

## Раздел 1. Электрическая цепь и её элементы

### План.

1. Основные понятия и соотношения электрической цепи. Базовые идеализированные пассивные элементы электрических цепей, их математические модели и характеристики.
2. Базовые идеализированные активные элементы электрических цепей (идеальные источники напряжения и тока), их математические модели. Схемотехнические модели (схемы замещения) пассивных элементов. Линейные модели источников.

Автоматизированное производство базируется на широком применении разнообразных электроэнергетических, электромеханических и электронных устройств (системы энергоснабжения и электроосвещения, электроаппараты и исполнительные электродвигатели, устройства электроавтоматики и информационно-измерительной техники, электронные приборы и вычислительные системы). Эти устройства входят в технологические системы в качестве встроенных объектов, участвующих в обеспечении их функционального назначения. Они отличаются принципами функционирования, уровнем энергии и мощности, назначением, видом сигналов. Специалисты машиностроительного профиля, занимающиеся созданием и эксплуатацией технологического оборудования используют электротехнические устройства должны разбираться в принципах функционирования и построения типовых электротехнических и электронных устройств. Поэтому, цель изучения дисциплины «Электротехника и электроника» заключается в овладении принципами построения, функционирования и моделирования типовых электромагнитных и электронных устройств; их описания и моделирования с использованием теории электрических и магнитных цепей.

### **1. Электрические цепи. Основные понятия и классификация.**

*Электрической цепью* называется совокупность источников и приемников электрической энергии, вспомогательных и измерительных устройств, а также соединительных проводов, предназначенных для генерации, передачи, распределения, преобразования и потребления электрической энергии или информации.

*Источниками* являются устройства, производящие электрическую энергию за счет преобразования химической, механической и тепловой энергии. В результате такого преобразования между выходными зажимами источников возникает электродвижущая сила, способная вызывать токи в замкнутых цепях и напряжения на элементах цепи.

Источниками электрической энергии являются: гальванический элемент, электрическая машина, термопара, фотодиод и др.

*Приемники* преобразуют электрическую энергию в различные виды химической, тепловой, механической и другой энергии. Приемники можно разделить на две группы: приемники с необратимым преобразованием энергии (например, электрическая машина в режиме двигателя, аккумулятор в режиме зарядки, электрическая печь, резистор, лампа накаливания и др.) и приемники с обратимым преобразованием электрической энергии в энергию электрического поля конденсаторов и магнитного поля катушек индуктивности и дросселей.

*Вспомогательные элементы* служат для управления режимом работы электрической цепи. К ним относятся коммутаторы (выключатели и переключатели), защиты от перенапряжений и недопустимого значения тока (предохранители), штепсельные разъемы, зажимы и др.

*По назначению* электрические цепи разделяются на:

*энергетические*, предназначенные для генерации, передачи и потребления электрической энергии;

*информационные*, предназначенные для передачи и обработки информации. Последние, как правило, относятся к классу электронных цепей.

*По виду обрабатываемой информации* цепи делятся на:

*аналоговые*, в которых переменные (токи и напряжения) являются непрерывными функциями времени;

*дискретные*, в которых переменные отличны от нуля в некоторые (дискретные) моменты времени, либо в только на множестве коротких интервалов времени.

*По типу параметров компонентов цепи* разделяются на:

*цепи с сосредоточенными параметрами*, в которых переменные являются функциями времени и не зависят от пространственных координат;

*цепи с распределенными параметрами*, в которых переменные являются функциями времени и пространственных координат;

*линейные цепи*, параметры элементов которых не зависят от режима цепи (т.е. от токов и напряжений);

*нелинейные цепи*, параметры элементов которых зависят от режима цепи;

*параметрические* (нестационарные) или *непараметрические* (стационарные) цепи, параметры элементов которых зависят или соответственно не зависят от времени;

*детерминированные и недетерминированные цепи*, у которых переменные или параметры являются соответственно детерминированными или случайными величинами.

Строго говоря, все цепи являются недетерминированными нелинейными цепями с распределенными параметрами и лишь при определенной идеализации могут быть отнесены к другим видам цепей.

При анализе процессов в реальной электрической цепи ее компоненты заменяются упрощенными схемными моделями, построенными из идеализированных активных и пассивных элементов. Элементы электрической цепи могут различаться числом зажимов (полюсов), присоединяемых к остальной цепи: двухполюсные и многополюсные.

*Источники* электрической заменяют *активными* элементами: источниками тока и напряжения. *Потребители* электрической энергии заменяют *пассивными элементами*: резистивным, емкостным и индуктивным.

Соединение идеальных двухполюсных элементов и источников производят с помощью **идеальных проводников**, т.е. проводников, в которых отсутствуют потери или преобразование электрической энергии.

Источники и идеальные элементы могут подключаться в цепь через **идеальные ключи**. Идеальный ключ в разомкнутом состоянии имеет бесконечно большое сопротивление, а в замкнутом его сопротивление равно нулю.

Процессы переключений в цепи с помощью идеальных ключей называются **коммутациями**. Таким образом ЭЦ - соединение идеальных двухполюсных элементов, источников и ключей.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных обозначений называется **схемой**. Схема имеет определенную конфигурацию. Основными понятиями, характеризующими конфигурацию цепи, являются *ветвь* и *узел*. **Ветвь** - участок цепи по которому течет один и тот же ток. **Узел** - точка соединения двух и более ветвей.

Величины, характеризующие процессы в электрической цепи.

Процессы в электрических цепях характеризуются следующими интегральными величинами : током, напряжением, зарядом, магнитным потоком ( потоком магнитной индукции).

**1. Электрический ток** - скалярная величина, связанная со скоростью изменения заряда  $i(t) = dq/dt$ . Единица измерения тока **А = К/Сек.**

При анализе схем электрических цепей принято устанавливать направление тока. Положительное направление тока выбирается произвольно перед началом анализа во всех ветвях электрической цепи и обозначается стрелкой.

Если в определенный момент времени  $t_1$  имеем  $i(t_1) \geq 0$ , то действительное направление тока совпадает с положительным.

**2. Напряжение** - скалярная алгебраическая величина численно равная разности потенциалов между зажимами 1 и 2 элемента  $u_{12} = \varphi_1(t) - \varphi_2(t)$ . Очевидно, что  $u_{12} = -u_{21}$

Так же как ток, напряжение имеет направление.

При анализе электрических цепей на схеме направления тока и напряжения на пассивных элементах совпадают (называются принимаются согласованными), а на активных направлены в противоположных направлениях.

С энергетической точки зрения напряжение связано с работой  $W$  в электрическом поле или потенциальной энергией  $u(t) = dW/dq$ . Единица измерения  $В = Дж/К$ .

Приведенное соотношение позволяет выразить электромагнитную энергию и мощность через введенные величины ток и напряжение.

**Энергия**, концентрируемая или рассеиваемая элементом цепи

$$W(t_0, t) = \int_0^q u(t) dq = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau$$

Единица измерения **Дж**.

В соответствии с определением **мощности**  $p(t) = dW/dt$ , можно получить выражение электрической мощности элемента цепи в виде:

$$p(t) = u(t) i(t).$$

Очевидно, что  $p(t)$  является алгебраической величиной, знак которой определяется знаками  $u$  и  $i$  в рассматриваемый момент времени. Для согласованных положительных направлений  $u, i$  можно установить, что при  $p(t) \geq 0$  энергия потребляется в элементе, а при  $p(t) \leq 0$  энергия отдается элементом во внешнюю цепь.

## 2. Элементы электрической цепи, их математические и схемотехнические модели.

**Идеальные двухполюсные элементы** моделируют определенные физические процессы, связанные с преобразованием электрической энергии.

К **пассивным двухполюсным элементам** относятся:

**Резистор** - элемент, учитывающий только необратимое преобразование электрической энергии в другие ее виды.

Резистор характеризуется зависимостью  $u(i)$  или  $i(u)$ , которая называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). Примеры ВАХ приведены на рисунке. Если ВАХ резистивного элемента линейна, то элемент называется **линейным**, а если не линейна - **нелинейным**.

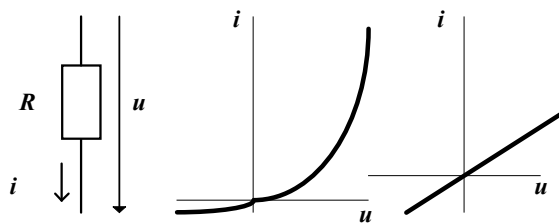


Рис.

**Линейные электрические цепи** содержат только линейные элементы.

Уравнение, связывающее ток и напряжение на элементе называется **уравнением элемента** или его **математической моделью**.

Для линейного участка ВАХ справедливы выражения :

$$u(t) = Ri(t) \text{ или } i(t) = Gu(t), \quad (2.8)$$

где  $R$  - сопротивление, Ом;  $G$  - проводимость, См; резистора.

Мощность, потребляемая в резисторе  $p(t) = u(t)i(t)$ . Для линейного резистора  $p(t) = Ri^2(t) = Gu^2(t) > 0$ , что свидетельствует о необратимом рассеянии электромагнитной энергии в резистивном элементе.

**Индуктивность** - учитывает только накопление и расходование магнитной энергии.

Индуктивный элемент характеризуется зависимостью потокосцепления  $\Phi$  от тока  $i$ , т.е. вебер-амперной характеристикой  $\Phi(i)$ . Потокосцепление многовитковой катушки есть произведение магнитного потока, сцепленного с одним витком, на число витков. Если характеристика линейная, то  $\Phi(t) = Li$ , где  $L$  - индуктивность элемента, Гн.

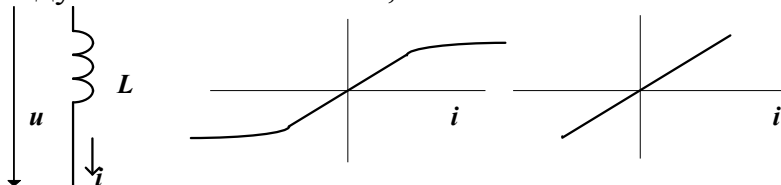


Рис.

Уравнение индуктивного элемента для линейного случая имеет вид:

$$U(t) = L di/dt$$

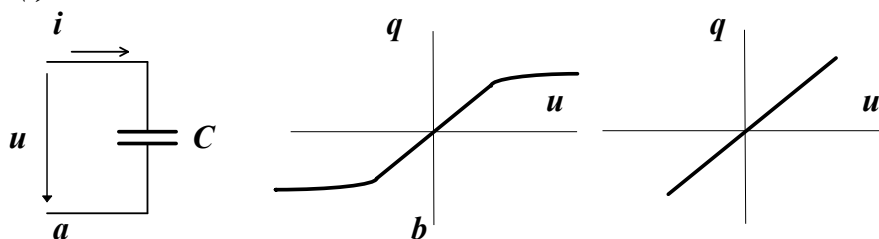
Относительно тока  $i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau$ .

Энергия магнитного поля, запасаемая в индуктивном элементе

$$W_M = \int_0^t u(\tau) i(\tau) d\tau = \int_0^t Li \frac{di}{d\tau} d\tau = L \frac{i^2}{2}.$$

**Емкость** - учитывает накопление и расходование только электрической энергии.

**Емкостной** элемент характеризуется зависимостью заряда  $q$  от напряжения  $u$ , т.е. кулон-вольтной характеристикой  $q(u)$ . Для линейной емкости  $q(t) = Cu(t)$ .



Уравнение элемента имеет вид:

$$i(t) = dq/dt = Cdu/dt$$

или

$$u(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau.$$

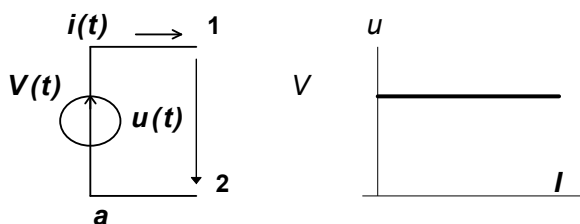
Энергия электрического поля, запасаемая в конденсаторе

$$W_c = Cu^2 / 2$$

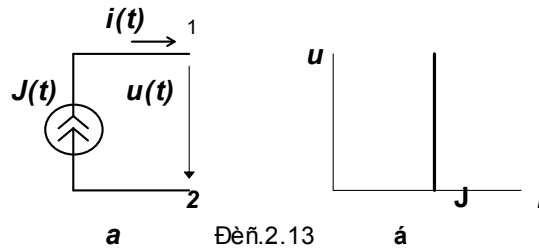
Для описания сторонних источников энергии, действующих в электрической цепи, используют две идеализированные модели активных элементов.

**Идеальный источник напряжения (ЭДС)**, схемное изображение которого приведено на рис. , характеризуется напряжением  $u(t)=V(t)$ , вне зависимости от значения тока  $i(t)$ . Ток и напряжение на источнике направлены противоположно. Мгновенная мощность  $p(t) = u(t)i(t)$  отдается источником во внешнюю цепь при  $p_u < 0$ .

Для источника постоянного напряжения внешняя характеристика показана на рис.



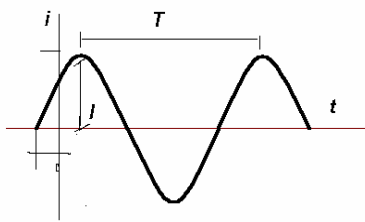
**Идеальный источник тока**, схемное изображение которого приведено на рис. , характеризуется током  $i(t) = J(t)$  вне зависимости от значения напряжения  $u(t)$ . Мгновенная мощность  $p(t)=u(t)J(t)$  отдается источником при  $p_i < 0$ . Внешняя характеристика источника постоянного тока показана на рис.



Приведенные идеальные источники являются идеальными потому что теоретически могут отдавать в цепь бесконечную мощность.

В электрических цепях применяются источники сигналов различной формы. Источники постоянного напряжения и тока задаются соотношением  $v(t)=V$ ,  $J(t)=J$ .

У источников синусоидального (гармонического) напряжения



$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \phi), \text{ где}$$

$U_m$  - амплитуда (максимальное значение),  $T$  - период синусоиды,  $f = 1/T$ , - линейная частота;  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$  - угловая частота колебаний. При фиксированной частоте  $\omega$  синусоидальную функцию удобно строить в зависимости от переменной  $\omega t$ , измеряемой в радианах).

Аналогично определяется гармонический источник тока.

Также применяются источники периодических сигналов различной формы (например, последовательность импульсов напряжения длительностью и периодом следования  $T$ ) и источники непериодических импульсных сигналов различной формы (например, одиночный прямоугольный импульс или импульс колоколообразной формы)

Представление сигналов в виде функций времени называется моделью во временной области.

Реальные элементы электрической цепи могут иметь различное описание в зависимости от режима работы и требований при моделировании. Описание реального элемента производится на основе анализа электрофизических процессов, протекающих в нем и может иметь достаточно сложный характер. Схемы замещения реальных элементов электрической цепи резистора, катушки индуктивности, конденсатора и др. строят, используя идеальные элементы.

Использование той или иной модели определяется требованиями к ее адекватности, сложности и точности.