

**А. В. СИТНИКОВ**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

**Учебник**

**Под редакцией В. Н. Енина**

*Рекомендовано  
Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебника для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих программы среднего  
профессионального образования по специальности 230111 «Компьютерные сети»,  
учебная дисциплина «Электротехнические основы источников питания»*

*Регистрационный номер рецензии 657  
от 18 декабря 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2014

УДК 621.311.6(075.32)  
ББК 31.2я723  
С412

Рецензент —

зав. кафедрой «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, д-р техн. наук, проф. А. Б. Красовский

**Ситников А. В.**

С412 Электротехнические основы источников питания : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / А. В. Ситников; под ред. В. Н. Енина. — М. : Издательский центр «Академия», 2014. — 240 с.

ISBN 978-5-7695-4610-5

Изложены основные положения теории электротехники и электроники, на базе которых рассмотрены принципы действия, схемотехнические и конструктивные особенности различных источников электропитания компьютеров. Описаны способы преобразования, фильтрации и стабилизации напряжений (токов). В качестве примеров рассмотрены источники электропитания современных компьютеров.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины ОП.06 «Электротехнические основы источников питания» по специальности 230111 «Компьютерные сети».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.311.6(075.32)

ББК 31.2я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Ситников А. В., 2014

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2014

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2014

ISBN 978-5-7695-4610-5

## Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по специальности «Компьютерные сети».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электротехнические основы источников питания».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит в себе учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

## Предисловие

Радиоэлектроника является одной из наиболее быстро развивающихся областей науки и техники. Цифровые электронно-вычислительные системы стали неотъемлемой частью жизни нашего общества. Это влечет за собой повышение требований к качеству подготовки специалистов по разработке, обслуживанию и эксплуатации различных радиоэлектронных (компьютерных) систем.

Развитие вычислительной техники дает в руки специалиста новых инструментарий в виде серии прикладных программ по расчету и моделированию электронных схем, однако это приводит к появлению пренебрежительного отношения к изучению физических основ процессов, происходящих в электрических цепях. Бездумная эксплуатация предложенного инструментария приводит к неспособности будущего специалиста ориентироваться в сложных, нестандартных ситуациях, которые могут возникнуть в процессе обслуживания и создания компьютерной техники.

В данной книге описаны сложные многофункциональные схемы блоков питания компьютеров идет на основе фундаментальных законов электротехники. При этом упор делается на понимание физических процессов, происходящих в электрических цепях.

Первая глава книги посвящена базовым элементам и методам расчета электрических цепей при различных входных воздействиях. Во второй главе приведено описание электронных компонентов, на основе которых строятся схемы источников питания. В третьей главе рассмотрены принципы действия блоков питания электронно-вычислительной аппаратуры.

Основой книги являются материалы лекций, читаемых автором студентам МГТУ им. Н. Э. Баумана.

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Теория электрических цепей базируется на понятии моделирования. *Модель* — это упрощенное представление реальной системы, для которой можно достаточно точно описать законы ее поведения и свойства. На основе идеальных моделей строятся системы, свойства которых максимально приближаются к свойствам реальной системы. Например, реальный резистор, обладая свойствами идеального резистивного элемента, может проявлять свойства идеализированных индуктивного и емкостного элементов.

Рассматриваемые далее электрические цепи состоят из совокупности идеализированных моделей. Итак, дадим определения, которые используются в теории электрических цепей.

*Электрический ток* — это изменение электрического заряда во времени. Хотя основным носителем заряда является электрон, т. е. отрицательный заряд, за направление тока принимают направление, в котором перемещаются положительные заряды.

Значение тока определяется количеством электрического заряда  $q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника в единицу времени:

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

Ток измеряется в амперах [А]. Для однозначного определения знака тока необходимо до начала анализа цепи произвольно выбрать условное (положительное) направление тока и указать его на схеме стрелкой (рис. 1.1).

Если в схеме есть источники тока или ЭДС, то предпочтительно выбирать направление тока в ветви по направлению источников.

Перемещение зарядов в цепи осуществляется за счет энергии электрического поля. *Напряжение*, или разность потенциалов, на участке цепи — это энергия  $w$  (или работа), затрачиваемая на пе-

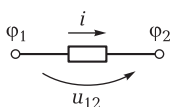


Рис. 1.1. Обозначение тока и напряжения на схеме

ремещение единицы заряда  $q$  из одной точки электрической цепи в другую:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}.$$

Напряжение измеряется в вольтах [В]. Для однозначного определения знака напряжения необходимо до начала анализа цепи выбрать, в общем случае произвольно, условное (положительное) направление напряжения и указать его на схеме стрелкой (см. рис. 1.1).

Любые соотношения, связывающие токи и напряжения в цепи, имеют смысл лишь для выбранных условных направлений.

Энергия измеряется в джоулях [Дж]. Энергия, затраченная на перемещение заряда  $q$  на участке цепи с напряжением  $u$ , определяется по формуле

$$w = \int udq = \int uidt.$$

Мощность определяется как скорость изменения энергии во времени:

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

Мощность измеряется в ваттах [Вт].

Мощность положительна при совпадении знаков напряжения и тока и отрицательна при их несовпадении.

*Электрическая цепь* — это совокупность устройств и соединяющих их проводников, по которым может протекать электрический ток. Электрическая цепь состоит из источников и приемников электромагнитной энергии.

*Источники электромагнитной энергии* — это устройства, в которых энергия тепловая, химическая, механического движения и другие превращается в электромагнитную энергию. Источниками энергии являются электрические генераторы, аккумуляторы, термоэлементы, гальванические элементы и т. д.

Источники подразделяются на источники напряжения и тока. Обозначение источников напряжения и тока на схеме представлено на рис. 1.2.

В приемниках электромагнитная энергия преобразуется в энергию другого вида (механическую, тепловую, химическую и т.д.). Источники энергии называют активными элементами, а приемники — пассивными элементами. Очевидно, что на пассивных элементах, в которых перемещение заряда осуществляется за счет энергии электрического поля, направления напряжения и тока совпадают.

Основными фундаментальными законами электрических цепей являются законы Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа гласит, что алгебраическая сумма мгновенных значений токов в узле равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0,$$

где  $n$  — число ветвей, входящих в узел (т.е. заряд не может в узле ни накапливаться, ни расходоваться).

Узел — место соединения не менее трех ветвей, а *ветвь* — участок цепи, по которому протекает один и тот же ток. Перед составлением уравнений по первому закону Кирхгофа необходимо выбрать положительные направления токов в ветвях.

Второй закон Кирхгофа, который следует из закона сохранения энергии, гласит, что алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС в контуре равна алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на элементах контура:

$$\sum_{k=1}^n e_k = \sum_{k=1}^n u_k.$$

Контур — это любой замкнутый путь на схеме. Контур может замыкаться как через пассивные элементы, так и через условный резистор, сопротивление которого равно бесконечности (разрыв

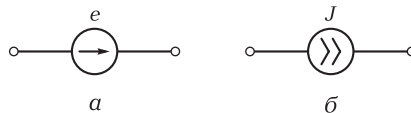


Рис. 1.2. Активные элементы:  
а — источник напряжения; б — источник тока

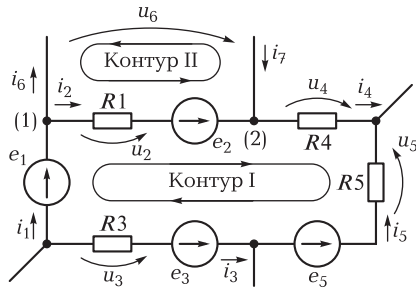


Рис. 1.3. Обозначение контуров на схеме

цепи). Перед составлением уравнения по второму закону Кирхгофа необходимо произвольно выбрать положительные направления токов в ветвях (следовательно, напряжений на пассивных участках цепи) и направление обхода контура.

Если направление ЭДС или напряжения совпадает с направлением обхода контура, то их в соответствующие части равенства записывают со знаком «+», если не совпадает — со знаком «-». Составим уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов (1), (2) и по второму закону Кирхгофа для контуров I, II схемы, изображенной на рис. 1.3:

$$\text{узел (1): } i_1 - i_2 - i_6 = 0;$$

$$\text{узел (2): } i_2 + i_7 - i_4 = 0;$$

$$\text{контур I: } u_2 + u_4 - u_5 - u_3 = e_1 + e_2 - e_5 - e_3;$$

$$\text{контур II: } u_2 - u_6 = e_2.$$

## 1.2. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электрическая цепь состоит из отдельных элементов. Под *элементами* в теории цепей понимают идеализированные модели реальных физических элементов, которым приписывают определенные свойства так, чтобы в совокупности они отражали действительные явления в этих реальных элементах. Соответственно и цепи, изучаемые в электротехнике, являются идеализированными моделями реальных электротехнических устройств.

### Классификация и характеристики электрических элементов.

Электрические элементы классифицируются следующим образом.



1. Активные и пассивные элементы цепи. К *активным элементам* в электротехнике относят источники электрической энергии. Источники бывают независимыми и зависимыми. У зависимых источников ЭДС или ток является функцией напряжений и токов на других участках цепи. Варианты зависимых источников:

- источник ЭДС (напряжения), управляемый током (ИНУТ);
- источник ЭДС (напряжения), управляемый напряжением (ИНУН);
- источник тока, управляемый током (ИТУТ);
- источник тока, управляемый напряжением (ИТУН).

К *пассивным элементам* относят элементы, в которых электромагнитная энергия преобразуется в другие виды энергии. Основными пассивными элементами являются резистивный, емкостный и индуктивный элементы.

2. Линейные и нелинейные. Коэффициенты, связывающие в элементе напряжение, ток и их производные, называются *параметрами элемента*. Если параметр не зависит от значений и направлений токов и напряжений в цепи, то такой элемент называют линейным. Параметры элементов почти всегда в какой-то мере зависят от тока и от напряжения, однако во многих случаях этой зависимостью можно пренебречь.

3. Взаимные и невзаимные (обратимые и необратимые). Элемент называется *обратимым*, если при изменении направления передачи энергии параметр элемента не меняется. К взаимным элементам относятся, например, резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы; к невзаимным — транзисторы, диоды и т. д.

4. Инвариантные и переменные во времени. Элемент называется *инвариантным*, если его параметр не изменяется во времени. Если параметр элемента независимо от тока и напряжения на нем изменяется во времени, то элемент называется *переменным во времени* (инерционным).

5. Сосредоточенные (независящие от пространственной координаты) и распределенные (зависящие от пространственной координаты).

**Резистивный элемент.** *Резистивный элемент* — это идеализированный элемент цепи, в котором напряжение и ток пропорциональны (закон Ома):

$$u = iR, \text{ или } i = \frac{u}{R},$$

где  $R$  — коэффициент пропорциональности, называемый сопротивлением.

Сопротивление измеряют в омах [Ом].

В резисторе (обладающем сопротивлением) происходит необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии в теплоту. Резистор устанавливается в цепь для управления током или напряжением, а выделение теплоты является побочным явлением, для борьбы с которым часто приходится применять особые средства, вплоть до установки в систему охлаждающих устройств (пассивных — радиаторов; активных — вентиляторов). Выделение теплоты на резисторе можно использовать и во благо, например в калориферах, термостатах, электрочайниках и т. д.

Условное изображение резистивного элемента представлено на рис. 1.4.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) резистора могут быть линейными (рис. 1.5, прямая 1) или нелинейными (рис. 1.5, кривая 2).

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u}.$$

Единица измерения проводимости — сименс [См].

Электромагнитная энергия, поступившая в сопротивление за некоторый промежуток времени и превращенная в теплоту, определяется по формуле

$$w_R = \int_0^t u_R i_R dt = \int_0^t R i_R^2 dt = \int_0^t G u_R^2 dt,$$

а мгновенная мощность — по формуле

$$p_R = u_R i_R = R i_R^2 = G u_R^2.$$

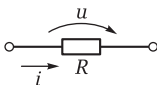


Рис. 1.4. Резистивный элемент

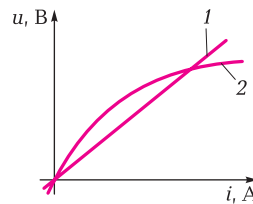


Рис. 1.5. ВАХ резистора:  
1 — линейного; 2 — нелинейного

**Емкостной элемент.** *Емкостной элемент* (конденсатор) — это идеализированный элемент цепи, в котором напряжение и ток связаны по интегральному закону для напряжения и по дифференциальному закону для тока:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt; i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}.$$

Величина тока в конденсаторе определяется скоростью изменения напряжения на конденсаторе. Так как напряжение на конденсаторе имеет вид интегральный (т. е. суммирующий), то емкостной элемент можно отнести к разряду накопителей, что часто используется в различных устройствах, например для подпитки оперативной памяти при выключении питания микроЭВМ.

Параметром конденсатора является емкость. Условное изображение емкостного элемента представлено на рис. 1.6.

Заряд конденсатора  $q$  пропорционален напряжению:  $q = Cu_C$ . Следовательно, параметр емкостного элемента — емкость  $C = \frac{q}{u_C}$ . Емкость измеряют в фарадах [Ф].

Кулон-вольтная характеристика емкостного элемента, т. е. зависимость заряда на обкладках конденсатора от напряжения, может быть линейной (рис. 1.7, прямая 1) или нелинейной (рис 1.7, кривая 2).

Мгновенная мощность на конденсаторе определяется по формуле

$$p_C = u_C i_C = Cu_C \frac{du_C}{dt}.$$

Мощность  $p_C$  положительна при совпадении знаков напряжения  $u_C$  и тока  $i_C$ , при этом происходит запасание энергии в элек-

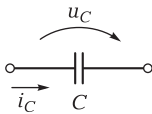


Рис. 1.6. Емкостной элемент

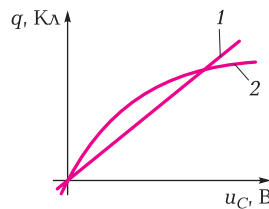


Рис. 1.7. Характеристика емкостного элемента:

1 — линейного; 2 — нелинейного

трическом поле конденсатора. Мощность  $p_C$  отрицательна при несовпадении знаков  $u_C$  и  $i_C$ , при этом запасенная в конденсаторе энергия возвращается во внешнюю по отношению к нему цепь.

Энергия электрического поля емкостного элемента определяется по формуле

$$w_C = \int u_C i_C dt = \int C u_C dC u_C = \frac{C u_C^2}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

**Индуктивный элемент.** *Индуктивный элемент* (катушка индуктивности) — это идеализированный элемент цепи, в котором напряжение и ток связаны по дифференциальному закону для напряжения и по интегральному — для тока:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}; \quad i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt.$$

Величина напряжения на катушке определяется скоростью изменения тока. В индуктивном элементе происходит преобразование электрической энергии в энергию магнитного поля и обратно, потери на теплоту отсутствуют.

Свойства индуктивного элемента определяются возможностью образования в нем магнитного потока при прохождении через него тока. Если индуктивный элемент состоит из нескольких витков, то его потокосцепление (полный магнитный поток) равно алгебраической сумме потоков, пронизывающих отдельные витки индуктивности:

$$\Psi = \sum_{k=1}^n \Phi_k,$$

где  $\Psi$  — потокосцепление;  $\Phi$  — магнитный поток.

Если все витки индуктивности пронизываются одним и тем же потоком, то потокосцепление  $\Psi = W\Phi$ , где  $W$  — число витков катушки.

Количественно свойства индуктивного элемента характеризуются индуктивностью  $L = \frac{\Psi}{i_L}$ , где  $L$  — параметр катушки индуктивности (измеряется в генри [Гн]). Магнитный поток и потокосцепление измеряются в веберах [Вб]. Потокосцепление и ток всегда имеют одинаковый знак (их направления связаны между собой правилом правоходового винта), поэтому  $L > 0$ .

Условное изображение индуктивного элемента представлено на рис. 1.8.

Вебер-амперная характеристика индуктивности, т.е. зависимость потокосцепления от тока, может быть линейной (рис. 1.9, прямая 1) или нелинейной (рис. 1.9, кривая 2).

Изменение во времени тока в катушке индуктивности приводит к изменению во времени магнитного потока (потокосцепления) в ней, что, в свою очередь, приводит к наведению в катушке ЭДС самоиндукции в соответствии с законом Фарадея —

Максвелла:  $e_L = -\frac{d\psi}{dt}$ .

Для линейной индуктивности ( $L = \text{const}$ ) выражение для ЭДС принимает вид

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di_L}{dt}.$$

Направления ЭДС и тока выбирают одинаковыми, знак «-» учитывает, что ЭДС в соответствии с законом Ленца препятствует изменению потокосцепления. При анализе цепей обычно рассматривают не ЭДС, а напряжение на элементе, положительное направление которого выбирают совпадающим с положительным направлением тока:

$$u_L = -e_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di_L}{dt}.$$

Мгновенная мощность индуктивности определяется по формуле

$$p_L = u_L i_L = L i_L \frac{di_L}{dt}.$$

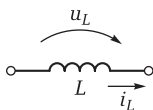


Рис. 1.8. Индуктивный элемент

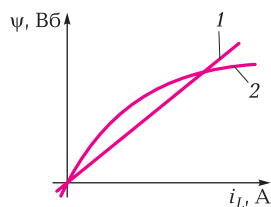


Рис. 1.9. Характеристика индуктивного элемента:

1 — линейного; 2 — нелинейного

Мощность положительна при совпадении знаков напряжения  $u_L$  и тока  $i_L$ , при этом происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности. Мощность  $p_L$  отрицательна при несовпадении знаков  $u_L$  и  $i_L$ , при этом накопленная в индуктивности энергия возвращается во внешнюю по отношению к индуктивности цепь.

Энергия магнитного поля индуктивности в произвольный момент времени определяется по формуле

$$w_L = \int u_L i_L dt = \int L i_L di_L = \frac{L i_L^2}{2} = \frac{\Psi^2}{2L}.$$

**Взаимоиндуктивный элемент.** Если изменение тока, протекающего через катушку, создает магнитный поток, пронизывающий витки другой катушки, в результате чего во второй катушке наводится ЭДС (изменяется ток), то эти две катушки называются магнитосвязанными (индуктивно связанными) — это и есть взаимноиндуктивный элемент.

Рассмотрим две магнитосвязанные катушки  $L1$  и  $L2$  (рис. 1.10). По первой из них протекает переменный ток  $i_1$ , по второй — ток  $i_2 = 0$  (режим холостого хода).

Ток  $i_1$  создает магнитный поток  $\Phi_{11} = \Phi_{21} + \Phi_{S1}$ , где  $\Phi_{21}$  — поток взаимоиндукции, пересекающий витки обеих катушек;  $\Phi_{S1}$  — поток рассеяния, пересекающий витки только первой катушки. Соответственно потокосцепление первой катушки  $\Psi_{11} = \Psi_{21} + \Psi_{S1}$ . Для линейных цепей потокосцепление пропорционально току, т.е.  $\Psi_{11} = L_1 i_1$  и  $\Psi_{21} = M_{21} i_1$ .

Коэффициент пропорциональности  $M_{21}$  называется взаимоиндуктивностью (измеряется в генри [Гн]). Переменный магнитный поток  $\Phi_{21}$  (и соответственно потокосцепление  $\Psi_{21}$ ), пронизывающий витки катушки индуктивности  $L2$ , вызывает в ней ЭДС (ЭДС взаимоиндукции):

$$e_{21} = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

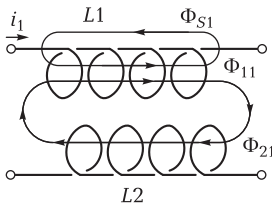


Рис. 1.10. Индуктивно связанные катушки

При протекании тока только по второй катушке ( $i_1 = 0$ ) получим аналогично:

$$\Phi_{22} = \Phi_{12} + \Phi_{S2}; \quad \Psi_{22} = \Psi_{12} + \Psi_{S2};$$

$$\Psi_{12} = M_{12}i_2; \quad e_{12} = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}.$$

В линейных цепях коэффициенты пропорциональности  $M_{21}$  и  $M_{12}$  равны:  $M_{21} = M_{12} = M$ .

Глубину магнитной связи между индуктивностями принято оценивать коэффициентом связи  $k$ , который определяется как среднее геометрическое из отношений потока взаимной индукции ко всему потоку индуктивности, созданного своим током:

$$k = \sqrt{\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}}} = \sqrt{\frac{\Psi_{21}}{\Psi_{11}} \frac{\Psi_{12}}{\Psi_{22}}} = \sqrt{\frac{M_{21}i_1}{i_1 L_1} \frac{M_{12}i_2}{i_2 L_2}} = \sqrt{\frac{M_{21}M_{12}}{L_1 L_2}}.$$

Учитывая, что  $M_{12} = M_{21} = M$ , получим

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы, так как  $\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{21} + \Phi_{S1}} < 1$  и  $\frac{\Phi_{12}}{\Phi_{22}} = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_{12} + \Phi_{S2}} < 1$ . Коэффициент связи уменьшается с увеличением потоков рассеяния.

Иногда глубину связи характеризуют коэффициентом рассеяния

$$k = \sqrt{\frac{\Phi_{S1}}{\Phi_{11}} \frac{\Phi_{S2}}{\Phi_{22}}}.$$

Рассмотрим случай, когда оба тока  $i_1$  и  $i_2$  не равны нулю (рис. 1.11).

Полные потокосцепления первого и второго контуров, обусловленные токами  $i_1$  и  $i_2$ , равны соответственно:

$$\Psi_{\text{полн}} = \Psi_{11} \pm \Psi_{12} = L_1 i_1 \pm M_{12} i_2;$$

$$\Psi_{2\text{полн}} = \Psi_{22} \pm \Psi_{21} = L_2 i_2 \pm M_{21} i_1.$$

Сложение или вычитание потоков зависит как от направления катушки индуктивных катушек (обмоток), так и от направления в

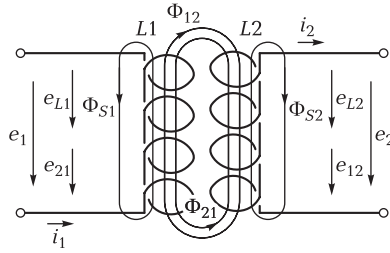


Рис. 1.11. Катушки с взаимной индукцией

них токов. Если магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции складываются, то такое включение катушек называется *согласным* (знак «+» в уравнениях); если вычитаются, то *встречным* (знак «-»).

При изменении токов в катушках изменяются магнитные потоки, пронизывающие эти катушки, и в катушках наводятся ЭДС:

$$e_{1\text{полн}} = -\frac{d\psi_{1\text{полн}}}{dt} = -\frac{d\psi_{11}}{dt} \mp \frac{d\psi_{12}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M_{12} \frac{di_2}{dt} = e_{L1} \pm e_{12};$$

$$e_{2\text{полн}} = -\frac{d\psi_{2\text{полн}}}{dt} = -\frac{d\psi_{22}}{dt} \mp \frac{d\psi_{21}}{dt} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M_{21} \frac{di_1}{dt} = e_{L2} \pm e_{21}.$$

Следовательно, при наличии магнитной связи между индуктивностями в каждой из них наводятся ЭДС самоиндукции ( $e_{L1}$ ,  $e_{L2}$ ) и ЭДС взаимной индукции ( $e_{12}$ ,  $e_{21}$ ):

$$e_{L1} = -L_1 \frac{di_1}{dt}; \quad e_{L2} = -L_2 \frac{di_2}{dt}; \quad e_{12} = \mp M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad e_{21} = \mp M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Во всех этих выражениях верхний знак соответствует согласному включению катушек, нижний — встречному. Таким образом, при согласном включении катушек индуктивностей ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции складываются, при встречном — вычитаются. Напряжения взаимной индукции равны соответственно:

$$u_{12} = -e_{12} = \mp M_{12} \frac{di_2}{dt}; \quad u_{21} = -e_{21} = \mp M_{21} \frac{di_1}{dt}.$$

Для указания на схеме включения катушек используется понятие одноименных зажимов. Физического смысла оно не имеет, но позволяет однозначно определить знаки напряжений взаимной индукции в уравнениях. При одинаковом направлении токов  $i_1$  и  $i_2$



относительно своих одноименных зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции складываются (включение согласное). Если токи  $i_1$  и  $i_2$  направлены относительно своих одноименных зажимов по-разному, то включение катушек встречное. На схеме нет необходимости вычерчивать намотку витков катушек, достаточно разметить их зажимы и указать направление токов.

На рис. 1.12 приведены примеры обозначения включения катушек.

Взаимоиндуктивный элемент находит широкое применение, например в схемах, где необходимо передать электрическую энергию в электрически не связанных цепях. Передача энергии осуществляется за счет магнитного поля.

**Активные элементы.** В качестве активных элементов в электротехнике рассматривают источники, т. е. элементы, питающие цепь электрической энергией. Как происходит преобразование других видов энергии в электрическую, в этом случае не рассматривается. Реальными источниками электромагнитной энергии являются генераторы постоянных, синусоидальных и импульсных сигналов; сигналы, получаемые от различного рода датчиков, антенны радиоприемных устройств и т. д.

В теории цепей рассматриваются идеализированные активные элементы: источники ЭДС и источники тока. *Идеальный источник напряжения* (источник ЭДС) — это активный элемент, напряжение на зажимах которого не зависит от тока, протекающего через источник (не зависит от сопротивления, подключенного к нему в качестве нагрузки), а равно величине ЭДС, вырабатываемому этим источником ( $u = e$ ).

*Идеальный источник тока* — это активный элемент; ток, протекающий через него, не зависит от напряжения на его зажимах (не зависит от сопротивления, подключенного к нему в качестве нагрузки).

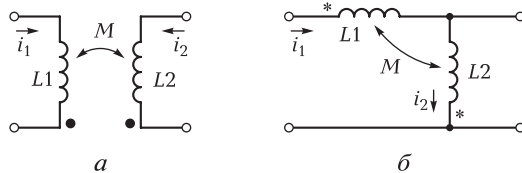


Рис. 1.12. Обозначение индуктивно связанных катушек:  
а — согласное включение; б — встречное включение

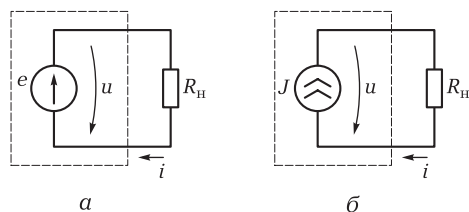


Рис. 1.13. Активные элементы:

*a* — нагруженный источник ЭДС; *б* — нагруженный источник тока

Рассмотрим работу идеального источника ЭДС, нагруженного на сопротивление  $R_n$  (рис. 1.13, *a*).

Напряжение на зажимах источника ЭДС  $u = e$  при любом  $R_n$ , а ток  $i = \frac{u}{R_n}$ . Таким образом, при уменьшении сопротивления  $R_n$  до 0 (режим короткого замыкания) ток  $i = \frac{e}{0} = \infty$ . При этом будет выделяться бесконечная мощность ( $p = ui = e \cdot \infty = \infty$ ). Следовательно, к определению источника необходимо добавить, что идеальный источник ЭДС — это источник, обладающий бесконечной мощностью.

Аналогичная ситуация возникает и для источника тока при нагрузке, равной бесконечности:  $R_n = \infty$  (режим холостого хода). При этом напряжение на зажимах источника тока  $u = \infty$  и выделяется бесконечная мощность ( $p = ui = \infty \cdot i = \infty$ ).

Следовательно, к определению источника необходимо добавить: *идеальный источник тока* — это источник, обладающий бесконечной мощностью.

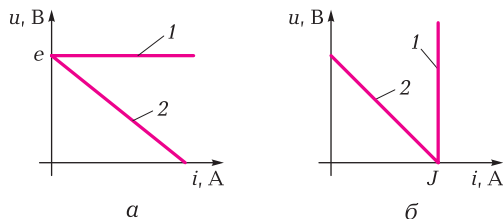


Рис. 1.14. ВАХ активных элементов:

*a* — источник ЭДС; *б* — источник тока; 1 — идеальный источник; 2 — реальный источник

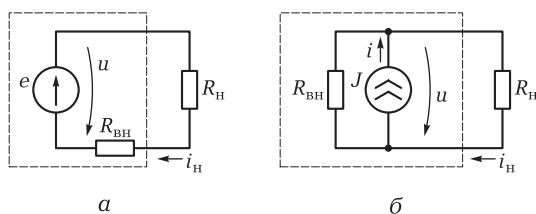


Рис 1.15. Модель реальных источников:  
 а — ЭДС; б — тока

Реальные источники не могут обладать бесконечной мощностью. Напряжение на реальном источнике ЭДС зависит от сопротивления нагрузки, как и ток, протекающий через источник тока. Вольт-амперные характеристики источника напряжения представлены на рис. 1.14 (прямая 1 соответствует идеальному источнику, прямая 2 — реальному).

Модель реального источника ЭДС (тока) можно составить из идеального источника ЭДС (тока) и резистора. Цепи, реализующие ВАХ реальных источников, изображены на рис. 1.15.

Резистор  $R_{вн}$  называется внутренним сопротивлением источника. Идеальный источник напряжения обладает нулевым, а идеальный источник тока — бесконечным внутренним сопротивлением. Такая модель является условной. Источники не могут обладать резистивными свойствами, как цвет не может обладать запахом, но такая модель позволяет рассчитывать реальные электрические цепи.

Кроме независимых источников существуют еще и зависимые, т.е. источники, параметры которых являются функциями токов или напряжений на некоторых участках цепи. Различают следующие виды управляемых источников: источник напряжения, управляемый напряжением; источник напряжения, управляемый током; источник тока, управляемый напряжением; источник тока, управляемый током. Примером реального ИТУТ может служить биполярный транзистор, а примером ИТУН — полевой транзистор.

### 1.3. ТОПОЛОГИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Топология электрических цепей включает в себя такие понятия, как «ветвь», «узел», «контур», «последовательное включение

элементов», «параллельное включение элементов» и т.д. *Ветвь* — это участок цепи, в котором протекает один и тот же ток. *Узел* — это точка соединения трех и более ветвей. *Последовательное включение элементов* — это включение, когда между элементами нет ни одного узла. *Параллельное включение элементов* — это включение, когда элементы имеют два общих узла. Таким образом, можно сказать, что ветвь — это участок цепи, расположенный между двумя смежными узлами; контур — это любой замкнутый участок цепи.

Рассмотрим способы преобразования электрических цепей. При последовательном включении резисторов (рис. 1.16, а) их сопротивления складываются; при параллельном (рис. 1.16, б) складываются проводимости:

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2; \quad G_{\text{паралл}} = G_1 + G_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2};$$

$$R_{\text{паралл}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

При последовательном соединении элементов (см. рис. 1.16, а) ток  $i$  во всех элементах один и тот же. Напряжение на цепи ( $u$ ), состоящей из последовательно соединенных элементов, равно сумме напряжений на каждом элементе:  $u = u_1 + u_2$ . При параллельном соединении элементов (см. рис. 1.16, б) напряжение на них ( $u$ ) одинаково. Общий ток  $i$  через параллельно включенные элементы равен сумме токов через каждый элемент:  $i = i_1 + i_2$ . Последовательно резисторы включают в цепь для снижения тока на этом участке цепи, параллельно — для увеличения тока.

Эквивалентные преобразования можно проводить не только пассивных, но и активных цепей. Источник ЭДС с последовательно включенным пассивным элементом можно представить как ис-

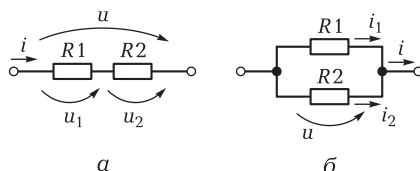


Рис. 1.16. Включение резисторов:  
а — последовательное; б — параллельное

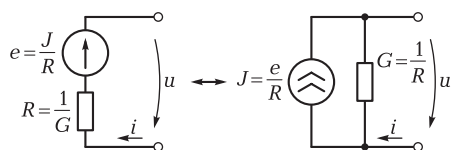


Рис. 1.17. Эквивалентное преобразование активных цепей

точник тока с параллельным пассивным элементом, и, наоборот, источник тока можно преобразовать в источник напряжения (рис. 1.17).

## 1.4. ВИДЫ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

В общем случае задача анализа электрических цепей заключается в определении токов (напряжений) в ветвях (или элементах) цепи. Заданными являются: схема цепи, значения номиналов всех ее элементов, параметры источников (входные воздействия), действующих в цепи. Все входные воздействия можно подразделить на детерминированные (регулярные) и недетерминированные (нерегулярные, или случайные).

Воздействие называется *детерминированным*, если оно описывается заранее известной (заданной) функцией времени.

Детерминированные воздействия можно подразделить на постоянные и переменные во времени воздействия. Переменные, в свою очередь, подразделяются на периодические и непериодические. Переменные периодические воздействия можно подразделить на моногармонические и полигармонические. Моногармоническим (или просто гармоническим) воздействием является воздействие, изменяющееся во времени по синусоидальному закону. Полигармонические сигналы содержат несколько синусоидальных составляющих, изменяющихся с разными частотами. Примером такого сигнала может служить последовательность прямоугольных импульсов.

Временное представление периодического сигнала удовлетворяет условию

$$f(t) = f(t + T),$$

где  $T$  — период функции.