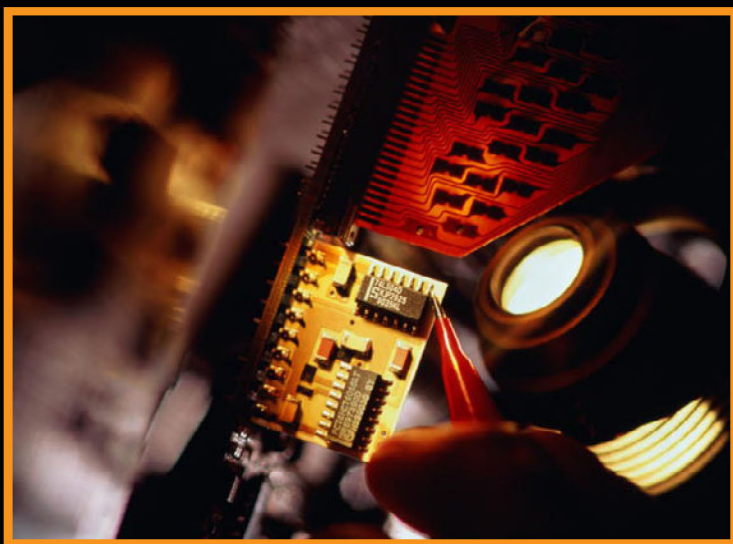


Электротехника и электроника



П. В. Ермуратский
Г. П. Лычкина
Ю. Б. Минкин

УДК 621.38 (0 75.8)

ББК 31.2 Я73

Е74

Е74 П. В. Ермуратский, Г. П. Лычкина, Ю. Б. Минкин
Электротехника и электроника. Издание второе, исправленное— М.:
ДМК Пресс, 2017. — 416 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-424-3

Учебник состоит из трёх частей: «Линейные электрические цепи», «Нелинейные электрические цепи, электроника», «Электромагнитные и электромеханические устройства. Электрические измерения и приборы».

Рассмотрены основные понятия теории электротехники и электроники. Приведены анализ и методы расчета однофазных и трехфазных электрических цепей; нелинейных и магнитных цепей; переходных процессов в электрических цепях. Даны основы теории электрических трансформаторов и электрических машин, их основные характеристики. Рассмотрены элементная база современных электронных устройств, усилители электрических сигналов, источники питания, цифровые устройства и основы микропроцессорной техники.

Для студентов вузов неэлектротехнических специальностей, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

Учебник

ЕРМУРАТСКИЙ Петр Васильевич

ЛЫЧКИНА Галина Прохоровна

МИНКИН Юрий Борисович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Главный редактор *Мовчан Д. А.*

dmkpress@gmail.com.ru

Корректор *Синяева Г. И.*

Верстка *Паранская Н. В.*

Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Формат 60×88 $\frac{1}{16}$. Гарнитура «Ньютон».
Печать офсетная. Усл. печ. л. 26. Тираж 100 экз.

ISBN 978-5-97060-424-3

© П.В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин., 2016

© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2017

Часть первая. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Глава первая.

Линейные цепи постоянного тока 6

- 1.1. Электрическая цепь. Характеристики и схемы замещения источников и приёмников (потребителей) электрической энергии. 7
- 1.2. Законы Ома и Кирхгофа для линейной цепи. 11
- 1.3. Граф схемы 17
- 1.4. Структурные преобразования схем замещения линейных цепей 19
- 1.5. Рационализация составления и решения уравнений Кирхгофа: методы контурных токов, узловых потенциалов, пропорциональных величин 24
- 1.6. Принципы суперпозиции, компенсации, взаимности 30
- 1.8. Двухполюсники 34
- 1.9. Принцип эквивалентного генератора (активного двухполюсника) 35
- 1.10. Мощность, развиваемая активным двухполюсником. 39
- 1.11. Применение принципа эквивалентного генератора для анализа цепей измерительных приборов. 40
- 1.12. Четырёхполюсники. Уравнения и схемы замещения 43

Глава первая.

ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Электрическая цепь.

Характеристики и схемы замещения источников и приёмников (потребителей) электрической энергии

Электрическая цепь — это совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении.

Электродвижущая сила (ЭДС) E — скалярная величина, характеризующая способность сторонних сил и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

Электрическое напряжение — это скалярная величина, характеризующая электрическое поле на рассматриваемом участке пути и равная разности потенциалов

$$U_{AB} = \Phi_A - \Phi_B.$$

Потенциал произвольной точки поля A Φ_A соответствует работе, совершаемой силами поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки в точку, потенциал которой равен нулю.

Электрический ток проводимости — это упорядоченное движение зарядов, он равен скорости изменения величины заряда Q через поперечное сечение проводника.

$$I = dQ/dt.$$

ЭДС, напряжение и потенциалы измеряются в вольтах (В).

Имя великого физика Италии Александра Вольта (1745 — 1827) было присвоено единице измерения в 1881 г. Международным конгрессом электриков в Париже в знак признания его заслуг как провозвестника эпохи электричества, установившего закон контактных напряжений, изобретшего «Вольтов столб» — источник электрического тока и давший возможность его практического применения.

Ток измеряется в амперах (А).

Она носит имя великого французского учёного Андре-Мари Ампера (1775 — 1836), внесшего большой вклад в изучение электромагнетизма и электросвязи. Это название единицы измерения было утверждено в 1893 г. на Международном конгрессе электриков в Чикаго.

Простейшая электрическая цепь состоит из источника I и приёмника P электрической энергии, соединённых проводами. Цепь может содержать ключ K для замыкания и размыкания цепи и измерительные приборы: амперметр A и вольтметры V для измерения тока и напряжения. Сопротивление амперметра мало и приближенно принимается равным нулю, сопротивление вольтметра велико и может быть принято равным бесконечности, если не оговорена необходимость учёта их сопротивлений, рис. 1.1.

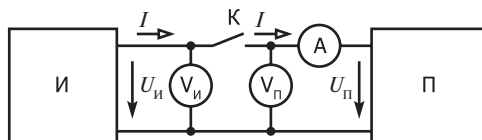


Рис. 1.1

В цепях постоянного тока напряжения и тока неизменны во времени. В приёмниках выбирают положительные направления тока I и напряжения U на схеме одинаковыми, а в источниках — противоположными. Направление действия ЭДС (от отрицательного вывода к положительному) указывается на схемах замещения элементов цепи стрелкой. Стрелки тока и напряжения показывают выбранные положительные направления этих величин, что необходимо учитывать при составлении уравнений, описывающих режим работы источников и приёмников. Примеры источников и приёмников приведены в таблице 1.1.

В источниках электрической энергии происходит преобразование различных видов энергии (химической, тепловой, механической, световой) в электрическую.

В приёмниках электрической энергии осуществляется преобразование электрической энергии в световую, механическую и другие виды.

Как видно из таблицы 1.1 на примере машины постоянного тока, в зависимости от того, какая энергия преобразуется, машина может быть источником (в генераторах механическая энергия вращения вала преобразуется в электрическую) и приёмником (в двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую энергию).

Внешняя характеристика источника представляет собой зависимость напряжения на его выводах от тока. Внешнюю характеристику источника снимают, изменяя параметры приёмника, а приёмника — изменяя параметры источника.

Таблица 1.1

| Источники | Приёмники |
|---------------------------------|--------------------|
| Аккумуляторная батарея. | |
| | |
| в режиме разрядки | в режиме зарядки |
| Машины постоянного тока. | |
| | |
| Генератор | Двигатель |
| Пассивные приёмники | |
| | |
| Термопара | Лампа накаливания |
| | |
| Фотоэлемент | Электронагреватель |

На рис. 1.2 *a, б* показаны внешние характеристики источника и приёмника: *1, 3* — линейные, *2* — нелинейные.

Элемент называют *активным*, если в нем содержатся сторонние источники ЭДС и напряжение на его выводах при отсутствии тока отлично от нуля. *Пассивным* называют элемент, в котором нет сторонних ЭДС и напряжение на его выводах при отсутствии тока равно нулю. Характеристики приёмника *1* и *2* соответствуют пассивным элемен-

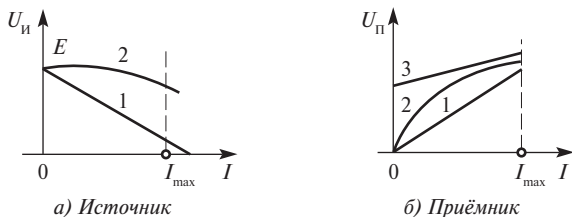


Рис. 1.2

там, 3 – активному линейному элементу. Экспериментально может быть снята только часть характеристик, так как ток не может превышать максимально допустимого значения I_{max} по условиям нагрева.

Для цепей с линейными характеристиками, математически выражаемыми уравнениями прямой линии, режим работы при выбранных, например, как в табл. 1.1, положительных направлениях токов и напряжений, определяют следующие уравнения:

для источника

$$U_{и} = E_{и} - R_{в} I, \quad (1.1)$$

для приёмника

$$U_{п} = E_{п} + R_{п} I, \quad (1.2)$$

где, соответственно,

$$R_{в} = -dU_{и}/dI; \quad R_{п} = dU_{п}/dI \quad (1.3)$$

– сопротивления реального источника и приёмника (у источников сопротивление часто называют внутренним $R_{в}$). В пассивных приёмниках $E_{п} = 0$.

Вводя абстрактное понятие идеальных линейных резистивных элементов R , источников напряжения ЭДС E и тока J , составляют схемы замещения источников и приёмников, удобные для анализа электрических цепей. На рис. 1.3 представлены внешние характеристики линейного резистивного элемента (прямая 1), источника напряжения

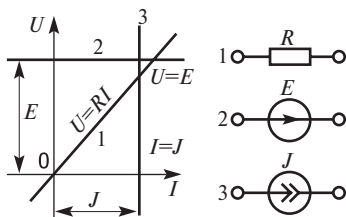


Рис. 1.3

или ЭДС (прямая 2), источника тока (прямая 3) и даны графические изображения этих элементов на схемах замещения.

В идеальном источнике напряжения (с внутренним сопротивлением, равным нулю) напряжение не зависит от тока (прямая 2) и $U = E$. В идеальном источнике тока (с внутренним сопротивлением теоретически бесконечно большим) ток не зависит от напряжения (прямая 3) и $I = J$.

Любой реальный линейный источник в электрической цепи имеет схему замещения, состоящую из последовательно соединенных резистивного элемента с сопротивлением R_B и идеального источника ЭДС (рис. 1.4 а) или из параллельно соединенных резистивного элемента с сопротивлением R_B и идеального источника тока (рис. 1.4 б). В этих схемах внешние характеристики соответствуют уравнениям (1.1) и (1.2) при

$$E = R_B J, \quad I_K = R_B I, \quad (1.4)$$

где I_K – ток короткого замыкания, а резистивный элемент с сопротивлением R_B учитывает потери внутри реального источника.



Рис. 1.4

Если положительное направление ЭДС выбирают совпадающим с направлением тока, как это делается для источников, то для приёмников она имеет отрицательный знак и ее называют противо-ЭДС. В стандартах этот термин отсутствует.

1.2. Законы Ома и Кирхгофа для линейной цепи

Закон Ома

На линейном резистивном элементе R напряжение U прямо пропорционально току I в нём и его сопротивлению R (измеряется в Омах)

$$U = RI.$$

Выдающийся немецкий учёный Георг Ом (1789 – 1854) в результате многочисленных экспериментов по изучению механизма работы электрических батарей источников тока пришёл к выводу, что ток в цепи с постоянным источником ЭДС обратно пропорционален сопротивлению цепи. Эти результаты были им опубликованы в 1827 г.

Первоначально учёный мир не оценил открытия Ома, потому что найденное им выражение было настолько простым, что именно своей простотой оно вызывало недоверие. Ом впервые ввёл термин «сопротивление» в западноевропейской литературе.

В России термин «сопротивление» и пропорциональность тока напряжению и обратная пропорциональность его сопротивлению было установлено в 1802 г. академиком В. В. Петровым (1761 – 1834).

В 1881 г. на электротехническом конгрессе в Париже было утверждено название единицы сопротивления «Ом».

Сложная электрическая цепь и ее схема замещения характеризуются следующими понятиями:

ветвь — участок электрической цепи или схемы с одним и тем же током;

узел — место соединения более двух ветвей электрической цепи или схемы;

контур — замкнутый путь, проходящий по ветвям электрической цепи или схемы.

Для анализа токов в сложных электрических цепях составляют и решают уравнения Кирхгофа.

Немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф (1824 – 1887), еще будучи студентом Кенигсбергского университета, занимался исследованием электрических цепей. В 1847 г. он открыл закономерности протекания электрического тока в разветвлённых электрических цепях.

Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов во всех ветвях, сходящихся в узле, равна нулю:

Если к узлу подсоединены ветви с источниками тока J , то

$$\sum I = 0. \quad (1.5a)$$

Для электрической цепи, содержащей y узлов, по первому закону Кирхгофа можно составить $(y - 1)$ независимых уравнений.

$$\sum_i I_i + \sum_k J_k = 0. \quad (1.5б)$$

Правило знаков: положительные направления токов выбирают произвольно; токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком, например, плюс (+), а токи, направленные от узла, — с другим знаком, например, минус (-). У источника тока направление должно быть известно и указано на схеме.

Первый закон Кирхгофа является следствием непрерывности тока и неизменности зарядов в узлах электрической цепи.

Пример 1.1. Для узла схемы (рис. 1.5) записать уравнения по первому закону Кирхгофа.

Решение. По первому закону Кирхгофа $J + I_1 - I_2 - I_3 = 0$.

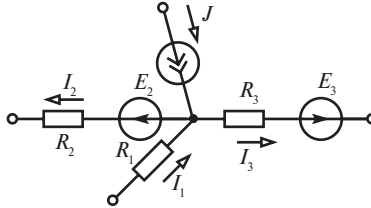


Рис. 1.5

Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма напряжений на всех участках замкнутого контура (с учетом выбранных положительных направлений) равна нулю:

$$\sum U_{mn} = \sum (\varphi_m - \varphi_n) = 0, \quad (1.6)$$

где φ_m и φ_n — потенциалы соответствующих выводов, или *алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах любого замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС этого контура:*

$$\sum R_i I_i = \sum E_i. \quad (1.7)$$

В общем расчете электрической цепи число неизвестных токов равно числу ν ветвей в цепи. Поэтому по второму закону Кирхгофа необходимо составить $\kappa = \nu - (\gamma - 1)$ независимых уравнений.

Независимые уравнения получатся, если в каждый контур входит хотя бы одна ветвь, не входящая в другие контуры.

При определении числа ветвей (ν) ветви с одним и тем же током следует принимать за одну ветвь. При определении числа узлов (γ) следует учитывать только те узлы, в которых сходятся более чем две ветви, а ветви с $R = 0$ включать в состав узла. В каждом контуре произвольно выбирают направление обхода контура.

Правило знаков: напряжения и ЭДС в уравнениях (1.7) записывают с положительным знаком, если направление напряжений, ЭДС и токов совпадает с направлением обхода контура.

В частном случае контур может быть замкнутым не через ветви, а замыкаться вне ветвей при напряжении между выводами n и m , равном $U_{nm} = U_s$ (рис. 1.6). При выбранном направлении обхода уравнение (1.7) принимает вид

$$U_s + RI = E. \tag{1.8}$$

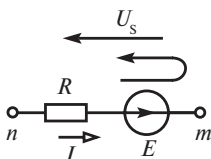


Рис. 1.6

Пример 1.2. Для контура (рис. 1.7) записать уравнение по второму закону Кирхгофа.

Решение. По второму закону Кирхгофа $U_1 + U_2 - U_3 + U_4 = 0$ или $R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_1 + E_2 - E_3$.

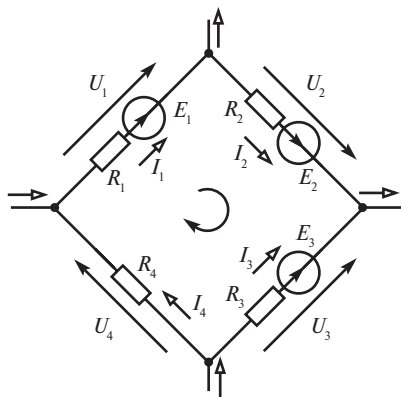


Рис. 1.7

В матричной форме уравнения Кирхгофа (1.5а) и (1.7) можно записать как

$$AI = BE, \tag{1.9}$$

где A, B – квадратные матрицы коэффициентов при токах и напряжениях порядка $\nu \times \nu$; I, E – матрицы-столбцы неизвестных токов и заданных ЭДС.

Элементами матрицы A являются коэффициенты при токах в левой части уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Первые $(y - 1)$ строки матрицы A содержат коэффициенты при токах в уравнениях, составленных по первому закону Кирхгофа, и имеют элементы $+1, -1, 0$ в зависимости от того, с каким знаком входит данный ток в уравнение.

Элементы следующих $(e - (y - 1))$ строк матрицы A равны значениям сопротивлений при соответствующих токах в уравнениях, составленных по второму закону Кирхгофа, с соответствующим знаком. Элементы матрицы B равны коэффициентам при ЭДС в правой части уравнений, составленных по законам Кирхгофа. Первые $(y - 1)$ строки матрицы имеют нулевые элементы, так как ЭДС в правой части уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа, отсутствуют. Остальные $(e - y + 1)$ строки содержат элементы $+1, -1$ в зависимости от того, с каким знаком входит ЭДС в уравнение, и 0 , если ЭДС в уравнении не входит.

Общее решение уравнений, составленных по законам Кирхгофа,

$$I = (A^{-1} B) E = GE, \quad (1.10)$$

где $G = A^{-1} B$ — матрица проводимостей:

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & \dots & G_{1b} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & \dots & G_{2b} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ G_{b1} & G_{b2} & G_{b3} & \dots & G_{bb} \end{pmatrix}. \quad (1.11)$$

Токи в каждой ветви:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= G_{11} E_1 + G_{12} E_2 + G_{13} E_3 + \dots + G_{1b} E_b ; \\ I_2 &= G_{21} E_1 + G_{22} E_2 + G_{23} E_3 + \dots + G_{2b} E_b ; \\ \cdot & \\ \cdot & \\ \cdot & \\ I_b &= G_{b1} E_1 + G_{b2} E_2 + G_{b3} E_3 + \dots + G_{bb} E_b . \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Пример 1.3. Для схемы на рис. 1.8 записать уравнения по законам Кирхгофа. Здесь $\nu = 6$, $y = 4$, $E_2 = E_3 = 0$.

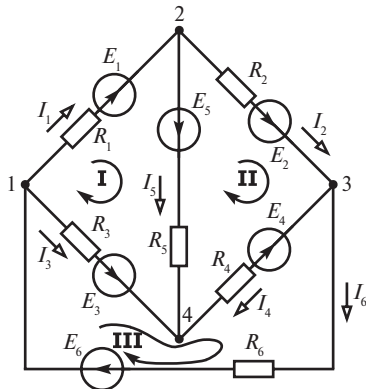


Рис. 1.8

Решение. По первому закону Кирхгофа составляют три уравнения для узлов 1–3:

$$-I_1 - I_3 + I_6 = 0; \quad I_1 - I_2 - I_5 = 0; \quad I_2 - I_4 - I_6 = 0;$$

по второму закону Кирхгофа — три уравнения ($\nu - y + 1 = 3$) для контуров I–III:

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_1 - E_3 + E_5;$$

$$R_2 I_2 + R_4 I_4 - R_5 I_5 = E_2 - E_4 - E_5;$$

$$R_3 I_3 - R_4 I_4 + R_6 I_6 = E_3 + E_4 + E_6.$$

Для обобщения записи в уравнения включены равные нулю ЭДС в ветвях 2, 3.

В матричной форме

$$AI = BE,$$

где

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ R_1 & 0 & -R_3 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & R_4 & -R_5 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & 0 & R_6 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} E_1 \\ 0 \\ 0 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{pmatrix}.$$

При анализе электрических цепей полезно пользоваться графами схем, которые определяют их топологические свойства.

1.3. Граф схемы

Топологическое представление схемы электрической цепи носит название графа электрической схемы (граф схемы).

Для представления графа схемы необходимо пронумеровать узлы электрической цепи (числом в кружке). Источники ЭДС и тока на графе не изображают. При этом ветвь с источником ЭДС сохраняется.

Ветви с идеальными источниками тока в топологическую схему не входят, т. к. их внутренняя проводимость равна нулю, а сопротивление бесконечно.

Вершины графа — узлы — соединяют дугами, представляющими ветви схемы. Каждая ветвь нумеруется числом без кружка.

Если на графе указаны условно-положительные направления токов или напряжений, то такой граф называется направленным графом схемы.

На рис. 1.9 показан граф схемы, представленной на рис. 1.8. Это — направленный граф схемы.

Дерево графа — совокупность ветвей графа, соединяющих все узлы без образования контуров.

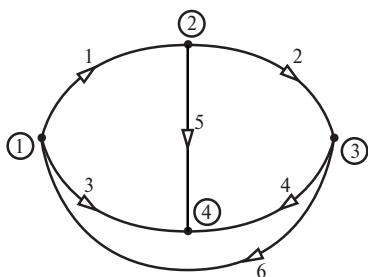


Рис. 1.9

Один из вариантов дерева графа показан на рис. 1.10.

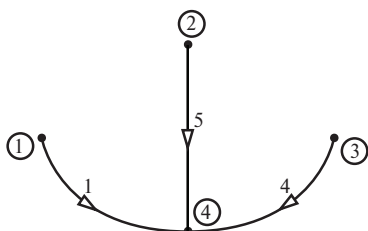


Рис. 1.10

Для получения независимых контуров к ветвям дерева графа добавляют по одной из оставшихся ветвей графа.

Независимые контуры, полученные из дерева графа рис. 1.10, приведены на рис. 1.11.

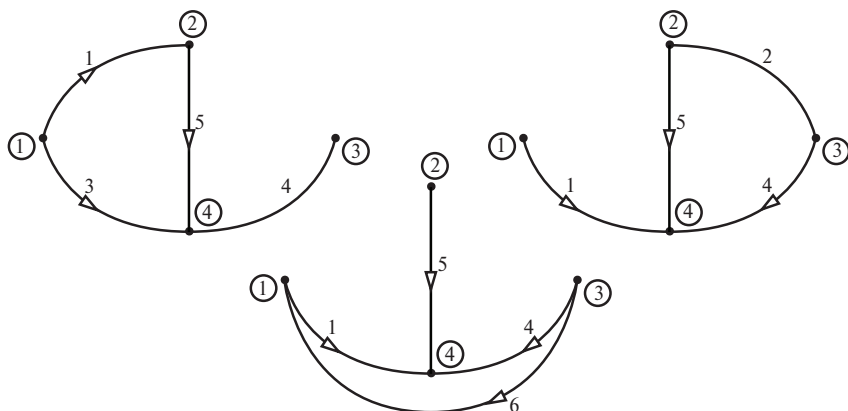


Рис. 1.11

1.4. Структурные преобразования схем замещения линейных цепей

В линейных электрических цепях возможны различные соединения элементов, например последовательное, параллельное, смешанное, звездой, треугольником.

Для упрощения анализа электрических цепей производят структурные преобразования, при которых ток и напряжение на зажимах электрической цепи и её схемы замещения остаются одинаковыми.

Последовательное соединение резисторов

При последовательном соединении резисторов во всех элементах один и тот же ток.

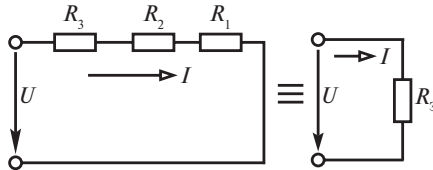


Рис. 1.12

$$R_{\mathcal{E}} = R_1 + R_2 + R_3.$$

$$R_{\mathcal{E}} = \sum R_i.$$

При последовательном соединении (рис. 1.12) сопротивления складываются.

Напряжение на каждом резисторе $U_{R_i} = R_i I$ пропорционально току и его сопротивлению.

$$U_{R_1} = R_1 I; U_{R_2} = R_2 I; U_{R_3} = R_3 I.$$

Параллельное соединение резисторов

При параллельном соединении (рис. 1.13) резисторов ко всем элементам приложено одно и то же напряжение (все резисторы включены между двумя узлами).

Эквивалентное сопротивление $R_{\mathcal{E}}$ обратно пропорционально проводимости

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{1}{G_{\mathcal{E}}},$$

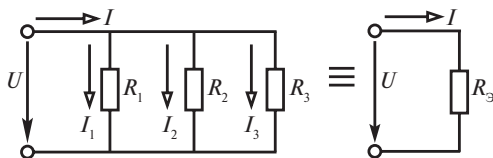


Рис. 1.13

где проводимость цепи

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = G_1 + G_2 + G_3.$$

При параллельном соединении проводимости складываются

$$G_3 = \sum G_i.$$

Ток в каждом элементе определяется по закону Ома

$$I_i = \frac{U}{R_i} = G_i U.$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3};$$

Ток I определяется по первому закону Кирхгофа

$$I = \sum I_i = I_1 + I_2 + I_3$$

или по закону Ома

$$I = \frac{U}{R_3} = G_3 U.$$

В таблице 1.2 приведены эквивалентные структурные схемы преобразования различных соединений и указаны выражения для определения эквивалентных параметров.

Таблица 1.2.

Эквивалентные структурные схемы преобразования различных соединений и их расчет

| Вид преобразования | Исходная схема | Преобразованная схема | Соотношения между параметрами* |
|--|----------------|-----------------------|--|
| Последовательное соединение | | | $R_{\text{Эк}} = \sum_{i=1}^n R_i$ $E_{\text{Эк}} = \sum_{i=1}^m E_i = E_1 - E_2 + \dots + E_m$ |
| Параллельное соединение с источниками тока | | | $G_{\text{Эк}} = \sum_{i=1}^n G_i, \quad \text{где } G_i = 1/R_i$ $J_{\text{Эк}} = \sum_{i=1}^m J_i = J_1 - J_2 + \dots + J_m$ |
| Параллельное соединение с источниками ЭДС | | | $\frac{1}{R_{\text{Эк}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ $E_{\text{Эк}} = R_{\text{Эк}} \left(\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + \dots + \frac{E_n}{R_n} \right)$ |

* Рассматривается алгебраическая сумма ЭДС и токов источников.

Таблица 1.2. Окончание.
Эквивалентные структурные схемы преобразования различных соединений и их расчет

| Вид преобразования | Исходная схема | Преобразованная схема | Соотношения между параметрами |
|--|----------------|-----------------------|--|
| Перенос источника ЭДС через узел | | | |
| Преобразование последовательного соединения источника и резистора в параллельное | | | $J = \frac{E}{R}$ |
| Звезда в треугольник | | | $R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$ $R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}$ $R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}$ |

Оглавление

| | |
|--|----------|
| Предисловие | 3 |
| Часть первая. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ | |
| Глава первая. Линейные цепи постоянного тока | |
| 1.1. Электрическая цепь. Характеристики и схемы замещения источников и приёмников (потребителей) электрической энергии | 7 |
| 1.2. Законы Ома и Кирхгофа для линейной цепи. | 11 |
| 1.3. Граф схемы | 17 |
| 1.4. Структурные преобразования схем замещения линейных цепей | 19 |
| 1.5. Рационализация составления и решения уравнений Кирхгофа: методы контурных токов, узловых потенциалов, пропорциональных величин .. | 24 |
| 1.6. Принципы суперпозиции, компенсации, взаимности | 30 |
| 1.8. Двухполюсники | 34 |
| 1.9. Принцип эквивалентного генератора (активного двухполюсника) | 35 |
| 1.10. Мощность, развиваемая активным двухполюсником. | 39 |
| 1.11. Применение принципа эквивалентного генератора для анализа цепей измерительных приборов. | 40 |
| 1.12. Четырёхполюсники. Уравнения и схемы замещения | 43 |
| Глава вторая. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА | |
| 2.1. Общая характеристика цепей синусоидального тока | 52 |
| 2.2. Структура цепи синусоидального тока | 53 |
| 2.3. Гармонические функции и их представление в комплексной форме | 57 |
| 2.4. Синусоидальный ток в резистивном элементе R | 61 |
| 2.5. Синусоидальный ток в индуктивном элементе L | 63 |
| 2.6. Синусоидальный ток в ёмкостном элементе C | 66 |
| 2.7. Сводная таблица соотношений между параметрами в цепи синусоидального тока с R, L, C элементами | 69 |
| 2.8. Мощность в цепи синусоидального тока | 69 |
| 2.9. Законы, принципы, методы анализа цепей синусоидального тока в комплексной форме | 73 |
| 2.10. Измерение тока, напряжения, мощности в цепях синусоидального тока | 74 |
| 2.11. Последовательное соединение R, L, C элементов | 75 |
| 2.12. Параллельное соединение R, L, C элементов | 78 |
| 2.13. Схемы замещения реальных индуктивных катушек и конденсаторов | 80 |
| 2.14. Резонансы напряжений и токов | 82 |
| 2.15. Падение и потеря напряжения при передаче электроэнергии | 87 |
| 2.16. Примеры анализа цепей синусоидального тока | 88 |
| Глава третья. ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ | |
| 3.1. Трёхфазная цепь и ее элементы | 94 |
| 3.2. Соединение фаз источников и приёмников звездой, четырёхпроводная линия .. | 96 |
| 3.3. Соединение фаз источников и приёмников звездой, трёхпроводная линия | 99 |
| 3.3.1. Симметричная нагрузка | 99 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.2. Несимметричная нагрузка | 100 |
| 3.4. Соединение фаз приёмника в трёхфазной цепи треугольником | 102 |
| 3.5. Пример анализа трёхфазной цепи. | 104 |
| 3.6. Мощность в трёхфазной цепи | 107 |
| 3.7. Защитное заземление и зануление в трёхфазной цепи. | 109 |

Глава четвертая. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

| | |
|---|-----|
| 4.1. Возникновение переходных процессов в электрических цепях. | 114 |
| 4.2. Решение уравнений, составленных по законам Ома и Кирхгофа для переходных процессов | 114 |
| 4.3. Переходные процессы при включении цепи с R, L элементами | 116 |
| 4.4. Переходные процессы при замыкании цепи с R, L элементами | 119 |
| 4.5. Переходные процессы при включении и отключении цепи с R, C элементами | 121 |
| 4.6. Переходные процессы в цепи с R, L, C элементами | 125 |

Глава пятая. ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

| | |
|--|-----|
| 5.1. Несинусоидальные ЭДС, напряжения и токи | 130 |
| 5.2. Математическое описание функций, несинусоидально зависящих от времени (ЭДС, токов и напряжений). | 131 |
| 5.3. Максимальные, действующие и средние значения несинусоидальных периодических функций (напряжений, ЭДС и токов) | 135 |
| 5.4. Высшие гармоники в трёхфазных цепях. | 136 |

Часть вторая. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

Глава шестая. ДИОДЫ, ВЫПРЯМИТЕЛИ, СТАБИЛИЗАТОРЫ

| | |
|---|-----|
| 6.1. Характеристики элементов и методы расчета нелинейных цепей. | 136 |
| 6.2. Полупроводниковые диоды | 140 |
| 6.2.1. Физические основы работы полупроводниковых приборов, $p-n$ переход. | 140 |
| 6.2.2. Полупроводниковый диод и его вольт-амперная характеристика | 143 |
| 6.3. Выпрямители | 146 |
| 6.3.1. Основные понятия и характеристики | 146 |
| 6.3.2. Однополупериодный выпрямитель | 148 |
| 6.3.3. Двухполупериодные выпрямители | 150 |
| 6.3.3.1. Двухполупериодный мостовой выпрямитель | 150 |
| 6.3.3.2. Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки трансформатора | 152 |
| 6.3.4. Трёхфазный выпрямитель с выводом нейтрали | 152 |
| 6.3.5. Трёхфазный мостовой выпрямитель | 153 |
| 6.3.6. Сглаживание выпрямленного напряжения. | 154 |
| 6.3.6.1. Основные понятия о сглаживающих фильтрах. | 154 |
| 6.3.6.2. Ёмкостной фильтр | 154 |
| 6.3.6.3. Индуктивный фильтр. | 156 |
| 6.3.6.4. LC -фильтр. | 156 |
| 6.3.7. Схемы выпрямления с умножением напряжения | 157 |
| 6.3.8. Работа выпрямителя на встречный источник ЭДС | 158 |

| | |
|---|-----|
| 6.4. Управляемые источники напряжения | 159 |
| 6.4.1. Тиристоры | 159 |
| 6.4.2. Управляемые выпрямители | 160 |
| 6.5. Стабилизаторы. | 161 |
| 6.5.1. Стабилитроны | 161 |
| 6.5.2. Стабилизаторы напряжения | 163 |

Глава седьмая. ТРАНЗИСТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ

| | |
|---|-----|
| 7.1. Характеристики нелинейных резистивных четырёхполюсников | 168 |
| 7.2. Общая характеристика усилителей | 169 |
| 7.3. Полевые и биполярные транзисторы, их характеристики и параметры | 172 |
| 7.3.1. Полевые транзисторы | 172 |
| 7.3.2. Общая характеристика биполярных транзисторов | 174 |
| 7.3.3. Схемы включения транзисторов | 175 |
| 7.3.4. Вольт-амперные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером | 176 |
| 7.3.5. Рабочая область на семействе характеристик транзистора | 177 |
| 7.3.6. Рабочая точка транзистора | 178 |
| 7.3.7. Дифференциальные параметры транзистора | 179 |
| 7.3.8. Уравнения и схема замещения транзистора по переменному току | 180 |
| 7.3.9. Определение h-параметров транзистора по вольт-амперным характеристикам | 181 |
| 7.4. Анализ работы и расчет параметров усилителя переменного напряжения на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером и коллекторной нагрузкой | 183 |
| 7.4.1. Режим работы усилителя по постоянному току | 183 |
| 7.4.2. Схема замещения усилителя по переменному току и расчет параметров усилителя $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_u | 186 |
| 7.4.3. Частотные характеристики усилителя | 188 |
| 7.5. Переходная и амплитудная характеристики усилителя | 192 |
| 7.6. Усилители мощности | 194 |
| 7.7. Обратные связи в усилителях | 196 |
| 7.7.1. Виды обратных связей в усилителях | 196 |
| 7.7.2. Влияние последовательной отрицательной обратной связи по напряжению на параметры усилителя | 198 |
| 7.7.3. Эмиттерный повторитель | 200 |
| 7.7.4. Температурная стабилизация | 201 |
| 7.8. Усилители постоянного тока и операционные усилители | 202 |
| 7.8.1. Усилители постоянного тока | 202 |
| 7.8.2. Операционные усилители | 204 |
| 7.9. Автогенераторы. | 207 |

Глава восьмая. ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

| | |
|---|-----|
| 8.1. Интегральные микросхемы | 214 |
| 8.2. Логические и цифровые элементы | 216 |

| | |
|---|-----|
| 8.2.1. Логические элементы | 217 |
| 8.2.2. Транзисторные ключи | 220 |
| 8.2.3. Триггеры | 223 |
| 8.2.4. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) | 225 |
| 8.2.5. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) | 226 |
| 8.3. Микропроцессоры и микроконтроллеры | 227 |
| 8.3.1. Микропроцессор. Основные понятия и определения | 227 |
| 8.3.2. Классификация микропроцессоров | 228 |
| 8.3.3. Архитектура и устройство микропроцессоров | 230 |
| 8.3.3.1. Архитектура МП | 230 |
| 8.3.3.2. Функциональные параметры МП | 231 |
| 8.3.3.3. Предельные эксплуатационные параметры МП | 233 |
| 8.3.3.4. Структура простейшего микропроцессора КР580ВМ80А | 233 |
| 8.3.4. Принципы работы микропроцессора | 237 |
| 8.3.4.1. Двоичная арифметика | 237 |
| 8.3.4.2. Алгоритм работы микропроцессора КР580ВМ80А | 240 |
| 8.3.4.3. Программная модель микропроцессора КР580ВМ80А | 242 |
| 8.3.4.4. Режимы адресации микропроцессора КР580ВМ80А | 245 |
| 8.3.4.5. Система команд микропроцессора КР580ВМ80А | 246 |
| 8.3.4.6. Применение микропроцессоров | 249 |

Часть третья. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Глава девятая. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

| | |
|--|-----|
| 9.1. Ферромагнитные материалы и их характеристики | 254 |
| 9.2. Магнитные цепи при постоянной МДС | 257 |
| 9.3. Магнитные цепи при переменной МДС. Эквивалентный синусоидальный ток | 261 |
| 9.4. Магнитная цепь при действии постоянной и переменной МДС | 266 |
| 9.5. Комплексная магнитная проницаемость и комплексная индуктивность | 267 |

Глава десятая. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

| | |
|--|-----|
| 10.1. Однофазный трансформатор | 270 |
| 10.1.1. Назначение трансформатора | 270 |
| 10.1.2. Устройство трансформатора | 271 |
| 10.1.3. Принцип действия трансформатора | 272 |
| 10.1.4. Режимы работы трансформатора | 274 |
| 10.1.5. Уравнения электрического и магнитного состояния трансформатора | 276 |
| 10.1.6. Приведение параметров трансформатора и его схема замещения | 278 |
| 10.1.7. Определение параметров схемы замещения трансформатора | 281 |
| 10.1.8. Внешняя характеристика трансформатора | 282 |
| 10.1.9. Потери и КПД трансформатора | 284 |
| 10.1.10. Пример расчета трансформатора | 285 |
| 10.2. Трёхфазные трансформаторы | 287 |
| 10.2.1. Параллельная работа трансформаторов | 290 |
| 10.3. Измерительные трансформаторы | 290 |

| | |
|---|-----|
| 10.4. Автотрансформатор | 291 |
| 10.5. Электротермические установки | 292 |
| 10.5.1. Классификация электротермических установок | 292 |
| 10.5.2. Печи сопротивления | 293 |
| 10.5.3. Трансформаторы для электротермических установок | 294 |
| 10.5.4. Индукционные печи | 295 |
| 10.5.5. Дуговые печи | 296 |
| 10.5.6. Плазмотроны | 298 |

Глава одиннадцатая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

| | |
|--|-----|
| 11.1. Общая характеристика электрических машин | 300 |
| 11.2. Электрические машины переменного тока | 301 |
| 11.2.1. Вращающееся магнитное поле ротора | 301 |
| 11.2.2. Вращающееся магнитное поле статора | 301 |
| 11.2.3. Результирующее магнитное поле | 303 |
| 11.3. Асинхронные машины | 304 |
| 11.3.1. Устройство трёхфазной асинхронной машины | 304 |
| 11.3.2. Принцип действия асинхронного двигателя | 305 |
| 11.3.3. Режимы работы асинхронной машины | 306 |
| 11.3.4. Уравнения и схема замещения одной фазы асинхронной машины | 306 |
| 11.3.5. Преобразование энергии в асинхронной машине | 308 |
| 11.3.6. Механическая характеристика асинхронной машины | 309 |
| 11.3.7. Способы пуска асинхронных двигателей | 311 |
| 11.4. Синхронные машины | 312 |
| 11.4.1. Устройство синхронной машины | 312 |
| 11.4.2. Принцип действия синхронной машины | 313 |
| 11.4.2.1. Синхронный двигатель | 313 |
| 11.4.2.2. Синхронный генератор | 314 |
| 11.4.3. Уравнения и схема замещения одной фазы синхронной машины | 314 |
| 11.4.4. Векторные диаграммы синхронных машин | 315 |
| 11.4.5. Момент синхронного двигателя | 317 |
| 11.4.6. Схемы пуска | 317 |
| 11.5. Машины постоянного тока | 319 |
| 11.5.1. Устройство машин постоянного тока | 319 |
| 11.5.2. Принцип действия генератора постоянного тока | 320 |
| 11.5.3. Генератор постоянного тока | 321 |
| 11.5.3.1. Генератор с независимым возбуждением | 321 |
| 11.5.3.2. Генераторы с параллельным возбуждением | 323 |
| 11.5.3.3. Генераторы со смешанным возбуждением | 324 |
| 11.5.4. Двигатель постоянного тока | 325 |
| 11.5.4.1. Двигатели с независимым возбуждением | 325 |
| 11.5.4.2. Двигатели постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением | 328 |
| 11.6. Сравнительные характеристики и области применения электрических машин | 332 |
| 11.7. Выбор электрических двигателей | 333 |

| | |
|---|------------|
| 11.7.1. Общие положения | 333 |
| 11.7.2. Нагрев и охлаждение двигателей | 335 |
| 11.7.3. Режимы работы электрических двигателей | 337 |
| 11.7.4. Выбор двигателя по мощности при продолжительном режиме работы | 338 |
| 11.7.5. Выбор двигателя для повторно-кратковременного режима работы | 344 |
| 11.7.6. Выбор двигателя для кратковременного режима работы | 345 |
| 11.7.7. Единые серии асинхронных двигателей | 346 |
| Глава двенадцатая. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ | |
| 12.1. Измерительные приборы | 348 |
| 12.1.1. Основные понятия и определения | 348 |
| 12.1.2. Характеристики и параметры средств измерения | 349 |
| 12.1.3. Основные обозначения, наносимые на шкалу измерительных приборов | 352 |
| 12.1.4. Электромеханические измерительные преобразователи | 354 |
| 12.2. Методы измерения | 357 |
| 12.2.1. Измерение тока | 357 |
| 12.2.2. Измерение напряжения | 359 |
| 12.2.3. Измерение мощности и энергии | 361 |
| 12.2.4. Прямые методы измерения сопротивления резистора | 362 |
| 12.2.5. Компарирующие методы измерений | 364 |
| 12.2.6. Резонансный метод измерения параметров катушек индуктивности и конденсаторов | 367 |
| 12.3. Цифровые измерительные приборы | 369 |
| 12.3.1. Квантование и дискретизация непрерывных величин | 369 |
| 12.3.2. Цифровые вольтметры | 375 |
| 12.3.3. Цифровые мультиметры | 382 |
| 12.3.4. Универсальный RLC-метр Agilent | 383 |
| 12.3.5. Счетчики электрической энергии | 385 |
| 12.3.6. Цифровые частотомеры | 385 |
| Приложения | |
| Приложение 1. Буквенные обозначения и единицы основных величин в электротехнике | 390 |
| Приложение 2. Физические законы и основные понятия | 392 |
| Приложение 3. Математические понятия, применяемые в электротехнике | 395 |
| Приложение 4. Маркировка полупроводниковых приборов | 396 |
| Приложение 5. Система обозначений ИМС | 397 |
| Приложение 6. Основные технические данные некоторых серийных асинхронных электродвигателей общего применения | 400 |
| Список литературы | 404 |
| Предметный указатель | 405 |