

Лекция №2.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Учебные вопросы

1. Электрический потенциал, напряжение, электродвижущая сила.
2. Условия возбуждения и поддержания тока в электрической цепи. Понятие электрической цепи. Резистивные, индуктивные и емкостные элементы цепей и их параметры.
3. Активные и пассивные двухполюсники и многополюсники (четырёхполюсники).

1. Электрический потенциал, напряжение, электродвижущая сила

Рассмотрим работу источника постоянной ЭДС. В таком источнике электрической энергии в результате действия сил неэлектромагнитной природы - химических, механических, тепловых, атомных и др., называемых *сторонними силами*, создается электрическое поле, которое характеризуется напряженностью $\vec{E}_{\text{стор}}$.

Например, в химическом источнике тока (ХИТ) под действием сил стороннего поля положительные и отрицательные заряды внутри источника разделяются (рис. 1). На электроде источника, обозначаемом знаком «+», накапливается избыток положительных зарядов, на электроде, обозначаемом знаком «-» - избыток отрицательных зарядов.

При подключении к выводам источника внешней электрической цепи в ней создается электрическое поле $\vec{E}_{\text{внеш}}$, направленное от положительного электрода источника к отрицательному.

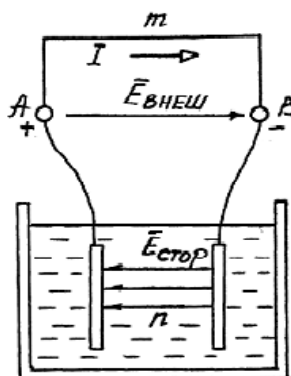


Рис. 1. Источник постоянной ЭДС (ХИТ)

Под действием этого поля носители отрицательных зарядов - электроны перемещаются вдоль внешней части цепи от отрицательного электрода к положительному, нейтрализуя недостаток отрицательных зарядов на положительном электроде. В цепи постоянного тока наступает динамическое равновесие: в источнике непрерывно происходит разделение зарядов, а через внешнюю часть цепи - их соединение.

Электродвижущая сила E (ЭДС) характеризует способность стороннего поля вызывать электрический ток. ЭДС численно равна работе сил стороннего поля по перемещению единицы заряда внутри источника (по пути AnB):

$$E = \int_{AnB} \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}.$$

Единица измерения ЭДС - вольт (В).

В электрических цепях **электрический ток** - явление направленного движения свободных носителей электрического заряда. Такими носителями заряда в металлах являются электроны, в плазме, электролите - ионы.

Обозначения тока в теории цепей - I (постоянный или действующий переменный), i (мгновенный переменный). Вместо термина «ток» употребляют также термин «сила тока».

Электрический ток измеряется количеством электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

Постоянный ток - электрический ток, не изменяющийся во времени. Все остальные токи - *переменные*.

Единица измерения тока - ампер (А). В электротехнике часто применяются также миллиампер (мА) и микроампер (мкА).

Условно за **направление тока** в цепи принято направление, обратное направлению движения носителей заряда - электронов, то есть от положительно заряженного электрода к отрицательно заряженному.

При протекании тока через элементы электрической цепи электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии и силами электрического поля выполняется работа по переносу электрических зарядов вдоль цепи, которая характеризуется **электрическим напряжением**.

Обозначения напряжения - U (постоянное или действующее переменное), u (мгновенное переменное).

Напряжение (разность потенциалов) между двумя точками цепи есть величина, равная работе сил поля по перемещению единичного заряда между этими точками (например, по пути AmB на рис. 1):

$$U = \int_{AmB} \bar{E}_{\text{ВНЕШ}} d\bar{l} . \quad (2)$$

Единица напряжения - вольт (В). В электротехнике часто применяются также милливольт (мВ) и киловольт (кВ).

Из определения напряжения получаем выражение для энергии W , затраченной на перемещение заряда q на участке цепи с напряжением u за промежуток времени от t_1 до t_2 :

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u dq = \int_{t_1}^{t_2} u i dt .$$

Дифференцирование этого равенства по времени дает выражение скорости изменения энергии во времени, которая называется *мгновенной мощностью* и определяется произведением мгновенных значений тока и напряжения:

$$p = \frac{dW}{dt} = u i . \quad (3)$$

2. Условия возбуждения и поддержания тока в электрической цепи. Понятие электрической цепи. Резистивные, индуктивные и емкостные элементы цепей и их параметры.

Все электротехнические устройства (ЭУ) представляют собой электромагнитные системы, анализ которых в общем случае сводится к решению уравнений Максвелла для ЭМП. Однако решение этих уравнений даже для сравнительно простых задач крайне сложно.

Вместе с тем, во многих практических случаях можно с достаточной точностью рассматривать ЭУ как электрическую или магнитную цепь. Такие модели ЭУ описываются не векторами поля (напряженностью и индукцией) а *интегральными величинами* – током, напряжением, электродвижущей силой (ЭДС), зарядом, магнитным потоком. Интегральными они называются потому, что численно определяются интегралами от векторов поля.

Электрическая цепь - совокупность устройств, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, токе и напряжении.

Электрическая цепь *предназначена* для передачи, распределения и преобразования электроэнергии в другие виды энергии.

По виду тока цепи разделяются на цепи постоянного и переменного тока.

По характеру параметров элементов цепи разделяются на линейные и нелинейные. Процессы в линейной цепи в общем случае описываются линейными дифференциальными уравнениями. Если же в состав цепи входит хотя бы один нелинейный элемент, то она называется нелинейной, а процессы в ней описываются нелинейными дифференциальными уравнениями.

Параметры линейных пассивных элементов могут иметь постоянные значения либо изменяться во времени под действием некоторых факторов, непосредственно не связанных с током или напряжением этих элементов (например, емкость конденсатора может меняться вследствие изменения расстояния между обкладками).

Линейные элементы первого типа называются *линейными элементами с постоянными параметрами*; элементы второго типа – *линейными элементами с переменными параметрами* или *параметрическими элементами*. Параметрические элементы следует отличать от *регулируемых* элементов, изменение параметров которых производится в процессе настройки устройства.

Цепи, составленные только из линейных элементов с постоянными параметрами, называются линейными цепями с постоянными параметрами, или *линейными инвариантными во времени цепями*. Процессы в линейных инвариантных во времени цепях описываются линейными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Любая электрическая цепь может состоять из следующих *элементов*:

- источников электроэнергии;
- приемников электроэнергии;
- вспомогательных элементов (соединительные провода, выключатели, предохранители, разъемы, измерительные приборы и др.).

В источниках электроэнергии различные виды энергии преобразуются в электрическую (в гальванических элементах - химическая; в электрических генераторах - механическая, в солнечных батареях - световая и др.).

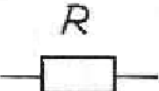
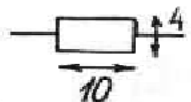
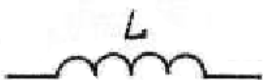
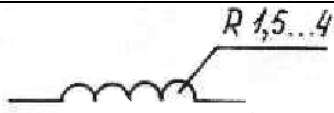
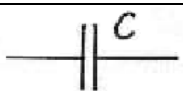
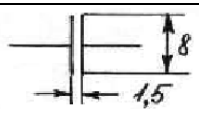
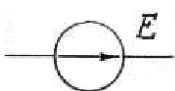
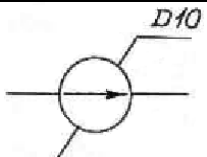
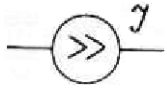
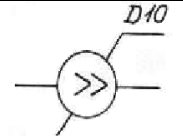
В приемниках электроэнергии происходит обратное преобразование - электроэнергия преобразуется в иные виды энергии.

Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электроэнергии. Приемники электроэнергии по своим свойствам можно разделить на резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Идеальный **резистивный элемент** (*активное сопротивление*) - это элемент электрической цепи, в котором происходит только необратимое преобразование электромагнитной энергии в тепло (так называемые *потери*), а запасание энергии электрического и магнитного поля отсутствует.

По свойствам к идеальному резистивному элементу близки следующие реальные устройства: резисторы, реостаты, лампы накаливания. Условное графическое обозначение резистора представлено в таблице 1.

Таблица 1

Наименование элемента	Условное графическое обозначение (ГОСТ)	Размеры (ГОСТ)
Резистор нерегулируемый		
Катушка индуктивности		
Конденсатор нерегулируемый		
Источник ЭДС		
Источник тока		

Основным параметром резистивного элемента является его *электрическое сопротивление* R .

Единицы измерения сопротивления - ом (Ом). Часто также применяются килоом (кОм) и мегаом (МОм).

Электрическое сопротивление линейного однородного проводника определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} . \quad (4)$$

где l - длина проводника в метрах;

S - его сечение в м^2 ;

ρ - удельное электрическое сопротивление в Ом · м.

Величина, обратная сопротивлению, называется *электрической проводимостью*:

$$G = 1/R. \quad (5)$$

Проводимость измеряется в сименсах (См).

При протекании тока I за время t в резистивном элементе выделяется тепло, определяемое по *закону Джоуля-Ленца*:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (6)$$

Мощность в резистивном элементе не может принимать отрицательных значений. Следовательно, энергия всегда поступает от источника в резистивный элемент.

Идеальным индуктивным элементом электрической цепи называют элемент, в котором при протекании тока происходит только запасание магнитной энергии, а потери и запасание электрической энергии отсутствуют. Примером элемента, близкого по свойствам к такому элементу, служит индуктивная катушка.

Условное графическое обозначение катушки индуктивности показано табл. 1. Протекание тока i по k -тому витку катушки вызывает появление магнитного поля, характеризуемого в теории электрических цепей интегральной величиной - *магнитным потоком* Φ_k .

Сумма всех потоков, сцепленных с отдельными витками катушки, называется *потокосцеплением*:

$$\psi = \sum \Phi_k = L \cdot i, \quad (7)$$

где L - *индуктивность*.

Единица измерения индуктивность - генри (Гн) (на практике наиболее часто встречаются элементы с индуктивностью 10^{-2} - 10^2 мГн).

Связь между током и напряжением в индуктивном элементе устанавливается на основе **закона электромагнитной индукции**: при изменении магнитного потока, сцепленного с контуром, в нем наводится электродвижущая сила, равная скорости изменения потокосцепления и направленная так, чтобы ток, вызванный ею, стремился воспрепятствовать изменению наводящего потока:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -u_L. \quad (8)$$

Напряжение на индуктивном элементе определяется скоростью изменения тока. При протекании через индуктивность постоянного тока поток не из-

меняется, напряжение равно нулю, что равносильно короткому замыканию выводов элемента.

Мгновенная мощность в индуктивном элементе:

$$p_L = u_L i = L i \frac{di}{dt} . \quad (10)$$

При совпадении знаков тока и напряжения происходит запасание энергии и мощность положительна, при несовпадении знаков мощность отрицательна, что означает отдачу запасенной в элементе энергии.

Интегрирование выражения (10) в пределах от t_1 , где ток равен нулю, до t_2 , где ток равен i , позволяет получить энергию, запасенную в индуктивности:

$$W_L = \int_0^i p_L dt = L \frac{i^2}{2} .$$

Следовательно энергия в индуктивности определяется значением тока в данный момент времени и пропорциональна квадрату тока, а потому не может принимать отрицательных значений.

Идеальный емкостной элемент электрической цепи - элемент, в котором происходит только запасание электрической энергии, а потери и запасание магнитной энергии отсутствуют.

Примером элемента емкостного типа является конденсатор. Его условное графическое обозначение представлено в таблице 1. .

В случае приложения к конденсатору напряжения на его обкладках появляются заряды, равные по значению и противоположные по знаку, а в диэлектрике между обкладками образуется связанное с этим зарядом электрическое поле. Заряд на обкладках конденсатора будет пропорционален напряжению между обкладками:

$$q = C U, \quad (11)$$

где C - емкость.

Единица измерения емкости - фарада (Ф). В электротехнике часто применяются также микрофарада (мкФ), пикофарада (пФ), нанофарада (нФ).

Для установления связи между током и напряжением в емкостном элементе достаточно продифференцировать выражение (11). В результате получим зависимость тока в емкости от напряжения на ней:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} . \quad (12)$$

Ток в емкостном элементе определяется скоростью изменения напряжения. В случае приложения постоянного напряжения ток в емкости равен нулю.

Мощность в емкостном элементе:

$$p_C = u_C i = C u_C \frac{du_C}{dt} . \quad (13)$$

Интегрирование выражения (13) позволяет найти энергию, запасенную в емкости:

$$W_C = \int_0^{u_C} p_C dt = C \frac{u_C^2}{2} .$$

Следовательно, энергия в емкости не может принимать отрицательных значений.

Индуктивные и емкостные элементы в отличие от резистивного называются реактивными.

Источники электроэнергии делятся на источники ЭДС и источники тока.

Идеальный источник ЭДС - источник, напряжение на выходных зажимах которого не зависит от тока, проходящего через источник. У такого источника отсутствует внутреннее сопротивление и его ЭДС равна напряжению на зажимах $U = E(t)$.

Условное графическое изображение идеального источника ЭДС показано в таблице 1. Направление стрелки совпадает с направлением тока внутри источника. При коротком замыкании зажимов такого источника ток в нем стремится к бесконечности, то есть мощность такого источника должна быть бесконечно велика, что на практике невозможно.

Для учета внутренних параметров реальных источников ЭДС в схеме замещения последовательно с идеальным источником ЭДС включаются фиктивные резисторы (для цепей постоянного тока) (рис. 2, а) или резисторы и индуктивности (для цепей переменного тока) (рис. 2, б).

Идеальный источник тока - это такой источник электроэнергии, в котором ток не зависит от напряжения на его выходных зажимах. Такой источник обладает бесконечно большим внутренним сопротивлением.

Условное графическое обозначение идеального источника тока показано в таблице 1. Данный элемент применяется в схемах замещения при расчете некоторых электротехнических и электронных устройств (например, схем с транзисторами).

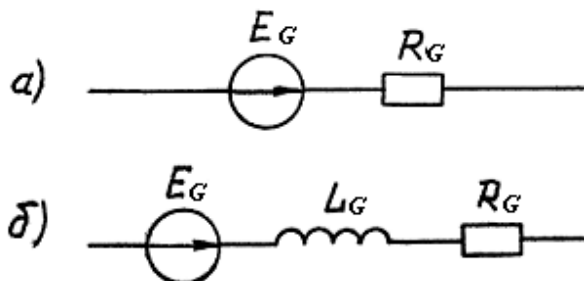


Рис. 2. Схемы замещения источников постоянной и переменной ЭДС

3. Активные и пассивные двухполюсники и многополюсники (четырёхполюсники)

Двухполюсник – это часть схемы произвольной конфигурации, имеющая одну пару зажимов (отсюда и произошло его название) обычно называемую входными.

Применение двухполюсников особенно эффективно, когда требуется определить значения тока в некоторой ветви для различных значений сопротивления в этой ветви в то время, как в остальной схеме сопротивления, а также ЭДС и токи источников постоянны. Данный метод основан на теореме: если активную цепь, к которой присоединена некоторая ветвь, заменить источником с ЭДС, равной напряжению на зажимах разомкнутой ветви, и сопротивлением, равным входному сопротивлению активной цепи, то ток в этой ветви не изменится. Указанные в теореме ЭДС и сопротивление можно интерпретировать как соответствующие параметры некоторого генератора, эквивалентного исходному активному двухполюснику.

Пусть необходимо определить ток в приемнике с сопротивлением R . Всю остальную часть схемы цепи обозначим активным двухполюсником A (см. слайд 1). В соответствии с методом активного двухполюсника схему можно трансформировать в схему, изображенную на слайде 2.

Искомый ток в приемнике определяется по формуле:

$$\underline{I} = \frac{E_{\mathcal{O}}}{R_{\mathcal{O}} + R} = \frac{U_{XXab}}{R_{\mathcal{O}} + R}, \quad (14)$$

где U_{xxab} - напряжение на разомкнутых зажимах $a-b$.

Параметры активного двухполюсника определяются следующим образом:

- любым из известных методов расчета линейных электрических цепей определяют напряжение на зажимах $a-b$ активного двухполюсника при разомкнутой исследуемой ветви;
- при разомкнутой исследуемой ветви определяется входное сопротивление активного двухполюсника, заменяемого при этом пассивным.

Данная замена осуществляется путем устранения из структуры активного двухполюсника всех источников энергии, но при сохранении на их месте их внутренних сопротивлений. В случае идеальных источников это соответствует закорачиванию всех источников ЭДС и размыканию всех ветвей с источниками тока.

При анализе электрических цепей в задачах исследования взаимосвязи между переменными (токами, напряжениями, мощностями и т.п.) двух каких-то ветвей схемы широко используется теория четырехполюсников.

Четырехполюсник – это часть схемы произвольной конфигурации, имеющая две пары зажимов, обычно называемые входными и выходными. Примерами четырехполюсника являются трансформатор, усилитель, потенциометр, линия электропередачи и другие электротехнические устройства.

Теория четырехполюсника в общем виде рассматривает основную проблему электротехники – передачу энергии (сигнала) от источника к приемнику электрической энергии через любое промежуточное звено. Внутренняя структура четырехполюсника может быть любой; она, как правило, не интересует исследователя, использующего аппарат четырехполюсника.

В общем случае четырехполюсники можно разделить на *активные*, в структуру которых входят источники энергии, и *пассивные*, ветви которых не содержат источников энергии. Далее будем рассматривать только пассивные четырехполюсники.

Наиболее существенным достоинством теории четырехполюсника является то, что между входными и выходными величинами (то есть токами и напряжениями) можно установить соотношения без расчета внутренней схемы четырехполюсника.