

1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Задачи электротехники. Электротехника как наука необходима для построения электро-магнитных цепей — систем выработки, передачи, преобразования и потребления электрической энергии и информационных сигналов. С использованием электротехнической теории строятся гигантские электростанции и миниатюрные генераторы; их энергия преобразуется, например, в механическую энергию двигателей больших станков и микро-электро-механических систем, в тепловую энергию плавильных печей и нитей ламп накаливания; используется электротехника и при решении задач передачи и преобразования сигналов и хранения информации (радио и телевидение, магнитная запись, телефония, ЭВМ).

Теоретические основы электротехники содержат в себе два раздела, отличающиеся постановкой задач и применяемыми методами: теория электрических цепей и теория электромагнитного поля. В этом курсе рассматривается только первый раздел — теория цепей. Понятия электрической цепи и электрической схемы эквивалентны.

Классы задач, которые ставятся в области теории цепей, — это:

- 1) расчёт и анализ существующих цепей (схем):
 - а. определение связи между токами, напряжениями, энергией;
 - б. расчёт характеристик заданной схемы, например к. п. д., потеря напряжения, пробойных токов, передаточных характеристик, искажений в каналах связи;
 - в. поиск граничных условий работы схемы (т. е. рабочего диапазона), например, диапазона напряжений питания, при которых схема выполняет заявленные функции, или максимальной частоты входного сигнала;
- 2) синтез цепей, т. е. разработка состава цепи и способа соединения элементов для достижения цепью заданных характеристик (например, коэффициента усиления и динамического диапазона в усилителе).

Интересно отметить, что анализ существующих цепей производится по известным правилам; это ремесло инженера-электронщика. А для синтеза цепей, т. е. разработки новых схем, никаких готовых правил и методик нет; это искусство, здесь требуется опыт и интуиция.

Классификация цепей.

1) Электрические цепи бывают линейными и нелинейными. В линейных цепях все элементы линейны, т. е. их параметры (сопротивления, ёмкости или индуктивности) не зависят от протекающего через них тока. Если в цепи есть хотя бы один нелинейный элемент, то и вся цепь становится нелинейной.

2) Различают цепи с сосредоточенными и распределёнными параметрами. В схемах первого типа можно без потери точности свести свойства вещества, составляющего систему, к однозначной топологии базовых свойств. В схемах второго типа свойства вещества, непрерывно распределённые по объёму системы, невозможно однозначно представить в виде комбинации базовых параметров; в этом случае приходится разбивать систему на элементарные объёмы и проводить интегрирование.

Классификация элементов.

Элементы электрических цепей различаются по назначению (источники энергии / сигнала; приёмники энергии / сигнала; вспомогательные), по числу выводов (2-х полюсные; 3-х полюсные; 4-х полюсные; многополюсные), по отношению к электромагнитной энергии (активные; пассивные), по типу модели элемента (нелинейные — описываются уравнениями с нелинейными коэффициентами; линейные — с линейными коэффициентами), по способу описания параметров элемента (с сосредоточенными параметрами; с распределёнными параметрами).

Базовые электрические свойства элементов (параметры) — сопротивление, ёмкость, индуктивность — обязательно присутствуют в любом фрагменте вещества, но в разной степени. Технологи создают специальные вещества и конструкции, в которых присутствует главным образом какое-либо одно из этих свойств, а остальные проявляются незначительно. Так изготавливают резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и другие элементы.

В большинстве случаев при расчёте можно заменить реальные элементы их основными свойствами, т. е. идеализированной моделью. Это, разумеется, упрощение, и оно справедливо не всегда. Исключение составляют элементы с малыми размерами (\sim мкм), работающие на сверхвысокой частоте (\sim ГГц), длинные линии; в остальных случаях такое приближение можно использовать.

Для исследования электрической цепи создаётся её идеализированная модель, учитывающая режим работы схемы и метод расчёта. Реальные электрические установки заменяются идеализированными элементами, обладающими приближённо теми же электрическими и магнитными свойствами, что и их прототипы. Электрическая принципиальная схема (ЭПС) – это графическая модель реальной цепи, отображающая способ электрического соединения проводниками полюсов реальных элементов, составляющих данную цепь (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и др.). Электрическая схема замещения (ЭСЗ) – математическая модель, схемная модель, в которой отдельные графические символы отражают определённые физические свойства и особенности реальной цепи (например, сопротивление, ёмкость, индуктивность и др.).

Электрические параметры элемента по-разному проявляются в разных условиях работы, соответственно при составлении ЭСЗ реальный элемент может быть заменён различными моделями. Сложность модели каждого элемента зависит от режима работы цепи, формы и величины сигнала, требуемой точности расчёта, технологии, способа изготовления элемента, характеристик вычислительного устройства (на котором можно посчитать схему).

1.1. Модели 2-х полюсных элементов

2-х полюсный элемент — это простейший двухвыводной элемент электрической схемы (полюсами называют его выводы). С электрической точки зрения важны три его параметра: ток i , протекающий через элемент; напряжение u между выводами элемента; мощность p , потребляемая или генерируемая элементом. Напряжение и ток элемента связаны между собой определённой функцией $i = f(u)$; при исследовании переходных про-

цессов важны также зависимости тока и напряжения от времени: $i = f_1(t)$, $u = f_2(t)$. И ток, и напряжение в каждый момент времени имеют определённое направление (обозначаемое стрелкой); если оно неизвестно, то для целей расчёта можно произвольно выбрать какое-то «положительное» направление — если в результате расчёта получится отрицательная величина, это будет означать только то, что направление в действительности противоположное — ни на каких других параметрах и свойствах схемы это не скажется. При выборе положительных направлений тока и напряжения следует учитывать, что ток течёт от точки с бóльшим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

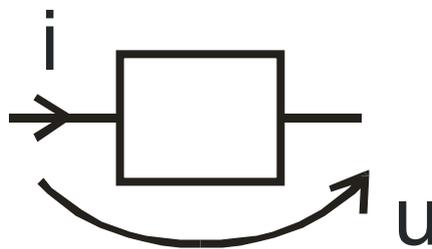


Рис. 1-1. Квадрат-двухполюсник, помечено напряжение и ток на выводах

Мгновенная активная мощность двухполюсника равна произведению его тока и напряжения, взятому со знаком «+», если ток и напряжение совпадают по направлению, и со знаком «-» в обратном случае: $p = \pm ui$.

По традиции, мгновенное значение переменного тока, напряжения, мощности и др. параметров обозначают строчной буквой (i , u , p , ...), а постоянное значение – прописной (I , U , P , ...).

Далее будут рассмотрены элементы электрической цепи: реальные элементы и их идеализированные модели.

Электрический проводник (провод). Реальный провод (ЭПС) обладает сопротивлением и ёмкостью, напряжение вдоль провода уменьшается с течением тока. В идеальном проводе (ЭСЗ) все точки провода эквипотенциальны.

Пассивные элементы (элементы, не создающие новой электромагнитной энергии).

[R] Резистор – элемент электрической цепи, превращающий электрическую энергию в другие виды (чаще всего в тепловую). Его основное свойство – *сопротивление*. Обозначение резистора на ЭСЗ:

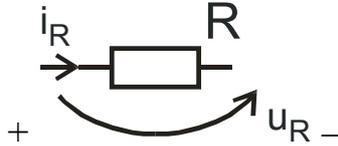


Рис. 1-2. Обозначение резистора на ЭСЗ

Основная характеристика резистора – зависимость протекающего тока от приложенного напряжения, в которой коэффициентом пропорциональности является величина, обратная сопротивлению резистора — *проводимость*:

$$i_R = \frac{1}{R} \cdot u_R. \quad (1.1)$$

Единица измерения сопротивления – ом (сокращённо Ом или Ω), проводимости – сименс (сокращённо См или S).

Мощность, потребляемая сопротивлением (единица измерения – ватт, сокращённо Вт или W):

$$p_R = u_R i_R = i_R^2 R = \frac{u_R^2}{R}, \quad (1.2)$$

[C] Конденсатор – элемент электрической цепи, накапливающий энергию электрического поля. Его основное свойство (обуславливающее возможность накопления электрической энергии) – *ёмкость*. Обозначение конденсатора на ЭСЗ:

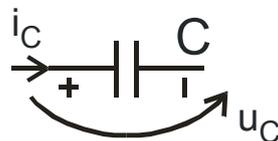


Рис. 1-3. Обозначение конденсатора на ЭСЗ

Основная характеристика конденсатора – зависимость накопленного заряда от приложенного напряжения, в которой коэффициентом пропорциональности является ёмкость:

$$q_C = \pm C \cdot u_C, \quad (1.3)$$

Знак «+» используется, если ток конденсатора и напряжение на конденсаторе совпадают по направлению. Также следует отметить зависимость тока конденсатора от его напряжения:

$$i_C = \frac{dq_C}{dt} = \pm C \cdot \frac{du_C}{dt}. \quad (1.4)$$

Мощность, потребляемая ёмкостью:

$$p_C = u_C i_C = \frac{Cu_C^2}{2}. \quad (1.5)$$

Единица измерения ёмкости – фарад (сокращённо Ф или F).

[L] Катушка индуктивности (дроссель) – элемент электрической цепи, накапливающий энергию магнитного поля. Её основное свойство (обуславливающее возможность накопления энергии магнитного поля) – *индуктивность*. Обозначение катушки индуктивности на ЭСЗ:

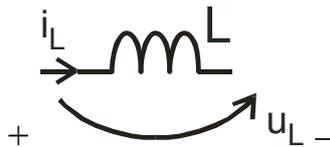


Рис. 1-4. Обозначение катушки индуктивности на ЭСЗ

Основная характеристика катушки индуктивности – зависимость потокосцепления от протекающего тока, в которой коэффициентом пропорциональности является индуктивность:

$$\psi_L = L \cdot i_L. \quad (1.6)$$

Знак «+» используется, если ток конденсатора и напряжение на конденсаторе совпадают по направлению. Также следует отметить зависимость напряжения на катушке индуктивности от протекающего тока:

$$u_L = \frac{d\psi_L}{dt} = \pm L \frac{di_L}{dt}, \quad (1.7)$$

Или, что то же самое,

$$i_L = \frac{\Psi_L}{L} = \frac{1}{L} \int u_L dt \quad (1.8)$$

Мощность, потребляемая индуктивностью:

$$p_L = u_L i_L = \frac{Li_L^2}{2}, \quad (1.9)$$

Единица измерения индуктивности – генри (сокращённо Гн или H).

Активные элементы (источники питания) — элементы электрической цепи, превращающие другие виды энергии в электрическую. Любой реальный источник электрической энергии можно представить любой из двух схем замещения: либо в виде источника напряжения, либо в виде источника тока.

[E] Источник напряжения (э. д. с.). Идеальный источник напряжения (или э. д. с. – электродвижущей силы) — элемент, напряжение U_E на зажимах которого не зависит от протекающего тока. Его ВАХ – это прямая линия, параллельная оси Y (см. рис. 1-5, а), а внутреннее сопротивление равно нулю: $R_{вн} = 0$.

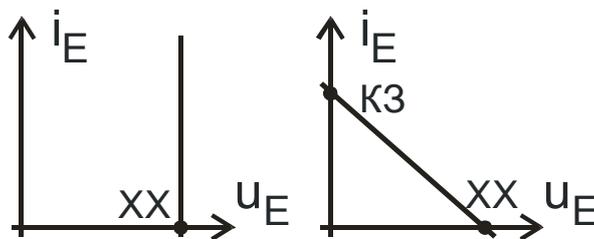


Рис. 1-5. ВАХ источника напряжения: идеального (а), реального (б)

Реальный источник напряжения всегда имеет ненулевое внутреннее сопротивление $R_g \neq 0$ (которое очень мало в хороших экземплярах). Эквивалентная схема реального источника напряжения состоит из последовательно включённых идеального источника э. д. с. E и сопротивления R_g (см. рис. 1-6).

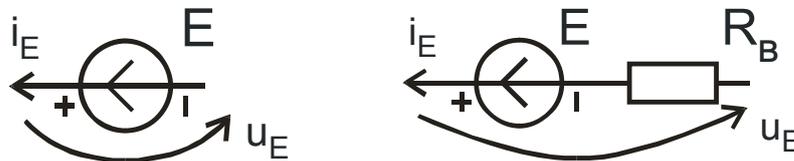


Рис. 1-6. Обозначение идеального (а) и реального (б) источника э. д. с.

Напряжение на зажимах источника U_E меньше вырабатываемой им э. д. с. E на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении: $U_E = E - IR_g$ (это уравнение прямой). Таким образом, ВАХ реального источника напряжения будет иметь вид наклонной прямой линии (см. рис. 1-5, б), пересекающей оси координат в двух характерных точках, соответ-

ствующих режиму холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). В режиме холостого хода контакты элемента разомкнуты (между ними бесконечно большое или громадное сопротивление); выходной ток в таком режиме равен нулю $I_{xx} = 0$, а выходное напряжение равно э. д. с. $U_{xx} = E$. В режиме короткого замыкания контакты элемента соединены друг с другом накоротко (между ними нулевое или мизерное сопротивление); выходное напряжение в таком режиме равно нулю $U_{кз} = 0$, а выходной ток определяется внутренним сопротивлением по закону Ома $I_{кз} = E/R_g$.

[J] Источник тока. Идеальный источник тока – элемент, ток которого J не зависит от приложенного напряжения. Его ВАХ – это прямая линия, параллельная оси X (см. рис. 1-7, а), а внутреннее сопротивление равно бесконечности $R_g = \infty$.

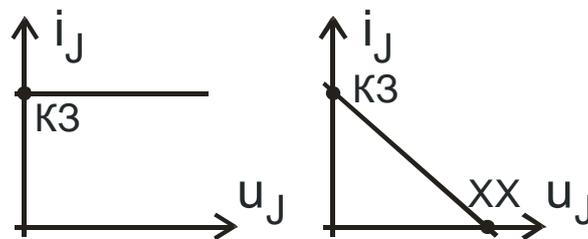


Рис. 1-7. ВАХ источника тока: идеального (а) и реального (б)

Реальный источник тока всегда имеет конечное внутреннее сопротивление (которое в хороших экземплярах очень велико). Эквивалентная схема реального источника тока состоит из параллельно включённых идеального источника тока J и внутреннего сопротивления R_g (см. рис. 1-8).

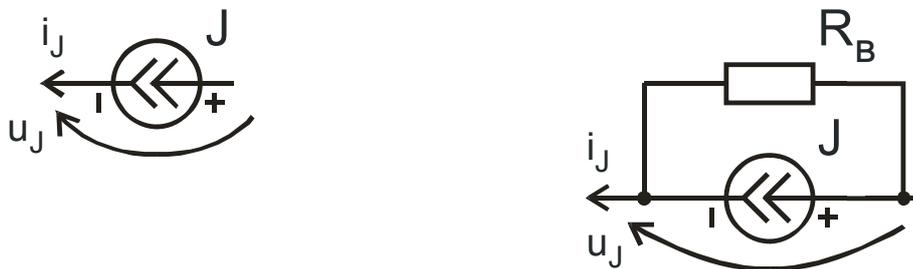


Рис. 1-8. Обозначение идеального (а) и реального (б) источника тока

Выходной ток источника I_J меньше тока идеального источника J на величину отвлечения во внутреннее сопротивление: $I_J = J - U_J/R_g$ (это тоже уравнение прямой). Таким образом, ВАХ реального источника

тока также будет иметь вид наклонной прямой линии (см. рис. 1-7, б), имеющей две характерные точки, соответствующие режимам ХХ и КЗ:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= 0, & U_{xx} &= JR_{\epsilon} \\ U_{кз} &= 0, & I_{кз} &= J \end{aligned}$$

Легко заметить, что ВАХ источников напряжения и тока совпадают по форме, что подтверждает предположение, сделанное в начале пункта, о взаимозаменяемости их моделей. Из сравнения токов и напряжений в крайних точках: ХХ и КЗ, можно вывести связь между параметрами источников тока и напряжения (по закону Ома):

$$R_{\epsilon,E} = R_{\epsilon,J}, \quad E = JR_{\epsilon,J}, \quad J = E/R_{\epsilon,E} \quad (1.10)$$

Измерительные приборы:

[V] Измеритель напряжения (вольтметр, осциллограф, фазометр). У хорошего измерителя напряжения его внутреннее сопротивление очень велико, а ток через него течь не будет, поэтому на ЭСЗ такой прибор будет представлен разрывом:

[A] Измеритель тока (амперметр, токовая обмотка, ваттметр). У хорошего измерителя тока его внутреннее сопротивление близко к нулю, он не должен препятствовать протеканию тока, поэтому на ЭСЗ такой прибор будет представлен соединением: