

2-3 Линейные и нелинейные электрические цепи постоянного тока (начало)

Электрическая цепь. Электродвижущая сила. Электрический ток. Электрическое сопротивление. Закон Ома. Энергия и мощность источника ЭДС. Преобразование электрической энергии в тепловую и световую.

Электрической цепью называют совокупность соединенных друг с другом источников электрической энергии и приемников, по которым может протекать электрический ток. Электромагнитные процессы в электрической цепи можно описать с помощью таких понятий, как ток, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС).

В источниках электрической энергии (гальванические элементы, аккумуляторы, электромагнитные генераторы и т. п.) химическая, механическая, тепловая энергия или энергия других видов превращается в электрическую, а в приемниках электрической энергии (электронагреватели, электрические лампы, электрические двигатели и т. п.) электрическая энергия преобразуется в тепловую, световую, механическую и другие виды энергии.

Электрические цепи, в которых получение электрической энергии в источниках, ее передача и преобразование в приемниках происходят при неизменных во времени токах и напряжениях, называют *цепями постоянного тока*.

Схемой электрической цепи называют ее графическое изображение, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединение этих элементов.

На рисунке 3.1, а изображена принципиальная схема простейшей электрической цепи с источником электрической энергии – аккумуляторной батареей и с приемником – лампой накаливания. Выводы (зажимы) источника и приемника энергии соединены между собой двумя проводами.



Рис. 3.1. Простейшая электрическая цепь:
а – принципиальная схема; *б* – расчетная схема замещения

Расчеты электрических цепей и исследования процессов, происходящих в них, основываются на различных допущениях и некоторой идеализации реальных объектов электрических цепей. В теории электрических цепей несущественно, какие именно электротехнические устройства включены в электрическую цепь, а важны такие их электрические и магнитные свойства, которые позволяют выполнить расчет токов, напряжений, мощностей.

В цепях постоянного тока у источников электрической энергии необходимо знать электродвижущую силу E и внутреннее сопротивление $R_{вт}$, а у приемника и соединительных проводов – сопротивление R . На рисунке 3.1, *б* представлена расчетная схема замещения простейшей электрической цепи. Источник энергии изображен в виде последовательного соединения источника ЭДС E и резистора $R_{вт}$, приемник – в виде резистора R . Сопротивление соединительных проводов не учтено, так как оно намного меньше сопротивления приемника.

При рассмотрении более сложных электрических цепей постоянного тока, имеющих несколько источников энергии, несколько приемников и разнообразные способы их соединения, элементами схем электрических цепей останутся источники ЭДС E и резисторы R . Для всего многообразия электротехнических устройств это позволяет выработать единые методики расчета.

3.2. Электродвижущая сила

По закону Кулона электрические заряды действуют друг на друга с определенной силой. Причем заряды одного знака отталкиваются, а заряды разных знаков притягиваются.

Внутри источников электрической энергии на электрические заряды действуют силы неэлектростатического происхождения, некулоновы силы. Их называют *сторонними*. Например, разделение зарядов в электропроводной среде происходит под действием электромагнитных сил при движении заряженных частиц в магнитном поле, в результате создается электрическое поле и образуется электродвижущая сила. Сторонние силы создаются и другими процессами (химические реакции, тепловые процессы, контактные явления и т. д.).

Сторонние силы перемещают положительные заряды внутри источника энергии от отрицательного зажима к положительному, т. е. против сил электростатического поля.

Величина, характеризующая способность сторонних сил создавать электрическое поле и вызывать электрический ток, называется *электродвижущей силой*.

Электродвижущая сила E численно равна работе сторонних сил по переносу единичного положительного заряда через область действия этих сил. Направление действия ЭДС (от отрицательного вывода к положительному) показано на схеме стрелкой (рис. 3.1, б). Стрелка показывает направление возрастания потенциала. Измеряется ЭДС E в вольтах (В), так же как потенциал и напряжение.

Благодаря ЭДС во внешней части цепи создается постоянно действующее электрическое поле, и в замкнутом контуре простейшей электрической цепи возникает ток I .

3.3. Электрический ток

Электрический ток в проводящей среде есть упорядоченное движение заряженных частиц внутри проводника под действием сил электрического поля.

Проводники делят на два вида в зависимости от типа носителей электрического заряда, образующих электрический ток. В провод-

никах первого вида (металлах) ток образуется свободными электронами. В проводниках второго вида (расплавленные соли, растворы солей, кислот, щелочей) носителями электрического заряда являются ионы – заряженные атомы и молекулы. Под действием сил электрического поля положительно заряженные частицы движутся по направлению поля, а отрицательные – в обратном направлении.

Интенсивность электрического тока оценивается физической величиной, называемой *силой электрического тока*. В практике эту величину называют *электрическим током* или просто *током*.

Величина тока проводимости определяется электрическим зарядом всех частиц, проходящих через поперечное сечение проводника в единицу времени. Предположим, через поперечное сечение проводника S за время t равномерно проходит n электронов. Заряд каждого электрона – e , поэтому общий заряд частиц, прошедших через сечение за это время, $q = en$.

Отношение

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

выражает заряд, перенесенный электронами через сечение проводника за 1 с, т. е. ток I .

Единица измерения электрического тока – ампер (А). На практике применяют производные от ампера: 1 килоампер (кА) = 10^3 А – для измерения больших токов; 1 миллиампер (мА) = 10^{-3} А и 1 микроампер (мкА) = 10^{-6} А – для измерения малых токов.

Положительным направлением электрического тока условно принято считать направление, в котором движутся положительно заряженные частицы. На рисунке 3.1, б направление тока I показано стрелкой во внешней цепи от положительного вывода источника энергии к отрицательному, т. е. совпадающим с направлением ЭДС. В металлах положительное направление тока противоположно направлению движения электронов.

Электрический ток, длительно не изменяющийся по величине и направлению, называется *постоянным* (рис. 3.2, график I).

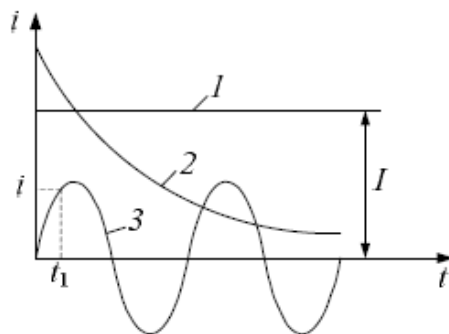


Рис. 3.2. Графики зависимости электрических токов от времени

Для постоянного тока характерно прохождение электрического заряда через поперечное сечение проводника в одном направлении с одинаковой интенсивностью.

Если ток со временем изменяется, то он называется *переменным* (рис. 3.2, графики 2, 3). В таком случае по оси ординат на графиках откладываются мгновенные значения тока, которые определяются изменением заряда q за бесконечно малый промежуток времени:

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

На графике 3 (рис. 3.2) показан мгновенный ток $i(t_1)$ в момент времени t_1 .

В практических расчетах пользуются понятием плотности электрического тока J . При токе в проводнике I и поперечном сечении проводника S численно плотность тока определяется отношением

$$J = \frac{I}{S}. \quad (3.1)$$

Единица измерения плотности тока — ампер на квадратный метр (А/м^2).

На практике площадь поперечного сечения проводов чаще выражают в квадратных миллиметрах (мм^2) и соответственно плотность тока — в амперах на квадратный миллиметр (А/мм^2).

При постоянном токе, несмотря на движение заряженных частиц в проводнике, распределение заряда в нем стационарно, так как в любом элементе объема за некоторый промежуток времени заряд уходящих и входящих частиц одинаков.

Электрическое поле, создаваемое движущимися заряженными частицами в проводнике, называется *стационарным* в отличие от электростатического, создаваемого неподвижными заряженными частицами.

Электрический ток в проводнике и соответствующее ему стационарное электрическое поле нужно поддерживать, непрерывно пополняя энергию поля, которая расходуется в связи с движением заряженных частиц, превращаясь в теплоту.

3.4. Электрическое сопротивление. Закон Ома

Электрическое сопротивление – это противодействие, которое атомы и молекулы проводника оказывают направленному движению зарядов в проводнике.

В 1826 г. Георг Ом экспериментально получил формулу для определения сопротивления участка проводника:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.2)$$

Для практических целей представляет интерес определение сопротивления участка проводника, если известны его форма и размеры.

Рассмотрим отрезок проводника длиной l и поперечным сечением S (рис. 3.3).

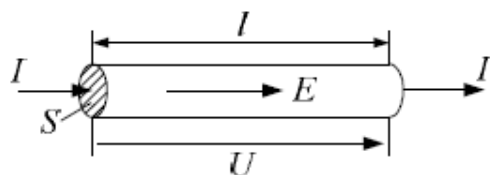


Рис. 3.3. Участок проводника с током

Наличие тока означает, что в проводнике существует электрическое поле с напряженностью E .

Электрическое поле можно принять равномерным, тогда по (2) напряжение на проводнике

$$U = El.$$

Плотность электрического тока в проводнике выражается произведением напряженности электрического поля E и удельной электрической проводимости γ :

$$J = \gamma E.$$

Удельная электрическая проводимость γ характеризует электропроводность вещества. В электротехнических справочниках приводятся значения удельной электрической проводимости материалов или обратной ей величины удельного сопротивления:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}.$$

Считая, что ток равномерно распределен по сечению ($J = \text{const}$), и учитывая уравнения (3.1) и (3.2), можно записать выражение сопротивления проводника через его размеры:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{El}{\gamma ES} = \frac{l}{\gamma S} = \rho \frac{l}{S}.$$

Наряду с сопротивлением для расчета цепей вводят понятие проводимости – величины, обратной сопротивлению:

$$g = \frac{1}{R}.$$

Единицей электрического сопротивления является сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В устанавливается ток 1 А: $[R] = \left[\frac{U}{I} \right] = \text{вольт-ампер (ВА)} = \text{ом (Ом)}$.

Единица измерения проводимости – $1/\text{Ом} = \text{сименс (См)}$.

Единица измерения удельной проводимости – $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$; удельного сопротивления – $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Из уравнения (3.2) следует

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) является математическим выражением закона Ома для участка проводника.

Ток в проводнике равен отношению напряжения на участке проводника к электрическому сопротивлению этого участка.

Выражения $U = RI$ и $R = \frac{U}{I}$ являются производными закона

Ома для участка проводника.

Графическое изображение электрического сопротивления R представлено на рисунке 3.1, б. Элемент цепи, обозначенный R , называют резистором или резистивным элементом цепи, предназначенным для использования его электрического сопротивления.

Положительное направление напряжения U на резистивном элементе R совпадает по направлению с током I . Ток через резистор R идет от большего потенциала к меньшему.

Важно отметить, что линии, соединяющие резисторы и источники ЭДС в расчетных схемах (см. рис. 3.1, б), являются проводниками, но их сопротивлением пренебрегают (т. е. считают равным нулю) и учитывают при расчете цепи только сопротивления резисторов R .

В общем случае сопротивление R зависит от тока I . Металлы нагреваются при прохождении тока через них. При увеличении температуры проводника усиливается тепловое хаотическое движение частиц, что увеличивает число столкновений и затрудняет упорядоченное движение электронов.

Сопротивление полупроводников изменяется при изменении величины и направления тока.

На практике часто бывает задана не зависимость сопротивления от тока $R(I)$ резистивного элемента, представляющего приемник на схеме, а зависимость напряжения на резистивном элементе от тока $U(I)$ или обратная зависимость тока от напряжения $I(U)$. Характеристики $U(I)$ и $I(U)$ получили название *вольт-амперных характеристик* (ВАХ).

Вольт-амперные характеристики могут быть нелинейными (рис. 3.4) и линейными (рис. 3.5). Следовательно, электрические цепи, содержащие элементы с нелинейными характеристиками, называют нелинейными, а цепи, содержащие только элементы с линейными характеристиками, называют линейными.

Для нелинейных резистивных элементов характерно сопротивление, которое зависит от тока. Так, судя по ВАХ (см. рис. 3.4), сопротивление элемента 1 падает с ростом тока, а сопротивление элемента 2 растет. Режимы работы большого числа реальных электрических цепей можно отнести к линейным (см. рис. 3.5), поэтому изучение свойств и методов расчета линейных электрических цепей представляет значительный практический интерес. У линейных резистивных элементов сопротивление R неизменно, не зависит от тока; ЭДС E источников в линейных цепях также считается постоянной.

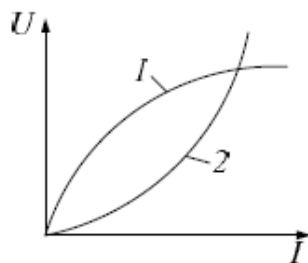


Рис. 3.4. ВАХ нелинейных элементов электрической цепи

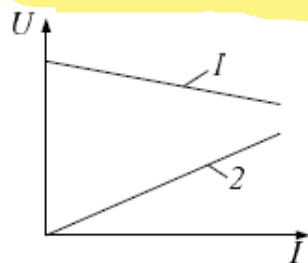


Рис. 3.5. ВАХ линейных элементов электрической цепи

Пример 3.1. Катушка из медной проволоки имеет $N = 2000$ витков, средний диаметр витка $D = 127$ мм, диаметр проволоки $d = 2$ мм. Определить сопротивление провода катушки, если удельное сопротивление меди при $t = 20$ °С $\rho = 0,0175$ Ом · мм²/м.

Решение. Определим длину медной проволоки, умножив длину окружности среднего витка на число витков:

$$l = \pi DN = 3,14 \cdot 127 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 \approx 800 \text{ м.}$$

Сечение медного провода

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Определим сопротивление провода катушки:

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,0175 \frac{800}{3,14} = 4,45 \text{ Ом.}$$

3.5. Энергия и мощность источника ЭДС

Работа сторонних сил в источнике ЭДС по переносу единичного положительного заряда равна ЭДС E . Следовательно, работа сторонних сил по перемещению всего электрического заряда q , создающего электрический ток, равна Eq .

Работа сторонних сил равна энергии, отдаваемой источником питания во внешнюю цепь. Эта энергия называется *электрической энергией источника*:

$$W_{\text{н}} = Eq.$$

Перемещенный заряд q можно выразить через ток в источнике: $q = It$, поэтому

$$W_{\text{н}} = EIt. \quad (3.4)$$

Формула (3.4) позволяет подсчитать энергию, выработанную источником за определенный промежуток времени t . Для оценки работоспособности источника нужно определить энергию, выработанную источником в единицу времени, т. е. за 1 с.

Энергия, вырабатываемая в единицу времени, называется *мощностью источника*:

$$P_{\text{н}} = \frac{W_{\text{н}}}{t} = \frac{EIt}{t};$$
$$P_{\text{н}} = EI. \quad (3.5)$$

Единица измерения энергии – джоуль (Дж).

Единица измерения мощности $[P] = \left[\frac{\text{W}}{t} \right] = \text{джоуль-секунда} = \text{ватт (Вт)}$.

Из формулы (3.5) следует, что ватт = вольт-ампер; джоуль = вольт-ампер-секунда = ватт-секунда.

Указанные единицы измерения мощности и энергии являются основными. Измерять большие мощности и количество энергии

удобнее более крупными единицами, чем ватт и джоуль. Поэтому пользуются производными единицами:

1 киловатт (кВт) = 10^3 Вт; 1 мегаватт (МВт) = 10^6 Вт;

1 киловатт-час (кВт · ч) = $1000 \cdot 3600 = 36 \cdot 10^5$ Вт · с (или Дж).



3.6. Преобразование электрической энергии в тепловую

Электрические заряды, движущиеся в проводнике под действием сил электрического поля, сталкиваются с элементарными частицами атомов и молекул проводника. При каждом столкновении движущиеся электрические заряды отдают энергию, при этом проводник нагревается за счет работы сил электрического поля.

Выразим количество выделенной тепловой энергии через напряжение и ток. Предположим, что в проводнике, имеющем на концах разность потенциалов U , заряд перемещенных частиц $q = It$.

Энергия электрического поля, затраченная на перемещение заряженных частиц,

$$W_3 = Uq = UIt.$$

Работа сил электрического поля расходуется на нагревание проводника. Поэтому энергию W_3 можно считать равной тепловой энергии приемника:

$$W_n = W_3 = UIt.$$

Согласно закону Ома, $U = IR$, тогда

$$W_n = I^2 R t. \quad (3.6)$$

Формула (3.6) является математическим выражением **закона Джоуля – Ленца**.

Количество электрической энергии, преобразуемой в проводнике в тепловую энергию, пропорционально квадрату тока и электрическому сопротивлению проводника.

Скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии в приемнике называется **мощностью приемника**:

$$P_n = \frac{W_n}{t} = UI. \quad (3.7)$$

Формула (3.7) справедлива для любого приемника независимо от вида энергии, который получается в результате преобразования.

Если электрическая энергия полностью превращается в тепловую, то мощность приемника можно выразить через ток в проводнике и его сопротивление:

$$P_{\pi} = I^2 R.$$

Явление преобразования в проводниках электрической энергии в тепловую широко используется на практике. На этом принципе основано действие большинства электрических промышленных и бытовых нагревательных устройств.

3.7. Преобразование электрической энергии в световую

Принцип преобразования электрической энергии в световую лежит также в основе работы электрических ламп накаливания. Нить лампы, изготовленная из тугоплавкого металла (вольфрама), нагревается при электрическом токе до температуры 3000 °С.

При высокой температуре нити лампы часть энергии излучается в виде световой энергии, которая в общем потоке тепловой энергии, излучаемой лампой, составляет менее 10 %.

Пример 3.2. Электропечь мощностью 1000 Вт при напряжении 220 В присоединена к распределительному щитку алюминиевыми проводами сечением $S = 5 \text{ мм}^2$ и длиной 50 м (в одну сторону). Определить ток, сопротивления электропечи и соединительных проводов, мощность потерь энергии и падение напряжения в проводах.

Решение. Ток в электропечи

$$I = \frac{P_{\pi}}{U} = \frac{1000}{220} = 4,54 \text{ А.}$$

Сопротивление электропечи

$$R_{\pi} = \frac{U}{I} = \frac{220}{4,54} = 48,4 \text{ Ом.}$$

Сопротивление соединительных проводов (линии) при удельном сопротивлении алюминия $\rho = 0,029 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ($t = 20 \text{ °С}$)

$$R_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S} = 0,029 \cdot 10^{-6} \frac{50 \cdot 2}{5 \cdot 10^{-6}} = 0,58 \text{ Ом.}$$

Мощность потерь энергии в соединительных проводах (линии)

$$P_{\text{л}} = I^2 R_{\text{л}} = 4,54^2 \cdot 0,58 = 11,2 \text{ Вт.}$$

Падение напряжения в проводах

$$U_{\text{л}} = IR_{\text{л}} = 4,54 \cdot 0,58 = 2,63 \text{ В.}$$

Дополнение.

Рассмотрим пальчиковый никель-марганцевый аккумулятор AA *Rechargeable NiMH 1600 mAh*. 1600 миллиампер-часов это его ёмкость. Рабочее напряжение 1,2 В, максимальный ток разряда 160 мА.

Энергия которую содержит аккумулятор равна $1,6 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot 1,2 \text{ В} = 1,92 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

При тарифе на электроэнергию 0,2537 руб. за кВт·ч она стоила бы

$1,92 \cdot 0,2537 / 1000 = 0,000487$ рубля или меньше 0,05 копейки.

А аккумулятор стоит рубли, потому что его энергия дорогая.

Максимальная мощность аккумулятора $160 \text{ мА} \cdot 1,2 \text{ В} = 0,192 \text{ Вт}$.

Мощность розетки $6 \text{ А} \cdot 220 \text{ В} = 1320 \text{ Вт}$.