

Дисциплина:
Электротехника и электроника

Лектор: **Сидиков В.Т.**
Кандидат физ.-мат.наук

АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ:

Лекции, практические задания,
лабораторные работы

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА:

1. Расчетно-графическое задание.
2. Подготовка к выполнению и защите лабораторных работ.
3. Самостоятельное изучение отдельных разделов курса.

-
1. Новожилов, О. П. Электротехника и электроника: учебник / О. П. Новожилов. – М.: Гардарики, 2008. – 653 с.
 2. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 1 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 270 с.
 3. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.

История электротехники

-
- 3000 г. до н.э. Античность, Средневековье, Возрождение. Люди узнали, что есть электрические заряды, что они бывают разных знаков, что они убегают по металлу, а вызываются потиранием неметаллического предмета шерстью.
- 1600 г. н.э. Введено понятие электричества
- 1650 г. Создана первая электростатическая машина – первый источник постоянного тока
- 1700 г.
- 1745 г. Открыт конденсатор и первый прибор для оценки тока
- 1785 г. Закон Кулона
- Опыты Гальвани, открытие действия тока на живые организмы
- 1799 г. Создание первого стабильного источника напряжения (электрохимический источник), открытие: ток течет только в замкнутой цепи (Вольта)
- 1800 г.

Становление основ электротехники

- 1820 г. Найдена связь между током и магнитным полем (Эрстед), выведен закон действия поля на постоянный ток (з-н Био-Савара-Лапласа)
- 1826 г. З-н Ампера, з-н Ома для резистора
- 1831 г. З-ны Ома в дифференциальной форме для всех пассивных элементов
Определение основных понятий: тока, напряжения;
создание точных измерительных приборов
- 1841 г. З-н Джоуля-Ленца
- 1847 г. З-ны Кирхгофа
- 1861-1864 г. Теория электромагнетизма Максвелла
- 1870 г. Выделение электротехники в самостоятельную науку
- 1900 г. Электрификация, развитие электромеханики



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА - это

область науки и техники,
использующая электрические и
магнитные явления в практических
целях

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которой могут быть описаны с помощью понятий тока и напряжения.

Источник – устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в электрическую энергию.

Приемник – устройство, в котором электрическая энергия преобразуется в какой-либо другой вид энергии.

Электрический ток – упорядоченное движение электрических зарядов.

Напряжение – разность электрических потенциалов на некотором участке электрической цепи между крайними точками этого участка.

ЭДС – результат преобразования какой-либо энергии в электрическую с разделением зарядов разных знаков под действием сторонних сил.

Схема замещения – графическое изображение, состоящее из условных изображений элементов, показывающее соединение этих элементов.

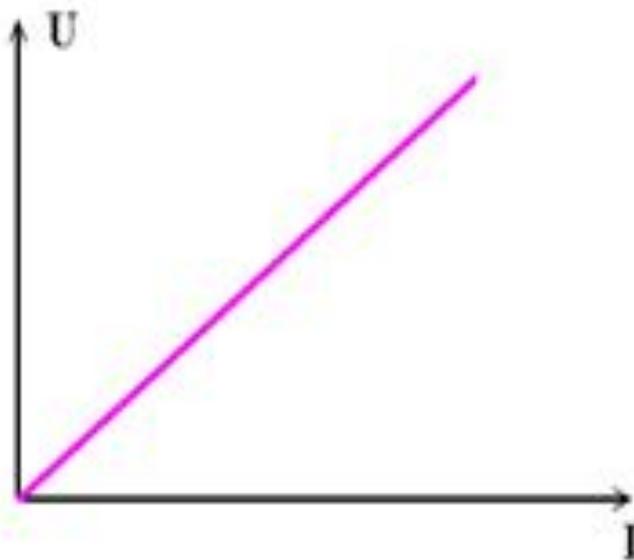
№



ВАХ (вольт-амперная характеристика) – основная характеристика любого элемента

1. Резистор (активный приемник)

Резистор – элемент, характеризующий необратимое преобразование электрической энергии (потери на нагрев, излучение, механическую работу и т.п.)

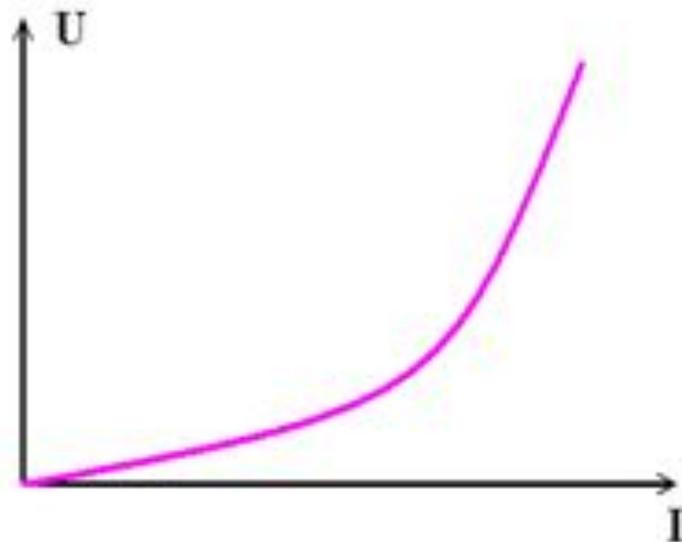


Резистор характеризуется электрическим сопротивлением (проводимостью).

ВАХ резистора описывается законом Ома

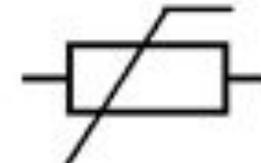
- **Нелинейные активные приемники**

Сопротивление нелинейного приемника зависит от тока, ВАХ не является прямой линией.



Графическое обозначение
активных приемников:

Линейный -- 

Нелинейный -- 

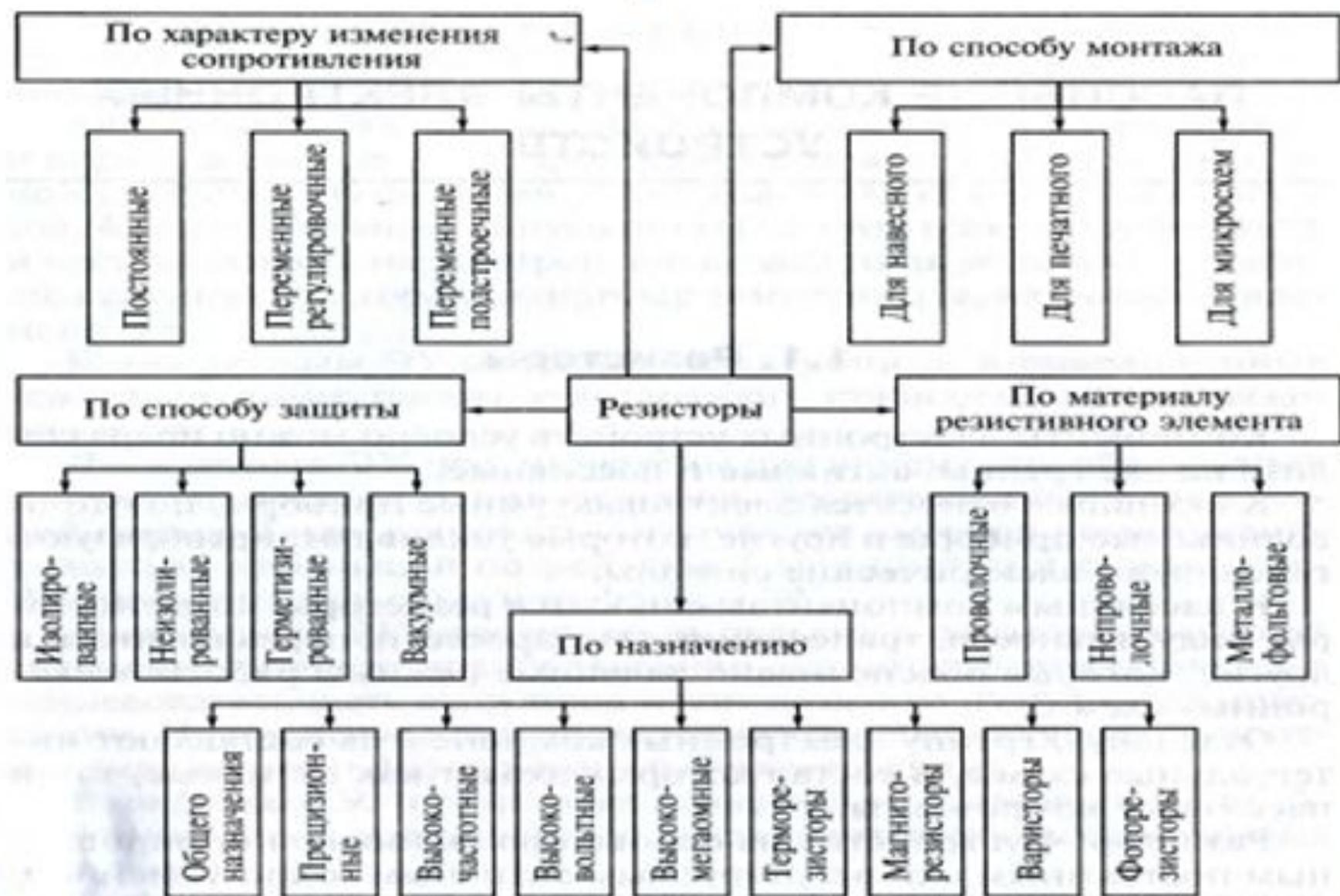


Рис. 1.1. Общая классификация резисторов

Переменные регулировочные резисторы обычно размещаются на лицевых панелях приборов и их сопротивление изменяется во время функционирования аппаратуры.

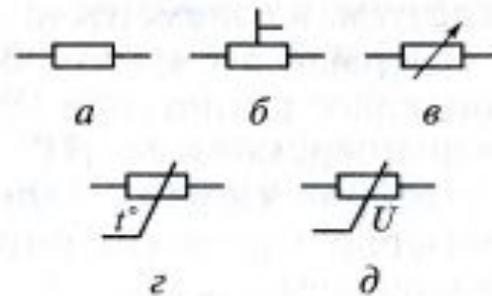
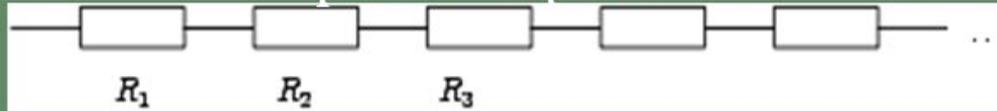


Рис. 1.3. Условные обозначения резисторов:
a — постоянные; *б* — подстроечные; *в* — регулировочные; *г* — терморезисторы; *д* — варисторы



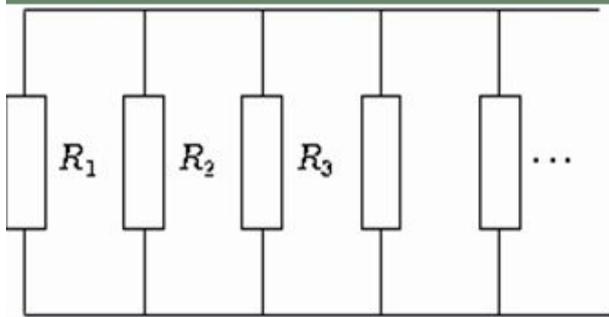
Последовательное соединение резисторов



$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

При последовательном соединении резисторов их сопротивления складываются

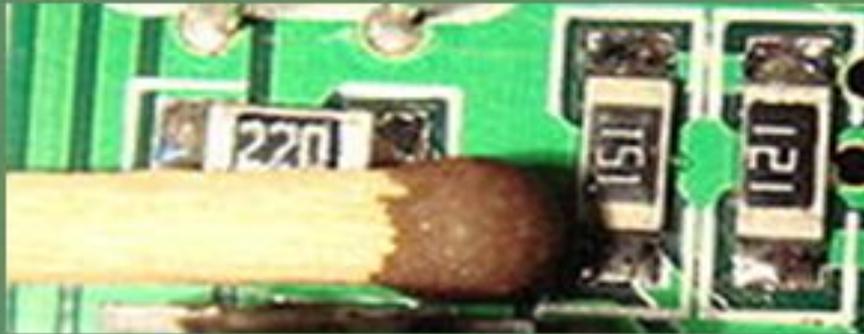
При последовательном соединении резисторов их сопротивления складываются



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

При параллельном соединении резисторов складываются величины, обратные пропорциональные сопротивлению (то есть общая проводимость складывается из проводимостей каждого резистора)

Маркировка SMD-резисторов



SMD-элементы

Радиоэлементы
предназначенные для
поверхностного монтажа на
плату, не имеют проволочных
выводов

«Резисторы» нулевого
сопротивления (перемычки
на плате) кодируются одной
цифрой «0».

Большее количество
знаков обозначает:

Кодирование 3 или 4 цифрами

ABC обозначает
 $AB \cdot 10^C$ Ом
например 102 — это
 $10 \cdot 10^2$ Ом = 1 кОм

ABCD обозначает
 $ABC \cdot 10^D$ Ом, точность 1 %
(ряд E96)
например 1002 — это
 $100 \cdot 10^2$ Ом = 10 кОм

Тест Опрос.

Вариант 1.

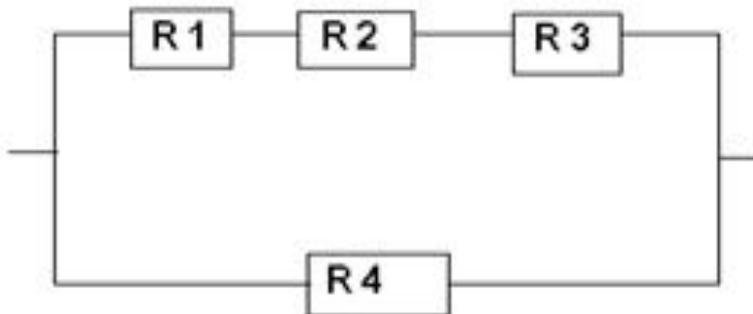
1. Начертите схему последовательного соединения 2 резисторов 1 Ом и 2 Ом. В каком из них сила тока больше?
2. Сколько одинаковых резисторов было соединено параллельно, если каждый из них имеет сопротивление 600 Ом, а их общее сопротивление составило 50 Ом?
3. Проводники сопротивлением 15 Ом и 20 Ом соединили последовательно. Чему равно их общее сопротивление?

Вариант 2.

1. Начертите схему параллельного соединения 2 резисторов 1 Ом и 2 Ом. В каком из них напряжение больше?
2. Сколько одинаковых резисторов было соединено последовательно, если каждый из них имеет сопротивление 50 Ом, а их общее сопротивление составило 600 Ом?
3. Проводники сопротивлением 10 Ом и 10 Ом соединили параллельно. Чему равно их общее сопротивление?

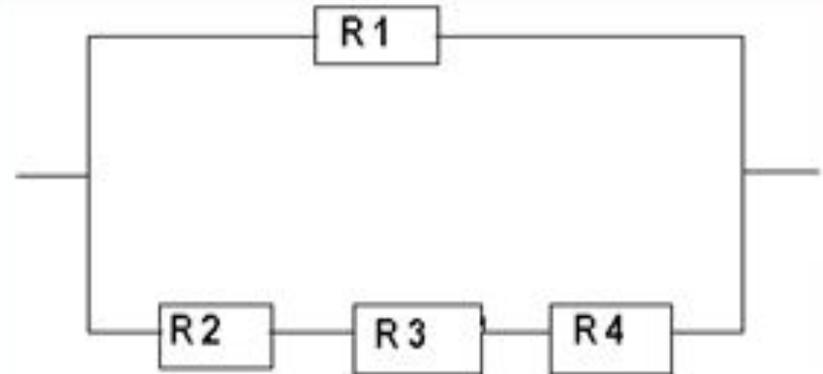
1 вариант

4. Вычислить сопротивление цепи, если $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ Ом}$, $R_4 = 3 \text{ Ом}$



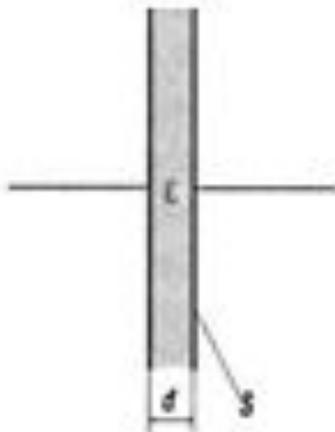
2 вариант

4. Вычислить сопротивление цепи, если $R_2 = R_3 = R_4 = 2 \text{ Ом}$, $R_1 = 6 \text{ Ом}$.





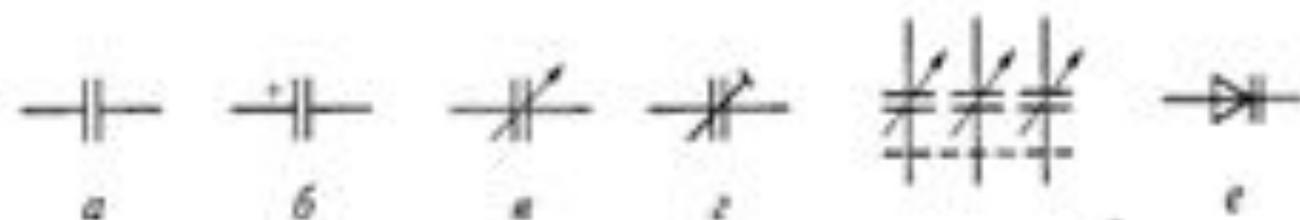
Конденсатор является пассивным электронным компонентом. Обычно состоит из двух электродов в форме пластин (называемых обкладками), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.



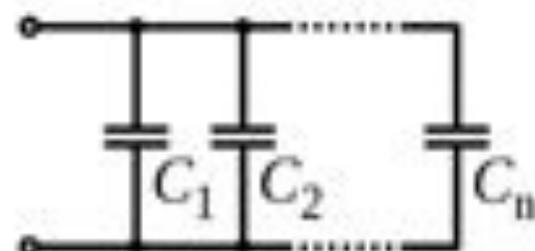
$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}$$

Конденсаторы, как и резисторы, являются наиболее распространенными элементами электронных цепей. Конструктивно конденсатор представляет собой две обкладки, между которыми находится диэлектрик.

Конденсаторы бывают постоянной и переменной емкости. В зависимости от типа диэлектрика конденсаторы постоянной емкости бывают: керамические, слюдяные, стеклокерамические, пленочные, бумажные, металлобумажные, фторопластовые, электролитические, вакуумные и т. п. Условные обозначения конденсаторов показаны на рис. 1.5.



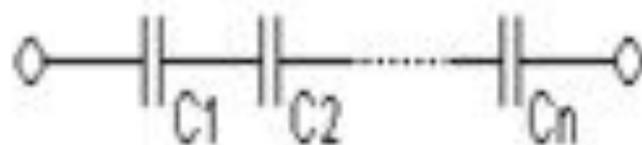
а — постоянной емкости; б — электролитический полярный; в — переменной емкости; г — подстроечный; д — многосекционный; е — варикап



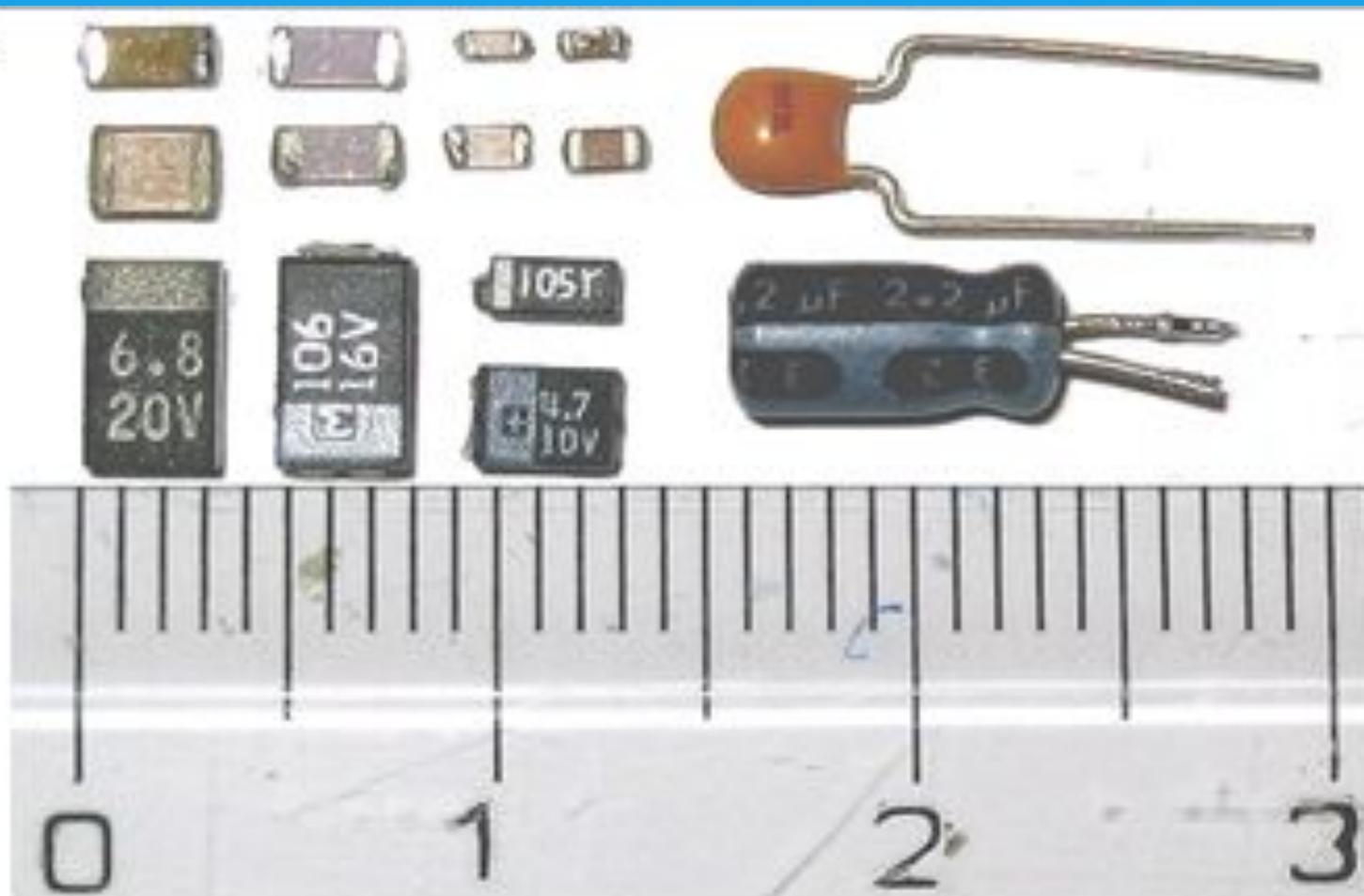
$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Для получения больших ёмкостей конденсаторы соединяют параллельно. При этом напряжение между обкладками всех конденсаторов одинаково. Общая ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей всех конденсаторов, входящих в батарею.

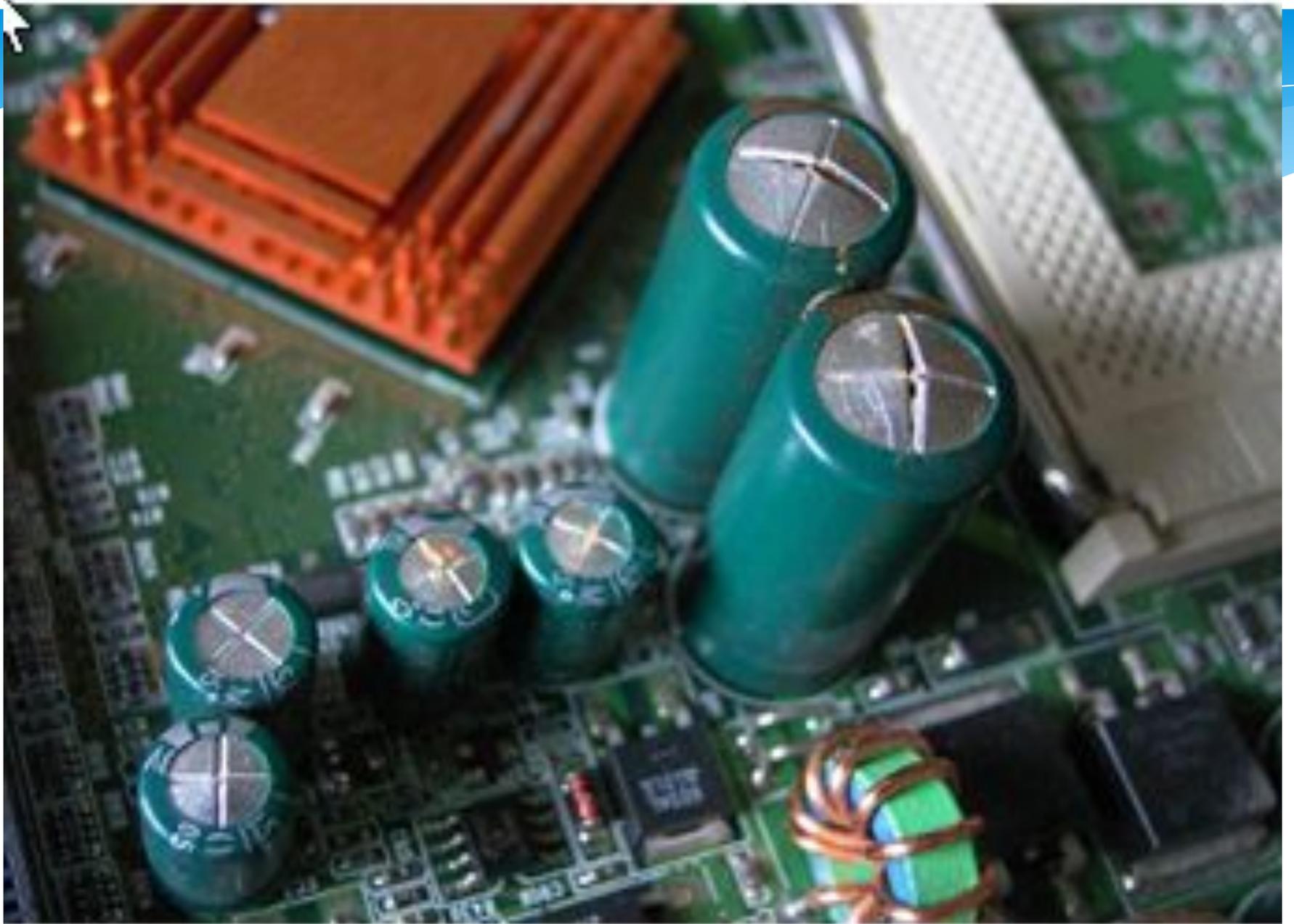
При последовательном соединении конденсаторов заряды всех конденсаторов одинаковы, так как от источника питания они поступают только на внешние электроды, а на внутренних электродах они получают только за счёт разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга. Общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов равна



$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}}$$



Слева — конденсаторы для поверхностного монтажа; справа — конденсаторы для объёмного монтажа; сверху — керамические; снизу — электролитические. На танталовых конденсаторах (слева) полоской обозначен «+», на алюминиевых (справа) маркируют «-».





обозначение катушек
индуктивности на схемах:

Катушка индуктивности — элемент электрической цепи, предназначенный для накопления энергии магнитного поля.

Вокруг проводника с током всегда существует магнитное поле, характеризующееся в каждой точке его определенным значением магнитной индукции. Магнитное поле тока усиливается, когда проводник свернут в виде спирали или когда из него намотана катушка.

Для создания магнитного поля затрачивается электрическая энергия, поступающая от источника питания. Эта энергия превращается в энергию магнитного поля.

Энергия магнитного поля катушки пропорциональна квадрату протекающего по катушке тока и величине, называемой индуктивностью катушки. Индуктивность катушки зависит от числа витков, площади витков, расстояния между витками, материала сердечника.

Для того, чтобы не было недопонимания, сразу поясню, что термин индуктивность может означать как физическую величину (типа емкости, сопротивления), так и элемент схемы – катушку индуктивности (типа конденсатор, резистор). В принципе точно также конденсаторы называют емкостями, а резисторы сопротивлениями)

Итак, единица индуктивности — Генри, а на практике чаще мГн или мкГн. Для понимания работы индуктивности как элемента, давайте сравним ее с конденсатором.

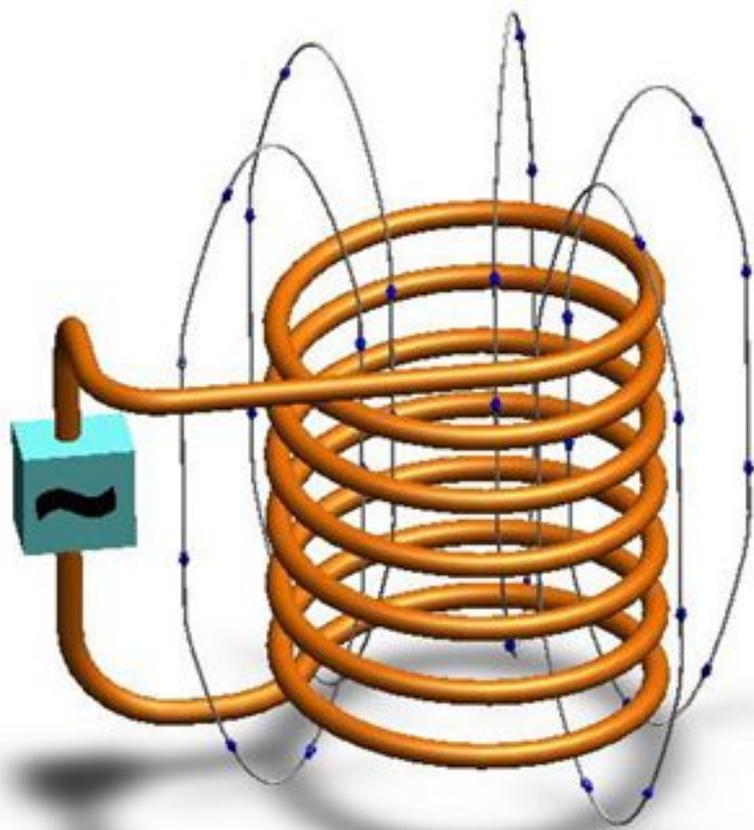
В конденсаторе – если пропустить через него ток, то это вызовет нарастание напряжения на нем. В катушке – если приложить к ней напряжение, то произойдет увеличение тока через индуктивность. Да короче, если в двух словах, то индуктивность, по сути – противоположность конденсатора. В конденсаторе скорость изменения напряжения зависит от протекающего тока. А в катушке? Правильно, наоборот! Скорость изменения тока зависит от приложенного напряжения.

При замыкании цепи в катушке происходят изменения связанного с ней магнитного поля, в витках катушки индуцируется электродвижущая сила (ЭДС). Величина возникающей ЭДС пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения тока в ней. Когда ток в катушке увеличивается или уменьшается на 1 А за 1 с, при этом в катушке возникает ЭДС, равная 1 В, индуктивность такой катушки принимается равной 1 Гн.

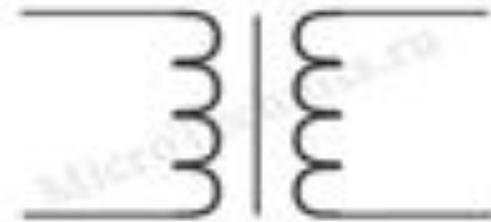
Для измерения малых индуктивностей используют дробные единицы: 1 миллигенри (мГн) = 10^{-3} Гн, 1 микрогенри (мкГн) = 10^{-6} Гн, 1 наногенри (нГн) = 10^{-9} мкГн.

В радиозлектронных устройствах используют катушки различных конструкций. Катушки являются составными элементами цепей, называемых колебательными контурами.

3. Катушка ИНДУКТИВНОСТИ



Катушки, входящие в трансформатор, называют первичной и вторичной обмотками трансформатора.



Принцип работы трансформатора заключается в следующем.

Мы подаем на первичную обмотку трансформатора входное напряжение, а со вторичной снимаем уже другое напряжение, причем коэффициент трансформации (изменения) пропорционален отношению числа витков катушек. Очень важным свойством трансформаторов является то, что мощность на его выходе практически равна мощности на входе. Что это нам дает? А то, что, если у нас есть, например, понижающий трансформатор, то на выходе мы получим рост тока при уменьшении напряжения. Мощность при этом естественно не изменится.

Давайте теперь прикинем, где бы мы могли использовать трансформаторы и для чего.

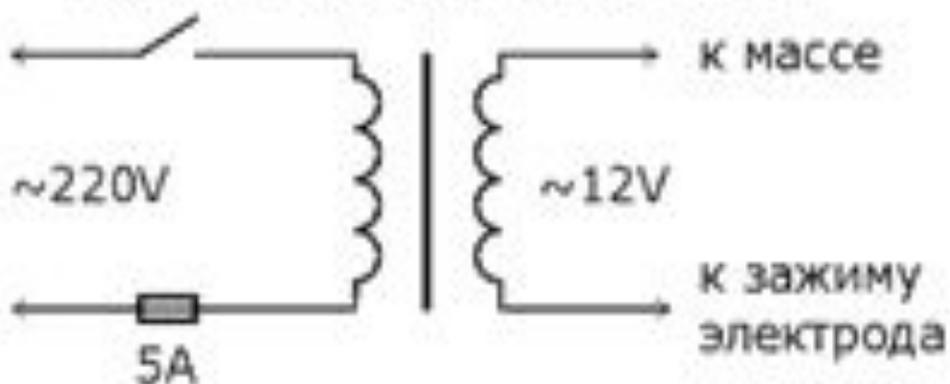
Ну, во-первых, катушки в трансформаторе электрически изолированы друг от друга, а, значит, трансформатор может помочь нам защитить нашу схему от непосредственного контакта с силовой сетью.

А, во-вторых, при помощи этого замечательного устройства мы можем преобразовать переменное напряжение сети к другому значению, как к большему, так и к меньшему. К слову, чаще всего напряжение сети понижается при помощи трансформатора. Это, пожалуй, основное применение этих элементов)

Трансформаторы применяются для изменения амплитуды сигнала переменного тока. Все трансформаторы условно могут быть разделены на три класса: силовые, согласующие и импульсные. Силовые трансформаторы преобразуют напряжения переменного тока в источниках вторичного питания. Согласующие трансформаторы используются для межкаскадной связи в усилителях. Импульсные трансформаторы применяют в импульсных устройствах.

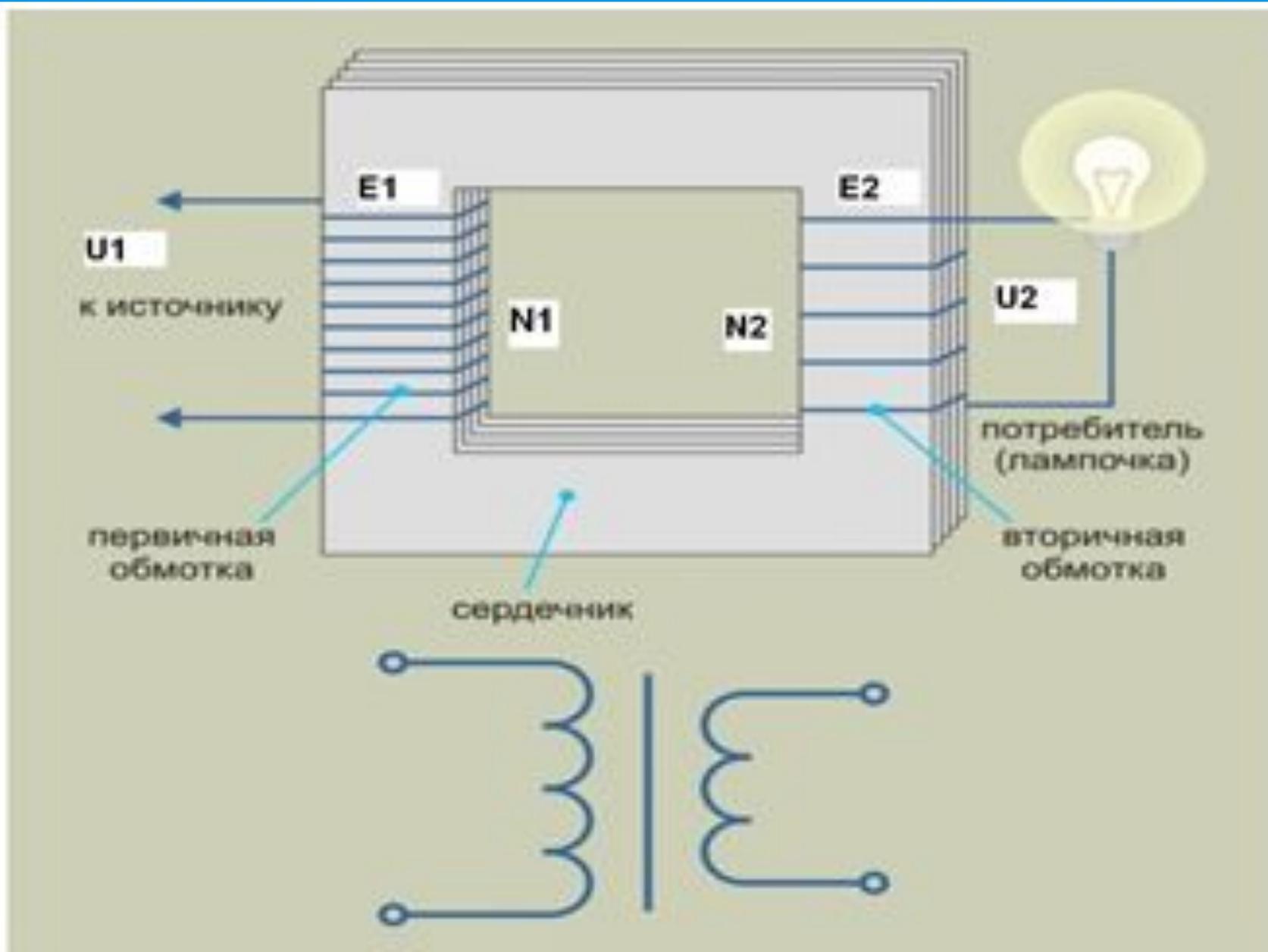


Схема сварочника по меди



Характеристики:

P_1 - 180-200 Вт V_1 - 220V
 I_1 - 20-40A V_2 - 12...15V
род тока - переменный

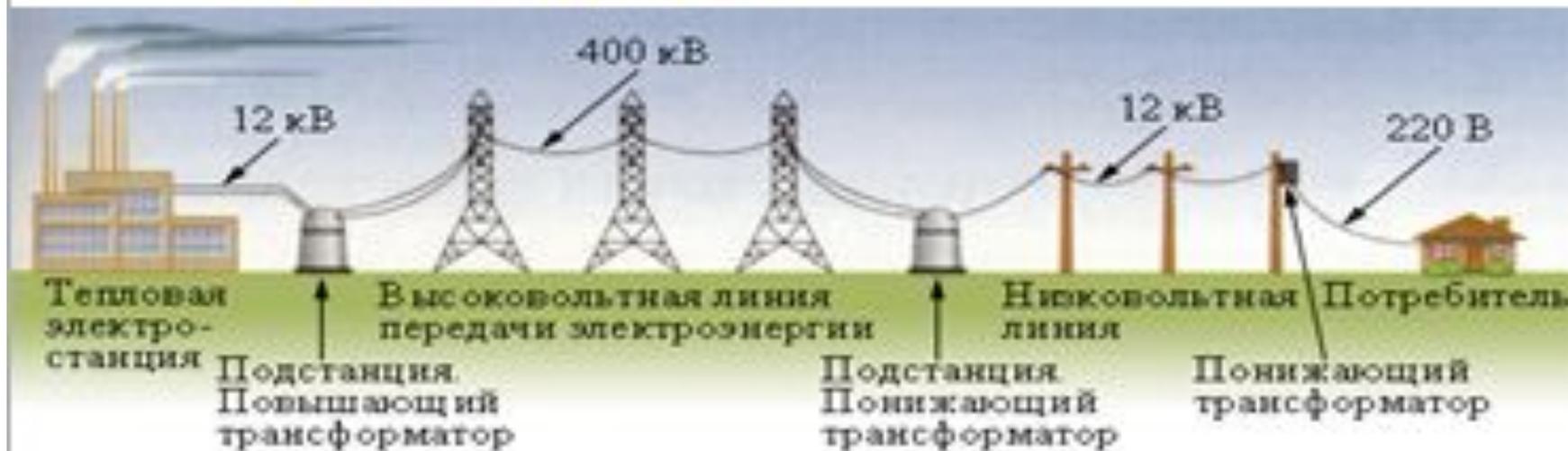


Коэффициент трансформации – величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

**Повышающий трансформатор трансформатор,
увеличивающий напряжение.**

$k < 1$, то $U_2 > U_1$, $N_2 > N_1$



**Понижающий трансформатор трансформатор,
уменьшающий напряжение.**

$k > 1$, то $U_2 < U_1$, $N_2 < N_1$

1.1. Ток, ЭДС и напряжение в электрической цепи

Ctrl+R

Электрической цепью называется «совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об *электродвижущей силе, токе и напряжении*»[6].

Из этого определения следует, что в общем случае электрическая цепь представляет собой соединение источников электрической энергии и потребителей этой энергии (нагрузки). Обычно соединение источника и нагрузки осуществляется металлическими проводниками, хорошо проводящими электрический ток.

Из курса физики [34] известно, что электрический ток можно представить состоящим из двух составляющих:

щы

Ctrl+Shift+S

$$i = i_n + i_{см}, \quad (1.1)$$

где i – полный ток;

i_n – ток проводимости, обусловленный движением носителей заряда;

$i_{см}$ – ток смещения, вызванный изменениями электрического смещения D .

Электрическое смещение D характеризует способность веществ к поляризации и определяется напряженностью электрического поля E .

Для большинства веществ $D = \epsilon_a E$, где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость.

Напряженность электрического поля E есть величина, измеряемая силой F действующей в данной точке поля на единичный положительный заряд q :

$$E = F/q. \quad (1.2)$$

Напряженность электрического поля измеряется в вольтах, деленных на метр (В/м).

Ток проводимости определяется скоростью изменения электрического заряда во времени

$$i_n = \frac{dq}{dt}, \quad (1.3)$$

где i_n – ток проводимости, измеряется в амперах (А);

q – перемещаемый заряд, измеряется в кулонах (К);

t – время, измеряется в секундах (сек.)

В электрических цепях существуют оба вида токов. Ввиду малости токов *смещения* в пространстве, окружающем соединительные проводники и элементы электрической цепи, этими токами в большинстве случаев пренебрегают, считая, что все токи смещения сосредоточены в элементах цепи. Известно также [21], что ток смещения в конденсаторе равен току проводимости проводника, соединенного с этим конденсатором. Учитывая отмеченные выше допущения, в дальнейшем изложении ток в электрической цепи будем понимать как *ток проводимости*.

Прохождение электрического тока в электрической цепи связано с преобразованием или потреблением энергии. Количество энергии, затрачиваемой на перемещение единицы заряда на участке цепи из одной точки проводника в другую, называется *напряжением*:

$$u = dw/dq, \quad (1.4)$$

где u – напряжение, измеряемое в вольтах (B);

w – энергия, измеряемая в джоулях ($Дж$).

Напряжение на участке цепи можно рассматривать как разность электрических потенциалов на концах этого участка:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (1.5)$$

где φ_1 – потенциал первой точки участка цепи;

φ_2 – потенциал второй точки участка цепи.

Электрическим потенциалом называется величина, определяемая отношением потенциальной энергии заряда в данной точке электрического поля к величине этого заряда [21]:

$$\varphi = w / q, \quad (1.6)$$

где w – потенциальная энергия заряда;

q – величина этого заряда.

Используя выражение (1.6) можно получить выражение энергии, затраченной на перемещение заряда q на участке цепи с напряжением u к моменту времени t :

$$\omega = \int_0^t u i dt .$$

Скорость изменения энергии во времени называется *мощностью* электрической цепи.

$$p = \frac{d\omega}{dt} = ui . \quad (1.7)$$

Мощность p измеряется в ваттах ($Вт$).

Ток в проводящей среде – явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля.

Мгновенное значение тока равно скорости изменения заряда во времени:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Единица измерения тока в системе СИ – ампер (А).



Андре-Мари Ампер
1775 - 1836

Напряжение (разность потенциалов) между двумя точками цепи определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемещение заряда из одной точки в другую:

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}$$

Единица измерения напряжения в системе СИ – вольт (В).



Алессандро Вольта
1745 – 1827

Источник электрической энергии – это устройство, преобразующее другие виды энергии, например химическую, механическую, тепловую в электрическую. Источник электрической энергии характеризуется величиной и направлением электродвижущей силы (ЭДС).

Электродвижущей силой называется величина, измеряемая работой сторонних (неэлектрических) сил источника при переносе единицы положительного заряда в своей внутренней цепи от вывода с меньшим потенциалом к выводу с большим потенциалом [21].

Следует заметить, что ЭДС может возникать не только вследствие разделения зарядов в источнике под действием сторонних сил, но и вследствие явления *электромагнитной индукции*. Это явление возникает при изменении магнитного потока Φ , проходящего через площадь контура, образованного проводником с током согласно *закону Фарадея–Максвелла* [21]:

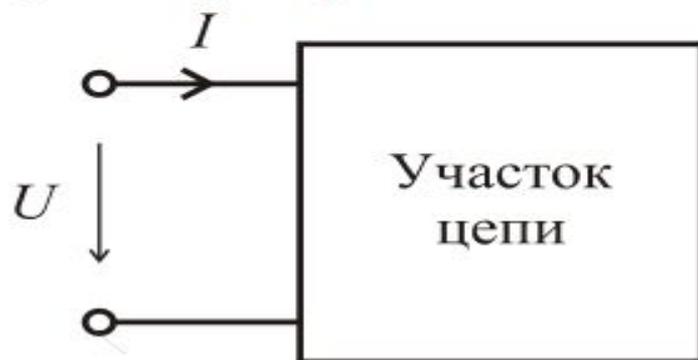
$$e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.8)$$

где e – ЭДС электромагнитной индукции.

В электрических цепях за *условно положительное направление тока* принимают направление движения положительных зарядов в электрической цепи [34]. Анализ электрической цепи можно проводить при произвольном выборе одного из двух возможных направлений тока в качестве положительного. Для однозначного определения *знака напряжения* между двумя точками электрической цепи одной точке приписывают положительную полярность, а другой – отрицательную. Условно положительные направления обозначают с помощью стрелок для токов и знаков «+», «-» или стрелок для напряжений.

Положительное направление тока выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи.

Для однозначного определения напряжения между двумя выводами участка цепи одному из выводов приписывают положительную полярность, которую отмечают стрелкой, направленной от вывода.



Примером простейшей электрической цепи может служить, например, соединение аккумулятора и лампы накаливания, показанное на рис. 1.1.

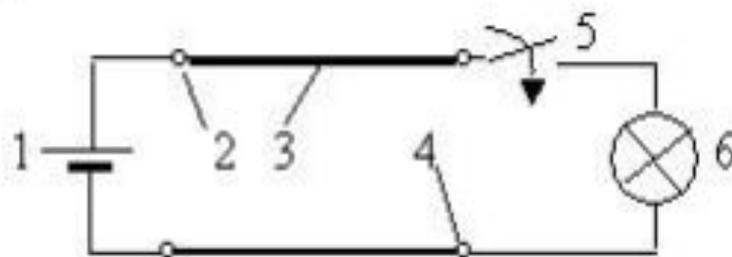


Рис. 1.1. Изображение простейшей электрической цепи
1 – источник ЭДС (аккумуляторная батарея);
2 – выводы (зажимы) источника; 3 – соединительные провода;
4 – зажимы нагрузки.

Нагрузка показана в виде последовательного соединения выключателя 5 и лампы накаливания 6.

1.2. Схемы замещения электрической цепи

В теории электрических цепей для анализа процессов, связанных с преобразованием, распределением и передачей электрической энергии, используют идеализированное изображение электрической цепи, называемое *схемой замещения (эквивалентной схемой)*.

Схема замещения служит расчетной моделью реальной электрической цепи. В этой схеме элементы реальной цепи изображаются

с помощью условных графических обозначений (УГО). Примеры УГО некоторых элементов электрической цепи показаны на рис.

1 2

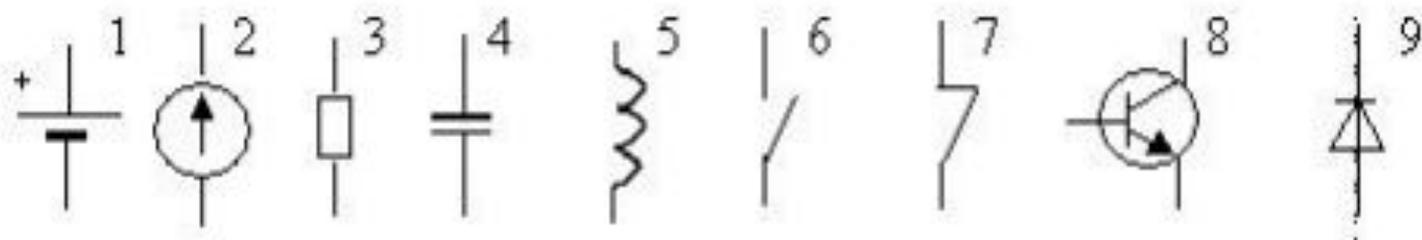
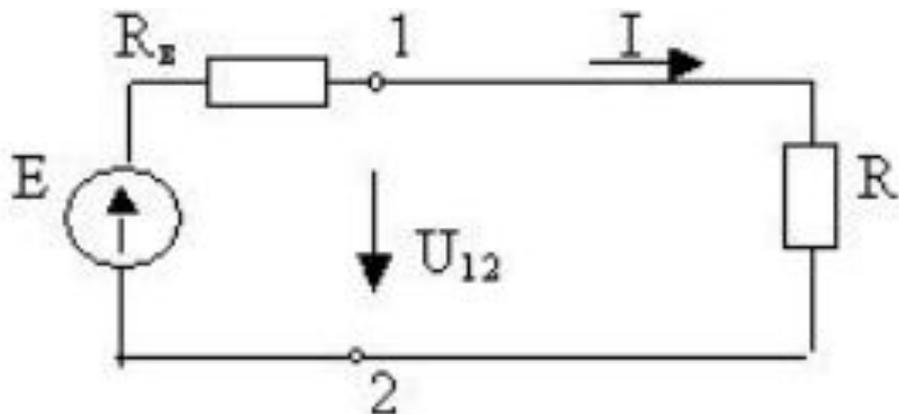


Рис. 1.2. Условные графические обозначения некоторых элементов электрических цепей:

- 1 – источник ЭДС; 2 – идеальный источник ЭДС; 3 – резистор;
4 – конденсатор; 5 – катушка индуктивности;
6, 7 – соответственно замыкающий и размыкающий контакты;
8 – биполярный транзистор; 9 – полупроводниковый диод.

Соединительные проводники, если не учитывается их собственное сопротивление, в схемах замещения показываются тонкими линиями. Выходящие и входящие зажимы устройств в схеме замещения обычно не показываются.

Существует большое количество видов электрических цепей, различающихся структурой, формой передаваемых электрических сигналов, мощностью, составом элементов. В любой электрической цепи происходит передача электромагнитным полем электрической энергии от источника к приемнику (потребителю). Наиболее точный анализ электромагнитных явлений в электрической цепи должен осуществляться на основе системы векторных дифференциальных уравнений Максвелла в частных производных [47]. В этой системе электромагнитное поле описывается локальными значениями электрического смещения D , магнитной индукции B , плотности электрического тока Y , напряженности электрического поля E , напряженности магнитного поля H .



Пример схемы замещения для электрической цепи, изображенной на рис. 1.1, показан на рис. 1.3.

В схеме замещения источник электрической энергии заменяется источником ЭДС E с внутренним сопротивлением R_E , а нагрузка (лампа накаливания) – резистором с сопротивлением R . Сопротивление соединительных проводов и выключателя чаще всего не учитывается, однако их можно учесть в сопротивлении нагрузки. В схеме замещения можно стрелками указать выбранные произвольно условно положительные направления токов и напряжений (см. рис. 1.3).

Расчёт электрической цепи по схеме замещения сводится обычно к нахождению приближенных значений токов и напряжений, существующих в реальной электрической цепи. Например, для схемы замещения (см. рис. 1.3) при указанных условиях в замкнутой цепи будет протекать ток I , величина которого, согласно *закону Ома*, определяется по выражению

$$I = E / (R_g + R). \quad (1.9)$$

Напряжение на выводах источника при протекании тока может быть определено по выражению

$$U_{12} = E - IR_g, \quad (1.10)$$

где IR_g – *падение напряжения* на внутреннем сопротивлении источника ЭДС;

U_{12} – *напряжение* на выводах источника ЭДС.

По выражению (1.10) можно сделать вывод, что при *отсутствии тока в цепи напряжение на выводах источника равно величине ЭДС, а при наличии внутреннего сопротивления и протекании тока это напряжение меньше ЭДС и будет уменьшаться с ростом тока.*

Если считать, что соединительные провода не имеют сопротивления, внутреннее сопротивление источника не изображать, то на эквивалентной схеме можно показать одно сопротивление нагрузки R , и простейшая схема примет вид, показанный на рис. 1.4., где ток I и напряжение $U = IR$ дополнительно изображены стрелками, показывающими выбранные для них положительные направления.

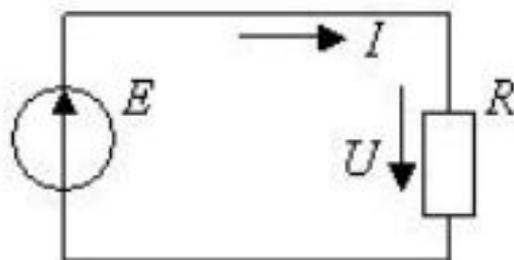


Рис. 1.4. Упрощённое изображение электрической цепи

1.3. Эквивалентные схемы источников электрической энергии

Источник энергии с известной ЭДС E и внутренним сопротивлением R_g может быть представлен ещё одним способом, часто используемым в расчётах электрических цепей. Доказательство представлено ниже [50].

Для цепи (см. рис. 1.3) справедливо соотношение (см. 1.9):

$$E = (R_g + R) I = U + R_g I \quad (1.11)$$

Преобразуем выражение (1.11), поделив его на R_g :

$$J = I + U G_g = I + I_g, \quad (1.12)$$

где G_g – внутренняя проводимость источника энергии;

$J = E / R_g$ – ток в цепи источника при $R=0$ (коротком замыкании его зажимов);

$I_g = U/R_g = U G_g$ – ток, равный отношению напряжения на зажимах источника энергии к его внутреннему сопротивлению;

$I = U / R = U G$ – ток приемника; $G = 1 / R$ – проводимость приемника.

Уравнению (1.12) соответствует эквивалентная схема рис. 1.5.

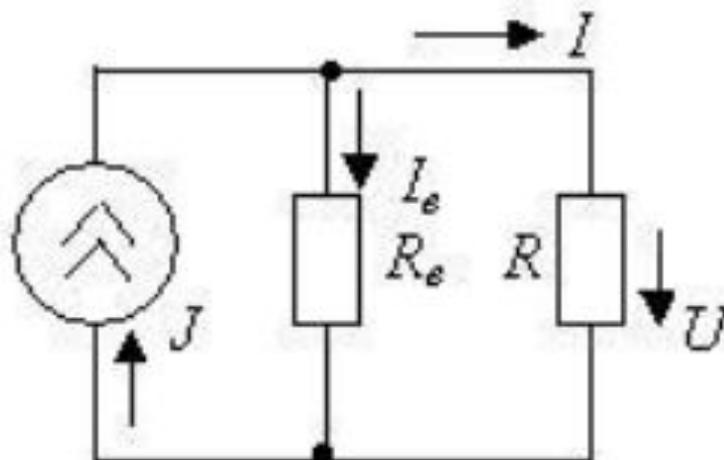


Рис. 1.5. Преобразованная эквивалентная схема электрической цепи

В схеме появился элемент, изображение которого отличается от изображения источника ЭДС и является изображением источника энергии, называемого идеальным источником тока.

Источником тока называют источник энергии, создающий электрический ток, величина которого не зависит от величины сопротивлений, подключённых к его зажимам [7].

Сопротивление R_g , подключенное к зажимам источника тока (см. рис. 1.5), играет роль внутреннего сопротивления реального источника тока.

Если $R_g \rightarrow \infty$, то $J = I$, а источник энергии называют *идеальным источником тока*. Считается, что его внутреннее сопротивление равно бесконечности, а величина его тока не зависит от нагрузки. Такая идеализация источника энергии во многих случаях существенно упрощает расчёты электрических цепей.

Источники ЭДС и тока называют *активными* элементами электрических схем, а сопротивления и проводимости – *пассивными*.

В теории электрических цепей наряду с понятием идеального источника тока часто используется понятие «*идеальный источник ЭДС*». Идеальным считается источник ЭДС, внутреннее сопротивление которого равно нулю, а напряжение на его зажимах не зависит от величины сопротивления нагрузки. В этом случае такой источник ЭДС можно изобразить так, как показано на рис. 1.4, а внутреннее сопротивление R_g в схеме замещения будет отсутствовать.

Для электрической цепи с источником ЭДС важной характеристикой является *внешняя характеристика* – зависимость напряжения на выводах источника от величины тока в цепи. В случае идеального источника ЭДС напряжение на выводах источника остается неизменным при изменении тока. Для реального источника это условие не соблюдается, так как увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении $R_в$ (рис. 1.3), может увеличиваться значение $R_в$, уменьшаться ЭДС. Внешние характеристики цепи с источником ЭДС показаны на рис 1.6.

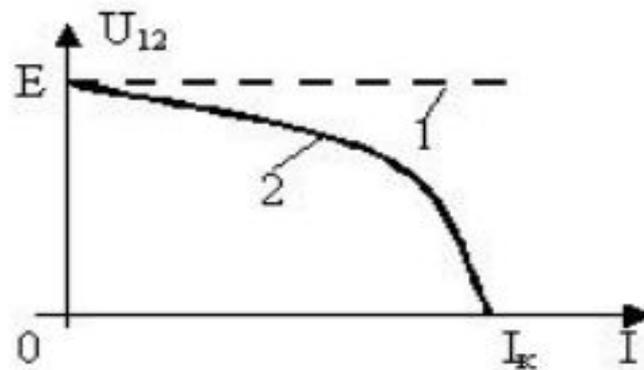


Рис. 1.6. Внешние характеристики электрической цепи с источником ЭДС:
1 – для идеального источника ЭДС; 2 – для реального источника ЭДС

Ток $I_к$, при котором напряжение на выводах источниках ЭДС становится равным нулю, называют *током короткого замыкания*.

Напряжение и ток — это количественные понятия, о которых следует помнить всегда, когда дело касается электронной схемы. Обычно они изменяются во времени, в противном случае работа схемы не представляет интереса.

Напряжение (условное обозначение: U , иногда E). Напряжение между двумя точками — это энергия (или работа), которая затрачивается на перемещение единичного положительного заряда из точки с низким потенциалом в точку с высоким потенциалом (т. е. первая точка имеет более отрицательный потенциал по сравнению со второй). Иначе говоря, это энергия, которая высвобождается, когда единичный заряд «сползает» от высокого потенциала к низкому. Напряжение называют также *разностью потенциалов или электродвижущей силой (э. д. с.)*. Единицей измерения напряжения служит вольт. Обычно напряжение измеряют в вольтах (В), киловольтах ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$), милливольтмах ($1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$) или микровольтах ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$)

измерения», мелким шрифтом). Для того чтобы переместить заряд величиной 1 кулон между точками, имеющими разность потенциалов величиной 1 вольт, необходимо совершить работу в 1 джоуль. (Кулон служит единицей измерения электрического заряда и равен заряду приблизительно $6 \cdot 10^{18}$ электронов.) Напряжение, измеряемое в нановольтах ($1 \text{ нВ} = 10^{-9} \text{ В}$) или в мегавольтах ($1 \text{ МВ} = 10^6 \text{ В}$) встречается редко; вы убедитесь в этом, прочитав всю книгу.

Ток (условное обозначение: I). Ток — это скорость перемещения электрического заряда в точке. Единицей измерения тока служит ампер. Обычно ток измеряют в амперах (А), миллиамперах ($1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$), микроамперах ($1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$), наноамперах ($1 \text{ нА} = 10^{-9} \text{ А}$) и иногда в пикоамперах ($1 \text{ пкА} = 10^{-12} \text{ А}$). Ток величиной 1 ампер создается перемещением заряда величиной 1 кулон за время, равное 1 с. Условились считать, что ток в цепи протекает от точки с более положительным потенциалом к точке с более отрицательным потенциалом, хотя электрон перемещается в противоположном направлении.

Запомните: напряжение всегда измеряется *между* двумя точками схемы, ток всегда протекает *через* точку в схеме или через какой-либо элемент схемы.

Говорить «напряжение в резисторе» нельзя — это неграмотно. Однако часто говорят о напряжении в какой-либо точке схемы. При этом всегда подразумевают напряжение между этой точкой и «землей», то есть такой точкой схемы, потенциал которой всем известен. Скоро вы привыкнете к такому способу измерения напряжения.

Напряжение создается путем воздействия на электрические заряды в таких устройствах, как батареи (электрохимические реакции), генераторы (взаимодействие магнитных сил), солнечные батареи (фотогальванический эффект энергии фотонов) и т. п. Ток мы *получаем*, прикладывая напряжение между точками схемы.

1.4. Мощность в цепи с источником ЭДС

Мощность в электрической цепи характеризует интенсивность энергетических процессов – это количество преобразуемой энергии в единицу времени. Источник энергии развивает мощность P_u , определяемую, согласно (1.7), как произведение величины ЭДС на ток:

$$P_u = EI. \quad (1.13)$$

В сопротивлении нагрузки и во внутреннем сопротивлении источника происходит превращение электрической энергии в тепловую, т.е. энергия источника расходуется на нагрев этих сопротивлений (обычно эту энергию называют тепловыми потерями). Этот факт отражается в условии, называемом *балансом мощностей*:

$$P_u = P_n + P_{вн}, \quad (1.14)$$

где P_n , $P_{вн}$ – соответственно мощность нагрева сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника.

Согласно *закону Джоуля – Ленца* [21], мощность электрического тока пропорциональна сопротивлению электрической цепи и квадрату тока, протекающего в этой цепи. Тогда справедливо равенство

$$EI = I^2(R_{\text{вн}} + R_n), \quad (1.15)$$

где $I^2 R_{\text{вн}} = P_{\text{вн}}$ – мощность внутренних тепловых потерь источника;

$I^2 R_n = P_n$ – мощность энергии, потребляемой сопротивлением нагрузки (мощность потребителя, потребляемая мощность, мощность нагрузки).

Используя *закон Ома*, можно получить различные выражения для определения мощности электрического тока, потребляемой сопротивлением нагрузки:

$$P_n = I^2 R_n = U_n I = U_n^2 / R_n = U_n^2 G_n, \quad (1.16)$$

где $G_n = 1/R_n$ – *проводимость* – величина обратная сопротивлению, измеряется в сименсах (*сим.*)

U_n – напряжение на нагрузке, $U_n = I R_n$.

Из равенства (1.15), учитывая (1.9), можно заметить, что мощность нагрузки зависит от соотношения величин сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника. Практически важное значение имеет соотношение, при котором мощность, отдаваемая источником в нагрузку, будет максимальной. Легко доказать, что таким соотношением является равенство $R_n = R_{\text{вн}}$.

1.5. Классический метод анализа и расчёта электрических цепей

Как отмечалось ранее, реальные электрические цепи отличаются множеством видов, способами соединений, параметрами, назначением, мощностью и составом элементов. В схемах замещения с помощью УГО обычно отражают вид и параметры элементов и способ их соединений.

В зависимости от способа соединений различают *неразветвлённые* и *разветвлённые* электрические цепи. В неразветвлённой цепи все элементы соединены последовательно один за другим и через них протекает один и тот же ток (см., например, рис. 1.4). В разветвлённой цепи появляются *ветви* и *узлы* (см., например, рис. 1.5). В электрической цепи произвольной конфигурации можно выделить *участки цепи*, содержащие цепи обоих или одного из двух способов соединения.

В разветвленных электрических цепях «ветвью» электрической цепи называется такой ее участок, который состоит только из последовательно включенных источников ЭДС или тока и (или) сопротивлений, по которому протекает один и тот же ток.

Узел – место (точка) соединения 3-х и более ветвей. Расчёт тока и падений напряжения в неразветвлённой цепи или в ветви разветвлённой цепи производится с помощью закона Ома (см., например рис. 1.3, формула 1.9).

Расчёт электрической цепи произвольной конфигурации осуществляется с помощью 1-го и 2-го законов Кирхгофа [26].

1-й закон Кирхгофа применяется к узлам и формулируется следующим образом: *сумма токов, подходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла*. При этом нужно условиться, например, записывать токи, направленные к узлу со знаком «-», а направленные от узла со знаком «+». Источники тока, присоединенные к узлу, также должны быть учтены, например:

$$\sum I - \sum J = 0, \quad (1.17)$$

где $\sum I$ – алгебраическая сумма токов в узле от источников ЭДС;

$\sum J$ – сумма токов источников тока, причем правило знаков такое же. Уравнение (1.17) можно записать несколько иначе:

$$\sum I = \sum J. \quad (1.18)$$

В этом случае следует условиться, что токи источников тока (ИТ), направленные к узлу, записаны в уравнении (1.18) со знаком «плюс», а направленные от узла – со знаком «минус».

Второй закон Кирхгофа применяется к контурам электрической цепи и формулируется следующим образом. *В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур, равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре.*

Уравнение, соответствующее формулировке второго закона Кирхгофа, можно записать в следующем виде:

$$\sum U = \sum E. \quad (1.19)$$

где $\sum U = \sum r I$ – *алгебраическая* сумма напряжений (падений напряжений) на сопротивлениях r ;

$\sum E$ – *алгебраическая* сумма ЭДС.

Следует обратить внимание на то, что *любой замкнутый контур* – это может быть контур, в который входит не несколько, а лишь одна ветвь цепи, причём *мысленное замыкание* контура может быть сделано по любому пути *вне* схемы.

При расчете цепей по второму закону Кирхгофа нужно принять направление обхода контуров и расставить стрелки токов, ЭДС и напряжений. В уравнение (1.19) должны входить с положительным знаком те напряжения и ЭДС, стрелки которых совпадают с выбранным направлением обхода контура.

Часто используется вторая формулировка второго закона Кирхгофа: *в любом контуре алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей, входящих в этот контур, равна нулю:*

$$\sum U = 0. \quad (1.20)$$

При этом положительные направления стрелок для напряжений выбираются произвольно, а в уравнение (1.20) подставляются со знаком «+» те напряжения, направления стрелок которых совпадают выбранным направлением обхода контура.

В теории электрических цепей различают два основных типа задач:

1) Задача анализа: известна конфигурация и параметры элементов цепи, требуется определить токи, напряжения и мощности для всех или некоторых участков цепи.

2) Задача синтеза: заданы токи и напряжения, найти конфигурацию цепи и выбрать ее элементы.

Задача синтеза, как правило, сложнее задачи анализа и требует большего объема знаний и опыта. Задача анализа решается при помощи законов Ома и Кирхгофа, использование которых считается классическим методом расчёта любых электрических цепей. Рекомендуется [26] придерживаться следующей последовательности решения задачи анализа:

- выбрать произвольные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи;
- определить количество неизвестных токов;
- выбрать направления обходов для контуров;

- составить уравнения 1-го закона Кирхгофа для узлов;
- составить уравнения 2-го закона Кирхгофа для контуров;
- решив систему уравнений, найти значения токов и напряжений;

- по найденным значениям определить мощности и энергетические показатели (при необходимости).

Общее число уравнений должно соответствовать числу неизвестных токов, причём число уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов в разветвлённой схеме.

Рассмотрим примеры расчётов электрических цепей разного вида с использованием описанных выше законов:

1) для неразветвлённого участка электрической цепи (рис. 1.7).

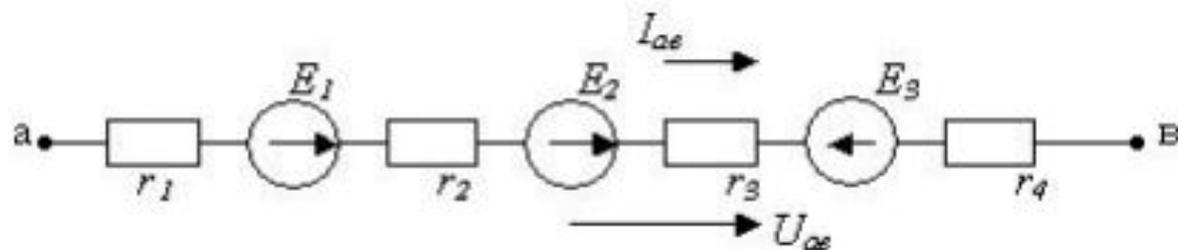


Рис. 1.7. Неразветвлённый участок электрической цепи

Полагаем для упрощения, что значения ЭДС, напряжения между узлами (a, b) и сопротивлений заданы, требуется определить ток ветви.

Выбираем направление тока, расставляем стрелки тока и напряжения и составляем уравнение второго закона Кирхгофа для мысленного контура $a - r_1 - E_1 - r_2 - E_2 - r_3 - E_3 - r_4 - b - a$, причём контур мысленно замыкаем по пути ($b - a$), проходящем вне электрической цепи:

$$I_{ab} (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) - U_{ab} = E_1 + E_2 - E_3. \quad (1.21)$$

Из уравнения (1.21) определяем величину тока:

$$I_{ав} = (U_{ав} + \sum E) * q_{ав} , \quad (1.22)$$

где $q_{ав} = 1 / r_{ав}$ – проводимость участка цепи $ав$;

$r_{ав} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ – суммарное сопротивление участка ;

$U_{ав} = \varphi_a - \varphi_b$ – напряжение между зажимами рассматриваемого участка (разность потенциалов), определяемое по выбранному направлению тока;

$\sum E = E_1 + E_2 - E_3$ – алгебраическая сумма ЭДС, действующих на том же участке (ЭДС, стрелка которой совпадает с выбранным направлением тока, считается положительной).

Формулу (1.22), полученную путём использования второго закона Кирхгофа, можно трактовать как закон Ома для участка цепи с ЭДС.

Если значение тока, полученное после расчета, окажется отрицательным, то это означает, что действительное направление тока противоположно выбранному. Напряжения на резисторах (падения напряжений) определяются по закону Ома:

$$U_i = I_{ав} r_i, \quad (i = 1 - 4);$$

2) для разветвлённой электрической цепи (рис. 1.8).

Анализ конфигурации цепи показывает, что схема имеет шесть ветвей, четыре узла и три независимых контура. Независимым считается контур, в который входит хотя бы одна ветвь, не вошедшая в другие контуры.

Число неизвестных токов (по числу ветвей) – шесть, следовательно должно быть составлено шесть уравнений, из них по первому закону Кирхгофа можно составить три уравнения, так как узлов в схеме – четыре.

Расставляем стрелки токов, выбрав (для удобства) их направления согласно со стрелками ЭДС, намечаем направления обхода выбранных независимых контуров (показано пунктиром на рис. 1.8)

и составляем систему уравнений.

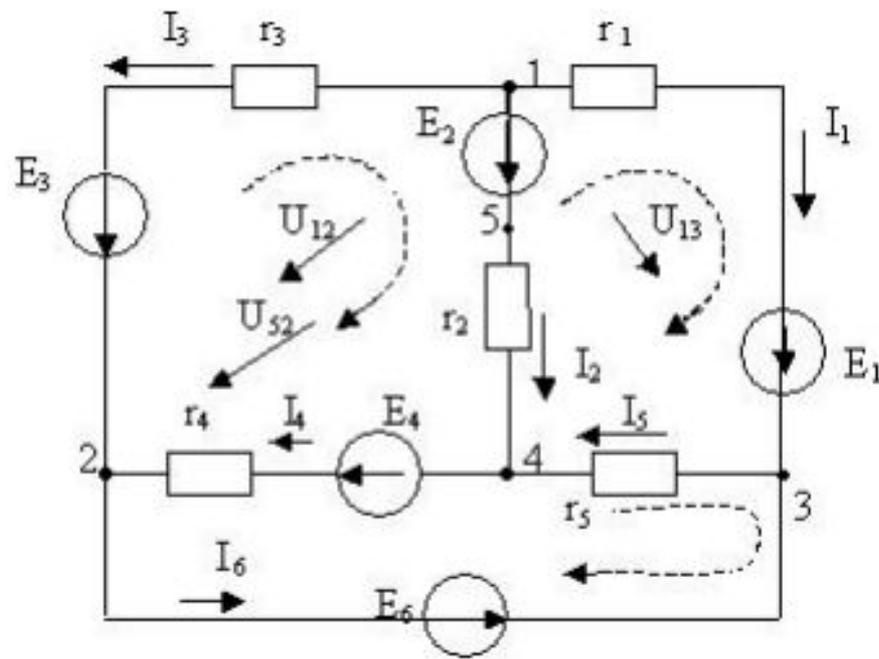


Рис. 1.8. Схема разветвлённой электрической цепи

Уравнения для узлов:

$$\text{узел 1:} \quad I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$\text{узел 2:} \quad I_6 - I_3 - I_4 = 0;$$

(1.23)

$$\text{узел 4:} \quad I_4 - I_5 - I_2 = 0.$$

Направления обхода контуров желательно выбирать одинаковыми во всех контурах. С учётом этого составляем уравнения второго закона Кирхгофа (контурные уравнения):

$$- I_3 r_3 + I_2 r_2 + I_4 r_4 = E_2 + E_4 - E_3;$$

$$- I_2 r_2 + I_1 r_1 + I_5 r_5 = E_1 - E_2;$$

(1.24)

$$- I_4 r_4 - I_5 r_5 = - E_4 - E_6.$$

Решение системы (1.23, 1.24) из шести уравнений даст значения шести неизвестных токов.

В расчетах электрических цепей часто приходится определять напряжение между двумя произвольными точками схемы. В этом случае удобно использовать вторую формулировку 2-го закона Кирхгофа, форма записи которого имеет вид $\sum U = 0$. Например, нужно определить напряжение U_{52} (см. рис. 1.8). Записываем уравнение для мысленного контура 2-1-5-2, изобразив стрелку искомого напряжения:

$$U_{52} - I_3 r_3 = E_2 - E_3 .$$

Аналогично для контура 5-4-2-5: $I_2 r_2 + I_4 r_4 - U_{52} = E_4$.

Из каждого составленного уравнения можно определить искомое напряжение при известных остальных величинах.

На основании рассмотренных законов разработаны многочисленные методы расчета сложных электрических цепей (см. [7], [26]).

Во многих случаях анализ состояния сложной цепи может быть облегчен при использовании некоторых топологических понятий и методов. К таким понятиям относятся, например, неориентированные и ориентированные графы, которые используются для характеристики геометрической структуры схемы электрической цепи. В графах линейными отрезками, называемыми *рёбрами*, изображают ветви схемы электрической цепи. Концевые точки ветвей называют *узлами* (*вершинами*).

2.1.1. Основные понятия и определения

Электрический ток, меняющийся во времени, называют переменным током. Если изменения напряжений и токов в цепях происходят по гармоническому закону, то такие цепи называются цепями гармонического (синусоидального) тока. Вид кривой синусоидального тока показан на рис.2.1.

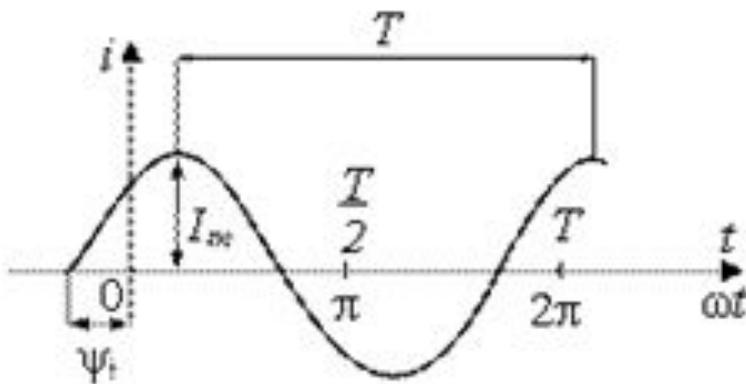


Рис.2.1.Кривая синусоидального тока

В предыдущих лекциях рассматривались электрические цепи при условии, что они находятся под воздействием постоянных напряжений и токов. В действительности же действующие в электрических цепях токи и напряжения являются переменными, т. е. представляют собой электрические *колебания*. Напомним, что колебаниями называются процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени. Различают неперiodические и периодические колебания.

Простейшим и в то же время наиболее важным типом периодических колебаний являются гармонические, когда колеблющаяся величина $s(t)$,

Исключительная роль гармонических колебаний в теории и практике радиотехники объясняется следующими обстоятельствами:

они широко используются для передачи сигналов и электрической энергии (например, промышленный ток с частотой 50 Гц);
применяются как простейший испытательный сигнал;
являются единственным типом колебаний, форма которых не изменяется при прохождении через любую линейную систему;
любое периодическое негармоническое колебание может быть представлено в виде суммы (наложения)

различных гармонических колебаний (такое представление называют спектром негармонического колебания).

Замечание:

Если временной интервал ограничен $t_1 \leq t \leq t_2$, то имеет место отрезок гармонического колебания, который уже будет обладать отличными от гармонического колебания свойствами; при этом чем больше временной интервал, тем ближе свойства отрезка к свойствам самого гармонического колебания; во всём курсе лекций предполагается, что временной интервал исчисляется от нуля до бесконечности: $0 \leq t < \infty$.

Определение гармонических напряжений и токов

Электрическое гармоническое колебание аналитически записывают в виде функции:

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

или

$$s(t) = S_m \sin(\omega t + \varphi_0).$$

Традиционно в электротехнике используют синусную форму записи, а в теории электрических цепей (радиотехнике) — косинусную, которой, если это не оговаривается особо, и будем пользоваться в дальнейшем:

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_0) = S_m \cos \theta(t). \quad (7.1)$$

Если под колебанием $s(t)$ понимать ток $i(t)$ или

напряжение $u(t)$, то (7.1) будет представлять собой соответственно гармонический ток или гармоническое напряжение,

причём $S_m = I_m$ или $S_m = U_m$.

Гармоническое колебание определено полностью, если заданы все

три его параметра: S_m — амплитуда, ω — круговая частота, φ_0 — начальная фаза.

Рассмотрим смысл указанных параметров (рис. 7.1):

S_m — *амплитуда колебания* — наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины; *размерность амплитуды* совпадает с *размерностью колебания* $s(t)$;

$\theta(t) = \omega t + \varphi_0$ — периодически изменяющийся *аргумент*

функции $s(t)$, называемый мгновенной фазой или просто фазой

колебания; выражается в *радианах* (рад); $1 \text{ рад} \approx 57,3^\circ$;

φ_0 — начальная фаза (рад) — значение мгновенной фазы

при $t = 0$, т. е. $\theta(0) = \varphi_0$; начальная фаза может быть как положительной, так и отрицательной; начальная фаза определяет

значение гармонического колебания в момент $t = 0$ и пропорциональна расстоянию от ближайшего максимума до оси

ординат. При $\varphi_0 > 0$ максимум смещён влево от оси, а

при $\varphi_0 < 0$ — вправо; при $\varphi_0 = 0$ максимум располагается на оси
ординат.

$$\omega = \frac{d\theta(t)}{dt}$$

- круговая частота (угловая скорость) — определяет скорость изменения фазы, выражается в *радианах в секунду* (рад/с), т. е. круговая частота численно равна изменению мгновенной фазы за единицу времени (секунду).

Введём ещё два характерных для периодических колебаний параметра: период и частоту.

T — *период колебания* — наименьший интервал времени, через который процесс повторяется, а именно:

$$s(t) = s(t \pm mT) \quad (7.2)$$

этому периоду соответствует изменение фазы

на 2π радиан $2\pi = [\omega(t + T) + \varphi_0] - (\omega t + \varphi_0) = \omega T$,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f, \text{ где величина}$$
$$f = \frac{1}{T}$$

(7.4)

называется *циклической частотой* и измеряется в герцах (Гц).

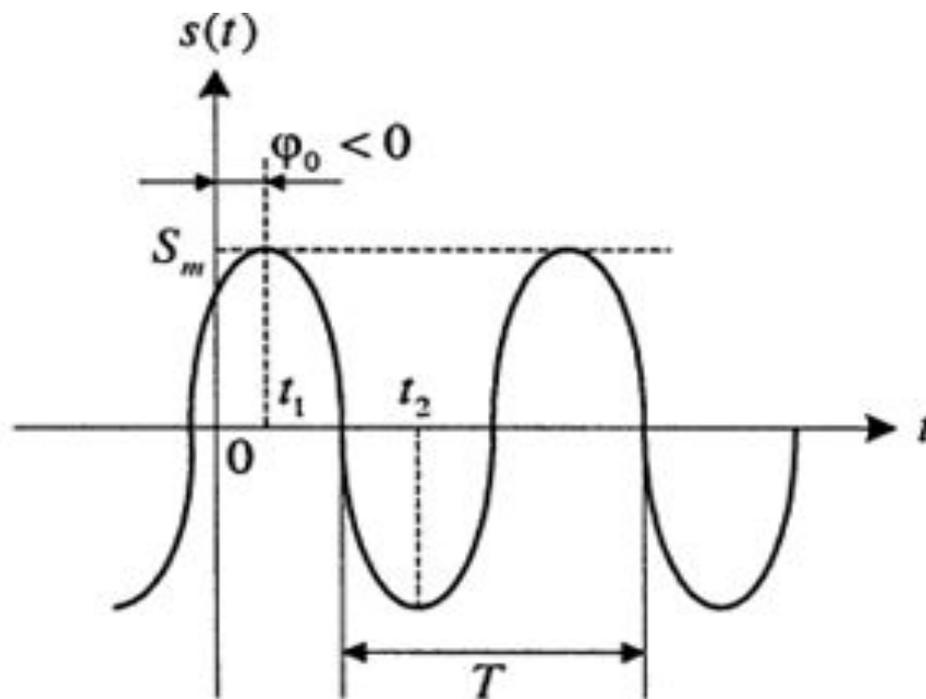


Рис. 7.1. К определению гармонического колебания

В ряде практических задач требуется знать фазовые соотношения между гармоническими колебаниями одинаковой частоты. Фазовые соотношения характеризуют *разностью фаз* сравниваемых колебаний.

Пусть рассматриваются два колебания

$$s_1(t) = S_{1m} \cos(\omega t + \varphi_{01}); \quad s_2(t) = S_{2m} \cos(\omega t + \varphi_{02}).$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$$

называется *разностью фаз* или *сдвигом фаз* этих колебаний.

Если $\Delta\varphi > 0$, то колебание $s_2(t)$ отстаёт от колебания $s_1(t)$ по фазе на угол $\Delta\varphi$; если $\Delta\varphi < 0$, то колебание $s_2(t)$ опережает колебание $s_1(t)$ на угол $\Delta\varphi$.

Если сдвиг фаз между двумя колебаниями

равен 0 , π или $\pi/2$ радиан, то говорят, что колебания происходят в фазе, противофазе или находятся в квадратуре соответственно.

При практических расчётах часто начальную фазу выражают в градусах ($^\circ$). Поскольку π соответствует 180° , то нетрудно получить соотношение

$$\varphi_{\text{рад}} = \pi \frac{\varphi_{\text{град}}}{180}.$$

Энергетические характеристики гармонических колебаний

Кроме указанных в разд. 7.1.1 параметров, гармонические колебания описываются энергетическими характеристиками:

- мгновенной мощностью,
- средней мощностью,
- действующими (эффективными) значениями амплитуд напряжения и тока.

Мгновенная мощность гармонических колебаний при согласном выборе положительных направлений тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ определяется как произведение мгновенных значений тока и напряжения

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \cos(\omega t + \varphi_{0u}) \cos(\omega t + \varphi_{0i}).$$

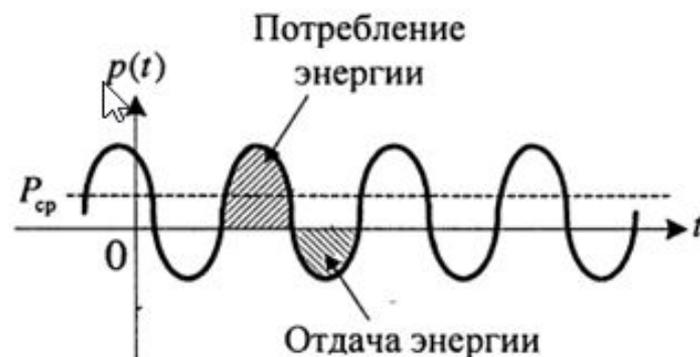


Рис. 7.2. Временная диаграмма мгновенной мощности

Положительным значениям мощности соответствует потребление цепью электрической энергии, а отрицательным значениям — отдача электрической энергии. В пассивных цепях это происходит за счёт энергии, запасаемой в конденсаторах (энергия электрического поля) и/или в индуктивностях (энергия магнитного поля). Для цепей, содержащих активные элементы, это означает, что цепь генерирует электрическую энергию.

Символическое изображение гармонических колебаний

Гармонические напряжения и токи в линейной цепи находятся в результате решения задач анализа, которые даже для относительно простых цепей, как это будет видно из дальнейшего, оказываются достаточно трудоёмкими. На практике используются *функциональные преобразования*, в результате которых операции над исходными функциями заменяются более простыми операциями над некоторыми новыми функциями. Исходные функции называются *оригиналами*, а соответствующие им новые *функции* — *изображениями* или *символами*.

Решение любой задачи методом функционального преобразования состоит из трёх следующих основных этапов:

1. Прямого преобразования оригиналов к их изображениям (символам).
2. Вычисления изображений искомых функций по правилам операций над изображениями.
3. Обратного преобразования полученных изображений искомых функций к их оригиналам.

Идея символического изображения гармонических колебаний состоит в замене гармонических функций комплексными числами. Возможность такого изображения гармонических функций заложена в том, что в режиме гармонических колебаний все колебания имеют одну и ту же *заранее известную частоту* ω , равную частоте внешнего воздействия. Тогда гармоническое колебание

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

достаточно охарактеризовать только *два вещественными числами*: X_m и φ_0 , которые можно объединить в одно *комплексное число* и рассматривать его как символическое изображение гармонического колебания. А операции над числами проще операций над функциями.

Законы Ома и Кирхгофа для комплексных амплитуд

Обозначим:

- комплексную амплитуду тока $\dot{I}_m = I_m e^{j\varphi_i}$,
- комплексную амплитуду напряжения $\dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}$.

Покажем, что изученные ранее законы Ома и Кирхгофа справедливы и для комплексных амплитуд.

Закон Ома в символической форме:

для определения закона Ома необходимо установить связи между комплексными токами и напряжениями, действующими в некотором двухполюснике (рис. 7.3).

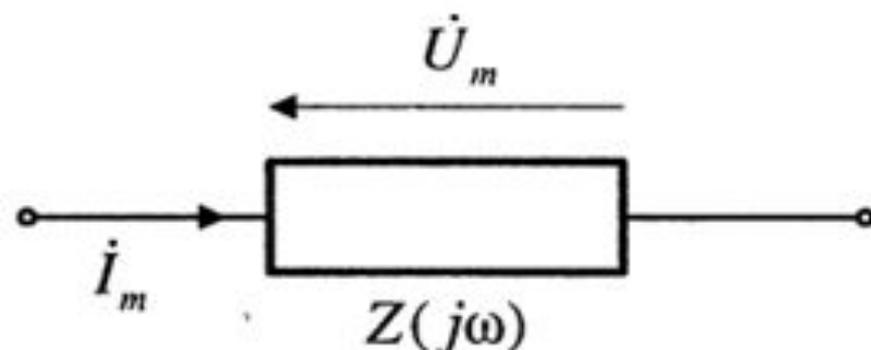


Рис. 7.3. Двухполюсник

Комплексным сопротивлением двухполюсника $Z(j\omega)$ называется отношение комплексных амплитуд напряжения и тока на входе двухполюсника

$$Z(j\omega) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m}. \quad (7.20)$$

Комплексное сопротивление называют также комплексом *полного сопротивления*, или *импедансом*.

Комплексной проводимостью двухполюсника $Y(j\omega)$ называется отношение комплексных амплитуд тока и напряжения на входе двухполюсника

$$Y(j\omega) = \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_m}. \quad (7.21)$$

Комплексную проводимость называют также *комплексом полной проводимости*, или адмитансом.

Первый закон Кирхгофа в символической форме:

сумма комплексных амплитуд токов всех N ветвей, подключённых к каждому из узлов электрической цепи, равна нулю.

Действительно, для мгновенных значений токов имеем:

$$\sum_{k=1}^N i_k(t) = 0;$$

где k — номер ветви, подключённой к рассматриваемому узлу. Тогда, заменяя мгновенные значения токов их комплексными амплитудами, согласно правилу сложения комплексных амплитуд получаем:

$$\sum_{k=1}^N \dot{I}_{m_k} = 0.$$

Второй закон Кирхгофа в символической форме,

сумма комплексных амплитуд напряжений на всех N ветвях, входящих в любой контур цепи, равна нулю.

Это показывается так же, как и для первого закона:

$$\sum_{k=1}^N u_k(t) = 0; \quad \sum_{k=1}^N \dot{U}_{m_k} = 0.$$

Выводы:

- активные составляющие комплексных сопротивлений и проводимостей пассивных двухполюсников не могут принимать отрицательных значений;
- реактивные составляющие могут принимать как положительные, так и отрицательные значения:

если $x > 0$ и $(b > 0)$ сопротивление (проводимость) имеет индуктивный характер, в противном случае — ёмкостной;

если колебания напряжения и тока происходят в фазе $\varphi_z = \varphi_u$, двухполюсник обладает чисто активным сопротивлением (проводимостью).

9 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

9.1 Определение трехфазной системы. Получение 3фазного тока

Трёхфазной электрической системой называется совокупность трёх электрически связанных однофазных систем, в которых с одинаковой частотой действуют одинаковые по величине ЭДС, сдвинутые относительно друг друга на 120 градусов и генерируемые одним генератором.

Трёхфазная система переменного тока была разработана, а затем практически освоена выдающимся русским инженером-электротехником М. О. Доливо-Добровольским (1862 — 1919) в 1891 г. Им были разработаны трёхфазные генератор, трансформатор и асинхронный двигатель. Простое устройство, относительная дешевизна, высокая надежность в эксплуатации трёхфазных генераторов, трансформаторов и двигателей, более экономичная передача энергии на расстояние по сравнению с однофазной системой способствовали широкому промышленному внедрению трёхфазной системы переменного тока.

Простейший трёхфазный генератор показан на рисунке 9.1, состоит из двух основных частей: статора и ротора.

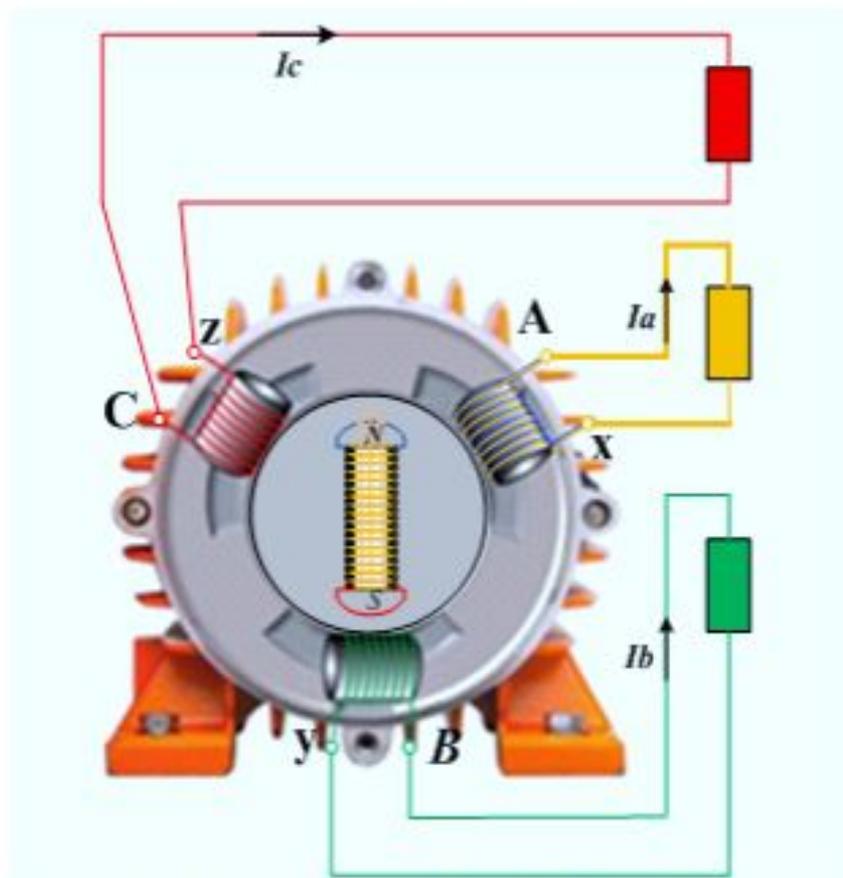


Рисунок 9.1- Простейший трёхфазный генератор.

На статоре – неподвижная часть генератора, расположены три одинаковые обмотки, смещенные одна относительно другой на 120° по внутренней поверхности сердечника.

Начала обмоток обозначают буквами A, B, C , а их концы — буквами X, Y, Z .

Каждую обмотку генератора и её электрическую цепь называют фазой.

Подвижная часть генератора — ротор — мощный электромагнит с обмоткой, получающей питание от источника постоянного тока.

На практике все начала и концы фазных обмоток статора выводятся в коробку или на щиток выводов и расположены в порядке показанной на рисунке 9.2. Указанное расположение выводов на щитке, как будет показано ниже, удобно для включения обмоток заданным способом.

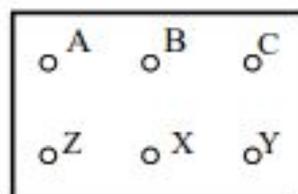


Рисунок 9.2 - Щиток выводов обмоток статора

Нужно заметить, что для удобства технического обслуживания и для маркировки на станциях и подстанциях электрические фазы имеют строгую расцветку.

Цвета шин фаз стандартизированы: A_x - **желтый**, B_y - **зелёный**, C_z - **красный**.

При вращении ротора будет вращаться и его магнитный поток. В результате этого, в каждой обмотке статора наводится синусоидальная ЭДС с максимальной амплитудой E_{mA} , E_{mB} , E_{mC} , следовательно считаем: $E_{mA} = E_{mB} = E_{mC} = E_m$

Таким образом, амплитудные значения ЭДС всех фаз имеют одинаковые значения. Между ЭДС соседних фаз образуется угол сдвига по фазе относительно ЭДС соседней обмотки на 120° . Частота изменения ЭДС - f , пропорциональна скорости вращения ротора.

Принимая за начало отсчета момент времени, когда ЭДС - E_A , в обмотке Ax равна нулю, то при вращении ротора против часовой стрелки уравнения ЭДС можно записать в следующем виде:

ЭДС первой обмотки описывается уравнением:

$$e_A = E_m \sin \omega t \quad 9.1$$

тогда ЭДС второй обмотки:

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120) \quad 9.2$$

а ЭДС третьей обмотки:

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad 9.3$$

Этим уравнениям соответствуют векторная диаграмма и графики изменения ЭДС, изображенные на рисунках 9.3 и 9.4

Если принять за исходный вектор ЭДС E_A , то ЭДС E_B отстает от E_A , а ЭДС E_C отстает от E_B . Следовательно, максимальных значений ЭДС в фазах достигают в таком порядке: сначала в фазе A , затем в B и далее в C .

Векторы ЭДС вращаются против часовой стрелки, а мимо неподвижной вертикальной оси они будут проходить в следующем порядке:

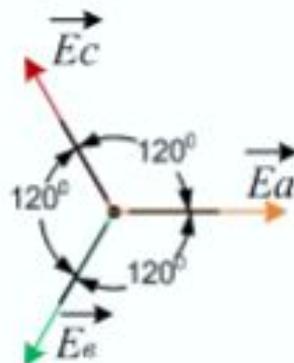


Рисунок 9.3 – Векторная диаграмма ЭДС в обмотках статора

Трехфазная симметричная систем ЭДС — это совокупность трех ЭДС имеющих одинаковую частоту и амплитуду, сдвинутых по фазе относительно друг друга на углы 120° .

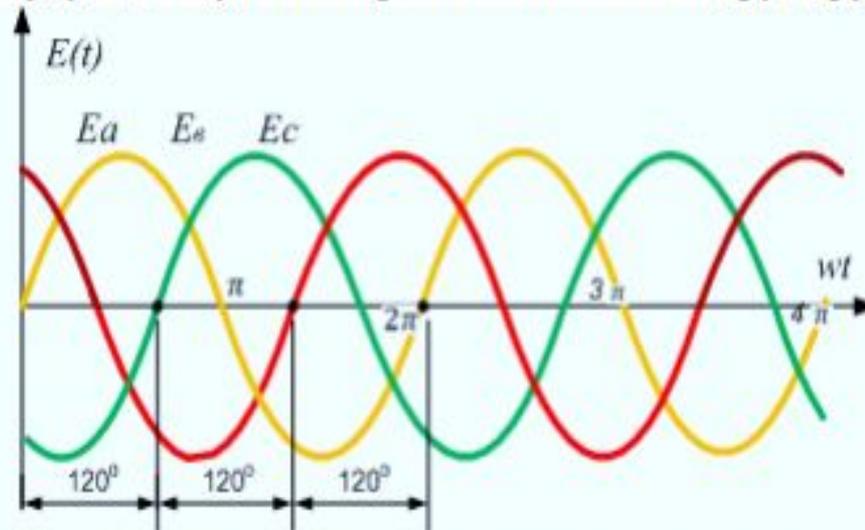


Рисунок 9.4 – Графики изменения ЭДС в фазных обмотках генератора

Для расчетов, обычно, строят векторную диаграмму токов и напряжений изображая вектор напряжения на фазе А - \vec{U}_A , направленным вертикально вверх.

На рисунке 9.5 показаны: а — векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС генератора, б — векторная диаграмма напряжений на равномерной нагрузке – трёхпалая звезда.

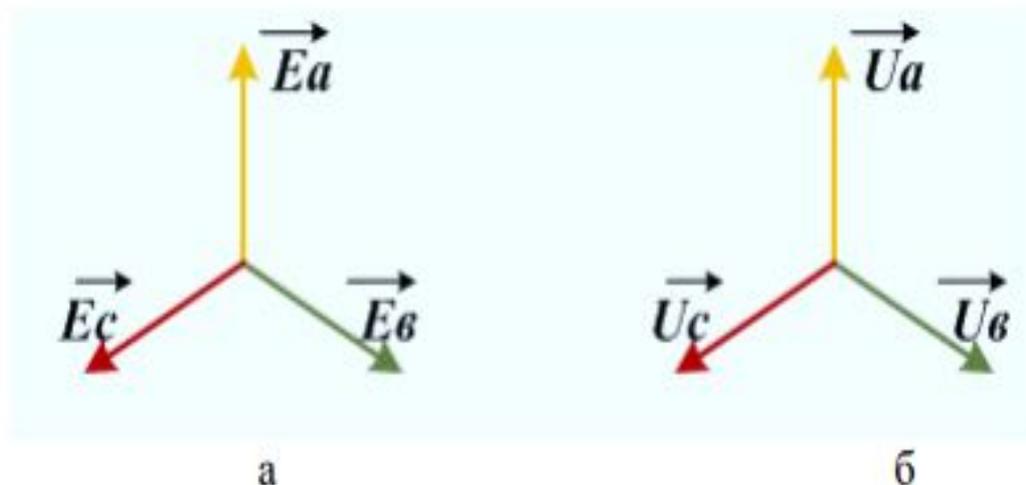


Рисунок 9.5 - Векторная диаграмма ЭДС трехфазного генератора и напряжений на нагрузке

ЭДС всех фаз трехфазного генератора принимают максимальные (амплитудные) значения в определенной последовательности. Рассмотренную последовательность *A-B-C* принято называть *прямой последовательностью фаз ЭДС*.

Различают симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. При симметричном режиме сопротивления трех фаз одинаковы и ЭДС образуют трехфазную симметричную систему. В этом случае токи фаз I_a, I_b, I_c будут равны по величине и сдвинуты по углу 120 градусов.

При несимметричном (неравномерном) режиме комплексные сопротивления фаз не равны друг другу, токи и их фазные сдвиги при этом будут различными.

Признаком не симметрии трехфазной системы ЭДС является неравенство амплитуд или неравенство углов сдвига фаз между каждой парой ЭДС.

Основное свойство симметричных трехфазных систем синусоидальных величин заключается в том, что алгебраическая сумма мгновенных значений этих величин в любой момент времени равна нулю.

Значит, при симметричной трехфазной системе ЭДС :

$$e_A + e_B + e_C = 0 \quad 9.4$$

а при симметричной трехфазной системе токов :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad 9.5$$

9.2 Соединение обмоток генератора

9.2.1 Способы соединения обмоток

Если к каждой обмотке генератора присоединить отдельную нагрузку с сопротивлениями Z_A , Z_B , Z_C как показано на рисунке 9.1, то в результате образуются три самостоятельные однофазные электрические цепи с токами генерируемыми одним генератором рисунок 9.6. В такой несвязанной системе работают шесть проводов. Это экономически не выгодно и неэффективно.

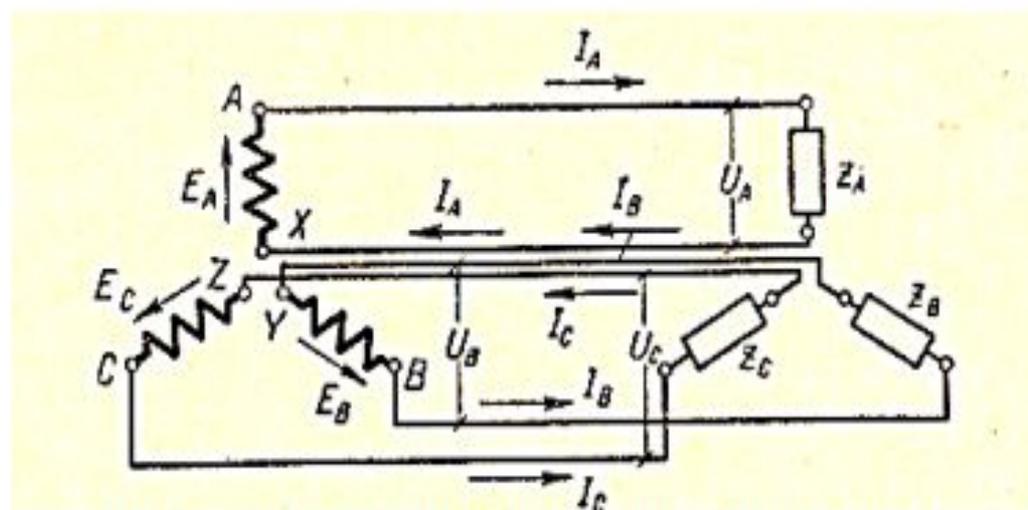


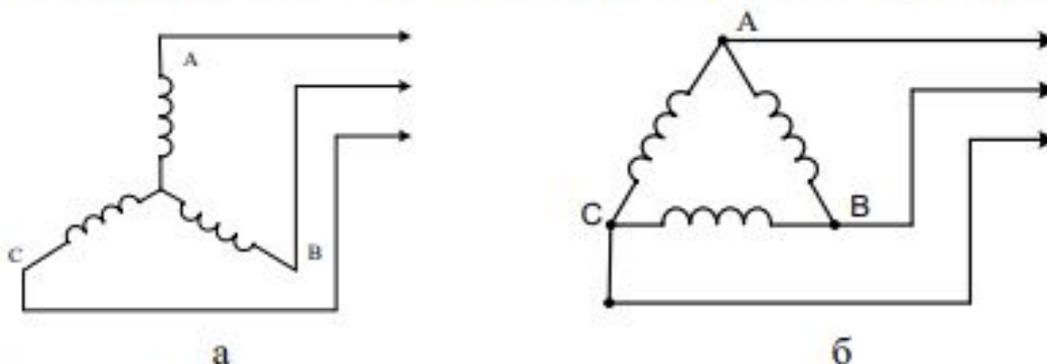
Рисунок 9.6 – Несвязанная трёхфазная цепь

В несвязанной системе генератор с приемником энергии соединяется шестью проводами. Большое число соединительных проводов — основной недостаток несвязанных систем, которые поэтому и не применяются. Сокращение числа соединительных проводов достигается в связанных системах, где обмотки генератора, как и отдельные фазы приемника, электрически связаны между собой и образуют трехфазные цепи.

Для этой цели выдающимся М.О.Доливо-Добровольским предложены две схемы соединения — **звездой** и **треугольником**, которые применяются и в настоящее время.

При соединении звездой, концы обмоток статора соединяются в одной точке, называемой нулевой N, а начала обмоток выходят на линии электропередач рис. 9.7(а).

При соединении треугольником конец одной обмотки статора соединяется с началом другой обмотки. Ответвления от начала обмоток выходят на линии электропередач рисунок 9.7(б).



На рисунке 9.7 - Способы соединения обмоток генератора

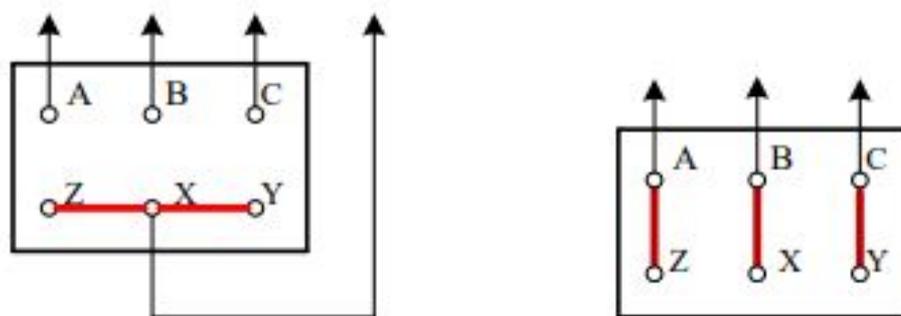


Рисунок 9.8 - Щиток выводов генератора, при разных способах соединения обмоток: а - соединение «звезда», б – соединение «треугольник»

9.2.1 Соединение обмоток звездой - «Звезда с нулевым проводом»

На электрической схеме (рисунок 9.9) обмотки статора трехфазного генератора располагают под углом 120° . При соединении обмоток звездой их концы X, Y и Z соединяют в одну точку O, называемую нулевой точкой или нейтралью (N) генератора. От нулевой точки к потребителям энергии прокладывают нулевой или нейтральный провод. Кроме нулевого к потребителям энергии прокладывают три линейных провода, которые соединяются с началами обмоток A, B и C.

Каждый линейный провод представляет собой отдельную фазу.

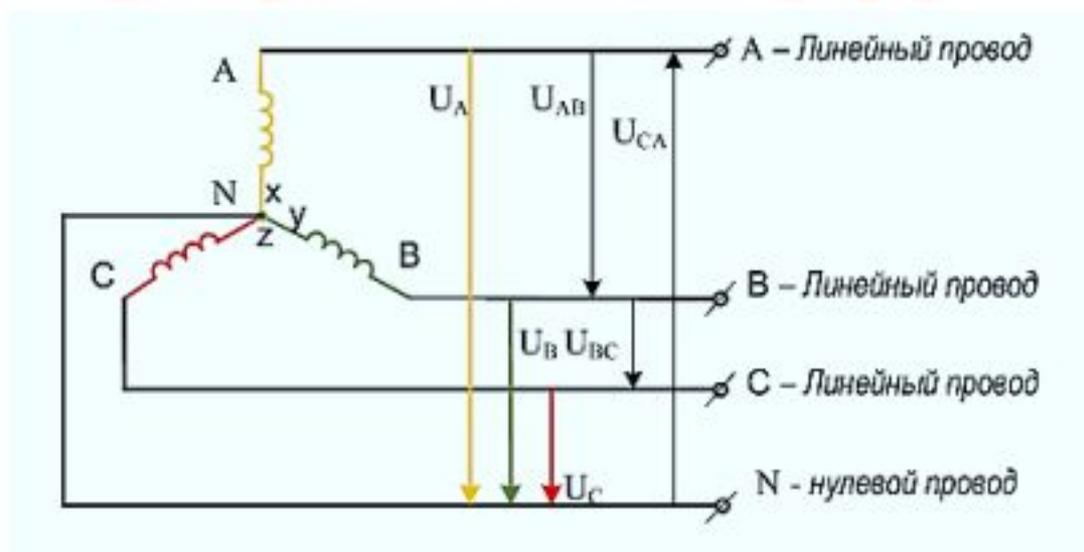


Рисунок 9.9 – Линейные и фазные напряжения при соединении «Звезда с нулевым проводом»

Полученная таким образом система называется звездой с нулевым проводом – четырёхпроводная линия. В случае отсутствия нулевого провода цепь получает название – «Трёхпроводная звезда».

9.2.2 Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником

Электрическая схема соединения обмоток генератора треугольником.

Для соединения обмоток генератора треугольником (рисунок 9.12) конец первой обмотки X соединяют с началом второй обмотки B , конец второй обмотки Y с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z с началом первой обмотки A . От начала каждой обмотки A , B , C к потребителям энергии прокладывают линейный провод. Нулевой провод при этом соединении отсутствует. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником получают трехпроводную, электрически связанную трехфазную систему.

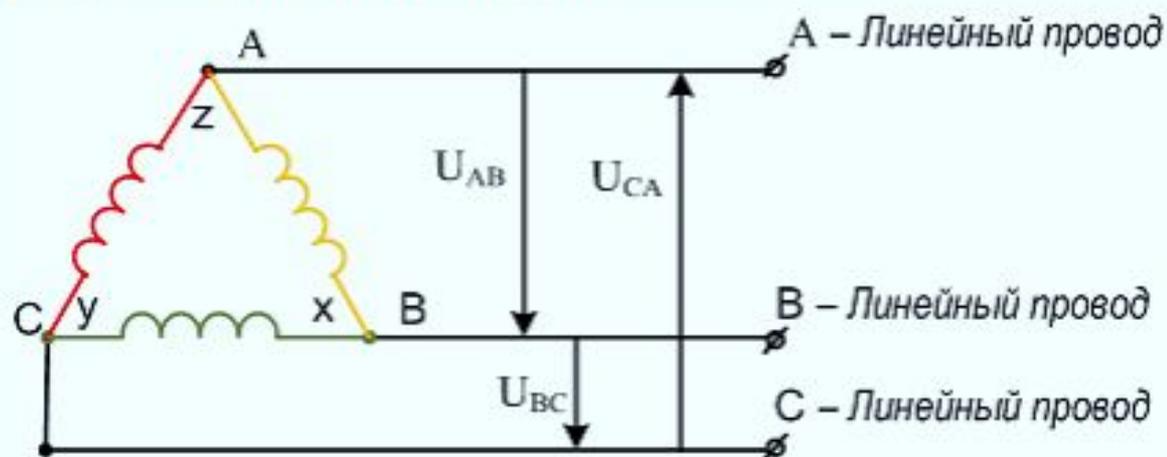


Рисунок 9.12 – Линейные и фазные напряжения при соединении «Треугольник»

На рисунке 9.12 показаны напряжения, действующие в трёхфазной системе при соединении обмоток треугольником. Обозначим линейные напряжения генератора U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . Напомним, что фазное напряжение измеряется между началом и концом обмотки одной из фаз генератора, а линейные — между линейными проводами или началами двух фазных обмоток.

Важно! Особенностью трёхфазной системы с соединением «звезда» является возможность двух значений напряжения.

Для «Звезды» справедливо: $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$, $I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}$

На практике существуют стандартные значения номинального напряжения сети :

660/380 В; 380/220 В, 220/127 В.

9.2.2 Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником

Электрическая схема соединения обмоток генератора треугольником.

Для соединения обмоток генератора треугольником (рисунок 9.12) конец первой обмотки X соединяют с началом второй обмотки B , конец второй обмотки Y с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z с началом первой обмотки A . От начала каждой обмотки A, B, C к потребителям энергии прокладывают линейный провод. Нулевой провод при этом соединении отсутствует. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником получают трехпроводную, электрически связанную трехфазную систему.

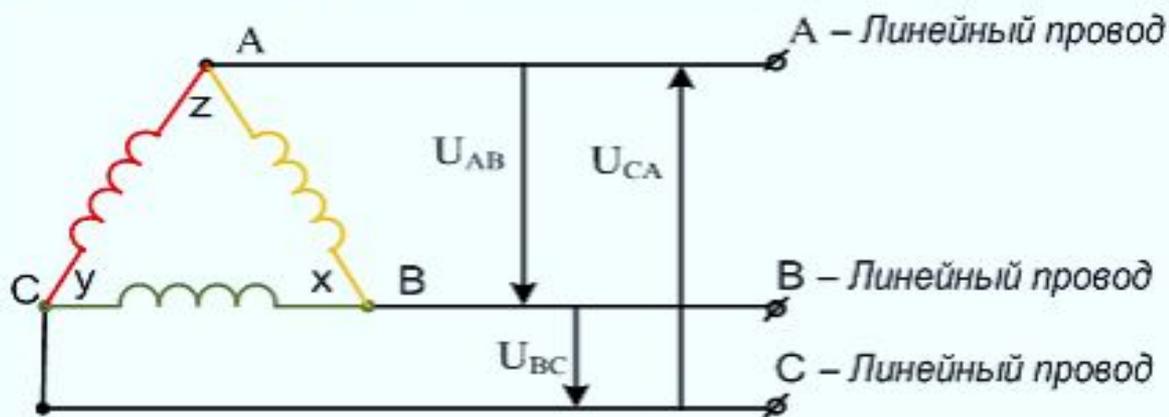


Рисунок 9.12 – Линейные и фазные напряжения при соединении «Треугольник»

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

Важно !

Особенности трёхфазной системы «Треугольник»:

- $I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ф}}$; $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ – соотношения для токов и напряжений.
- В системе нет нулевого провода.

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$$

9.3.4 Роль нулевого провода

Нулевой провод является уравнивающим. Потенциалы нейтрали источника и приемника с помощью этого провода принудительно уравниваются, а поэтому звезда векторов фазных напряжений приемника точно совпадает со звездой фазных напряжений источника.

Четырехпроводная система применяется в электрических сетях с напряжением 380/220 В при электроснабжении от общего источника силовой (электродвигатели) и осветительной (электролампы) нагрузки (рисунок 9.24).

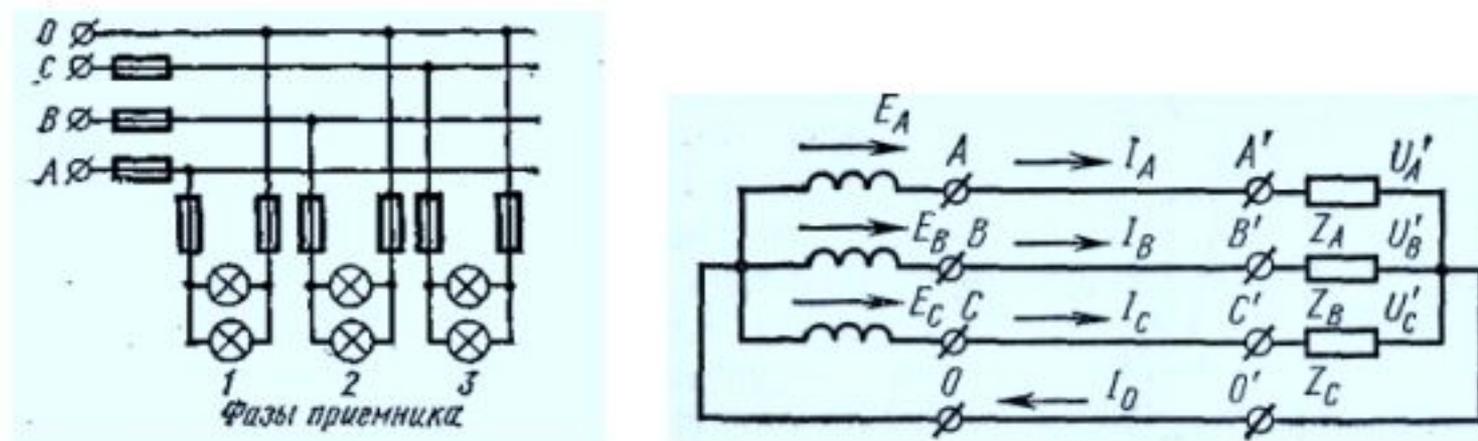


Рисунок 9.24 – Включение нагрузки в четырёхпроводную сеть

На нулевом проводе никогда не ставят выключателей и предохранителей. Необходимо чтобы он был всегда в готовности взять на себя неравномерность нагрузки фаз. Обрыв «нуля» считается аварийным режимом.

В четырёхжильном силовом кабеле, нулевой провод можно отличить от рабочих жил по цвету изоляции (голубая) или по сечению (площадь сечения нейтрали меньше чем сечение рабочих жил).

9.3.4 Аварийные режимы при включении нагрузки звездой

Ранее были рассмотрены свойства трехфазной системы при соединении приемников энергии звездой.

Относительно нулевого провода были сделаны следующие выводы:

1) при равномерной нагрузке этот провод к приемникам электрической энергии может не подключаться, так как ток в нем равен нулю;

2) при неравномерной нагрузке в нулевом проводе имеется некоторый ток

Какие же изменения произойдут в фазах приемника при неравномерной нагрузке, если отключить нулевой провод?

Для этого рассмотрим некоторые характерные неблагоприятные случаи неравномерной нагрузки.

Чтобы создать **неравномерную нагрузку** (рисунок 9.25), отсоединим от генератора первую фазу приемника (для этого отключим рубильник P).

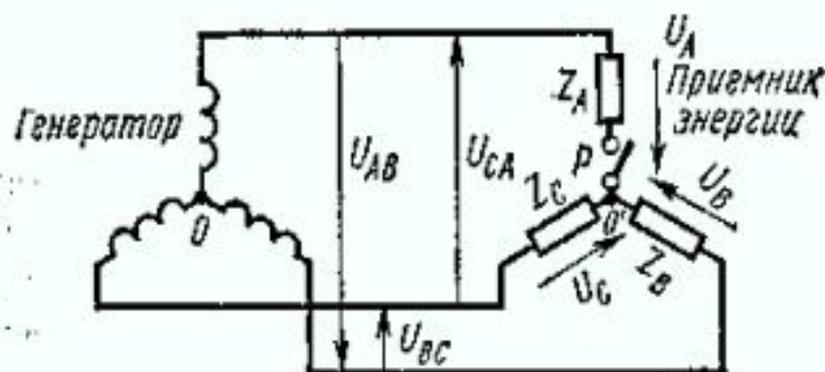


Рисунок 9.25 – Моделирование обрыва фазы

При этом цепь с последовательным соединением двух равных сопротивлений Z_B и Z_C будет находиться под линейным напряжением U_{BC} . Падения напряжения на них будут одинаковы и равны половине напряжения U_{BC} . Следовательно, нулевая точка O' окажется посередине отрезка BC

Важно! При обрыве одной фазы в трёхпроводной трехфазной цепи: напряжение на поврежденной фазе увеличивается до $\frac{\sqrt{3}}{2}U_{л}$ ($0,87U_{л}$), а напряжения на здоровых фазах падает до $0,5U_{л}$

Важно !

- ✓ При отсутствии нулевого провода, в случае КЗ на нагрузке одной из фаз, напряжение на поврежденной фазе падает до нуля, а на здоровых фазах увеличивается до линейного значения $U_{л}$.
- ✓ При неравномерной нагрузке и отключенном нулевом проводе происходит смещение нулевой точки $0'$ приемника из центра треугольника линейных напряжений генератора.
- ✓ В результате этого изменяются фазные напряжения приемника электрической энергии. Более загруженные фазы приемника (с меньшим общим сопротивлением) оказываются под меньшим фазным напряжением, а менее загруженные фазы приемника (с большим сопротивлением) — под большим фазным напряжением.

3.1. Электромагнетизм

Электромагнетизм - это раздел электричества, рассматривающий воздействие движущихся зарядов на движущиеся заряды.

Движение заряда может быть равномерным (I закон Ньютона). Если к такому заряду привязать систему отсчета, то в этой системе заряд не движется. Таким образом, если другая заряженная частица движется параллельно первой с той же скоростью и в том же направлении, то между ними не будет магнитного взаимодействия, а только кулоновское взаимодействие. И так, чтобы магнитное взаимодействие проявилось, частицы должны двигаться или с разной скоростью или в разном направлении.

Связь характеристик магнитного поля:

$$B = \mu_0 * H; \text{ где } B - \text{индукция магнитного поля; } H - \text{напряженность магнитного поля; } \mu_0 = 1,26 * 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}.$$

Для того, чтобы заряды направленно двигались в пространстве, необходимо наличие проводящей среды, специально ориентированной в пространстве.

Назначение электромагнитных устройств

Производство, преобразование, передача, распределение или потребление электрической энергии осуществляются при помощи электротехнических устройств. Из всего их многообразия выделим электромагнитные устройства, работа которых основана на явлении электромагнитной индукции, сопровождающемся возникновением магнитных потоков.

К статическим электромагнитным устройствам относят дроссели, магнитные усилители, трансформаторы, реле, пускатели, контакторы и другие устройства. К вращающимся - электродвигатели и генераторы, электромагнитные муфты.



Совокупность ферромагнитных деталей электромагнитных устройств, предназначенных для проведения основной части магнитного потока, называется **магнитной системой электромагнитного устройства**. Особой конструктивной единицей такой системы является **магнитопровод**. Магнитные потоки, проходящие через магнитопроводы, могут частично замыкаться по немагнитной среде, образуя магнитные потоки рассеяния.

Магнитные потоки, проходящие через магнитопровод, могут создаваться при помощи постоянных или переменных электрических токов, протекающих в одной или более **индуктивных катушках**. Такая катушка представляет собой элемент электрической цепи, предназначенный для использования его собственной индуктивности и/или его магнитного поля.

Одна или несколько катушек образуют **обмотку**. Часть магнитопровода, на которой или вокруг которой расположена обмотка, называется **сердечником**, часть, на которой или вокруг которой обмотка не расположена, называется **ярмом**.

Расчет основных электрических параметров электромагнитных устройств базируется на законе полного тока и законе электромагнитной индукции. Явление взаимоиндукции используется для передачи энергии из одной электрической цепи в другую.

Смотрите более подробно здесь: [Магнитные цепи электрических аппаратов](#) и здесь: [Для чего нужен расчет магнитной цепи](#)

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Мощность трансформатора определяется максимально возможной индукцией материала магнитопровода и его размерами. Поэтому магнитопроводы (обычно стержневого типа) силовых трансформаторов большой мощности собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм.

Устройство и принцип работы трансформатора

Электромагнитным реле называется электромеханическое реле, работа которого основана на воздействии магнитного поля неподвижной обмотки на подвижный ферромагнитный элемент.

Любое электромагнитное реле содержит две электрические цепи: цепь входного (управляющего) сигнала и цепь выходного (управляемого) сигнала. По принципу устройства управляемой цепи различают неполяризованные и поляризованные реле. Работа неполяризованных реле, в отличие от поляризованных реле, не зависит от направления тока в управляющей цепи.



Дроссель – устройство, используемое в качестве индуктивного сопротивления в цепях переменного или пульсирующего тока.

Магнитопроводы с немагнитным зазором используются в дросселях переменного тока, которые служат для накопления энергии, и в сглаживающих дросселях, предназначенных для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. При этом существуют дроссели, в которых размер немагнитного зазора можно регулировать, что необходимо для изменения индуктивности дросселя в процессе его работы.

Устройство и принцип работы электрического дросселя

Магнитный усилитель – устройство, состоящее из одного или нескольких магнитопроводов с обмотками, с помощью которого в электрической цепи, питаемой от источника переменного напряжения или переменного тока, может изменяться ток или напряжение по величине, основанное на использовании явления насыщения ферромагнетика при действии постоянного подмагничивающего поля.

Принцип работы магнитного усилителя основан на изменении дифференциальной магнитной проницаемости (измеряемой на переменном токе) при изменении постоянного тока подмагничивания, поэтому простейшим магнитным усилителем является дроссель насыщения, содержащий рабочую обмотку и обмотку управления.

Существует пять характерных режимов работы трансформатора:

1. Рабочий режим;
2. Номинальный режим;
3. Оптимальный режим;
4. Режим холостого хода;
5. Режим короткого замыкания;

РАБОЧИЙ РЕЖИМ

Режим характеризуется следующими признаками:

- Напряжение первичной обмотки близко к номинальному значению или равно ему $\dot{u}_1 \approx \dot{u}_{1\text{НОМ}}$;
- Ток первичной обмотки меньше своего номинального значения или равен ему $i_1 \leq i_{1\text{НОМ}}$.

В рабочем режиме эксплуатируются большинство трансформаторов. Например, силовые трансформаторы работают с напряжениями и токами обмоток отличными от номинальных. Так происходит из-за переменчивого характера их нагрузки.

Измерительные, импульсные, сварочные, разделительные, выпрямительные, вольтодобавочные и другие трансформаторы, также обычно эксплуатируются в рабочем режиме просто из-за того, что напряжение сети к которой они подключены отличается от номинального.

НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Характерные признаки режима:

- Напряжение первичной обмотки равно номинальному $\dot{u}_1 = \dot{u}_{1\text{НОМ}}$;
- Ток первичной обмотки равен номинальному $\dot{i}_1 = \dot{i}_{1\text{НОМ}}$.

Номинальный режим работы является частным случаем рабочего режима. В таком режиме могут работать все трансформаторы, но как правило, с большими в сравнении с рабочим режимом потерями и как следствие, с меньшим КПД (коэффициентом полезного действия). Из-за этого при эксплуатации трансформатора его избегают.

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Режим характеризуется условием:

$$k_{\text{НГ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ХХ}}}{P_{\text{КЗ}}}} \quad (1)$$

Где $P_{\text{ХХ}}$ - потери холостого хода;

$P_{\text{КЗ}}$ - потери короткого замыкания;

$k_{\text{НГ}}$ - коэффициент нагрузки трансформатора, определяемый по формуле:

$$k_{\text{НГ}} = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}} \quad (2)$$

РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

Характерные признаки режима:

- Вторичная обмотка трансформатора разомкнута или к ней подключена нагрузка с сопротивлением гораздо большим сопротивления номинальной нагрузки обмотки⁽¹⁾ трансформатора;
- К первичной обмотке приложено напряжение $\dot{u}_{1xx} = \dot{u}_{1ном}$;
- Ток вторичной обмотки $i_2 \approx 0$ (для трехфазного трансформатора - $i_{2ф} \approx i_{2п} \approx 0$).

На рисунке 1 изображена схема опыта холостого хода однофазного, а на рисунке 2 - трехфазного двухобмоточных трансформаторов.

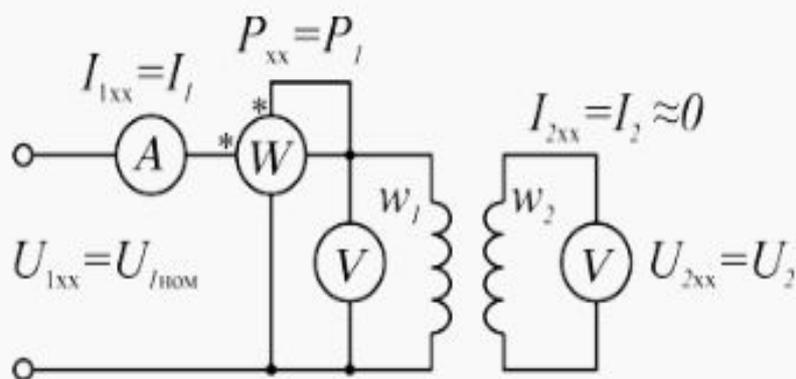


Рисунок 1 - Схема опыта холостого хода однофазного двухобмоточного трансформатора

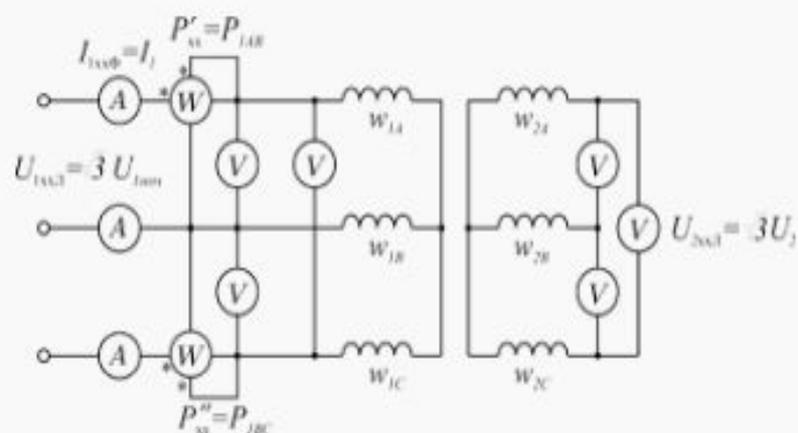


Рисунок 2 - Схема опыта холостого хода трехфазного двухобмоточного трансформатора

По существу в режиме холостого хода трансформатор представляет собой катушку на магнитопроводе, к которой подключен источник напряжения. Режим холостого хода является рабочим для трансформаторов напряжения. Кроме того, этот режим служит для определения тока i_x , мощности ΔQ_x холостого хода и ряда других параметров [2, с. 291][3, с. 207] (смотри "Опыт холостого хода трансформатора").

Примечание:

1. Под сопротивлением номинальной нагрузки обмотки понимается величина $R_{\text{НОМ}}$, равная отношению номинального напряжения обмотки $U_{\text{НОМ}}$ к её номинальному току обмотки $I_{\text{НОМ}}$

Режим короткого замыкания характеризуется:

- Вторичная обмотка замкнута накоротко или к ней подключена нагрузка сопротивлением гораздо меньшим внутреннего сопротивления трансформатора;
- К первичной обмотке приложена такая величина напряжения \dot{u}_1 , что ток первичной обмотки равен её номинальному току $\dot{i}_1 = \dot{i}_{1ном}$
- Напряжение вторичной обмотки $\dot{u}_2 = 0$ (для трехфазного трансформатора - $\dot{u}_{2ф} = \dot{u}_{2л} = 0$).

Схема опыта короткого замыкания изображена на рисунке 3 для однофазного, а на рисунке 4 - для трехфазного двухобмоточных трансформаторов.

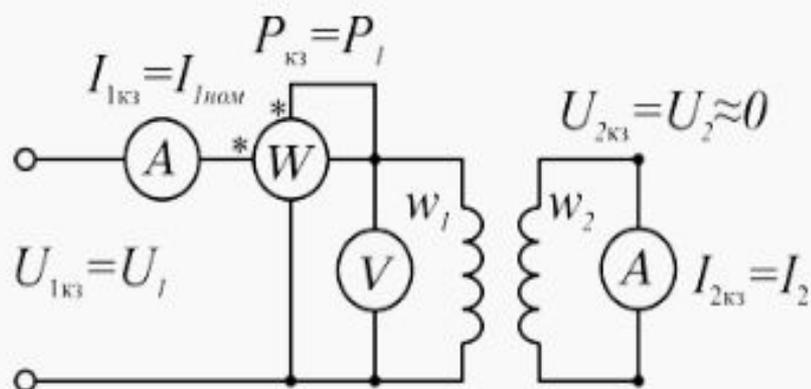


Рисунок 3 - Схема опыта короткого замыкания однофазного двухобмоточного трансформатора

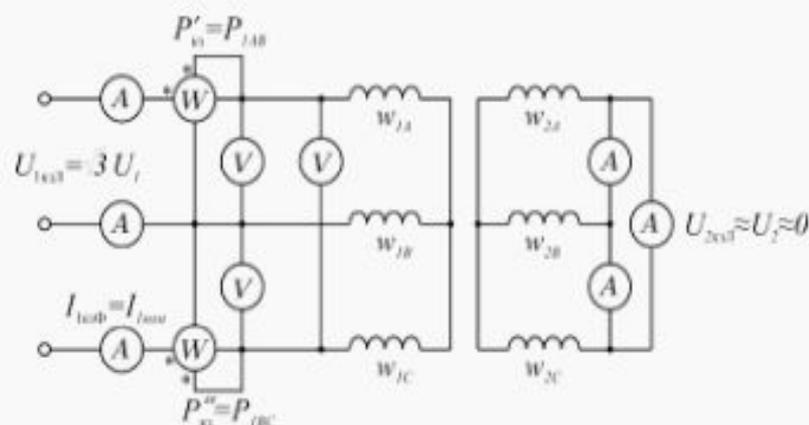


Рисунок 4 - Схема опыта короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора

Режим короткого замыкания является рабочим режимом для трансформаторов тока и сварочных трансформаторов, в тоже время являясь аварийным для других трансформаторов. Также он используется для определения напряжения u_k , мощности ΔP_k короткого замыкания и других параметров трансформатора [2, с. 294][3, с. 209] (смотри "Опыт короткого замыкания трансформатора").

Вращающаяся электрическая машина – устройство, предназначенное для преобразования энергии на основе электромагнитной индукции и взаимодействия магнитного поля с электрическим током, содержащее, по крайней мере, две части, участвующие в основном процессе преобразования и имеющие возможность вращаться или поворачиваться друг относительно друга.

Часть электрических машин, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой, называется статором, а вращающаяся часть – ротором.

Электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую, называется электромашинным генератором. Электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую, называется вращающимся электродвигателем.





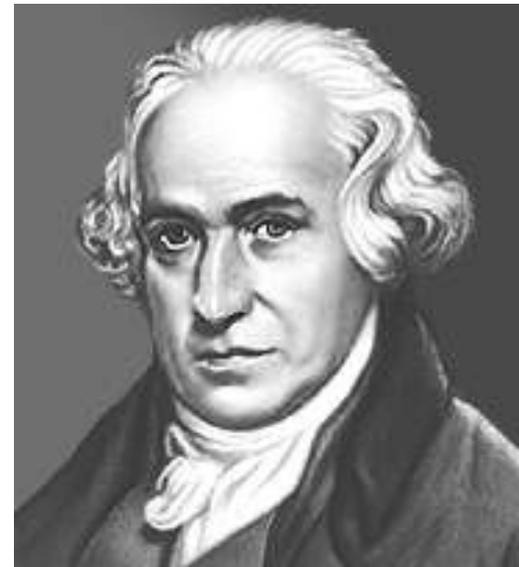
Энергия, затрачиваемая на перемещение заряда

$$w = \int_0^q u dq = \int_{-\infty}^t u i dt$$

Мгновенная мощность участка цепи:

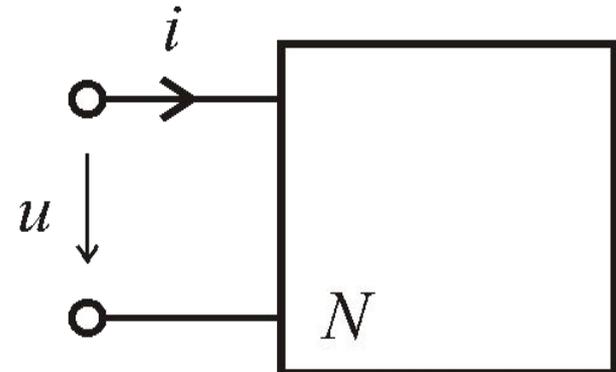
$$p = \frac{dw}{dt} = ui .$$

Мощность измеряется в ваттах (Вт).



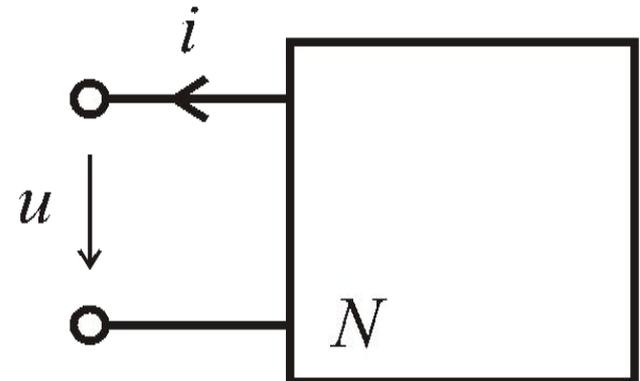
Джеймс Уатт
1736 – 1819

При совпадении знаков напряжения и тока мощность положительна. Это соответствует потреблению энергии участком цепи.



$$p = ui > 0$$

При несовпадении знаков напряжения и тока мощность отрицательна. Это означает, что участок цепи является источником энергии.



$$p = -ui < 0$$

Элементы электрических цепей

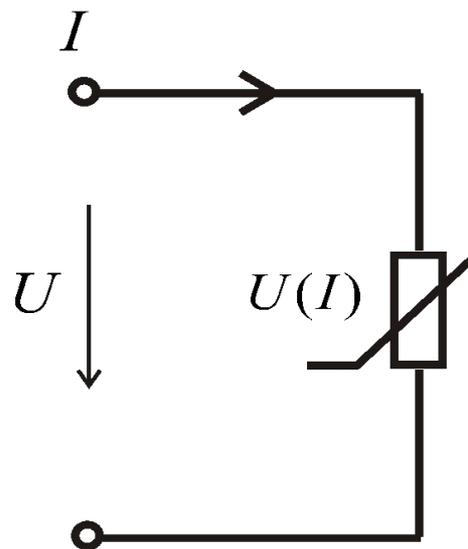
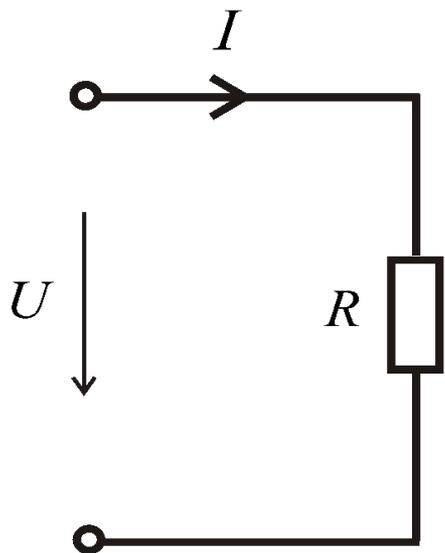
Под элементами в теории цепей понимают не реальные устройства, а их идеализированные модели, обладающие определенными свойствами реальных прототипов.

Таковыми идеализированными элементами являются резистивный, индуктивный и емкостный элементы, а также независимые источники напряжения и тока.

Соединяя между собой идеализированные элементы, мы получим модель, или схему замещения, приближенно отображающую процессы в реальном электронном устройстве.

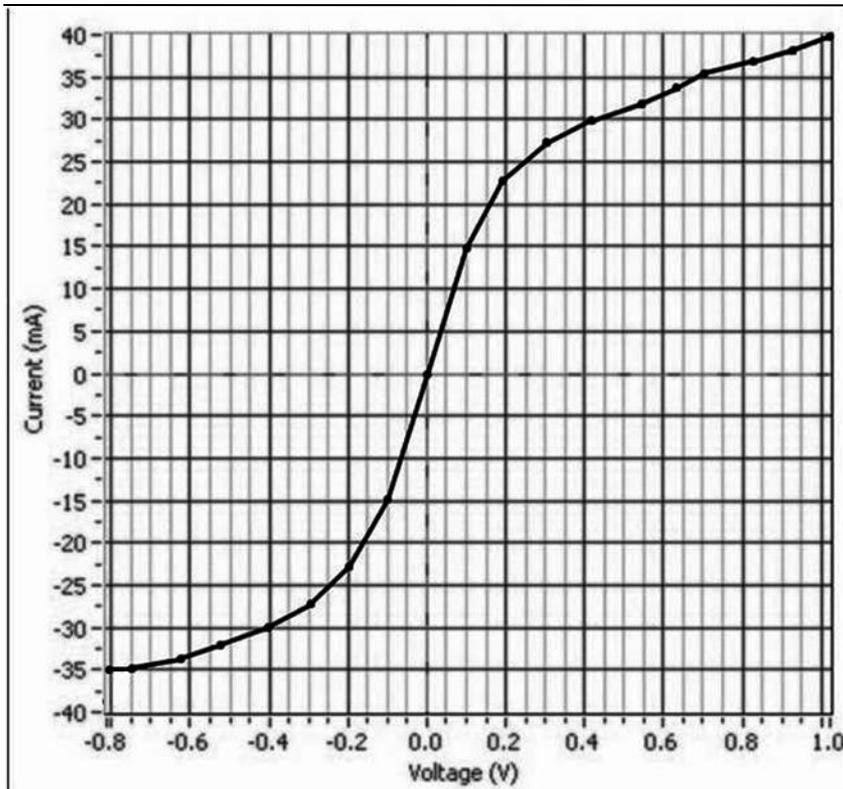
Резистивный элемент – идеализированный элемент, в котором происходит только необратимое преобразование электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии.

Условное графическое обозначение резистивного элемента:

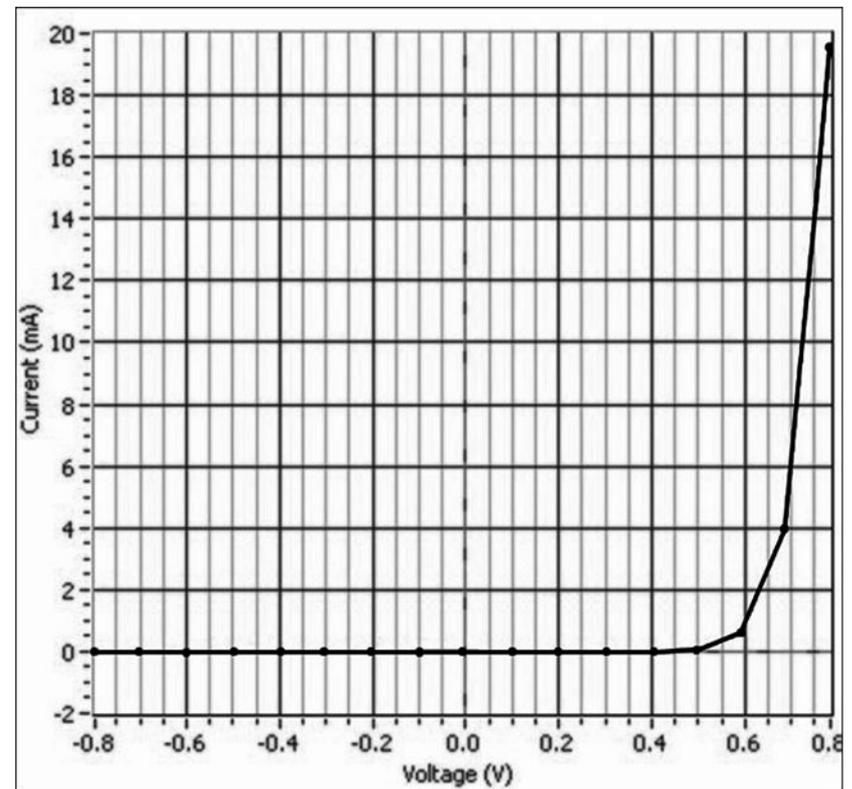


Вольт-амперные характеристики резистивных элементов.

Лампа накаливания



Полупроводниковый диод



Если ВАХ – прямая, проходящая через начало координат, резистор называют линейным.

Закон Ома:

$$u = Ri .$$

R – сопротивление.

Единица измерения – Ом.



Георг Симон Ом
1789 – 1854

Закон Ома:

$$i = Gu .$$

$$G = 1/R \text{ - проводимость.}$$

Единица измерения – Сименс.

Мощность, поглощаемая резистором

$$p = ui = Ri^2 = u^2/R$$



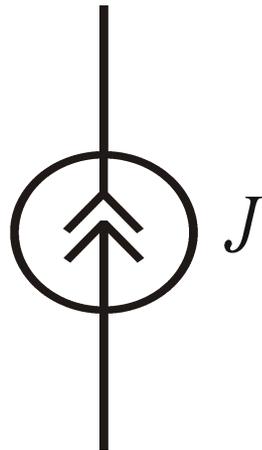
Вернер фон Сименс

Источник напряжения – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону.

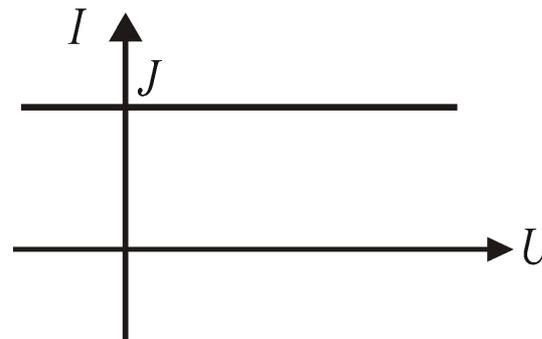


Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.

Источник тока – двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом.



ВАХ источника тока



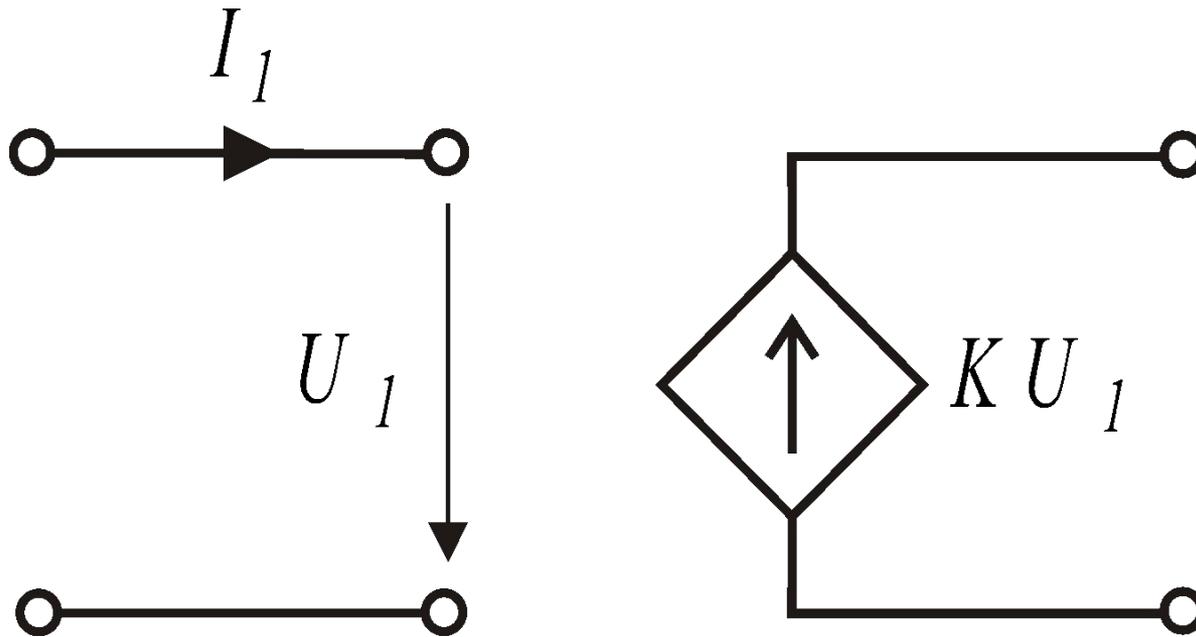
Внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно.

Управляемый источник – четырехполюсный резистивный элемент, состоящий из двух ветвей и двух пар выводов: входной и выходной.

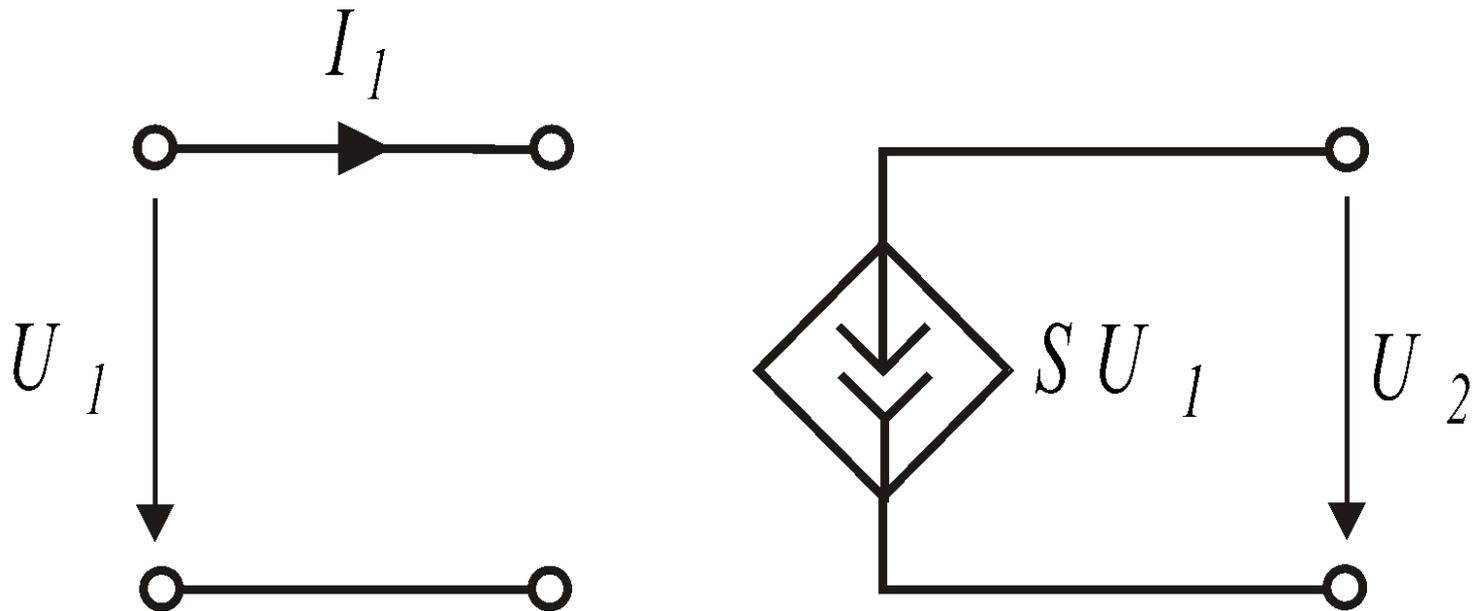
Управляемые источники обладают следующими свойствами:

- 1) выходная величина пропорциональна входной.
- 2) выходная величина не влияет на входную.

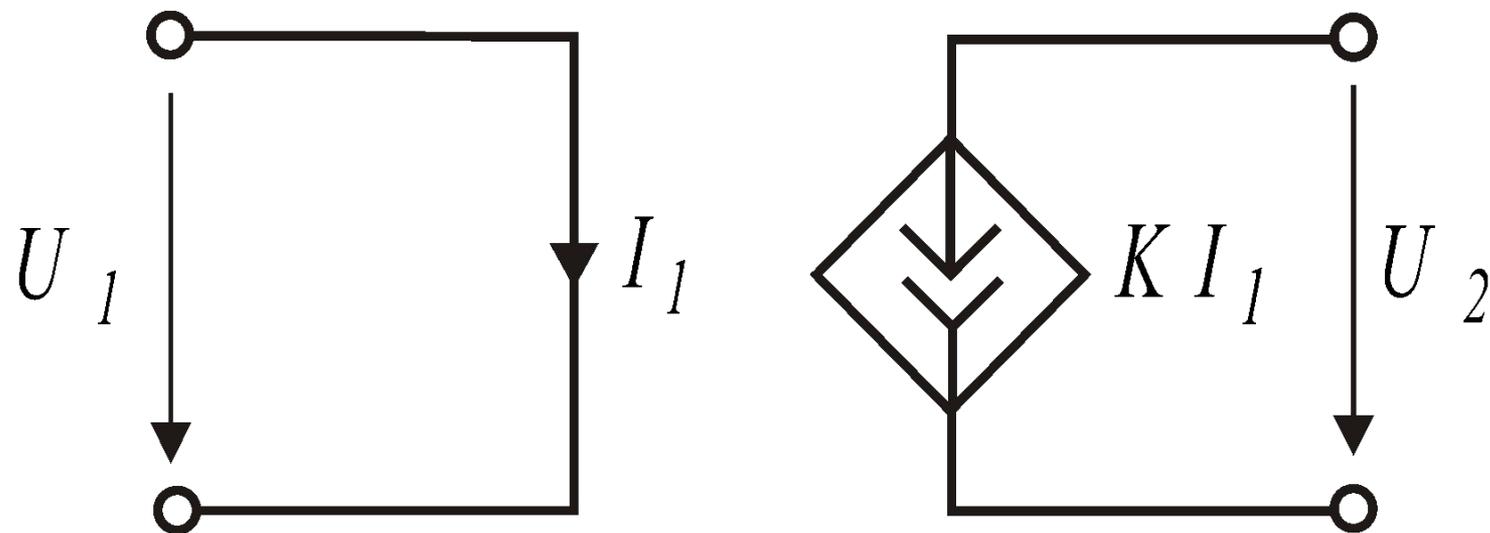
Источник напряжения управляемый напряжением (ИНУН)



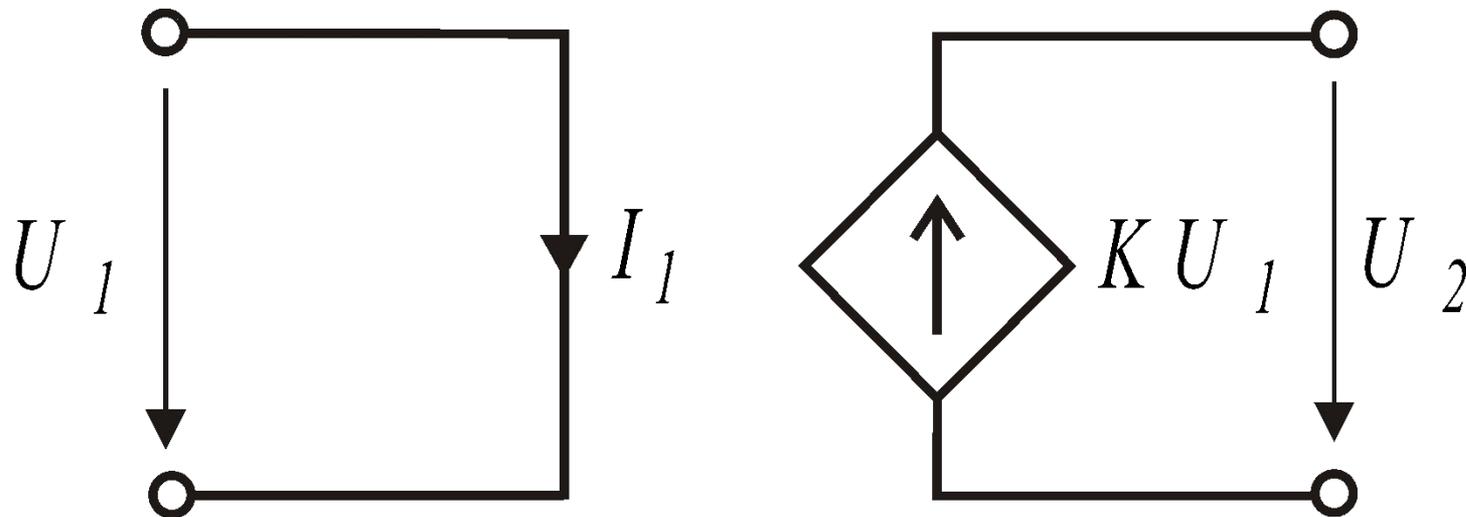
Источник тока управляемый напряжением
(ИТУН)



Источник тока управляемый током
(ИТУТ)



Источник напряжения управляемый током
(ИНУТ)



-
1. *Ток* в проводящей среде есть явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля. Мгновенное значение тока равно скорости изменения заряда во времени. Положительное направление тока выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи.
 2. *Напряжение* (разность потенциалов) между двумя точками цепи определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемещение заряда из одной точки в другую. Положительное направление напряжения показывают стрелкой, направленной от одного зажима элемента к другому, либо знаками «+», «-»

-
3. Для обозначения электрических величин используют прописные и строчные буквы. Прописными буквами обозначают постоянные напряжения, токи и мощности: U, I, P . Мгновенные значения переменных величин обозначают малыми (строчными) буквами: u, i, p .
4. *Резистивным* называют идеализированный двухполюсный элемент, для которого связь между напряжением и током можно представить в виде графика, называемого вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Резистивный элемент моделирует процесс необратимого преобразования электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии, при этом запасание энергии в электромагнитном поле отсутствует.

-
5. *Источник напряжения* – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону. Внутренне сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.

 6. *Источник тока* - двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом. Внутренне сопротивление идеального источника тока бесконечно.

Основные топологические понятия

Ветвь – участок цепи с двумя выводами.

Узел – точка соединения двух или более ветвей.

Контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

Первый закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:

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

Токи, направленные от узла, записывают с положительным знаком. Токи, направленные к узлу, записывают со знаком минус.

Число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа

$$n_y - 1$$

Второй закон Кирхгофа: В контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений ветвей равна алгебраической сумме ЭДС источников.

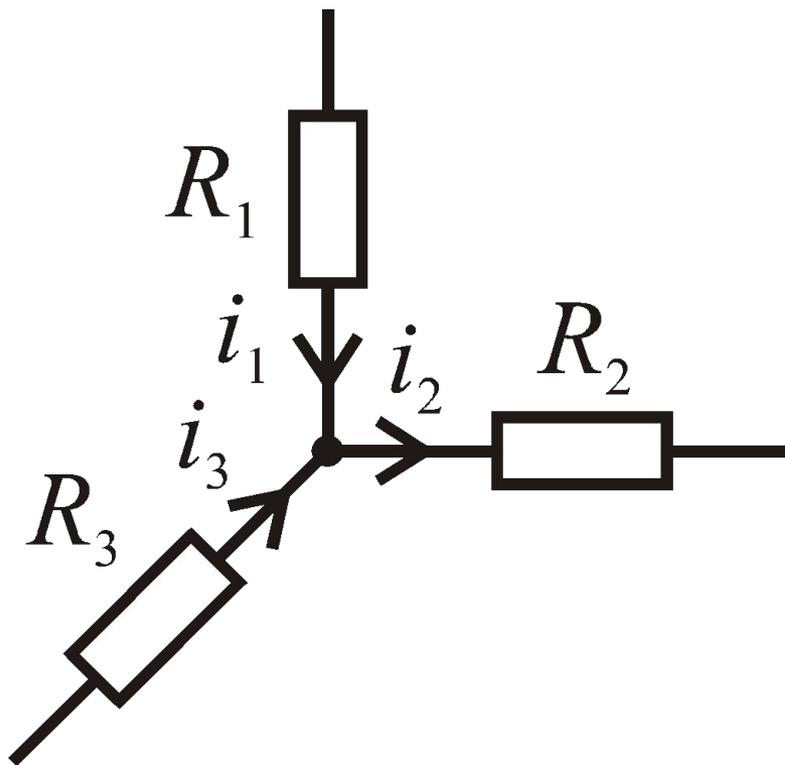
$$\sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^n e_k$$

Число независимых уравнений по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров:

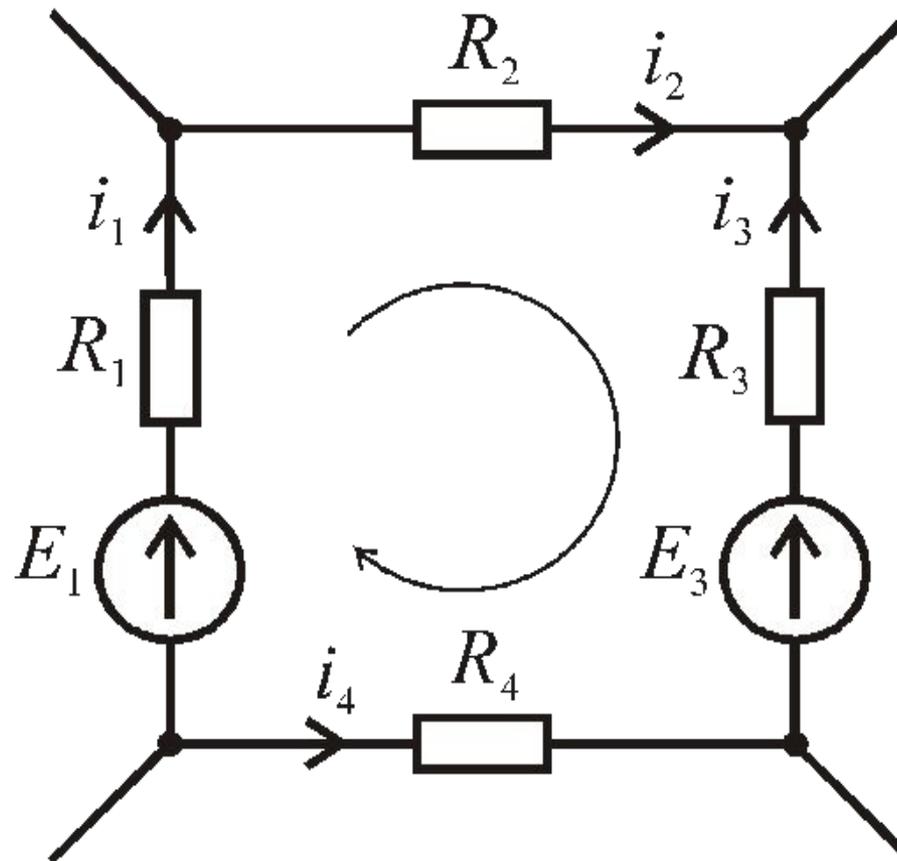
$$n_b - n_y + 1$$



Густав Роберт Кирхгоф
1824 - 1887



$$-i_1 + i_2 - i_3 = 0$$



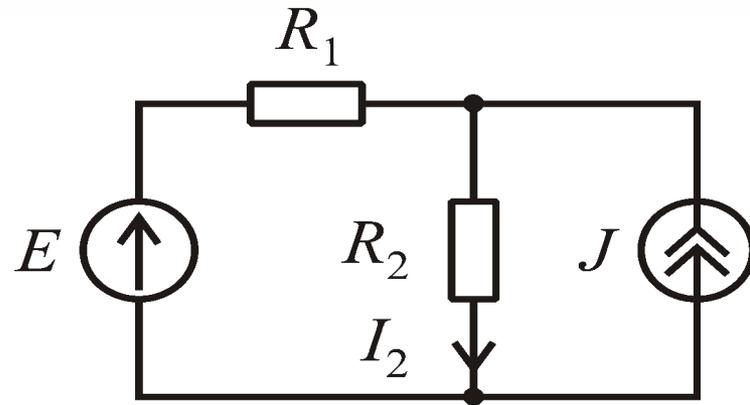
$$R_1 i_1 + R_2 i_2 - R_3 i_3 - R_4 i_4 = E_1 - E_3$$

Принцип наложения является фундаментальным свойством линейных цепей.

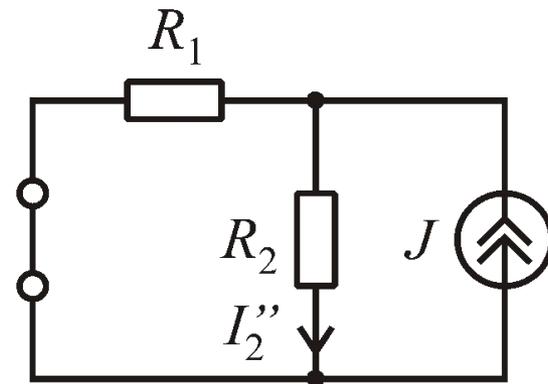
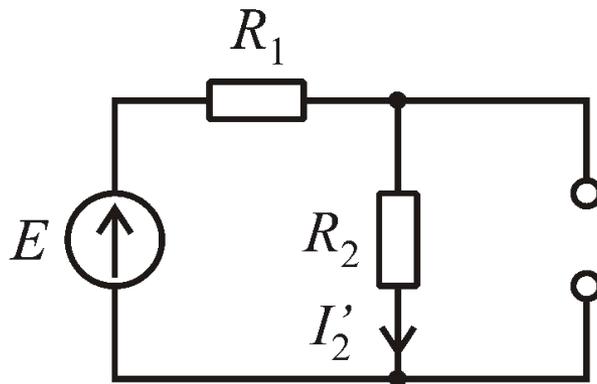
Реакция линейной цепи при одновременном действии нескольких независимых источников равна сумме реакций, получающихся при действии каждого источника в отдельности.

Принцип наложения является следствием линейности уравнений, описывающих цепь.

Принцип наложения справедлив только для линейных цепей.

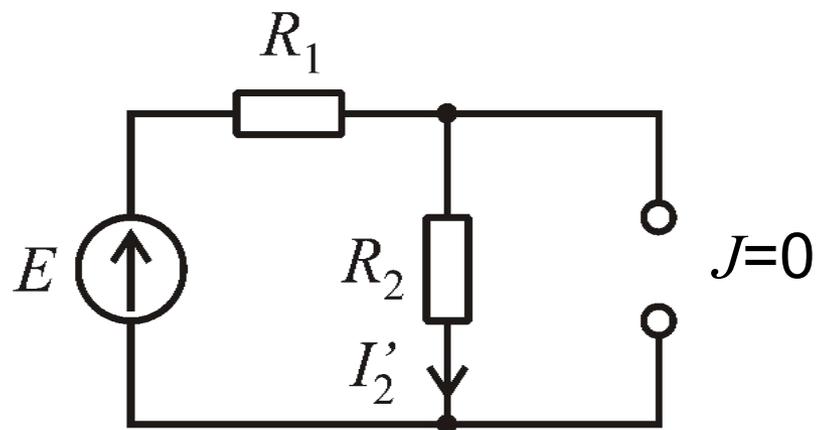


Рассмотрим две частных схемы, в каждой из которых действует только один источник



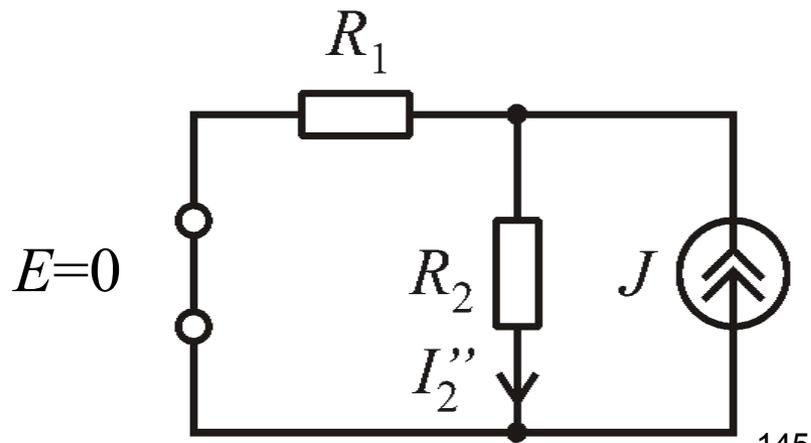
$$I_2 = I_2' + I_2''$$

Частная схема 1:



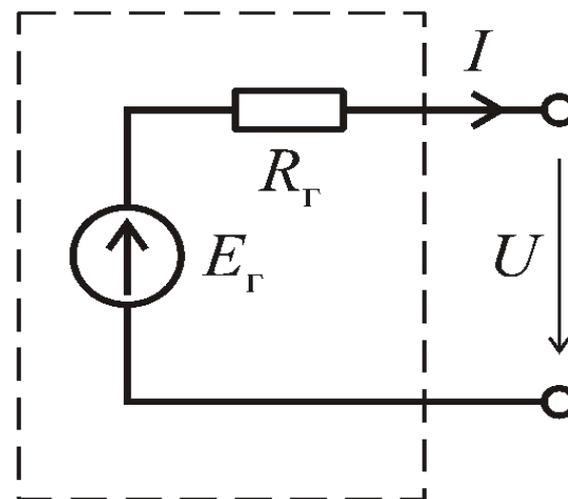
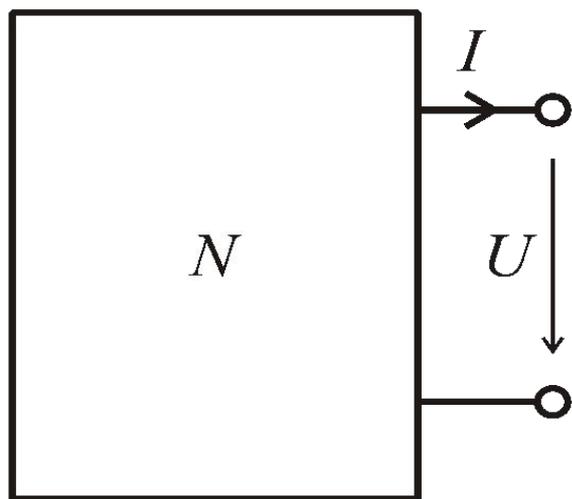
$$I_2' = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Частная схема 2:



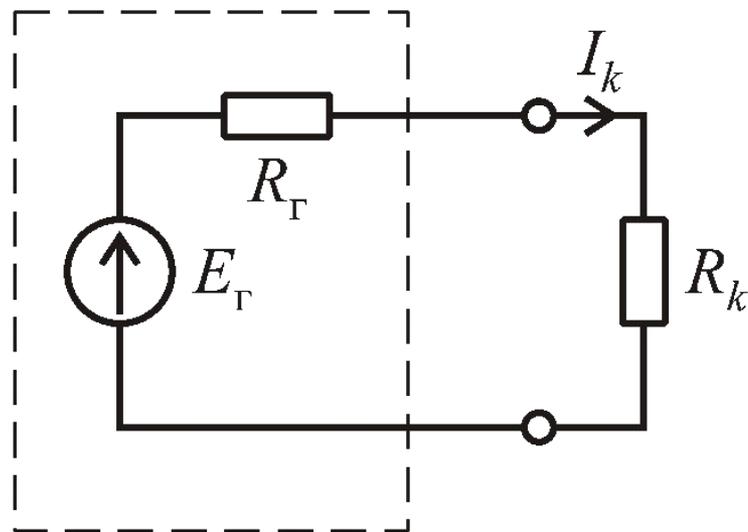
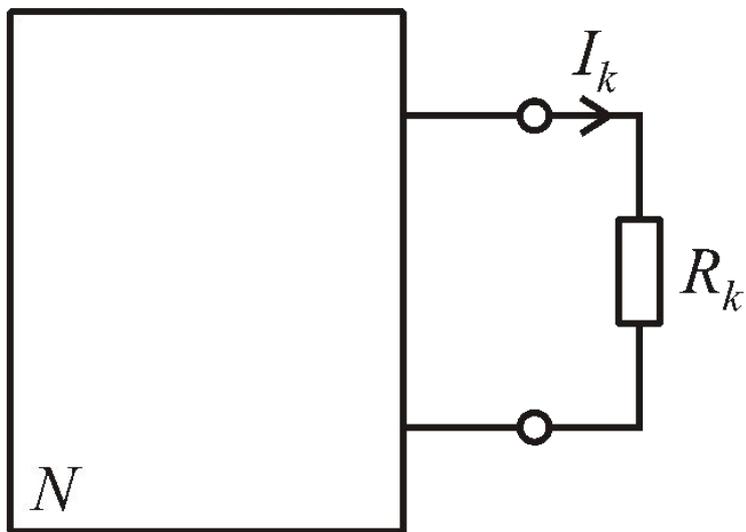
$$I_2'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} J$$

Линейную цепь с двумя внешними зажимами можно представить эквивалентной схемой, состоящей из последовательно соединенных независимого источника напряжения и резистора



$$E_G = U_{XX} \quad R_G = R_{BX} = \frac{U_{XX}}{I_{K3}}$$

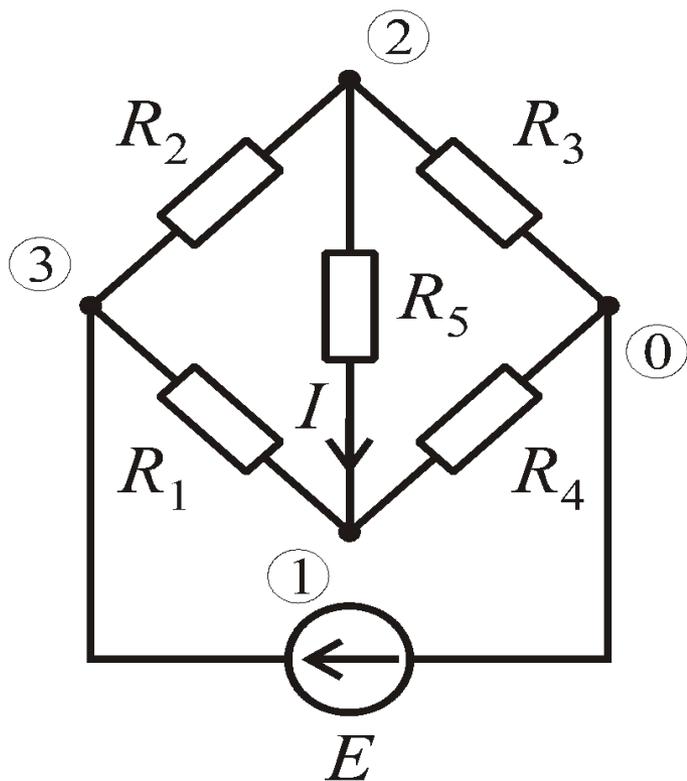
Этот метод удобно использовать тогда, когда требуется рассчитать ток только в одной ветви сложной цепи.



-
1. Выделяем ветвь, в которой необходимо рассчитать ток, а остальную часть цепи заменяем эквивалентным двухполюсником.
 2. Определяем параметры эквивалентного двухполюсника
 3. Искомый ток рассчитываем по формуле

$$I = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{к}}} .$$

Мост Уитстона, используется для измерения сопротивлений. Для ограничения тока нуль-индикатора последовательно с ним включен резистор R_5 . Необходимо найти ток в диагональной ветви моста.



$$R_1 = 15 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 60 \text{ Ом},$$

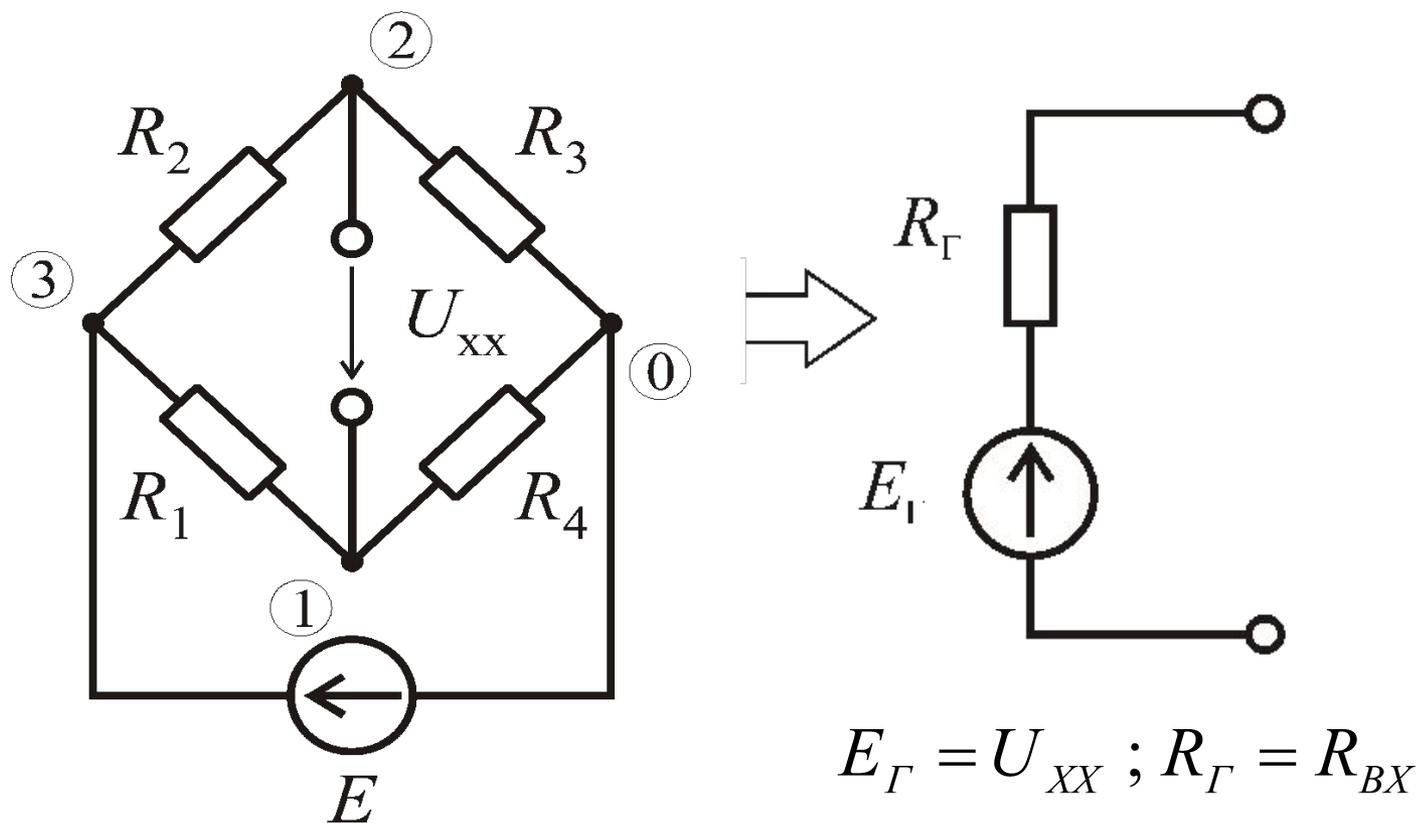
$$R_3 = 90 \text{ Ом},$$

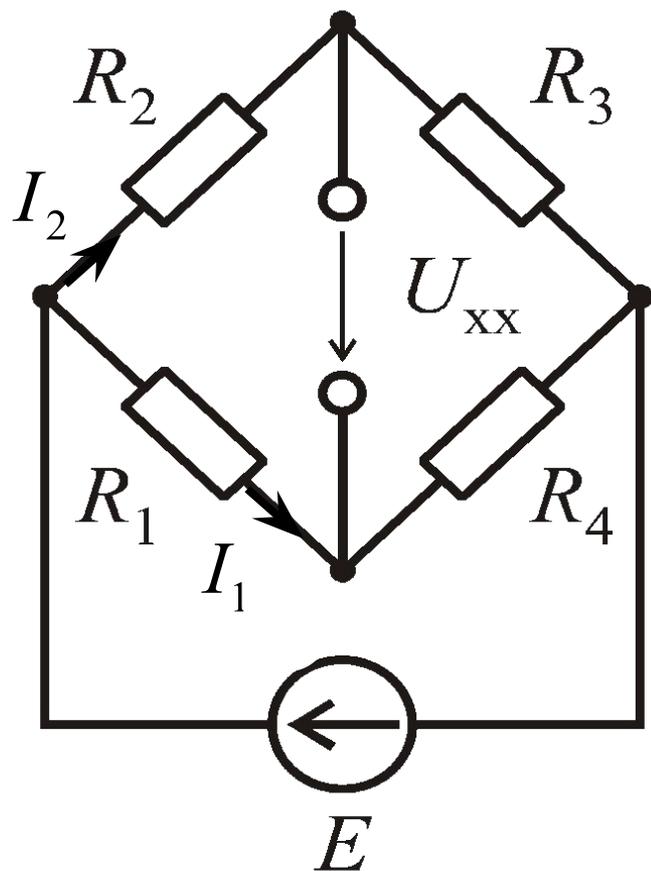
$$R_4 = 60 \text{ Ом},$$

$$R_5 = 12 \text{ Ом},$$

$$E = 120 \text{ В}$$

Разомкнем диагональную ветвь, а оставшуюся цепь представим эквивалентным двухполюсником.





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

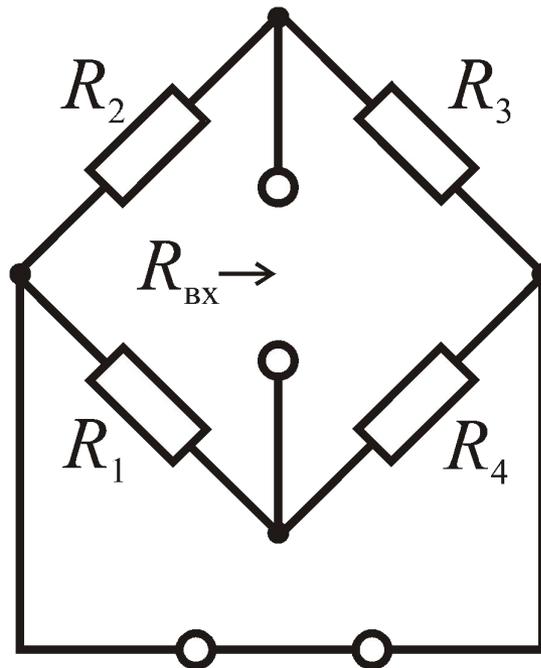
$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_4} = \frac{120}{15 + 60} = 1.6 \text{ A}$$

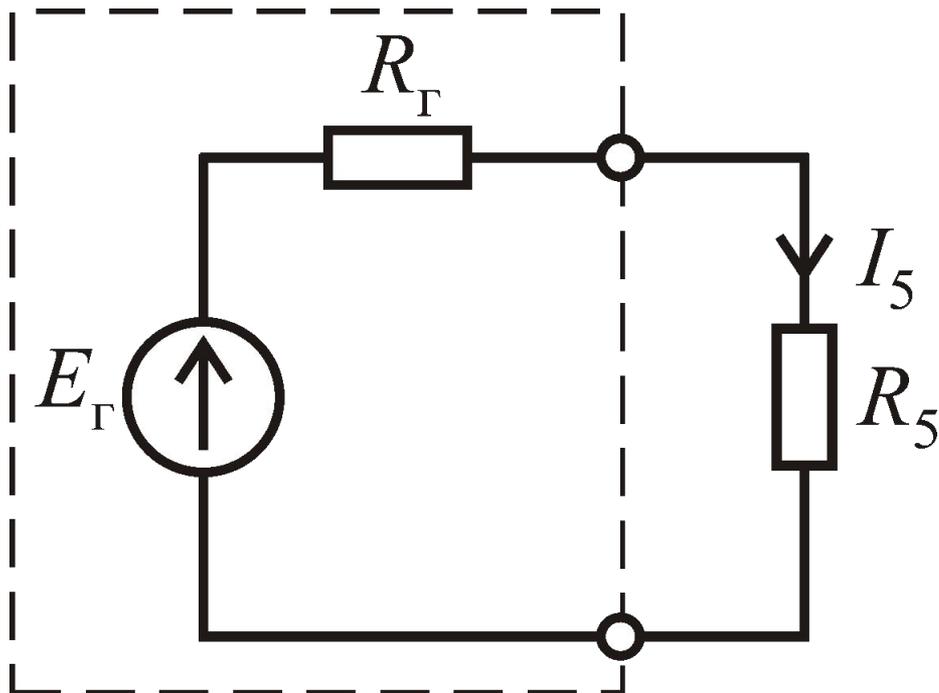
$$I_2 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{120}{60 + 90} = 0.8 \text{ A}$$

$$U_{XX} = -24 \text{ V}$$

Входное сопротивление двухполюсника найдем, исключив из схемы источник напряжения:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = 48 \text{ Ом} .$$



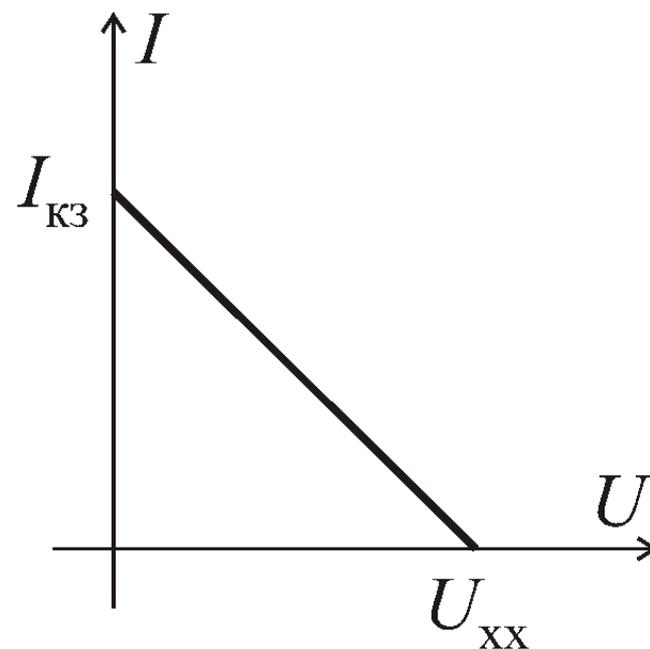
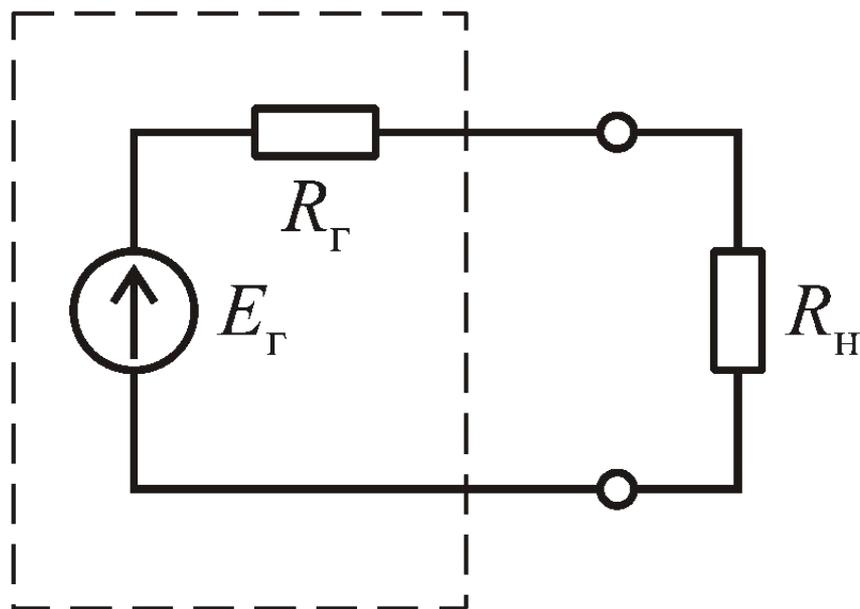


$$E_{\Gamma} = U_{\text{XX}} = -24 \text{ В}$$

$$R_{\Gamma} = R_{\text{BX}} = 48 \text{ Ом}$$

$$I_5 = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_5} = \frac{-24}{48 + 12} = -0.4 \text{ А.}$$

Рассмотрим двухполюсник, образованный последовательным соединением источника напряжения и линейного резистора. К внешним зажимам двухполюсника подключено сопротивление нагрузки R_H .



Ток в цепи

$$I = \frac{E}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}}}$$

Напряжение на зажимах двухполюсника

$$U_{\text{H}} = E_{\Gamma} - R_{\Gamma} I$$

Мощность, отдаваемая двухполюсником в сопротивление нагрузки

$$P_{\text{H}} = I^2 R_{\text{H}} = \frac{E_{\Gamma}^2 R_{\text{H}}}{(R_{\Gamma} + R_{\text{H}})^2}$$

Режим короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} \quad U_{\text{н}} = 0$$

В режиме к. з. $P_{\text{н}} = 0$.

Режим холостого хода:

напряжение на внешних зажимах двухполюсника равно напряжению источника:

$$U_{\text{хх}} = E_{\Gamma}, \quad \text{а ток } I = 0$$

В режиме хх $P_{\text{н}} = 0$.

Двухполюсник отдает в нагрузку максимальную мощность при $R_{\text{H}} = R_{\text{Г}}$:

$$P_{\text{H max}} = \frac{E_{\text{Г}}^2}{4R_{\text{Г}}}$$

Этот режим называют ***режимом согласованной нагрузки***.

Операционный усилитель (ОУ) – усилитель, имеющий большой коэффициент усиления, высокое входное и малое выходное сопротивления. В настоящее время операционные усилители выпускают в виде интегральных микросхем.

Типичные параметры интегрального ОУ:

$$R_{\text{ВХ}} > 100 \text{ кОм}$$

$$R_{\text{ВЫХ}} < 100 \text{ Ом}$$

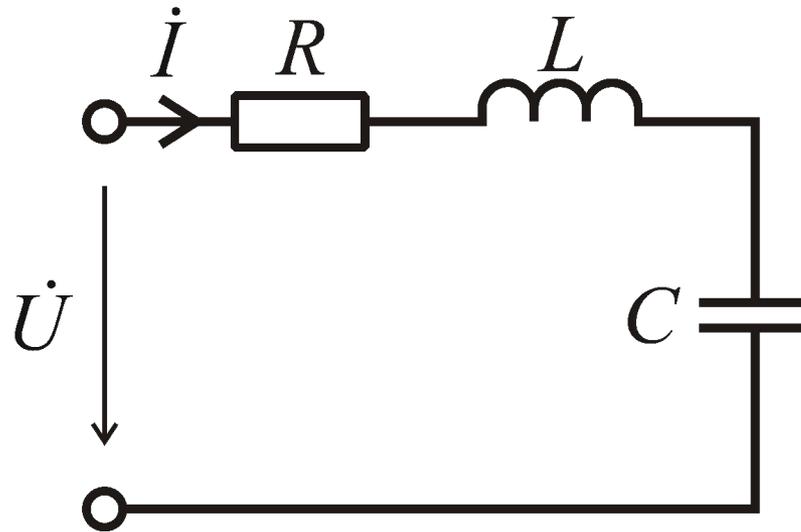
в линейном режиме коэффициент усиления напряжения ОУ

$$K_U = 10^4 - 10^6.$$

Резонанс напряжений

Резонанс напряжений наблюдается в цепях с последовательным соединением ветвей, содержащих L и C элементы.

Простейшей цепью, в которой наблюдается резонанс напряжений, является последовательный колебательный контур.



Резонанс напряжений

Комплексное сопротивление последовательного колебательного контура

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

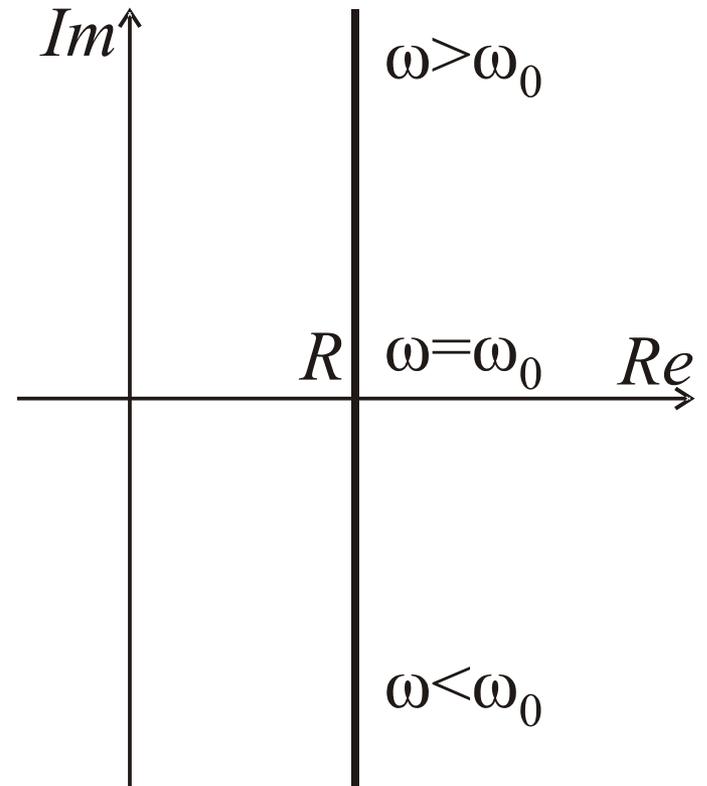
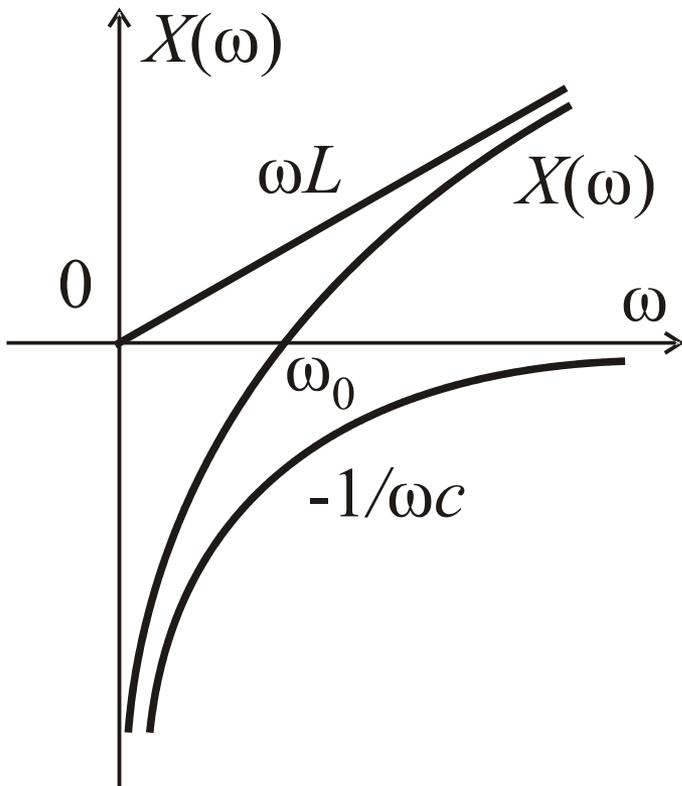
Резонанс напряжений наступает, когда реактивное сопротивление обращается в нуль, т. е.

$$X = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0$$

Это происходит при резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

Резонанс напряжений

Частотные характеристики последовательного колебательного контура



Резонанс напряжений

Поскольку при резонансе напряжений реактивное сопротивление $X = 0$, полное сопротивление цепи принимает минимальное значение

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \min$$

Вследствие этого ток в цепи достигает максимального значения. При резонансе ток и напряжение совпадают по фазе, поэтому коэффициент мощности $\cos \phi = 1$

Резонанс напряжений

Сопротивления индуктивного и емкостного элементов в последовательном колебательном контуре при резонансе равны:

$$x_L = x_C = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Эту величину называют *характеристическим сопротивлением* контура и обозначают ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Резонанс напряжений

При резонансе входное напряжение последовательного колебательного контура равно напряжению резистивного элемента. Поэтому

$$U_L = U_C = \frac{\rho}{R} U_{\text{ВХ}} = QU_{\text{ВХ}}$$

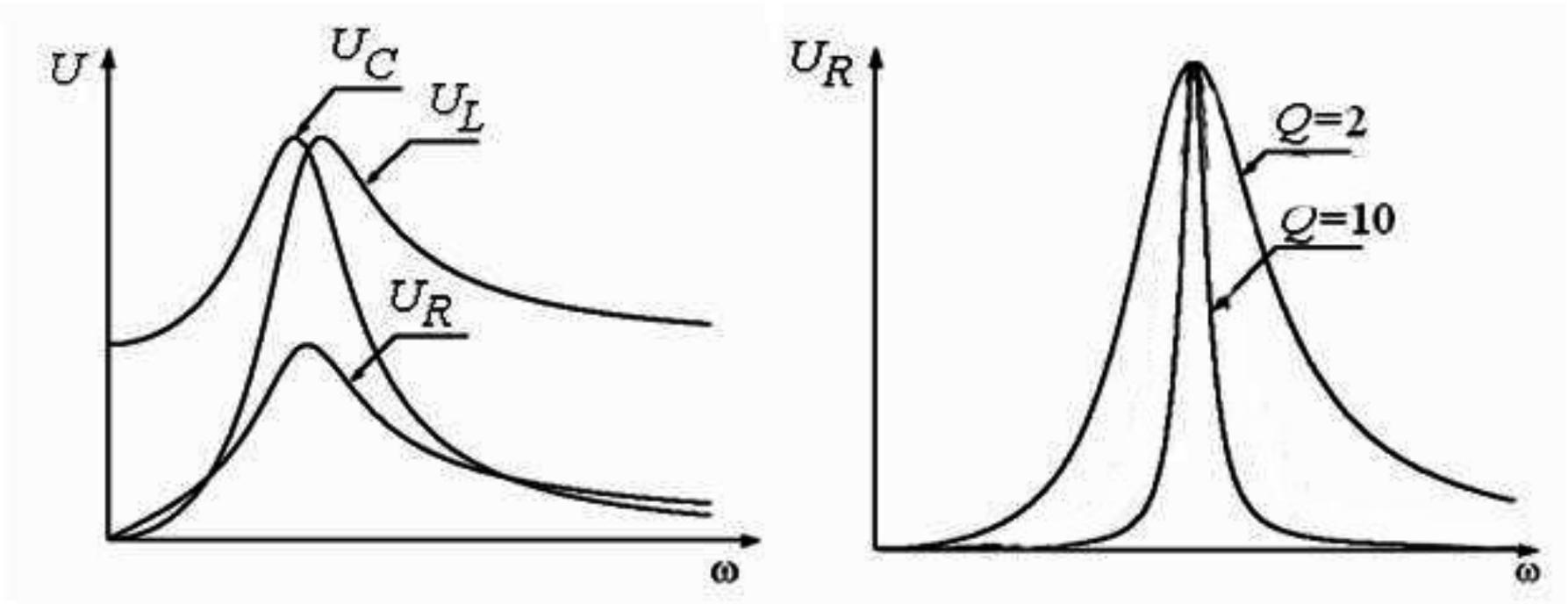
$$Q = \rho / R$$

Резонанс напряжений

Величину $Q = \frac{\rho}{R}$ называют добротностью колебательного контура. Добротность равна отношению напряжения на индуктивном и емкостном элементах в режиме резонанса к напряжению, приложенному к контуру.

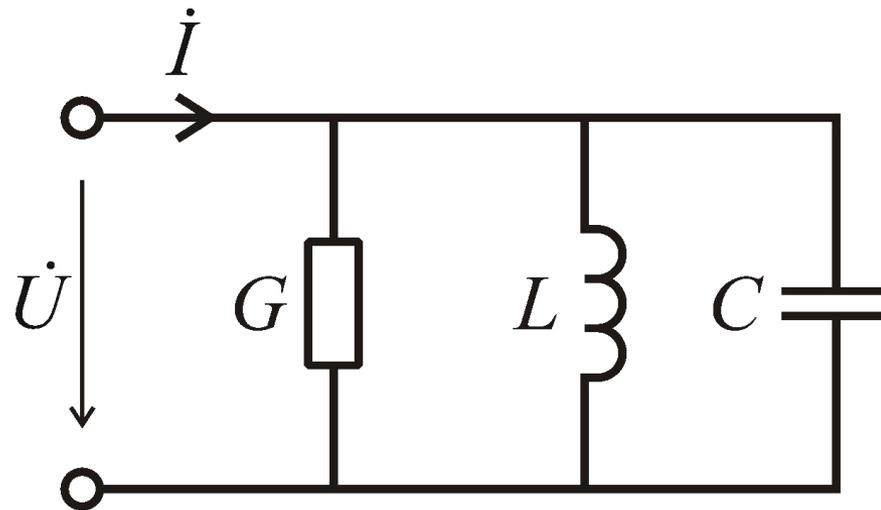
$$Q = \frac{\rho I}{RI} = \frac{U_L}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_C}{U_{\text{ВХ}}}$$

Частотные характеристики последовательного колебательного контура



Резонанс токов

Простейшей цепью, в которой может наблюдаться резонанс токов, является параллельный колебательный контур



Комплексная проводимость контура

$$\underline{Y} = G + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

Резонанс токов

Резонанс токов наступает, когда реактивная проводимость обращается в нуль:

$$B = \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = 0$$

Резонансная частота

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

На резонансной частоте полная проводимость контура минимальна:

$$Y(\omega_0) = G$$

Резонанс токов

Полное сопротивление параллельного колебательного контура на частоте резонанса максимально

$$Z(\omega_0) = \frac{1}{Y(\omega_0)}$$

Резонанс токов

Следовательно, при резонансе токов ток неразветвленной части цепи имеет наименьшее значение и равен току резистивного элемента:

$$I_{\text{рез}} = U / R$$

При резонансе токи емкостного и индуктивного элементов

$$I_C = \omega_0 C U = Q I$$

Резонанс токов

Величину $Q = \frac{R}{\rho}$ называют добротностью

параллельного колебательного контура. Как и в случае последовательного колебательного контура, характеристическое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Добротность параллельного колебательного контура тем больше, чем больше сопротивление резистора R , включенного параллельно индуктивному и емкостному элементам.