

# Лекция 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

## План

1. Введение.
2. Электрические величины и единицы их измерения.
3. Двухполюсные элементы электрических цепей.
4. Управляемые (зависимые) источники.
5. Заключение.

## 1. Введение

Все электротехнические и радиотехнические устройства представляют собой электромагнитные устройства, процессы в которых подчиняются общим законам электромагнетизма. В любом электромагнитном устройстве происходит движение электрических зарядов, связанное с изменяющимся во времени и пространстве электромагнитным полем, двумя сторонами которого являются электрическое и магнитное поля.

Электромагнитные процессы сопровождаются преобразованием электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии. Точный анализ этих процессов, описываемых системами уравнений и частных производных (уравнениями Максвелла), – задача, трудно разрешимая даже в простейших случаях. Но для инженерных расчетов необходим количественный анализ. Поэтому возникает потребность в приближенных методах анализа, позволяющих с достаточной степенью точности решать широкий круг задач. Такие методы дает теория электрических цепей, которая для характеристики электромагнитных процессов вместо векторных величин теории поля, зависящих от пространственных координат и времени, вводит интегральные скалярные величины – ток и напряжение, являющиеся функциями времени.

Для приближенного учета процессов преобразования электромагнитной энергии в теории цепей вводят идеальные элементы. Простейшими идеальными элементами являются двухполюсные элементы с двумя полюсами или выводами – индуктивный, емкостный и резистивный элементы, учитывающие накопление энергии в магнитном и электрическом полях и необратимое преобразование электромагнитной энергии в другие виды энергии. Для учета преобразования энергии неэлектрической природы (химиче-

ской, механической, тепловой и т. д.) в электромагнитную вводят элементы, называемые источниками напряжения и тока.

Соединяя между собой соответствующим образом эти идеальные элементы, получают электрическую цепь, приближенно отображающую электромагнитные процессы в рассматриваемом устройстве.

Конечно, не все электромагнитные процессы можно анализировать на основе теории цепей. Исследование процессов на очень высоких частотах, включая изучение электромагнитной энергии, определение параметров элементов цепей и т. д. должны проводиться на основе методов теории поля. Оценка границ применимости самой теории цепей требует привлечения теории поля. Методы теории цепей, в свою очередь, применяются для решения задач теории электромагнитного поля, возникающих при передаче энергии сверхвысоких частот по линиям и волноводам.

Общее свойство цепей, составленных из резистивного, индуктивного и емкостного элементов и называемых пассивными, состоит в том, что энергия в них только потребляется; усиление мощности невозможно.

Если в цепи имеется хотя бы один активный элемент в виде полупроводникового прибора или интегральной схемы, то получим активную цепь, обладающую свойством усиления мощности.

В курсе основ теории электрических цепей мы будем рассматривать в основном анализ линейных цепей. Параметры таких цепей постоянны и не зависят от токов и напряжений, а также от времени. Анализ линейных цепей, описываемых системами линейных дифференциальных уравнений, хорошо разработан. Если параметр хотя бы одного элемента зависит от тока или напряжения, то цепь является нелинейной, описываемой системой нелинейных уравнений. В математике не существует общих методов решения таких уравнений. Соответственно, анализ нелинейных цепей связан с значительными трудностями.

## **2. Электрические величины и единицы их измерения**

Основными величинами, характеризующими состояние цепи, являются ток и напряжение.

*Ток* в проводящей среде есть явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля. Как известно, ток проводимости в металлах представляет собой перемещение отрицательных зарядов (электронов), а в полупроводниках – перемещение как отрицательных (электроны), так и положительных (дырки) носителей заряда.

В каждый момент времени  $t$  ток характеризуется мгновенным значением, равным скорости изменения заряда во времени:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1)$$

Здесь  $\Delta q$  – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за интервал времени, равный  $\Delta t$ .

Единица измерения тока в системе СИ – ампер (А). В электронных устройствах ток редко превышает несколько ампер. Часто используют меньшие величины тока: миллиамперы,  $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ , микроамперы,  $1 \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$ , и наноамперы,  $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$ .

Ток является скалярной алгебраической величиной, которая может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Для однозначного определения тока необходимо задать его направление. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов. Положительное направление тока выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи (рис. 1.1).

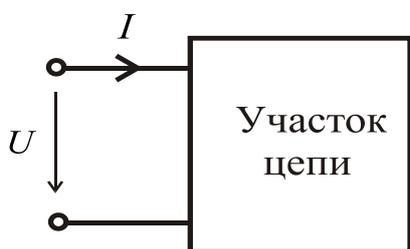


Рис. 1.1

Если в результате расчета величина тока оказывается положительной, то это означает, что его направление совпадает с выбранным положительным направлением. Если ток отрицателен, он направлен противоположно выбранному направлению.

Перенос зарядов в цепи связан с преобразованием или потреблением энергии. Для определения энергии, затрачиваемой на перемещение заряда, используют другую величину – напряжение.

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

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}. \quad (1.2)$$

Единица измерения напряжения в системе СИ – вольт (В). Напряжение различных электронных устройств варьируется в широких пределах. Например, для работы цветного кинескопа монитора компьютера требуется напряжение около 20000 В (20 кВ), а для питания микропроцессоров – менее 3 В.

Напряжение – скалярная величина и может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Для однозначного определения знака напряжения выбирают положительное направление его отсчета, которое показывают стрелкой, направленной от одного зажима к другому, либо знаками «+», «-» (рис. 1.1).

Положительную полярность напряжения удобно выбирать согласованной с положительным направлением тока. В этом случае стрелки, обозначающие ток и напряжение, совпадают.

Согласно (1.1) и (1.2) энергия, затрачиваемая на перемещение заряда, определяется формулой

$$w = \int_0^q u dq = \int_{-\infty}^t u i d\tau. \quad (1.3)$$

В (1.3) принято, что при  $t = -\infty$   $w = 0$ .

Мгновенная мощность участка цепи равна производной энергии по времени:

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

Мощность измеряется в ваттах (Вт). Мощность является алгебраической величиной. Если при согласованных направлениях тока и напряжения мощность положительна ( $p > 0$ ), она потребляется участком цепи. Если мощность отрицательна ( $p < 0$ ), то этот участок цепи является источником энергии.

По характеру изменения во времени различают постоянные, периодические и непериодические токи и напряжения.

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:  $u, i, p$ .

### 3. Двухполюсные элементы электрических цепей

Исследование процессов, происходящих в реальных цепях, основано на идеализации элементов, составляющих цепь. Под элементами в теории цепей понимают не реальные устройства, а их идеализированные модели, обладающие определенными свойствами реальных прототипов. Такими 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. Чем сложнее схема замещения, тем точнее она отражает свойства реальной электронной цепи.

Таким образом, идеализированные элементы являются «кирпичиками», из которых строятся модели реальных электронных устройств. Рассмотрим подробнее элементы, используемые в теории цепей.

### 3.1. Резистивный элемент

*Резистивным* называют идеализированный двухполюсный элемент, для которого связь между напряжением и током можно представить в виде графика, называемого вольт-амперной характеристикой. Резистивный элемент моделирует процесс необратимого преобразования электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии, при этом запасание энергии в электромагнитном поле отсутствует.

По своим свойствам к идеальному резистивному элементу близки проволочный реостат, лампа накаливания, полупроводниковый диод. Изображение резистивного элемента показано на рис. 1.2, а, б. На рис. 1.3 приведены примеры вольт-амперных характеристик резистивных элементов.

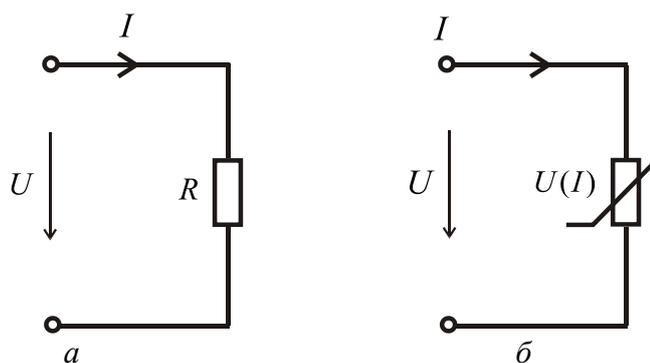


Рис. 1.2

Если вольт-амперная характеристика резистивного элемента – прямая, его называют *линейным*. Любой реальный элемент можно рассматривать как линейный только в определенном диапазоне изменения напряжений и токов. Для линейного резистора связь между напряжением и током определяется *законом Ома*:

$$u = Ri; \quad i = Gu. \quad (1.4)$$

В формулах (1.4) коэффициенты пропорциональности  $R$  и  $G$  называют соответственно *сопротивлением* и *проводимостью*. В соответствии с законом Ома мощность, поглощаемая резистором,

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}.$$

Если параметры элемента зависят от токов и напряжений, его называют *нелинейным*. Условное обозначение нелинейного резистора показано на рис. 1.2, б.

Вольт-амперные характеристики нелинейных резистивных элементов весьма разнообразны. Если характеристика расположена в первом и третьем квадрантах (кривая 1 на рис. 1.3), то элемент является пассивным, поскольку мгновенная мощность  $p = ui$  положительна. Если какой-либо участок ВАХ находится во втором или четвертом квадрантах (кривая 2 на рис. 1.3), то произведение напряжения и тока отрицательно, что соответствует генерированию мощности.

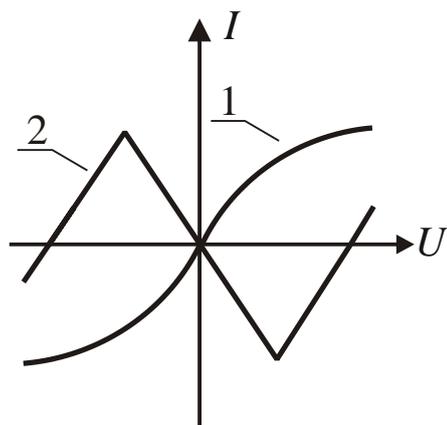


Рис. 1.3

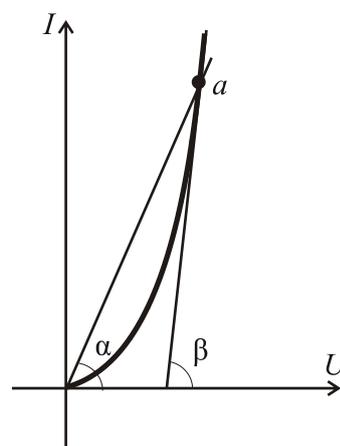


Рис. 1.4

Для каждой точки ВАХ нелинейного резистора можно определить *статическое* и *динамическое* сопротивления. Статическим сопротивлением называют отношение постоянного напряжения нелинейного элемента к току в нем:

$$R_{\text{ст}} = U/I.$$

Статическое сопротивление обратно пропорционально тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в выбранную точку ВАХ (рис. 1.4):

$$R_{\text{ст}} = k / \operatorname{tg}(\alpha). \quad (1.5)$$

Дифференциальное сопротивление нелинейного резистора – это отношение малых приращений напряжения и тока:

$$R_{\text{диф}} = du/di.$$

Оно характеризует элемент при малых изменениях напряжения и тока вблизи выбранной точки ВАХ. Дифференциальное сопротивление обратно

пропорционально тангенсу угла наклона касательной, проведённой к выбранной точке ВАХ (рис. 1. 4):

$$R_{\text{диф}} = k / \text{tg}(\beta). \quad (1.6)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  в формулах (1.5) и (1.6) равен отношению масштабных коэффициентов по осям напряжений и токов:  $k = \mu_U / \mu_I$ .

### 3.2. Независимые источники напряжения и тока

*Источник напряжения* – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону. Источники напряжения изображают так, как показано на рис. 1.5, а

Вольт-амперная характеристика источника напряжения представляет прямую, параллельную оси токов (рис. 1.5, б).

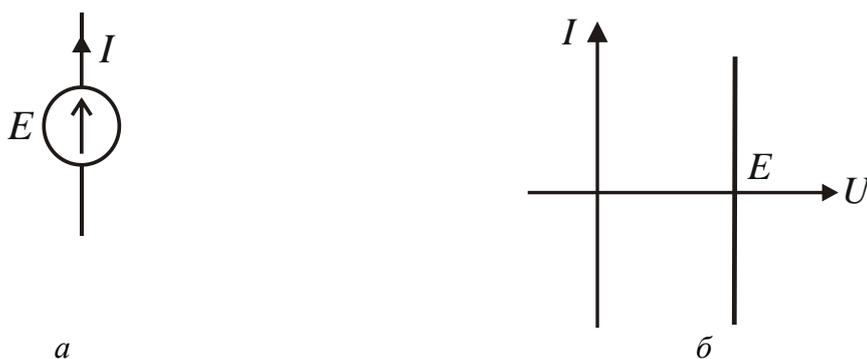


Рис. 1.5

Стрелка ЭДС источника напряжения направлена к его положительному выводу. Поэтому напряжение на внешних зажимах источника напряжения направлено в сторону, противоположную направлению ЭДС.

Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, в противном случае его напряжение будет зависеть от тока через него. Мощность такого источника бесконечна.

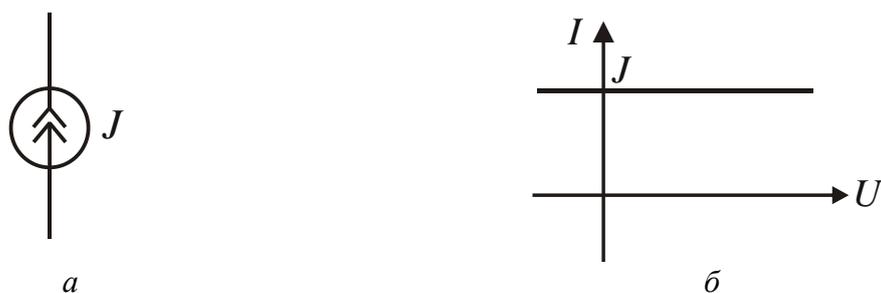


Рис. 1.6

Если напряжение источника равно нулю, то это эквивалентно короткому замыканию выводов источника, поскольку его внутреннее сопротивление нулевое.

*Источник тока* – двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом. Источники тока изображают так, как показано на рис. 1.6, а. Двойная стрелка показывает положительное направление тока источника.

Вольт-амперная характеристика источника тока показана на рис. 1.6, б. Она представляет прямую, параллельную оси напряжений.

Внутренняя проводимость идеального источника тока равна нулю, в противном случае ток будет зависеть от напряжения на его зажимах. Соответственно, внутреннее сопротивление такого источника бесконечно велико. Мощность такого источника также бесконечна. Если ток источника тока равен нулю, это эквивалентно разрыву его выводов.

Подчеркнем, что рассмотренные источники являются идеальными. В сочетании с другими элементами они используются для моделирования реальных источников.

#### 4. Управляемые (зависимые) источники

Помимо независимых в теории цепей рассматривают зависимые, или управляемые, источники. Они представляют результат идеализации свойств реальных электронных приборов. *Управляемый источник* – четырехполюсный резистивный элемент, состоящий из двух ветвей и двух пар выводов: входной и выходной. Он обладает следующими свойствами:

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

Входной и выходной величинами управляемого источника могут быть токи или напряжения. Поэтому различают четыре вида управляемых источников.

1. *Источник напряжения, управляемый напряжением* (ИНУН), рис. 1.7, а. Входной ток этого элемента равен нулю:  $I_1 = 0$ . Напряжение на выходе ИНУН пропорционально входному напряжению:  $U_2 = KU_1$ . Основным параметром является безразмерный коэффициент усиления напряжения  $K$ .

2. *Источник тока, управляемый напряжением* (ИТУН), рис. 1.7, б. Выходной ток этого источника пропорционален входному напряжению:  $I_2 = SU_1$ . Входной ток ИТУН равен нулю. Коэффициент пропорциональности  $S$ , имеющий размерность проводимости, называют передаточной проводимостью или крутизной.

3. *Источник тока, управляемый током* (ИТУТ), рис. 1.7, в. Поскольку входная ветвь представляет короткое замыкание, входное напряжение этого источника равно нулю:  $U_1 = 0$ . Выходной ток ИТУТ пропорционален вход-

ному:  $I_2 = KI_1$ . Безразмерный коэффициент пропорциональности  $K$  называют *коэффициентом усиления тока*.

4. *Источник напряжения, управляемый током* (ИНУТ), рис. 1.7, з. Напряжение на выходе ИНУТ пропорционально входному току:  $U_2 = KI_1$ . Управляющий параметр ИНУТ имеет размерность сопротивления.

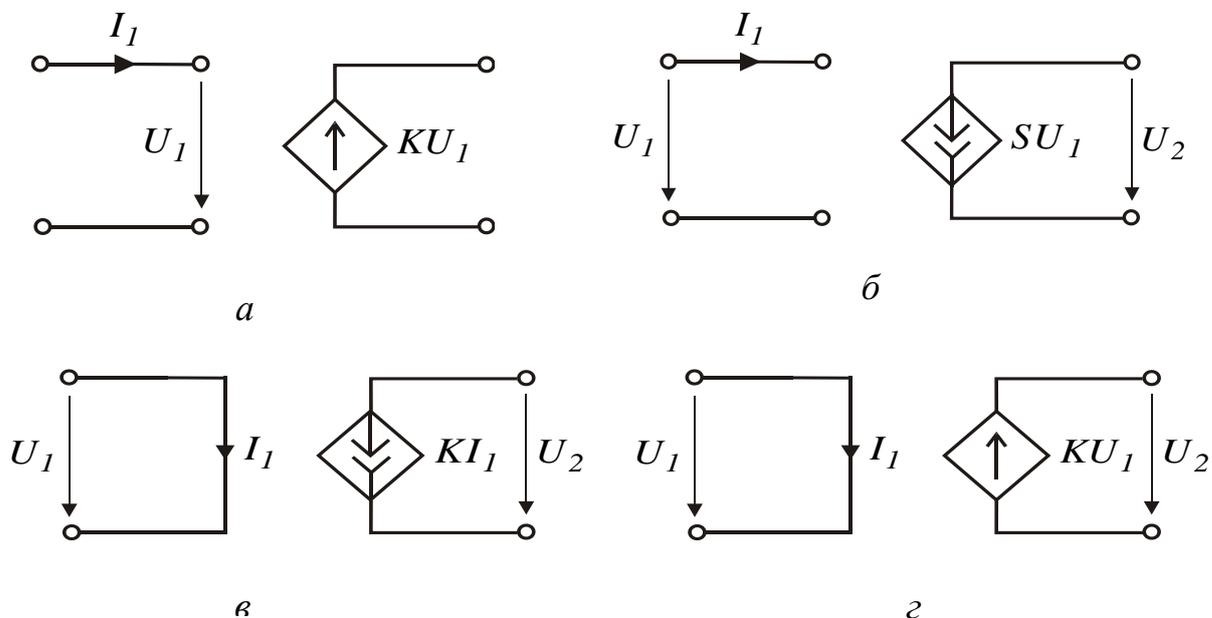


Рис. 1.7

Важно отметить, что входные зажимы источников, управляемых током, замкнуты накоротко, а входные зажимы источников, управляемых напряжением, разомкнуты.

Управляемые источники являются необратимыми элементами, так как передача сигнала осуществляется только от входа к выходу. Для передачи сигнала от выхода к входу источника необходима внешняя цепь, которую называют *цепью обратной связи*.

## 5. Заключение

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. 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. Внутреннее 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. Внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно.