмоток и схемы соединения обмоток. Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединения.

Выпускаются трансформаторы следующих групп соединений Y/Y-0;

Y/Yн-0 (звезда – звезда с выведенной нейтралью);

Y/Δ-11 (звезда – треугольник, группа одиннадцать).

В целях повышения надежности и экономичности работы систем электроснабжения несколько трансформаторов соединяют параллельно, при этом должны соблюдаться следующие условия:

равенство коэффициентов трансформации;

принадлежность трансформаторов к одной группе соединений;

равенство напряжений короткого замыкания (расхождение не более 10 %).

**МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Машина постоянного тока обладает свойством обратимости, то есть может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Она состоит из неподвижного статора и вращающегося якоря (в машинах переменного тока вращающая часть – ротор). Статор состоит из станины, главных и дополнительных полюсов, подшипниковых щитов и траверсы со щетками.

Станина имеет кольцевую форму, изготовляется из стального литья и выполняет функцию магнитопровода.

Главные полюсы, выполненные из ферромагнитного материала, служат для создания постоянного во времени и неподвижного в пространстве магнитного поля, они имеют специальную обмотку, называемую обмоткой возбуждения.

По этой обмотке пропускается постоянный ток (ток возбуждения). В машинах малой мощности для создания поля могут использоваться постоянные магниты.

Дополнительные полюсы устанавливаются между главными и служат для улучшения условий коммутации.

Коммутация – это процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с этим явления.

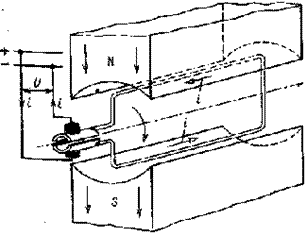
При плохой коммутации появляется значительное искрение под щетками, что приводит к обгоранию коллектора.

Подшипниковые щиты закрывают статор с торцов. В них впрессовываются подшипники и укрепляется щеточная траверса со щетками, изготовленными из графита или смеси графита с медью.

Якорь состоит из сердечника, обмотки и коллектора. Сердечник набран из листов электротехнической стали. В пазы сердечника укладывается медная обмотка, состоящая из последовательно и параллельно соединенных секций.

Концы секций припаивают к пластинам коллектора, что образует замкнутую обмотку якоря. Коллектор набран из медных пластин клинообразной формы, изолированных друг от друга и корпуса и образующих в сборе цилиндр, который крепится на валу якоря.

На рисунке 15 изображена схема машины постоянного тока, работающей в режиме двигателя, на которой (для упрощения) обмотка якоря изображена в виде одной секции (рамки), концы которой припаяны к двум коллекторным пластинам, на которых сверху и снизу установлены щетки.

Таким образом, напряжение питания U подается на обмотку якоря (секция) через скользящий контакт, который образует щетка и коллекторная пластина. По мере износа щетка поджимается к коллекторной пластине с помощью пружины.  
  
Рис. 15. Конструктивная схема двигателя постоянного тока

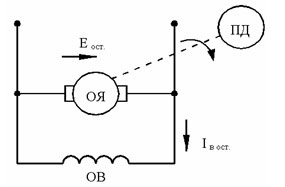
У машин постоянного тока существуют различные схемы включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря. По этому признаку они делятся на:

- машины параллельного возбуждения, у которых обмотка возбуждения (ОВ) включена параллельно обмотке якоря (ОЯ);

- машины последовательного возбуждения (последовательное включение ОВ и ОЯ);

- машины смешанного возбуждения (одна часть ОВ включается параллельно ОЯ, другая – последовательно).

- машины независимого возбуждения (ОВ подключена к независимому источнику питания).

  
Каждая из перечисленных схем включения ОВ и ОЯ имеет свои свойства.

**ПРИНЦИП САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Магнитная система генератора, будучи однажды намагниченной, сохраняет длительное время небольшой магнитный поток остаточного магнетизма сердечников полюсов и станины Фост. (2-3 % номинального).

При вращении якоря генератора с помощью приводного двигателя ПД (см. рис. 16) в поле остаточного потока Фост., в обмотке якоря ОЯ наводится небольшая синусоидная ЭДС Еост., которая выпрямляется с помощью щеточно-коллекторного узла, являющегося механическим преобразователем рода тока.

Пульсации ЭДС после выпрямления намного ослабляются при увеличении числа витков в обмотке якоря и увеличении числа пластин в коллекторе.

Под действием остаточной ЭДС в обмотке возбуждения возникает небольшой ток возбуждения Iв ост.

При соответствующем направлении он увеличивает остаточный магнитный поток Фост, что вызовет увеличение ЭДС генератора и тока возбуждения. Это процесс происходит лавинообразно до тех пор, пока не будет ограничен насыщением магнитной цепи машины.

**УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА**

Условия самовозбуждения генератора:

Наличие остаточной намагниченности;

Совпадение по направлению остаточного магнитного потока и поля, создаваемого обмоткой возбуждения;

Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

ЭДС обмотки якоря прямо пропорциональна частоте вращения якоря (n) и магнитному потоку Ф главных полюсов https://dprm.ru/wp-content/uploads/samovozbuzhdenij%D0%B5-230.gif. При работе генератора с нагрузкой, когда по обмотке якоря течет ток, возникает магнитное поле якоря, которое накладывается на поле полюсов.

Явление воздействия магнитного поля, создаваемого током якоря, на магнитное поле главных полюсов машины называется реакцией якоря.

В современных машинах постоянного тока реакция якоря всегда действует на основное поля размагничивающим образом, уменьшая его.

На практике находят применение следующие рабочие характеристики генераторов постоянного тока:

а) характеристика холостого хода – зависимость напряжения холостого хода U0 от тока возбуждения IВ https://dprm.ru/wp-content/uploads/samovozbuzhdenij%D0%B5-231.gifпри I = 0, n = const;

б) внешняя характеристика – зависимость напряжения U на зажимах якоря от тока нагрузки https://dprm.ru/wp-content/uploads/samovozbuzhdenij%D0%B5-232.gifпри n = const; RВ = const (сопротивление обмотки возбуждения)

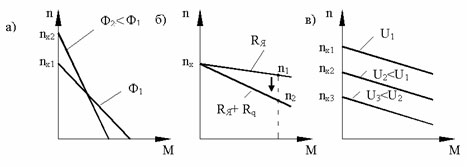
в) регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения IВ от тока нагрузки I https://dprm.ru/wp-content/uploads/samovozbuzhdenij%D0%B5-233.gif при U = const; n = const;

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Двигатель работает на принципе выталкивания проводника с током из магнитного поля.

Взаимодействие тока и магнитного поля создает силу F, направление которой определяется правилом левой руки.

Правило левой руки формулируется так: левую руку располагают так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, вытянутые пальцы показывали направление тока в проводнике обмотки якоря, а отогнутый палец укажет направление силы. (см. рис.17).

  
Рис. 17 – Возникающая пара сил создает вращающий момент МЭМ

Уравнение электромагнитного момента двигателя:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/dvigatel-postojannogo-toka-img235.gif  
где Iя – ток якоря;

Ф – магнитный поток одного полюса;

См – коэффициент момента.

Уравнение электрического состояния цепи якоря

https://dprm.ru/wp-content/uploads/dvigatel-postojannogo-toka-img236.gif  
где U – питающее напряжение двигателя;

Rя – сопротивление обмотки якоря;

Епр – противо-ЭДС

https://dprm.ru/wp-content/uploads/dvigatel-postojannogo-toka-img237.gif  
где n – частота вращения якоря;

СЕ – коэффициент ЭДС.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока это зависимость частоты вращения n от момента М на валу, то есть n=f(М) при U=const, Iв=const.

Уравнение механической характеристики двигателя параллельного возбуждения имеет вид:

n=nx–вМ,

где  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/dvigatel-postojannogo-toka-img238.gif

— частота вращения при холостом ходе;

https://dprm.ru/wp-content/uploads/dvigatel-postojannogo-toka-img239.gif

— угловой коэффициент.

Механическая характеристика представляет собой прямую линию с небольшим углом наклона.

Такие характеристики называют жесткими.

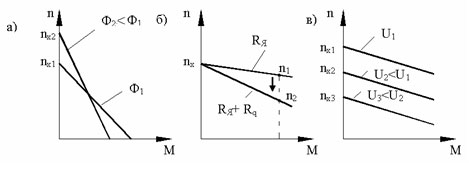
**СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ**

Частоту вращения двигателя можно регулировать следующими способами:

Изменением магнитного потока главных полюсов Ф (Рис.18, а).

Изменением сопротивления цепи якоря Rя за счет дополнительного сопротивления (частота вращения уменьшается только вниз от номинальной) (Рис.18, б).

Данный способ не экономичен из-за больших тепловых потерь в реостате.

Изменением подводимого к цепи якоря напряжения U (Рис.18, в).  
  
Рис. 18 – Способы регулирования частоты вращения

При этом якорь двигателя должен быть запитан от отдельного источника.

**СПОСОБЫ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ В ХОД**

Наибольшего значения ток якоря IЯ достигает при пуске двигателя в ход.

Пусковой ток якоря определяется по формуле, полученной из уравнения электрического состояния цепи якоря при Епр=0:  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-dvigatelja-img241.gif

В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен (n=0) и в его обмотке противо-ЭДС (Епр= 0) не индуцируется, что приводит при небольшом сопротивлении обмотки якоря к недопустимо большому пусковому току, в 10-20 раз превышающему номинальное значение.

Такой большой пусковой ток опасен для двигателя по следующим причинам:

- в двигателе может возникнуть круговой огонь на коллекторе;

- большой пусковой момент оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить;

- большой пусковой ток вызывает большое падение напряжения в сети.

Поэтому прямой (безреостатный) пуск двигателя, когда цепь якоря сразу включается на полное напряжение, обычно применяют для двигателей малой мощности (0,7-1,0 кВт).

Кроме прямого пуска возможен пуск двигателя с включением пускового реостата в цепь якоря и пуск при пониженном напряжении.

При пуске двигателя с включением пускового реостата Rпуск пусковой ток определяется по формуле:

https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-dvigatelja-img242.gif  
Сопротивление пускового реостата выбирают такой величины, чтобы в начальный момент пуска (при Епр=0), пусковой ток превышал номинальный не более, чем в 2-3 раза.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-dvigatelja-img243.gif

По мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата выводится.

Для пуска двигателей большой мощности применять пусковые реостаты нецелесообразно из-за больших потерь энергии.

Поэтому в двигателях большой мощности применяют безреостатный пуск двигателя путем понижения напряжения.

**АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

Асинхронные машины обладают свойством обратимости. Однако асинхронные генераторы практически не применяются, так как характеристики хуже, чем у синхронных генераторов.

Широкое применение имеют трехфазные асинхронные двигатели.

**Асинхронный двигатель**

Асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора, разделенных между собой воздушным зазором.

Статор состоит из цилиндрического литого корпуса, сердечника и трехфазной обмотки.

Сердечник собирается из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга и запрессовывается в корпусе статора. На внутренней поверхности сердечника вырублены пазы, в которые укладывается трехфазная обмотка статора.

Обмотка подключена к трехфазной сети и представляет собой систему проводников, сдвинутых относительно друг друга в пространстве вдоль окружности статора на 120о. Обмотки статора могут соединяться звездой или треугольником.

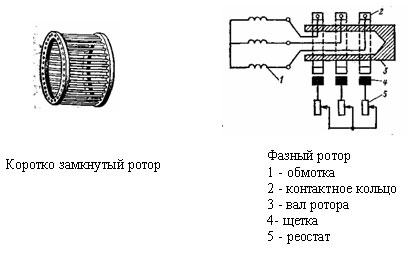
Схема соединения обмоток статора зависит от расчетного напряжения двигателей и номинального напряжения двигателей и номинального напряжения сети.

Ротор состоит из стального вала, на который напрессован сердечник, выполненный из отдельных листов электротехнической стали с пазами.

Обмотка ротора бывает двух типов – короткозамкнутая и фазная. Наибольшее распространение имеют двигатели с короткозамкнутым ротором (ротор с беличьей клеткой).

Токопроводящая часть такого ротора состоит из медных или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко с торцов (см. рисунок). Обычно «беличья клетка» формируется путем заливки пазов ротора расплавленным алюминием.

Фазный ротор имеет три обмотки, соединенные в звезду. Выводы обмоток присоединены к кольцам, закрепленным на валу и изолированным друг от друга и от вала (см. рис.19)

  
Рис. 19

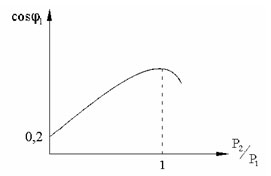
Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося фазного ротора на каждое контактное кольцо накладывают подпружиненные щетки, расположенные в щеткодержателях.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами.

**Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей**

Из выражения, по которому можно рассчитать частоту вращения ротора  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/img257.gif  
следует, что n2 можно регулировать изменением какой либо из трех величин: скольжения (S), частоты тока в обмотке статора или числа пар полюсов (р) в обмотке статора.

**Коэффициент мощности асинхронных двигателей**

Кроме активной мощности Р1 двигатель потребляет реактивную мощность Q1, в основном необходимую для образования вращающегося магнитного поля. Коэффициент мощности определяется по формуле:  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/img258.gif  
  
Рис.21. Зависимость коэффициента мощности от загрузки двигателя

При холостом ходе cos φ1 имеет малое значение (не превышает 0,2), так как активная мощность расходуется только на относительно небольшие потери в статоре и небольшие механические потери, а реактивная мощность имеет практически постоянное значение.

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В основе работы асинхронного двигателя лежит вращающееся магнитное поле, создаваемое трехфазными токами в обмотке статора и воздействии этого поля на токи, протекающие в обмотке ротора.

При протекании трехфазного тока по трехфазной обмотке статора возникает вращающееся магнитное поле (частота вращения n1), которое пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции.

В замкнутой обмотке ротора возникают токи. В результате взаимодействия этих токов с вращающимся полем на роторе возникает электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки.

Совокупность этих сил создает электромагнитный вращающийся момент, приводящий ротор во вращение с частотой n2 < n1 в сторону вращения поля статора.

У асинхронного двигателя ротор отстает от поля статора, так как только при этом условии в проводниках ротора будет наводиться ЭДС, потечет ток и возникнет вращающий момент.

Двигатель называется асинхронным потому, что частота вращения ротора n2 не равна частоте вращения поля n1 статора, то есть n2 ≠ n1 .

Вращающий момент М асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения сети.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img244.gif  
Различие частоты вращения магнитного поля статора n1 и частоты вращения ротора n2 определяется величиной, называемой скольжением S, которое выражают в долях единицы либо в процентах.

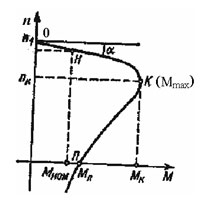
https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img245.gif  
У асинхронных двигателей скольжение изменяется в пределах от 0 (при идеальном холостом ходе) до 1 (при пуске). Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называют номинальным скольжением Sном. Для асинхронных двигателей общего назначения Sном=1÷8%.

Большее значение скольжения соответствует двигателям большей мощности.

Частота вращения ротора n2 при известном скольжении определяется по формуле:  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img246.gif  
об/мин.  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img247.gif  
где f – частота тока в сети;

р – число пар полюсов обмотки статора.  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img248.gif  
Как следует из принципа действия асинхронного двигателя, обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора. Энергия из обмотки статора передается в обмотку ротора магнитным путем.

Механическая характеристика асинхронного двигателя это зависимость частоты вращения ротора n2 от момента М, развиваемого двигателем в установившемся режиме работы.  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img249.gif  
Разновидностью механической характеристики является зависимость момента на валу двигателя от скольжения.

https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img250.gif  
  
Рис.20. Механическая характеристика асинхронного двигателя

В зоне от М=0 до М≈0,9Мmax зависимость n2=f(М) близка к прямой линии. Участок ОН – рабочий участок. Участок НК соответствует механической перегрузке двигателя.

Работа с моментом М > Мном возможна лишь кратковременно из-за перегрева машины. Участок ОК соответствует статически устойчивой работе двигателя. На этом участке обеспечивается саморегулирование. Саморегулирование — это свойство автоматического установления равновесия между моментом сопротивления, создаваемым рабочим механизмом, и моментом двигателя.

Участок КП соответствует неустойчивой работе.

**Механическая характеристика**

https://dprm.ru/wp-content/uploads/asinhr-dvig-img252.gif  
асинхронного двигателя является жесткой, так как в пределах от идеального холостого хода до номинальной нагрузки (nном ,Мном) частота вращения падает не более чем на 10 %.

**ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В первый момент пуска частота вращения ротора n2 равна нулю и скольжение  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-v-hod-img253.gif  
При пуске двигателя должны выполняться условия:

- вращающий момент должен быть больше момента сопротивления, создаваемого рабочим механизмом;

- пусковой ток Iпуск не должен иметь большого значения (должно выполняться условие Iпуск ≤ (5÷7)Iном).

В зависимости от конструкции ротора, мощности двигателя и характера нагрузки применяются различные способы пуска:

- прямой пуск;

- пуск с использованием пусковых реостатов, включаемых в цепь обмотки фазного ротора;

- пуск при пониженном напряжении.

При прямом пуске обмотка статора двигателя сразу включается на полное напряжение сети. При этом пусковые токи в статоре и роторе имеют максимальные значения. По мере разгона ротора скольжение уменьшается и токи уменьшаются.

Бросок тока при пуске может вызвать значительное падение напряжения в сети, что может привести к остановке рядом работающих двигателей, так как момент, развиваемый ими прямо пропорционален квадрату напряжения сети  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-v-hod-img254.gif  
Данный способ пуска получил наибольшее применение для двигателей мощностью до 50 кВт.

Пуск с включением пускового реостата в цепь фазного ротора обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током. Однако этот способ пуска связан со значительными потерями мощности в пусковом реостате.

При пуске двигателя при пониженном напряжении существуют следующие способы понижения напряжения:

- переключением обмотки статора с треугольника на звезду (фазное напряжение на статоре понижается в 31/2 раз);

- включением в цепь обмотки статора реактивных катушек (дросселей);

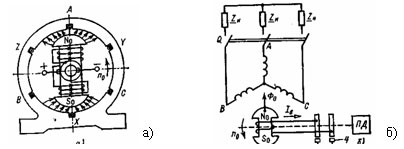
- подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор.

Пуск двигателя при пониженном напряжении связан с понижением пускового момента  
https://dprm.ru/wp-content/uploads/pusk-v-hod-img256.gif  
что является существенным недостатком данного способа пуска.

**СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

Синхронная машина отличается от устройства асинхронной машины конструкцией ротора и тем, что частоты вращения магнитного поля статора n0 и ротора n2 у синхронной машины одинаковы, то есть n0=n2.

Из-за равенства частот вращения n0 и n2 машина называется синхронной. Синхронные машины обладают свойством обратимости, то есть могут работать как генератором, так и двигателем.

Рис.22. Конструкция и электрическая схема синхронной машины с явно выраженными полюсами

В настоящее время большинство электрических станций оснащено трехфазными синхронными генераторами, которые приводятся во вращение паровыми или гидравлическими турбинами, а также двигателями внутреннего сгорания.

Синхронные двигатели применяются там, где требуется обеспечение постоянства частоты вращения, например, на компрессорных и нефтеперекачивающих станциях.

Синхронная машина состоит из неподвижного статора, аналогичного статору асинхронного двигателя и ротора, вращающегося внутри статора. Ротор представляет собой электромагнит постоянного тока, он имеет обмотку возбуждения, запитанную постоянным током от выпрямителя или от генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

Одним из способов передачи энергии на обмотку возбуждения является использование контактных колец укрепленных на роторе и щеток, а также установка на роторе генератора постоянного тока (возбудителя). Роторы синхронных машин бывают с явно выраженными и неявно выраженными полюсами.

Роторы с явно выраженными полюсами применяют в гидрогенераторах (тихоходных машинах). Для быстроходных машин (турбогенераторов) используют ротор с неявно выраженными полюсами.

В данном случае явно полюсная конструкция ротора неприменима из-за возможного разрушения в связи с большими центробежными силами.

На рисунке 22, а изображена схема синхронной машины с явно выраженными полюсами. На статоре расположена трехфазная обмотка, к которой в режиме двигателя подводится трехфазное напряжение, а в режиме генератора подключается трехфазный приемник.

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

При вращении ротора синхронного генератора от приводного двигателя ПД (см. рис.22,б) с постоянной частотой n0, постоянное магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения, пересекая проводники фазных обмоток статора наводит в них синусоидальную ЭДС, зависящую от синхронной частоты вращения n0 и максимального магнитного потока полюса ротора Фоm.  
Формула зависимости ЭДС  
Катушки отдельных фаз статора сдвинуты в пространстве на электрический угол, равный 120° и их ЭДС образуют симметричную трехфазную систему.

Изменяя ток возбуждения Iв можно регулировать магнитный поток и ЭДС генератора. Зависимость Е0=f(Iв) называется характеристикой холостого хода генератора (нелинейная). Если к обмотке статора подключить нагрузку, то в обмотках статора потечет трехфазный ток.

В зависимости от вида нагрузки (активной, индуктивной или емкостной) ток может либо совпадать по фазе с ЭДС, либо сдвинут на некоторый угол.

При протекании трехфазного тока по обмоткам статора образуется вращающееся магнитное поле. При этом магнитные поля ротора и статора вращаются с одной и той же частотой n0. они взаимодействуют между собой и образуют результирующее вращающееся магнитное поле машины.

Реакция якоря – это воздействие поля статора (якоря) на магнитное поле машины, создаваемое обмоткой возбуждения на роторе. Характер реакции якоря зависит от вида нагрузки.

При чисто активной нагрузке имеет место поперечная реакция якоря (векторы магнитных полей обмоток ротора и статора расположены под углом 90°). При чисто индуктивной нагрузке реакция якоря продольная размагничивающая (векторы магнитных полей направлены навстречу друг другу и результирующее магнитное поле уменьшается).

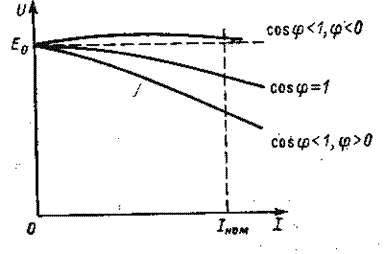


Рис.23. Внешние характеристики синхронного двигателя при различных видах нагрузки

При чисто емкостной нагрузке реакция якоря продольная намагничивающая (векторы магнитных полей имеют одинаковое направление и результирующее магнитное поле увеличивается).

Кроме характеристики холостого хода Е0=f(Iв), синхронный генератор характеризуется внешней и регулировочной характеристиками, вид которых зависит от характера реакции якоря.

Внешняя характеристика это зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки U=f(I).

Регулировочная характеристика это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки Iв=f(I), при U=const.

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Принцип действия синхронного двигателя основан на явлении притяжения разноименных полюсов двух магнитных полей — вращающегося поля статора и постоянного поля ротора. Вращающееся магнитное поле статора создается при питании обмоток статора от трехфазной сети.

Постоянное поле ротора создается постоянным током возбуждения, протекающим по обмотке возбуждения ротора. На рис.24,а полюсы N и S вращающегося магнитного поля статора показаны штриховкой. Они вращаются против часовой стрелки с частотой n0.

При вращении поля статора с частотой n0, полюсы ротора N0 и S0  будут вращаться также с частотой n0 (произойдет «сцепление» этих полюсов с разноименными полюсами статора N и S).

В режиме идеального холостого хода (момент сопротивления отсутствует Мс=0) оси магнитных полей статора и ротора совпадают. При этом на полюсы ротора действуют радиальные силы F1 и F2, которые не создают вращающего момента.

Если к валу машины приложить механическую нагрузку, которая создает момент сопротивления Мс, ось ротора и его полюсов S0, N0 сместится в сторону отставания на угол q, который называется углом нагрузки (см.рис.24 ,б).

В данном случае вращающееся поле статора «ведет» за собой поле ротора и сам ротор. Тангенциальные составляющие Ft сил F создают вращающий момент М двигателя, который преодолевает момент сопротивления (М = Мс).

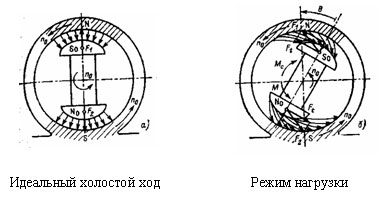


Рис. 24. Идеальный холостой ход и режим нагрузки

Полезно знать, что момент двигателя пропорционален напряжению сети (М º Uc); то есть синхронный двигатель, в отличие от синхронного двигателя, в меньшей степени зависит от колебаний питающего напряжения.

При неизменной величине напряжения сети максимальный момент двигателя зависит от тока возбуждения.

При увеличении момента сопротивления Мс угол нагрузки q увеличивается до некоторого предела, когда Мс>Mmax, то угол нагрузки q станет больше 90°, режим двигателя будет неустойчивым. Вращающий момент двигателя начнет уменьшаться, ротор будет тормозиться, двигатель выйдет из синхронизма и может остановиться.

Выпадение машины из синхронизма недопустимое явление. Синхронные машины проектируют так, чтобы при номинальном режиме угол нагрузки не превышал 30°, а запас по моменту и активной мощности был не менее 1,65.  
Механическая характеристика синхронного двигателя n=f(M) представлена на рис. 25

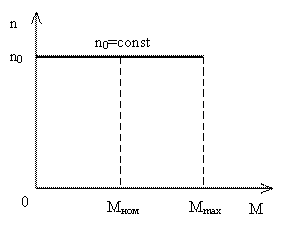


Рис. 25 Механическая характеристика синхронного двигателя

Синхронный двигатель позволяет регулировать реактивную мощность Q, потребляемую из сети, и улучшать коэффициент мощности cos j сети. При этом двигатель должен работать в режиме перевозбуждения (Iв>Iвном).

Существуют специальные машины (синхронные компенсаторы), предназначенные для выработки реактивной мощности, которая отдается в сеть и потребляется другими потребителями, например, асинхронными двигателями. Тем самым исключается необходимость передачи реактивной мощности по сети на большие расстояния от электрической станции и сокращаются потери мощности в сети, что повышает эффективность системы электроснабжения.

Синхронные компенсаторы имеют облегченную конструкцию, меньшие размеры и массу, так как работают вхолостую и загружены только реактивным током.

**ПУСК В ХОД СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**Особенности пуска в ход синхронного двигателя**

В последние годы получил широкое распространение асинхронный пуск, когда ротор синхронного двигателя, кроме обмотки возбуждения, снабжается специальной пусковой короткозамкнутой обмоткой типа беличьей клетки асинхронного двигателя.

При этом способе пуска, вначале двигатель начинает работать как асинхронный (обмотка возбуждения синхронного двигателя замыкается на пусковой реостат).

Когда, при разгоне, частота вращения ротора достигает 95% частоты вращения поля статора n0, пусковой реостат отключают, а обмотку возбуждения ротора включают на постоянное напряжение сети и двигатель втягивается в синхронизм.