

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Том II

*Петр Афанасьевич Ионкин,
Александр Иосифович Даревский,
Евгений Степанович Кухаркин,
Владимир Георгиевич Миронов,*

Николай Александрович Мельников

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

том II

**Нелинейные цепи и основы теории
электромагнитного поля**

Под ред. П. А. Ионкина

Редактор Т. И. Артемова. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Художник А. В. Исиченко. Техн. редактор Э. М. Чижевский. Корректор Г. И. Кострикова

Т-02880. Сдано в набор 6/X-75 г. Подп. к печати 10/III-76 г. Формат 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 3. Объем 24. Усл. п. л. 24. Уч.-изд. л. 21,62. Изд. № ЭР-193. Тираж 70 000 экз. Цена 86 коп. Зак. 191.

План выпуска литературы издательства «Высшая школа» для вузов и техникумов на 1976 г. Позиция № 130.
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Том II

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ
И ОСНОВЫ ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Под редакцией проф. П. А. Ионкина

**ИЗДАНИЕ второе,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ**

**Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов
электротехнических специальностей
вузов**



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1978

Рецензент — проф. Н. Г. Максимович
(Львовский государственный университет)

П. А. Ионкин, А. И. Даревский, Е. С. Кухаркин,
В. Г. Миронов, Н. А. Мельников

Теоретические основы электротехники. Том. II. Нелиней-
Т11 **ные цепи и основы теории электромагнитного поля.** Под
ред. П. А. Ионкина. Учебник для электротехн. вузов.
Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Высш. школа», 1976.

383 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: П. А. Ионкин, А. И. Даревский, Е. С. Ку-
харкин и др.

Учебник представляет собой второе издание одноименной книги, выпущен-
ной издательством «Высшая школа» в 1965 г. Второе издание подверглось суще-
ственной переработке и обновлению с целью приближения содержания курса к
современной практике расчета и проектирования электротехнических устройств.

Для удобства читателей книга выпускается в двух томах: том I — «Основы
теории линейных цепей», том II — «Нелинейные цепи. Основы теории электромаг-
нитного поля».

Предназначается в качестве учебника для студентов электротехнических спе-
циальностей вузов.

Т $\frac{30306-195}{001(01)-76}$ 130-76

6П2.1

ЧАСТЬ I

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

ГЛАВА 20

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСТОЯННЫХ ТОКАХ И НАПРЯЖЕНИЯХ

§ 20.1. Характерные нелинейности и графическое представление характеристик

Как указывалось, в реальных условиях все электрические и магнитные цепи являются нелинейными; линейными их можно считать в ограниченных диапазонах значений токов и напряжений. Например, при чрезмерно больших токах происходит значительный нагрев материала проводников, сопровождающийся резкими изменениями сопротивления и последующим изменением его физического состояния (например, расплавлением металла). При высоких напряжениях нарушаются свойства диэлектриков. Однако во многих случаях приходится считаться с нелинейностью параметров отдельных элементов электрических цепей при их нормальной работе в допустимом диапазоне значений токов и напряжений*.

Следует различать некоторые наиболее характерные нелинейности. Так, вольт-амперная характеристика нелинейного элемента может быть непрерывной и прерывистой, монотонной и немонотонной, однозначной и неоднозначной, симметричной и несимметричной.

К типичным примерам нелинейности с монотонной непрерывной вольт-амперной характеристикой относятся цепи, содержащие элементы с нагреваемыми до сравнительно высокой температуры металлическими проводниками (электрические лампы накаливания, нагревательные приборы и т. д.) (рис. 20.1), электровакуумные

* Здесь рассматриваются только установившиеся режимы нелинейных электрических цепей.

приборы, работающие на принципе газового разряда (рис. 20.2). Прерывистую (практически со скачком) характеристику могут иметь цепи с полупроводниковыми приборами. Неоднозначность вольт-амперной характеристики электрической цепи вызывается, например, элементом с магнитным сердечником при наличии гистерезиса. Нелинейность может быть обусловлена не только пассивными элементами цепи, в которых, как отмечено, происходит



Рис. 20.1

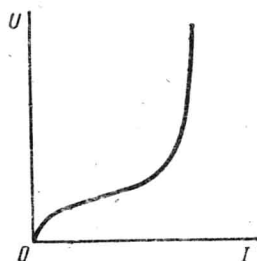


Рис. 20.2

преобразование электрической энергии в какую-либо другую форму, но и активными элементами, допускающими обратное преобразование энергии. На рис. 20.3 показаны примеры внешних характеристик различных генераторов постоянного тока.

Графическая зависимость напряжения на выходных зажимах источника питания от тока нагрузки — внешняя характеристика —

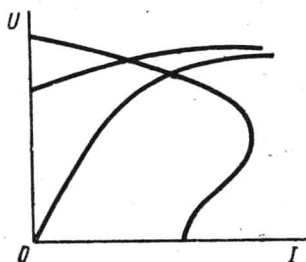


Рис. 20.3

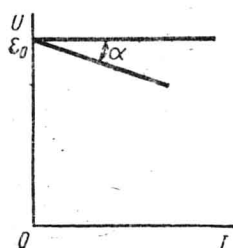


Рис. 20.4

позволяет исключить составление схемы замещения для этого источника, если расчет можно выполнить графическим методом. При этом предполагается, что положительное значение тока при положительном напряжении на зажимах соответствует генерированию электрической энергии, а отрицательное — потреблению.

Если внешняя характеристика источника электрической энергии линейна или линеаризована для некоторого диапазона значений токов и напряжений (рис. 20.4) и описывается уравнением

$$U = \mathcal{E}_0 - r_{\text{в}} I,$$

то ее начальная ордината $(U)_{I=0} = \mathcal{E}_0$ соответствует активному параметру эквивалентного двухполюсника, т. е. э. д. с., а тангенс угла наклона характеристики $\operatorname{tg} \alpha$ определяет внутреннее сопротивление, т. е. пассивный параметр активного двухполюсника (рис. 20.5):

$$r_{\text{в}} = m_r \operatorname{tg} \alpha,$$

где m_r — масштаб сопротивления.

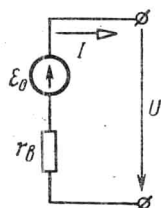


Рис. 20.5

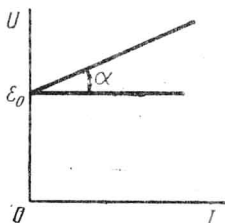


Рис. 20.6

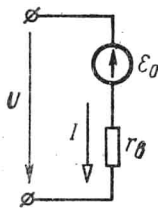


Рис. 20.7

Точка пересечения внешней характеристики с осью абсцисс определяет ток короткого замыкания:

$$I_{\text{к}} = (I)_{U=0} = \mathcal{E}_0 / r_{\text{в}}.$$

Графическая зависимость напряжения на входных зажимах любого двухполюсника от тока, т. е. вольт-амперная характеристика, освобождает от необходимости составления схемы замещения для этого двухполюсника, если расчет можно выполнить графическим методом. Если вольт-амперная характеристика (или ее участок) линейна (рис. 20.6) и описывается уравнением $U = \mathcal{E}_0 + r_{\text{в}} I$, то ее начальная ордината соответствует э. д. с. схемы замещения двухполюсника:

$$U_{\text{р}} = (U)_{I=0} = \mathcal{E}_0,$$

а $\operatorname{tg} \alpha$ определяет пассивный параметр (входное сопротивление): $r_{\text{в}} = m_r \operatorname{tg} \alpha$ (рис. 20.7). Если линейная вольт-амперная характеристика проходит через

начало координат, то $\mathcal{E}_0 = 0$ и цепь можно рассматривать как пассивную. Наконец, если двухполюсник имеет внешнюю характеристику $U_1(I)$, то при изменении направления тока ее можно представить в виде $U_2(I)$ и наоборот (рис. 20.8).

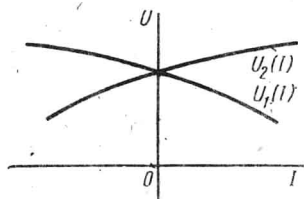


Рис. 20.8

§ 20.2. Графический метод расчета неразветвленных цепей с последовательным соединением линейных и нелинейных элементов

На рис. 20.9 показано последовательное соединение двух нелинейных элементов $r_1(I_1)$ и $r_2(I_2)$, вольт-амперные характеристики $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ которых показаны на рис. 20.10.

Пусть напряжение на зажимах цепи равно U . Требуется определить ток I и напряжения U_1 и U_2 на нелинейных элементах.

С этой целью строят вспомогательную характеристику для всей цепи, представляющую собой зависимость тока I от общего напряжения U . Поскольку в неразветвленной цепи $I_1 = I_2 = I$,

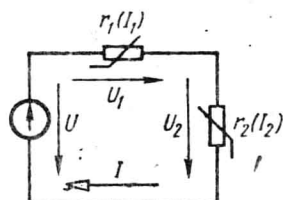


Рис. 20.9

то для построения характеристики $I(U_1 + U_2)$ необходимо просуммировать напряжения U_1 и U_2 для одних и тех же значений тока I (рис. 20.10). Если после этого отложить на оси абсцисс отрезок Oa , равный в масштабе напряжений m_U напряжению U , и из точки a провести прямую ab , параллельную оси ординат, до пересечения с кривой $I(U_1 + U_2)$, то получим отрезок ab , равный в масштабе токов m_I току I . Затем из точки b надо прове-

сти прямую bc , параллельную оси абсцисс. В результате получаются отрезки cd и cf , соответственно равные в масштабе m_U напряжениям U_1 и U_2 .

Аналогично рассчитывают цепь, состоящую из большего числа последовательно соединенных нелинейных элементов.

Графические построения для расчета последовательной цепи рис. 20.9 можно провести другим способом. Заданную схему можно представить в виде последовательного соединения нелинейного

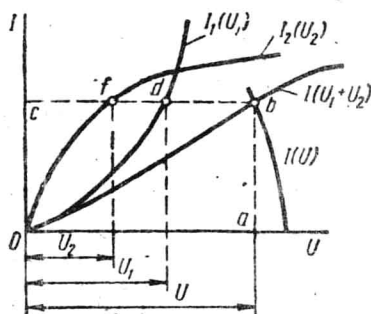


Рис. 20.10

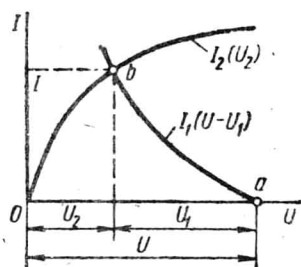


Рис. 20.11

активного двухполюсника с источником э. д. с. $\mathcal{E} = U$ и нелинейным сопротивлением $r_1(I_1)$ и нелинейного пассивного двухполюсника с нелинейным сопротивлением $r_2(I_2)$. Так как напряжение U_2 на зажимах нелинейного элемента $r_2(I_2)$ определяется, с одной стороны, вольт-амперной характеристикой этого элемента $I_2(U_2)$, а с другой — разностью между э. д. с. $\mathcal{E} = U$ и напряжением U_1 на зажимах нелинейного элемента $r_1(I_1)$, то точка b пересечения характеристик $I_2(U_2)$ и $I_2(U - U_1)$ (рис. 20.11) соответствует равенствам $U_2 = U - U_1$ и $I_1 = I_2 = I$, определяющим рабочий режим рассматриваемой цепи.

Пусть требуется определить ток и напряжения на участках цепи, изображенной на рис. 20.12, если внешняя характеристика источника энергии задана в виде графика $U_1(I)$, а вольт-амперная характеристика приемника является прямой $U_2(I)$, проходящей через начало координат (рис. 20.13). Точка a пересечения характеристик $U_1(I)$ и $U_2(I)$, очевидно, соответствует $U_1 = U_2 = U$ и $I_1 = I_2 = I$ и определяет искомые величины.

Если в неразветвленной цепи имеется несколько источников и приемников электрической энергии, то предварительно следует определить внешнюю характеристику для всех источников питания путем суммирования напряжений на зажимах источников при оди-

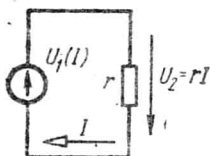


Рис. 20.12

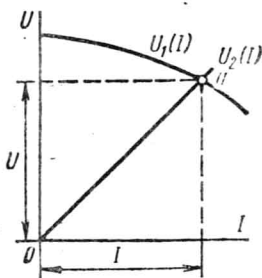


Рис. 20.13

наковых токах и вольт-амперную характеристику для всех приемников электрической энергии, а затем для нахождения тока и напряжений воспользоваться приведенным выше решением.

В заключение следует отметить, что если напряжение на зажимах источника (см. рис. 20.9) является функцией тока I [на рис. 20.10 кривая $I(U)$], то и в этом случае точка b пересечения характеристик $I(U)$ и $I(U_1 + U_2)$ дает возможность найти рабочий режим.

§ 20.3. Графический метод расчета цепей с параллельным соединением линейных и нелинейных элементов

Поскольку параллельное соединение ветвей характеризуется равенством напряжений на их зажимах, при графическом методе решения результирующую характеристику получают путем суммирования токов, соответствующих одинаковым напряжениям.

Для иллюстрации указанного метода можно, например, найти распределение токов между двумя параллельно включенными источниками питания (рис. 20.14, а), внешние характеристики которых приведены на рис. 20.14, б. Прежде всего следует просуммировать токи I_1 и I_2 с помощью заданных внешних характеристик (рис. 20.14, б). Для определения токов I_1 и I_2 в ветвях источников питания, например, по известному току I во внешней цепи необходимо провести линию, параллельную оси абсцисс, от точки характеристики $U(I_1 + I_2)$, соответствующей заданному значению тока I . Точки пересечения этой прямой с исходными характери-

стиками источников питания определяют значения токов в каждом из них. Токи в ветвях источников питания существенно зависят

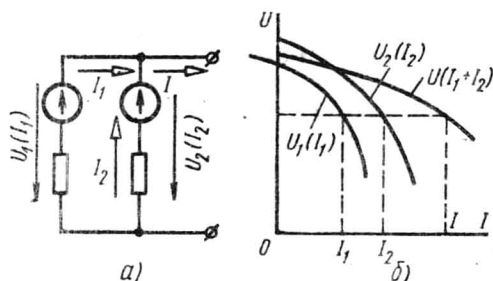


Рис. 20.14

соединенные нелинейные элементы $r_1(I_1)$ и $r_2(I_2)$, вольт-амперные характеристики которых $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ показаны на рис. 20.16.

Если напряжение на зажимах цепи задано равным U , то по вольт-амперным характеристикам $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ легко найти токи I_1 и I_2 , а на основании уравнения $I_1 + I_2 = I$ — ток в неразветвленной части цепи. Если задан ток I , то для определения напряжения U и токов I_1, I_2 (рис. 20.16) необходимо построить вспомогательную характеристику $I_1 + I_2 = I_{12}(U)$. Поскольку при параллельном соединении $U_1 = U_2 = U$, то в соответствии с уравнением $I_{12} = I_1 + I_2$ надо просуммировать ординаты кривых $I_1(U_1)$ и $I_2(U_2)$ для одних и тех же значений напряжения $U_1 = U_2$. Отложив на оси ординат отрезок Oc , равный в масштабе m_I току

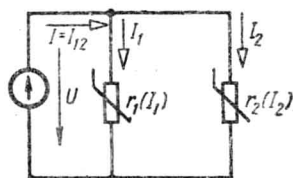


Рис. 20.15

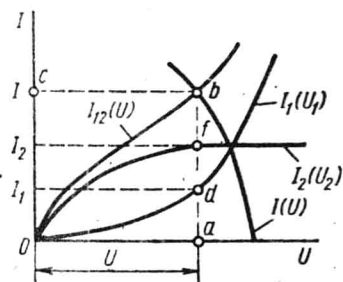


Рис. 20.16

то та же точка b пересечения характеристики $I_{12}(U)$ и $I(U)$ (рис. 20.16) определяет рабочий режим цепи.

Если параллельно включены несколько источников питания и приемников электрической энергии, то целесообразно сначала произвести суммирование характеристик отдельно для всех источников

от вида характеристик и только при одинаковых характеристиках они имеют одинаковые значения. При резко отличающихся характеристиках токи в ветвях источников могут иметь разные направления по отношению к направлениям э. д. с.

На рис. 20.15 изображены параллельно

$I = I_{12}$, и проведя из точки c прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой $I_1 + I_2 = I_{12}(U)$, легко найти напряжение $U = Oa/m_U$. Прямая ba , проведенная параллельно оси ординат до пересечения с вольт-амперными характеристиками нелинейных элементов, дает возможность непосредственно определить токи I_1 и I_2 (рис. 20.16). Если внешняя характеристика источника электрической энергии определяется кривой $I(U)$, изображенной на рис. 20.16,

и приемников электрической энергии, а затем определить режим, рассматривая цепь в виде последовательного соединения эквивалентных источника питания и приемника электрической энергии.

§ 20.4. Графический метод расчета цепей с последовательно-параллельным соединением линейных и нелинейных элементов

Применяя принципы расчета, рассмотренные выше, можно определить рабочий режим для любой цепи с последовательно-параллельным соединением элементов.

На рис. 20.17 изображена схема последовательно-параллельного соединения двух нелинейных и одного линейного элементов. Пусть заданы напряжение U , вольт-амперные характеристики нелинейных элементов и сопротивление r_3 линейного элемента. Требуется найти токи в ветвях и напряжения на элементах. В этом случае суммирование токов и напряжений, отложенных по осям координат, производят поочередно в зависимости от характера соединения соответствующих элементов. Сначала по заданному сопротивлению r_3 строят вольт-амперную характеристику в виде прямой, проходящей через начало координат (рис. 20.18).

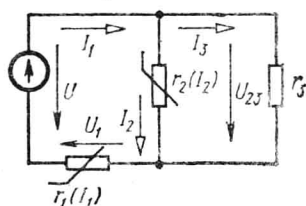


Рис. 20.17

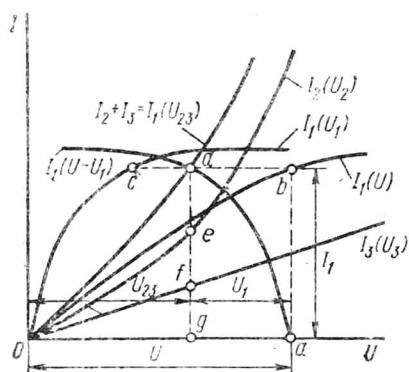


Рис. 20.18

Путем суммирования ординат кривой $I_2(U_2)$ и прямой $I_3(U_3)$ для одних и тех же значений напряжения $U_2 = U_3 = U_{23}$ строят вольт-амперную характеристику параллельного соединения $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$. При суммировании абсцисс кривых $I_1(U_1)$ и $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ для одних и тех же значений тока I_1 получают вольт-амперную характеристику всей цепи $I_1 = I_1(U_1 + U_{23}) = I_1(U)$. Затем откладывают в некотором масштабе m_U на оси абсцисс

напряжение U в виде отрезка Oa и проводят прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривой $I_1(U)$. В результате получают отрезок ab , определяющий в масштабе m_I ток I_4 . Из точки b проводят прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривыми $I_1(U_1)$ и $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ и из точки d опускают перпендикуляр на ось абсцисс. В соответствии с уравне-

ниями $U = U_1 + U_{23}$ и $I_1 = I_2 + I_3$ отрезки db и $cb = Og$ определяют в масштабе m_U соответственно напряжение U_1 на первом элементе и напряжение U_{23} на разветвлении, а отрезки ge и gf в масштабе m_I — токи I_2 и I_3 .

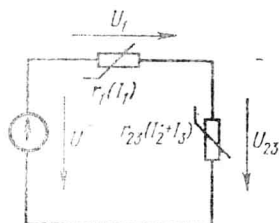


Рис. 20.19

Графические построения для расчета рассматриваемой цепи можно провести и другим способом. Для этого следует представить схему рис. 20.17 в виде последовательного соединения нелинейного активного двухполюсника с источником э. д. с. $\mathcal{E} = U$ и нелинейного сопротивлением $r_1(I_1)$ и нелинейного

пассивного двухполюсника, эквивалентного двум параллельным ветвям с элементами $r_2(I_2)$ и $r_3(I_3)$ (рис. 20.19). Точка d (см. рис. 20.18) пересечения кривых $I_1(U - U_1)$ и $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ определяет рабочий режим этой схемы.

§ 20.5. Графический метод расчета разветвленных цепей с нелинейными элементами

Те же приемы можно применить и для расчета более сложных цепей, особенно если они легко приводятся к последовательно-параллельным.

На рис. 20.20 показана разветвленная схема с тремя известными э. д. с. $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ и тремя нелинейными элементами, которые

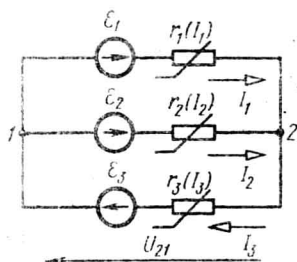


Рис. 20.20

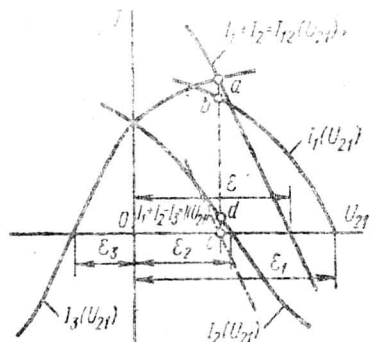


Рис. 20.21

для упрощения принимаем симметричными и одинаковыми (с одинаковыми вольт-амперными характеристиками). Требуется определить токи I_1, I_2 и I_3 .

При выбранных положительных направлениях токов на основании второго закона Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$U_{21} = \mathcal{E}_1 - U_1 = \mathcal{E}_2 - U_2 = -\mathcal{E}_3 + U_3,$$

где U_1 , U_2 и U_3 — напряжения на соответствующих нелинейных элементах.

С помощью заданной вольт-амперной характеристики на рис. 20.21 построены кривые:

$$I_1 = I_1(U_{21}) = I_1(\mathcal{E}_1 - U_1);$$

$$I_2 = I_2(U_{21}) = I_2(\mathcal{E}_2 - U_2);$$

$$I_3 = I_3(U_{21}) = I_3(-\mathcal{E}_3 + U_3).$$

Для определения токов в ветвях можно построить вспомогательную характеристику $I_1 + I_2 = I_{12}(U_{21})$ (рис. 20.21) путем суммирования токов I_1 и I_2 для одних и тех же значений напряжения U_{21} . Поскольку токи в ветвях должны удовлетворять первому закону Кирхгофа ($I_1 + I_2 = I_3$), ордината точки a пересечения кривых $I_3(U_{21})$ и $I_{12}(U_{21})$ определяет в масштабе m_I ток I_3 , а абсцисса той же точки a в масштабе m_U — напряжение U_{21} . Затем из точки a проводим прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с кривыми $I_1(U_{21})$ и $I_2(U_{21})$. В результате получаем отрезки cb и cd , определяющие токи I_1 и I_2 .

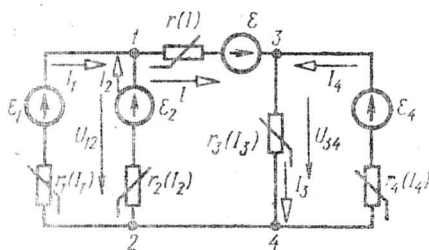


Рис. 20.22

Другим способом решения этой задачи является построение характеристики $I_1 + I_2 - I_3 = I(U_{21})$ вместо кривой $I_{12}(U_{21})$ (пунктирная кривая на рис. 20.21). Согласно первому закону Кирхгофа, $I_1 + I_2 - I_3 = 0$, поэтому решением этой задачи является точка с пересечения кривой $I(U_{21})$ с осью абсцисс.

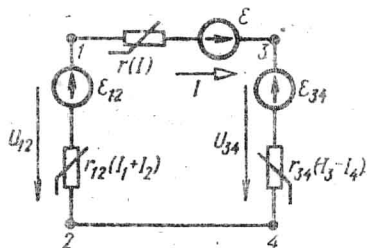


Рис. 20.23

Изложенный метод расчета можно распространить на более сложные цепи, состоящие из любого числа активных и пассивных нелинейных элементов с последовательно-параллельным соединением.

Например, в цепи рис. 20.22 следует заменить параллельно соединенные ветви эквивалентными двухполюсниками, а затем привести схему к последовательному соединению двухполюсников (рис. 20.23).

Расчет сложных цепей с нелинейными элементами можно свести к графическому методу расчета схем с последовательно-параллельным соединением активных и пассивных нелинейных элементов путем «перемещения» э. д. с. источника в другие ветви.

На рис. 20.24 изображена мостовая схема с нелинейными элементами пяти ветвей. Если в каждую ветвь, присоединенную, на-

пример, к узлу 3 (или к узлу 1), включить источник напряжения с э. д. с. $\mathcal{E}$, направленной от узла (на рис. 20.24 эти э. д. с. показаны пунктиром); то разность потенциалов между узлами 1 и 3 окажется равной нулю и эти узлы можно будет объединить. Токи во всех ветвях остаются без изменения, так как сумма э. д. с. в любом из кон-

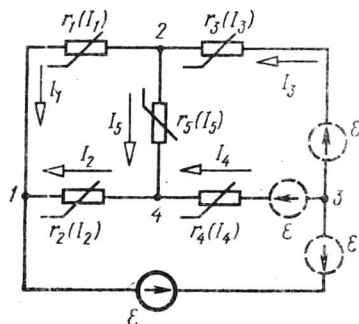


Рис. 20.24

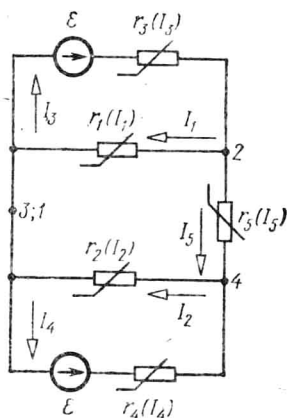


Рис. 20.25

туров, а также токи в узлах не изменяются. В результате указанного преобразования получается схема с последовательно-параллельным соединением элементов (рис. 20.25). Расчет такой схемы можно выполнить рассмотренным выше методом.

§ 20.6. Графо-аналитические методы расчета цепей с линейными и нелинейными элементами.

Применение уравнений линейных многополюсников

Если вольт-амперная характеристика нелинейного элемента задана или математически выражена в виде приближенных аналитических зависимостей $U = U(I)$, $r(I)$, $r(U)$ и т. п., то рабочий режим цепи с помощью схемы замещения можно определить решением системы уравнений.

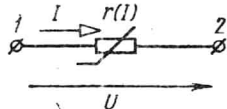


Рис. 20.26

В тех случаях, когда рабочий режим цепи приблизительно известен, вольт-амперную характеристику каждого нелинейного элемента (рис. 20.26) можно заменить линей-

ной, получаемой с помощью касательной к нелинейной характеристике в точке a предполагаемого режима (рис. 20.27). Начальная ордината этой касательной в масштабе m_U определяет э. д. с. линейной схемы замещения (рис. 20.28, a), а отношение приращений напряжения и тока или в пределе производная от напряжения по току в масштабе $m_r = m_U/m_I$ — дифференциальное сопротивление r_d . Величина этого сопротивления пропорциональна тангенсу угла α между касательной к вольт-амперной характеристике в точ-

ке a и осью абсцисс:

$$r_d = dU/dI = m_r \operatorname{tg} \alpha.$$

При расчете нелинейных электрических цепей иногда пользуются статическим сопротивлением, определяемым отношением напряжения к току; в масштабе m_r это сопротивление пропорционально $\operatorname{tg} \beta$.

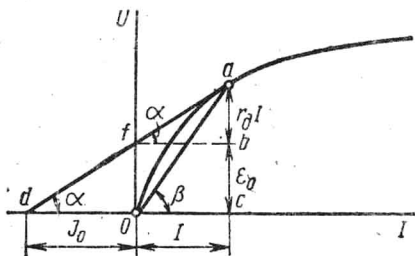


Рис. 20.27

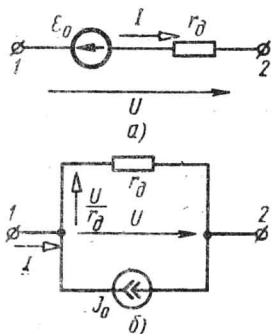


Рис. 20.28

Из рис. 20.27 следует, что на нелинейном элементе $r(I)$ (см. рис. 20.26) при рабочем режиме в точке a напряжение $U = \epsilon_0 + r_d I$. Путем деления этого выражения на r_d легко получить соотношение $U/r_d = \epsilon_0/r_d + I$, которому соответствует схема замещения с источником тока J_0 (рис. 20.28, б). Полезно подчеркнуть, что величина тока J_0 равна в масштабе m_I отрезку Od (см. рис. 20.27), отсекаемому на оси абсцисс продолжением касательной af , что легко показать с помощью соотношений между катетами треугольника dOf .

Если нелинейный элемент (см. рис. 20.26) имеет другую вольт-амперную характеристику (рис. 20.29), то при тех же положительных направлениях тока I и напряжения U на схемах замещения рис. 20.28, а, б изменятся направления э. д. с. ϵ_0 и тока J_0 , что легко обосновать с помощью построений, приведенных на рис. 20.29.

В случае, когда на некотором участке вольт-амперной характеристики пассивного элемента напряжение убывает при увеличении тока (рис. 20.30), дифференциальное сопротивление линейной схемы замещения получается отрицательным. В схеме замещения отрицательное сопротивление эквивалентно источнику электрической энергии. В случае пассивного нелинейного элемента энергия, потребляемая элементом схемы (в виде э. д. с.), частично возвра-

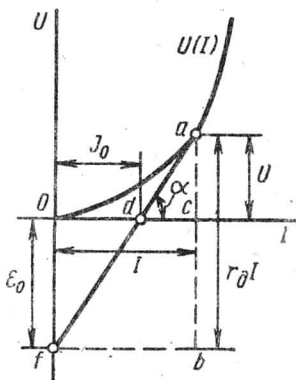


Рис. 20.29

идется в цепь через отрицательное сопротивление. В результате этого от внешнего источника потребляется энергия, определяемая мощностью UI . Такое перераспределение энергии обусловлено различием свойств элементов схемы в виде э. д. с. и сопротивлений, которые должны отображать свойства нелинейного элемента на данном участке вольт-амперной характеристики.

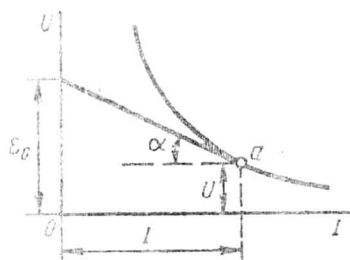


Рис. 20.30

что рабочий режим каждого нелинейного элемента соответствует тому участку вольт-амперной характеристики, который заменен линейной характеристикой. Если проверка показывает, что действительный рабочий режим достаточно далек от предполагаемого, то следует повторить расчет при линеаризации характеристики с помощью касательной, проведенной в другой рабочей точке. После повторного расчета требуется повторная проверка. Для достаточно сложных схем такой метод является весьма трудоемким и решение не всегда сходится.

Если рабочий режим нелинейных элементов задается из каких-либо условий, то нелинейность схемы устраняется, а расчет линейной части схемы выполняют по заданным условиям.

Расчет рабочего режима цепи с нелинейными элементами заметно упрощается, если линейную

часть схемы предварительно заменить эквивалентной, содержащей наименьшее возможное число элементов. Так, если в сложной схеме имеется лишь один нелинейный элемент (ветвь), то всю остальную — линейную — часть схемы можно рассматривать как активный двухполюсник и заменить одной э. д. с. и одним сопротивлением. Рабочий режим в упрощенной схеме легко определить, например, графическим методом или, как показано ниже, итерационным методом.

Если в сложной схеме имеется два нелинейных элемента (ветви), то в общем случае остальную — линейную — часть схемы

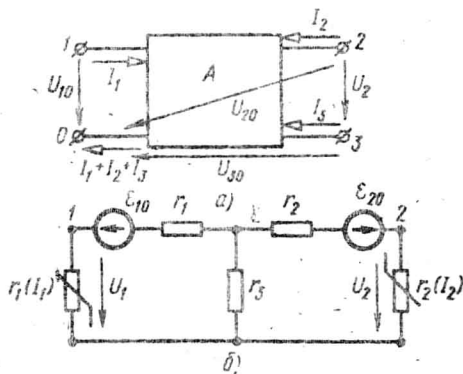


Рис. 20.31

можно рассматривать как активный четырехполюсник, который заменяется, например, схемой замещения в виде трехлучевой звезды.

Пусть два пассивных нелинейных элемента с заданными вольт-амперными характеристиками включены в сложную активную линейную схему (рис. 20.31, а). Можно считать, что первый нелинейный элемент (первая ветвь) включен между зажимами 1 и 0, а второй — между зажимами

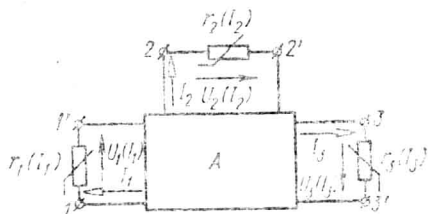


Рис. 20.32

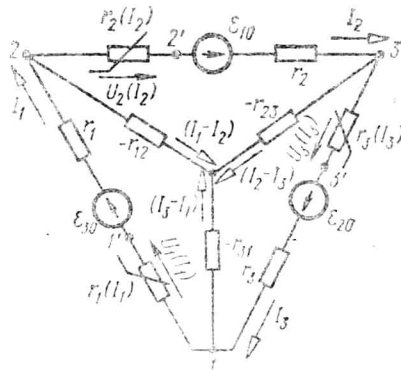


Рис. 20.33

2 и 3 схемы. Линейная часть схемы представляет собой четырехполюсник, для которого справедливы уравнения:

$$U_1 = U_{10} = \varphi_1 - \varphi_0 = r_{11} I_1 + r_{12} I_2 + r_{13} I_3 + \mathcal{E}_{10};$$

$$U_{20} = \varphi_2 - \varphi_0 = r_{21} I_1 + r_{22} I_2 + r_{23} I_3 + \mathcal{E}_{20};$$

$$U_{30} = \varphi_3 - \varphi_0 = r_{31} I_1 + r_{32} I_2 + r_{33} I_3 + \mathcal{E}_{30}.$$

Поскольку здесь $I_2 = -I_3$, а $U_{20} - U_{30} = U_3$, т. е. напряжению на втором нелинейном элементе, получим:

$$U_1 = (r_{11} + r_{12} - r_{13}) I_1 + (I_1 - I_2) (r_{13} - r_{12}) + \mathcal{E}_{10};$$

$$U_2 = -(r_{13} - r_{12}) (I_1 - I_2) + (r_{22} + r_{33} + r_{21} - r_{31} - 2r_{23}) I_2 + \mathcal{E}_{20}$$

или

$$U_1 = r_1 I_1 + (I_1 - I_2) r_3 + \mathcal{E}_{10};$$

$$U_2 = -r_3 (I_1 - I_2) + r_2 I_2 + \mathcal{E}_{20},$$

где

$$r_1 = r_{11} + r_{12} - r_{13}; \quad r_2 = r_{22} + r_{33} + r_{21} - r_{31} - 2r_{23};$$

$$r_3 = r_{13} - r_{12} \quad (r_{12} = r_{21}, \quad r_{13} = r_{31}, \quad r_{23} = r_{32}),$$

а э. д. с. $\mathcal{E}_{10} = \mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_{20} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3$ равны напряжениям соответственно на входных и выходных зажимах при одновременном размыкании ветвей с нелинейными элементами (рис. 20.31, а). Рабочий режим схемы замещения, показанной на рис. 20.31, б, находят графическим методом. По найденным значениям U_1 , I_1 , U_2 и I_2 определяют рабочий режим исходной схемы. Аналогично можно рассчитать сложную схему цепи с тремя нелинейными элементами