
ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие обобщает преподавательский опыт авторов за последнее десятилетие. Предложенный в нем курс содержит краткое и доступное изложение материала, выполненное со строгих математических позиций, но с обязательной физической трактовкой результатов. Учебное пособие ориентировано на активное овладение студентами второго и третьего курсов навыками самостоятельной работы, когда опыт рационального и эффективного изучения учебной литературы у них еще мал. Курс начинается с изучения функциональных свойств цепей как преобразователей сигналов, вначале в более физической и понятной временной, а затем в частотной области. После этого изложены классические и современные приложения теории цепей — дискретные цепи, теория фильтров, активные цепи, синтез двухполюсников, теория чувствительности, машинно-ориентированные методы расчета, релейные цепи, магнитные цепи, цепи высокой добротности, синтез четырехполюсников.

Учебное пособие в основном опирается на книгу авторов «Основы теории электрических цепей», дополненную базовыми разделами теории электромагнитного поля.

Авторы благодарят рецензентов, профессора А. А. Ланнэ и кафедру теории электрических цепей Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций (заведующий кафедрой — профессор В. Ф. Дмитриков), за их советы и замечания, которые способствовали методическому совершенствованию учебника.

Авторы признательны преподавателям кафедры ТОЭ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» А. Е. Завьялову и Д. А. Морозову, подготовившим рукописи глав 18 и 21 соответственно.

Замечания и предложения просим присылать в издательство.

Список использованных сокращений

АМ	— амплитудно-модулированный;	МУН	— метод узловых напряжений;
АК	— автоколебания;	МЦ	— магнитная цепь;
АФХ	— амплитудно-фазовая характеристика;	МЧХ	— мнимая частотная характеристика;
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика;	НФ	— нарастающая функция;
ВАХ	— вольтамперная характеристика;	НФУ	— нелинейное функциональное уравнение;
ВД	— векторная диаграмма;	НЧ	— низкие частоты;
ВЧ	— высокие частоты;	НЭ	— нелинейный элемент;
ВЧХ	— вещественная частотная характеристика;	ОКН	— основная кривая намагничивания;
ГС	— главное сечение;	ОМ	— операторный метод;
ГК	— главный контур;	ОУ	— операционный усилитель;
ДЛ	— длинная линия;	ПЗ	— полоса задерживания;
ДП	— двухполюсник;	ПЗФ	— полосовой заграждающий фильтр;
ДЦ	— дискретная цепь;	ПП	— полоса пропускания;
ЗИ	— зависимый источник;	ППФ	— полосовой пропускающий фильтр;
ЗН	— зона неискажения;	ПС	— переменные состояния;
ЗНК	— закон напряжений Кирхгофа;	ПФ	— передаточная функция;
ЗТК	— закон токов Кирхгофа;	ПХ	— переходная характеристика;
ИД	— идеальный диод;	ПЦ	— присоединенная цепь;
ИН	— источник напряжения;	РН	— резонанс напряжений;
ИНУН	— источник напряжения, управляемый напряжением;	РТ	— резонанс токов;
ИНУТ	— источник напряжения, управляемый током;	РФ	— ряд Фурье;
ИПН	— источник постоянного напряжения;	РЦ	— релейная цепь;
ИС	— индуктивно связанный;	РЭ	— релейный элемент;
ИТ	— источник тока;	СК	— связанные контуры;
ИТУТ	— источник тока, управляемый током;	СЧ	— средние частоты;
ИТУН	— источник тока, управляемый напряжением;	УПР	— установившийся периодический режим;
ИХ	— импульсная характеристика;	ФАЧ	— функция абсолютной чувствительности;
КЗ	— короткозамкнутый участок цепи;	ФВЧ	— фильтр верхних частот;
КЛ	— ключ;	ФК	— фильтр Котельникова;
КПД	— коэффициент полезного действия;	ФНЧ	— фильтр нижних частот;
ЛС	— линия связи;	ФЧХ	— фазочастотная характеристика;
ЛЧ	— линейная часть;	ХП	— характеристический полином;
МДС	— магнитодвижущая сила;	ХХ	— холостой ход;
МКА	— метод комплексных амплитуд;	Ц	— цепь;
МКТ	— метод контурных токов;	ЦВМ	— цифровая вычислительная машина;
МТДНХ	— метод токов дерева и напряжений хорд;	ЧП	— четырехполюсник;
		ЧХ	— частотная характеристика;
		ЭДС	— электродвижущая сила.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

§ 1.1. ТОК, НАПРЯЖЕНИЕ, ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ

1.1.1. Ток в электрической цепи

Током $i(t)$ называется направленное движение электрических зарядов, как положительных $q_+(t)$, так и отрицательных $q_-(t)$.

Символ i не только качественная, но и количественная характеристика: ток численно равен скорости изменения электрических зарядов в поперечном сечении проводника, так что

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}, \quad q(t) = q_+(t) + q_-(t), \quad (1.1)$$

причем ток i измеряется в амперах (А), заряд $q(t)$ в кулонах (Кл), время t — в секундах (с), и размерность $A = \text{Кл/с}$.

К моменту времени t заряд, прошедший через поперечное сечение проводника, таков:

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt = q(t_0) + \int_{t_0}^t i(t) dt, \quad (1.2)$$

то есть, предполагается, что при $t \rightarrow -\infty$ ток в цепи отсутствовал.

Условимся малыми (строчными) буквами обозначать значения переменных как функций времени, т. е. мгновенные значения переменных, $i(t) \equiv i$, $q(t) \equiv q$. Тогда формулы (1.1), (1.2) в сокращенной записи имеют следующий вид:

$$i = q', \quad q = \int_{-\infty}^t i dt.$$

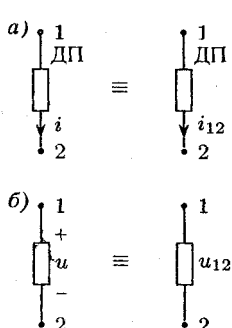


Рис. 1.1

О направлении (знаке) тока можно говорить только, когда указано его условно положительное направление. Два эквивалентных способа обозначения условно положительного направления тока между двумя узлами (полюсами) двухполюсника (ДП) изображены на рисунке 1.1а, причем $i \equiv i_{12}$. Таким образом, условно положительное направление тока можно указать либо «стрелкой», либо двумя индексами, соответствующими номерам узлов цепи.

Значение тока принято увязывать с направлением движения положительных зарядов q_+ , поэтому, если при решении задачи получено $i_{12}(t) = -2 \text{ А}$, то движение отрицательных зарядов q_- в этот момент времени t происходит от узла 1 к узлу 2, а положительных q_+ — от узла 2 к узлу 1.

Следствие: $i_{12}(t) = -i_{21}(t)$.

1.1.2. Напряжение

Движение зарядов связано с потреблением энергии. Для характеристики этого явления вводят понятие — напряжение $u(t)$. Однако $u(t)$ не только качественная, но и количественная характеристика: напряжение $u_{12}(t)$ между узлами 1 и 2 цепи численно равно энергии W_{12} (работе A_{12}), затраченной на перенос единичного положительного заряда $q = +1 \text{ Кл}$ от узла 1 к узлу 2 цепи:

$$\begin{aligned} u_{12}(t) &= u_1(t) - u_2(t) = W_{12}(t)|_{q=+1} = \\ &= A_{12}(t)|_{q=+1} = -u_{21}(t). \end{aligned}$$

Следствия:

1. Напряжение $u_1(t)$ узла 1 цепи численно равно работе по переносу заряда $q = +1 \text{ Кл}$ из узла 1 в тот узел цепи, напряжение которого условно принято нулевым; такой базисный узел с нулевым напряжением выбирается произвольно.

2. Если осуществляется перенос бесконечного малого заряда dq , то затраченная энергия

$$dW(t) = u(t) dq(t), \quad (1.3)$$

причем энергия измеряется в джоулях (Дж), а напряжение — в вольтах (В).

О знаке напряжения можно говорить, если указана (задана) его условно положительная полярность. Два эквивалентных способа обозначения условно положительной полярности приведены на рисунке 1.1б, причем $u \equiv u_{12}$. Таким образом можно условно положительную полярность указать либо разметкой «плюс-минус» узлов ДП, либо двумя индексами, соответствующими номерам этих узлов. Если при решении задачи получено $u_{12} = -10$ В, то энергетический уровень узла 2 выше, чем узла 1

1.1.3. Согласованная полярность

Условимся полярность напряжения R -, L -, C -элементов, т. е. так называемых пассивных элементов цепи, всегда согласовывать с выбранным направлением тока этих элементов, как показано на рисунке 1.2а. Полярность $u(t)$ элемента (или ДП) цепи называют согласованной с направлением тока $i(t)$ этого же элемента (или ДП), если ток на схеме направлен к элементу от узла, которому присвоена положительная полярность (см. рис. 1.2а). Очень часто разметку полярности напряжения ($\pm$) указывают непосредственно у выводов обозначения элемента на схеме (см. рис. 1.2б, в, г). В этом случае полярность элемента называют согласованной (строго — полярность напряжения элемента называют согласованной с направлением тока), если ток на схеме направлен к выводу элемента, помеченному знаком «плюс», от ближайшего узла, к которому элемент присоединен.

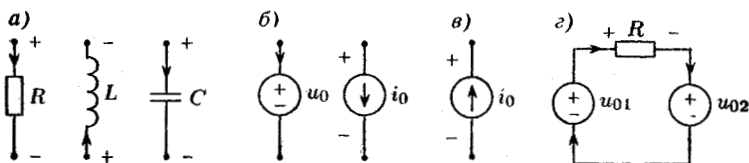


Рис. 1.2

У источников напряжения u_0 или тока i_0 полярность в общем случае можно выбирать как согласованной (рис. 1.2б), так несогласованной (рис. 1.2в). Несогласованная полярность характерна (следует из физических соображений) для цепей с единственным источником. В качестве примера на рисунке 1.2г изображена схема последовательной цепи с двумя источниками напряжения (соответствующая практической схеме зарядки аккумулятора); ток элементов цепи одинаков; при выбранном его направлении у источника u_{02} согласованная полярность, а у источника u_{01} — несогласованная.

Примечание. Двухполюсником (ДП) называют любую часть цепи, имеющую два внешних вывода (узла, зажима, полюса), относительно которых и рассматриваются ее характеристики; условное обозначение ДП приведено на рисунке 1.1.

1.1.4. Энергия и мощность

Пусть через ДП током $i(t)$ переносится заряд $dq(t)$, а полярность напряжения ДП $u(t)$ согласована с направлением тока. Тогда, согласно (1.3), затраченная при этом элементарная энергия будет

$$dW(t) = u(t) dq(t).$$

Мощностью ДП $p(t)$ называют скорость поступления энергии в ДП:

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t) \frac{dq(t)}{dt} = u(t)i(t). \quad (1.4)$$

Измеряется мощность в ваттах (Вт).

На основании (1.4) энергия, поступившая в ДП к моменту времени t , будет

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt. \quad (1.5)$$

Примечания:

1. ДП или элемент цепи называют пассивным, если в любой момент времени его энергия неотрицательна, т. е.

$$W_{\text{пас}}(t) \geq 0. \quad (1.6)$$

2. Если мощность элемента $p(t) > 0$, то элемент в этот момент потребляет или запасает энергию, если же $p(t) < 0$, то элемент генерирует энергию (или возвращает запасенную).

3. По закону сохранения энергии сумма мощностей всех элементов цепи равна нулю, т. е. в цепи имеет место баланс мощностей

$$\sum_{(k)} p_k(t) = 0, \quad (1.7)$$

где k — номер элемента.

4. Если полярность напряжения ДП несогласована с направлением тока (см. например, рисунок 1.2в,г), то в отличие от (1.4) формула мощности ДП имеет следующий вид:

$$p(t) = -u(t)i(t). \quad (1.8)$$

§ 1.2. РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.2.1. Определение резистивного элемента

В курсе теории электрических цепей единый электромагнитный процесс генерирования, передачи, преобразования и потребления электромагнитной энергии идеализируют и условно разбивают на отдельные составляющие, которые учитывают обычно в виде следующих элементов (см. рис. 1.2а,б): R -элемент учитывает необратимое потребление электромагнитной энергии; L -элемент учитывает запасание энергии магнитного поля; C -элемент учитывает запасание энергии электрического поля; для учета процесса генерирования электромагнитной энергии за счет других видов энергии вводят идеальные источники напряжения $u_0(t)$ и тока $i_0(t)$. Рассмотрим подробно характеристики каждого из указанных элементов.

Резистивным элементом, или R -элементом цепи называют идеализированный, пассивный, двухполюсный элемент, который отражает только одну сторону единого электромагнитного процесса — необратимое преобразование электромагнитной энергии в другие виды энергии (тепловую, световую, механическую, химическую и др.).

Условное обозначение R -элемента с указанием согласованной полярности приведено на рисунке 1.3а.

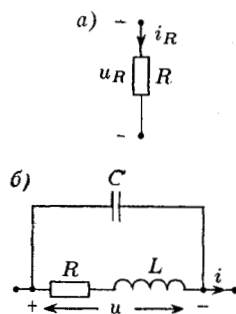


Рис. 1.3

По своим характеристикам к R -элементу приближаются реальные резисторы и нагревательные приборы на низких частотах (НЧ). Однако уже на средних частотах схема замещения реального резистора усложняется и обычно имеет вид, близкий к приведенному на рисунке 1.36, где R -элемент отражает необратимые потери электромагнитной энергии; L -элемент учитывает наличие магнитного поля, обусловленного протеканием тока i в реальном резисторе; C -элемент учитывает наличие электрического поля, обусловленного напряжением u на выводах реального резистора. Вопросы составления схем замещения реальных электротехнических устройств достаточно сложны и рассматриваются в спецдисциплинах.

1.2.2. Вольт-амперные характеристики резистивного элемента

Связь между током и напряжением линейного R -элемента определяется законом Ома

$$u_R(t) = Ri_R(t),$$

следовательно, символ R не только качественная, но и количественная характеристика: величина R называется сопротивлением резистивного элемента и является коэффициентом пропорциональности между его напряжением u_R и током i_R , т. е.

$$R = \frac{u_R(t)}{i_R(t)}; \quad (1.9)$$

обратная величина

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i_R}{u_R} \quad (1.10)$$

называется проводимостью резистивного элемента, причем в (1.9), (1.10) сопротивление измеряют в омах (Ом), а проводимость — в сименсах (См).

Показанный на рисунке 1.4а график вольт-амперной характеристики (ВАХ) линейного резистивного элемента — прямая линия, проходящая через начало координат, причем тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс пропорционален сопротивлению элемента: $R \sim \operatorname{tg} \gamma$ (в формуле поставлен символ пропорциональности, так как необходимо учитывать масштабы

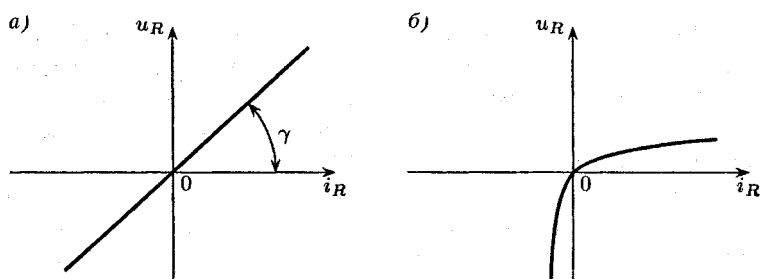


Рис. 1.4

для i_R , u_R на графике). Следует отметить, что характеристики большинства реальных резистивных элементов нелинейны: линейность — это обычно идеализация реальных ВАХ в ограниченном диапазоне токов-напряжений элемента. Так, на рисунке 1.4б качественно показана ВАХ диода, являющаяся существенно нелинейной.

ВЫВОД: ВАХ линейного R -элемента описываются линейными алгебраическими уравнениями (1.9), (1.10).

1.2.3. Энергетические характеристики R -элемента

Согласно (1.4) мгновенная мощность, т. е. скорость поступления энергии в R -элемент, будет следующей:

$$p_R(t) = u_R(t)i_R(t) = Ri_R^2(t) = Gu_R^2(t) \geq 0. \quad (1.11)$$

ВЫВОД: согласно формуле (1.11) R -элемент, действительно, необратимо потребляет энергию в любой момент времени.

Энергия, поступившая в R -элемент к моменту времени t будет

$$W_R(t) = \int_{-\infty}^t p_R(t) dt \geq 0. \quad (1.12)$$

как интеграл от положительной функции.

ВЫВОД: из сравнения формул (1.6) и (1.12), следует, что R -элемент, действительно является пассивным элементом.

§ 1.3. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

1.3.1. Источник напряжения

Источником напряжения (ИН) называют идеализированный двухполюсный элемент, напряжение которого $u_0(t)$ является заданной функцией времени и не зависит от протекающего через ИН тока.

Условное обозначение ИН приведено на рисунке 1.5а. Направление тока ИН может быть произвольным, как согласованным, так и несогласованным с полярностью напряжения.

Примечание. Для цепей с единственным ИН характерна (логична) несогласованная полярность, как показано на рисунке 1.5б, где ДП — пассивный двухполюсник: действительно, при резистивном ДП его мощность согласно формуле (1.11) $p_{\text{ДП}} > 0$, а мощность ИН при несогласованной полярности будет на основании формулы (1.8) $p_{\text{ИН}} = -u_0 i < 0$, что соответствует физическим процессам генерирования энергии в цепи. При этом в соответствии с формулой (1.7) имеет место баланс мощностей, т. е. $p_{\text{ИН}} + p_{\text{ДП}} = 0$.

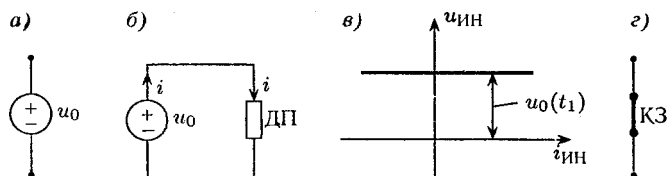


Рис. 1.5

Независимость напряжения ИН от тока отражается на ВАХ источника, как показано на рисунке 1.5в для некоторого момента времени $t = t_1$; следовательно, дифференциальное сопротивление ИН

$$R_{\text{диф}} = \frac{du}{di} = 0.$$

Частный случай источника напряжения с нулевым напряжением $u_0 = 0$ эквивалентен короткозамкнутому участку цепи (КЗ), который определяется как идеализированный двухполюсный элемент, условно изображенный на рисунке 1.5г, причем

сопротивление и напряжение идеального КЗ-элемента являются нулевыми, т. е.

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{КЗ}} &= 0, \\ u_{\text{КЗ}} &= 0, \\ G_{\text{КЗ}} &= 1/R_{\text{КЗ}} \rightarrow \infty \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

(ток КЗ-элемента зависит от вида остальной цепи).

Идеальный ИН является источником бесконечной мощности. Действительно, при коротком замыкании ИН, как показано на рисунке 1.6а, ток ИН $i_{\text{ИН}} = u_0/R_{\text{КЗ}} \rightarrow \infty$, а мощность с учетом (1.8) из-за несогласованной полярности ИН $p_{\text{ИН}} = -u_0 i_{\text{ИН}} \rightarrow -\infty$. Однако этот предельный случай в теории цепей не рассматривается (действительно, относительно узлов 1, 2 имеем параллельное соединение ИН и КЗ, т. е. $u_0 = u_{\text{КЗ}}$), поскольку в схеме рисунка 1.6а:

1. Нарушаются согласно формуле (1.13) определения ИН и КЗ ($u_0 \neq 0$, $u_{\text{КЗ}} = 0$).

2. Нарушается закон напряжений Кирхгофа, так как сумма напряжений в контуре не равна нулю.

Нормальными режимами работы идеального ИН являются:

1. Нагрузка его, например, пассивным ДП, как было показано на рисунке 1.5б.

2. Холостой ход (ХХ), т. е. обрыв нагрузки, как изображено на рисунке 1.6б.

По своим характеристикам к ИН приближаются, например, мощные аккумуляторные батареи в режиме малых отдаваемых токов. Обычно схема замещения реального ИН на НЧ имеет вид, изображенный на рисунке 1.6в; ВАХ реального ИН представлена схематично на рисунке 1.6г (в предположении $u_0 > 0$, $i > 0$ для некоторого момента времени $t = t_1$); сопротивление R_0 в этом случае часто называют внутренним или выходным сопротивлением реального источника.

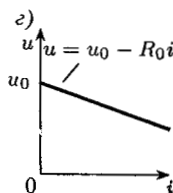
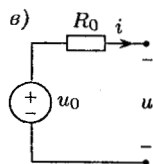
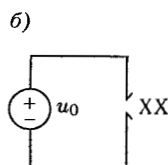
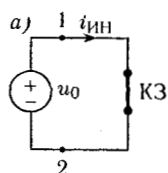


Рис. 1.6

1.3.2. Источник тока

Источником тока (ИТ) называют идеализированный двухполюсный элемент, ток которого $i_0(t)$ описывается заданной функцией времени и не зависит от напряжения ИТ.

Условное обозначение ИТ приведено на рисунке 1.7а.

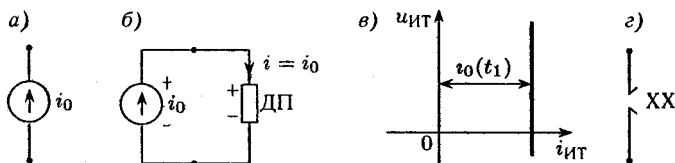


Рис. 1.7

Полярность напряжения ИТ может быть выбрана произвольно, как согласованной, так и несогласованной с направлением тока ИТ.

Примечание. Для цепей с единственным ИТ характерна (логична) несогласованная полярность, как показано на рисунке 1.7б, где ДП — пассивный двухполюсник; действительно, при резистивном ДП его мощность, согласно формуле (1.11) $p_{\text{ДП}} > 0$, а мощность источника с учетом $u_{\text{ИТ}} = -u_{\text{ДП}}$ и несогласованной полярности ИТ $p_{\text{ИТ}} = -u_{\text{ИТ}}i_0 < 0$, причем $p_{\text{ДП}} + p_{\text{ИТ}} = 0$.

Независимость тока ИТ от напряжения отражается на ВАХ источника, как показано на рисунке 1.7в для некоторого момента времени $t = t_1$, следовательно, дифференциальное сопротивление ИТ $R_{\text{диф}} = du/di \rightarrow \infty$.

Частный случай источника тока с нулевым током $i_0 = 0$ эквивалентен разомкнутому (разорванному) участку цепи, который иначе называют холостым ходом (ХХ), т. е. обрывом в цепи.

Холостой ход — это идеализированный двухполюсный элемент цепи, условное изображение которого приведено на рисунке 1.7г, причем у такого идеального элемента ток и проводимость являются нулевыми:

$$i_{\text{ХХ}} = 0, \quad G_{\text{ХХ}} = 0, \quad R_{\text{ХХ}} = \frac{1}{G_{\text{ХХ}}} \rightarrow \infty, \quad (1.14)$$

а напряжение зависит от вида остальной цепи.

Примечание. Формулы (1.13), (1.14) намеренно имеют одинаковую форму, чтобы подчеркнуть фундаментальное в теории цепей свойство аналогии (двойственности) характеристик элементов, называемое дуальностью элементов.

Идеальный ИТ является источником бесконечной мощности. Действительно, при обрыве его выводов, как показано на рисунке 1.8а, напряжение ИТ $u_{\text{ИТ}} = i_0 R_{\text{ХХ}} \rightarrow \infty$, мощность с учетом несогласованной полярности $p_{\text{ИТ}} = -u_{\text{ИТ}} i_0 \rightarrow -\infty$. Однако этот предельный случай в теории цепей не рассматривается (действительно, схему на рисунке 1.8а можно трактовать как последовательное соединение ИТ и ХХ, т. е. $i_0 = i_{\text{ХХ}}$), поскольку здесь:

1. Нарушаются согласно формуле (1.14) определения ИТ и ХХ ($i_0 \neq 0, i_{\text{ХХ}} = 0$).

2. Нарушается закон токов Кирхгофа (ток, вытекающий, например, в узел 1, не равен вытекающему).

Нормальными режимами работы идеального ИТ являются:

1. Нагрузка его, например, пассивными ДП (см. рис. 1.7б).
2. Короткое замыкание его выводов (см. рис. 1.8б).

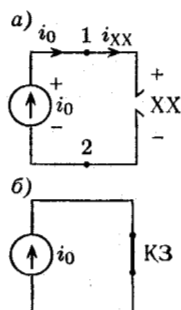


Рис. 1.8

§ 1.4. ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ЦЕПИ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.4.1. Определение индуктивного элемента цепи

Индуктивным элементом, или L -элементом называют идеализированный двухполюсный пассивный элемент цепи, единственным электромагнитным процессом в котором является запасание энергии магнитного поля.

Условное обозначение L -элемента приведено на рисунке 1.9а, причем полярность напряжения принято согласовывать с направлением тока элемента. Символ L не только качественная, но и количественная характеристика: величина L , называемая

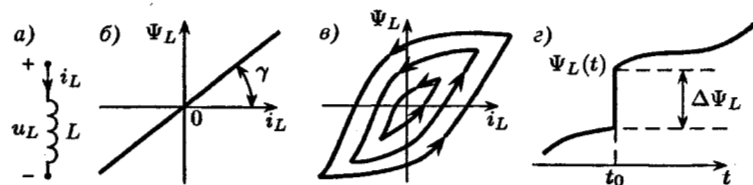


Рис. 1.9

индуктивностью, является коэффициентом пропорциональности между потокоцеплением самоиндукции Ψ и током i_L , обусловившим это потокоцепление:

$$L = \frac{\Psi(t)}{i_L(t)}, \quad (1.15)$$

где потокоцепление $\Psi = \sum_{(N)} \Phi_k = N\Phi_{\text{ср}}$, т. е. в катушке индуктивности, являющейся на НЧ близким реальным прототипом L -элемента, потокоцепление равно сумме элементарных потоков Φ_k , пронизывающих все N витков катушки (здесь $\Phi_{\text{ср}}$ — средний поток, сцепленный с каждым из витков катушки). В формуле (1.15) потокоцепление Ψ измеряют в веберах (Вб), L — в генри (Гн).

Вебер-амперная характеристика линейного L -элемента — это прямая линия (см. рис. 1.9б), причем $\text{tg } \gamma \sim L$. Однако у реальных катушек индуктивности с магнитным сердечником вебер-амперная характеристика нелинейна, неоднозначна и обладает гистерезисом (см. рис. 1.9в). В случае отсутствия магнитного сердечника зависимость $\Psi(i_L)$ близка к линейной.

1.4.2. Вольт-амперная характеристика L -элемента

Изменение тока i_L приводит согласно формуле (1.15) к изменению потокоцепления, пронизывающего витки катушки индуктивности. А изменение Ψ_L приводит по закону электромагнитной индукции к появлению напряжения самоиндукции u_L на выводах катушки, которое равно скорости изменения потокоцепления, что применительно к идеализированному линейному L -элементу записывается следующим образом:

$$u_L(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = L \frac{di_L(t)}{dt} = Li'_L(t). \quad (1.16)$$

Формула (1.16) записана для случая согласованной полярности (см. рис. 1.9а).

Примечания:

1. Согласно формуле (1.16) в цепях постоянного тока при $i_L = \text{const}$ напряжение $u_L = 0$, т. е. в соответствии с формулой (1.13) L -элемент эквивалентен КЗ; действительно, при $i_L = \text{const}$ магнитный поток, пронизывающий катушку индуктивности, неизменен, поэтому напряжение индукции равно нулю.
2. По закону электромагнитной индукции напряжение (ЭДС) индукции u_L , создаваемое током i_L , наводится такой полярности (такого

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru