

# Электрические цепи постоянного тока и методы их расчета

## 1.1. Электрическая цепь и ее элементы

В электротехнике рассматривается устройство и принцип действия основных электротехнических устройств, используемых в быту и промышленности. Чтобы электротехническое устройство работало, должна быть создана электрическая цепь, задача которой передать электрическую энергию этому устройству и обеспечить ему требуемый режим работы.

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, ЭДС (электродвижущая сила) и электрическом напряжении.

Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения. Электрическая схема простейшей электрической цепи, обеспечивающей работу осветительной аппаратуры, представлена на рис. 1.1.

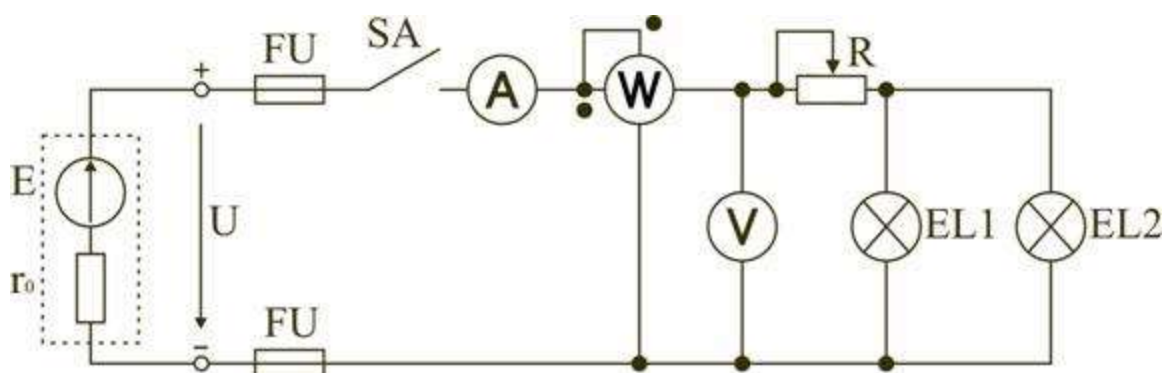


Рис. 1.1

Все устройства и объекты, входящие в состав электрической цепи, могут быть разделены на три группы:

### 1) Источники электрической энергии (питания).

Общим свойством всех источников питания является преобразование какого-либо вида энергии в электрическую. Источники, в которых происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую, называются первичными источниками. Вторичные источники – это такие источники, у которых и на входе, и на выходе – электрическая энергия (например, выпрямительные устройства).

### 2) Потребители электрической энергии.

Общим свойством всех потребителей является преобразование электроэнергии в другие виды энергии (например, нагревательный прибор). Иногда потребители называют нагрузкой.

3) Вспомогательные элементы цепи: соединительные провода, коммутационная аппаратура, аппаратура защиты, измерительные приборы и т.д., без которых реальная цепь не работает.

Все элементы цепи охвачены одним электромагнитным процессом.

В электрической схеме на рис. 1.1 электрическая энергия от источника ЭДС  $E$ , обладающего внутренним сопротивлением  $r_0$ , с помощью вспомогательных элементов цепи передается через регулировочный реостат  $R$  к потребителям (нагрузке): электрическим лампочкам  $EL1$  и  $EL2$ .

## 1.2. Основные понятия и определения для электрической цепи

Для расчета и анализа реальная электрическая цепь представляется графически в виде расчетной электрической схемы (схемы замещения). В этой схеме реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями, причем вспомогательные элементы цепи обычно не изображаются, а если сопротивление соединительных проводов намного меньше сопротивления других элементов цепи, его не учитывают. Источник питания показывается как источник ЭДС  $E$  с внутренним сопротивлением  $r_0$ , реальные потребители электрической энергии постоянного тока заменяются их электрическими параметрами: активными сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . С помощью сопротивления  $R$  учитывают способность реального элемента цепи необратимо преобразовывать электроэнергию в другие виды, например, тепловую или лучистую.

При этих условиях схема на рис. 1.1 может быть представлена в виде расчетной электрической схемы (рис. 1.2), в которой есть источник питания с ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $r_0$ , а потребители электрической энергии: регулировочный реостат  $R$ , электрические лампочки  $EL1$  и  $EL2$  заменены активными сопротивлениями  $R, R_1$  и  $R_2$ .

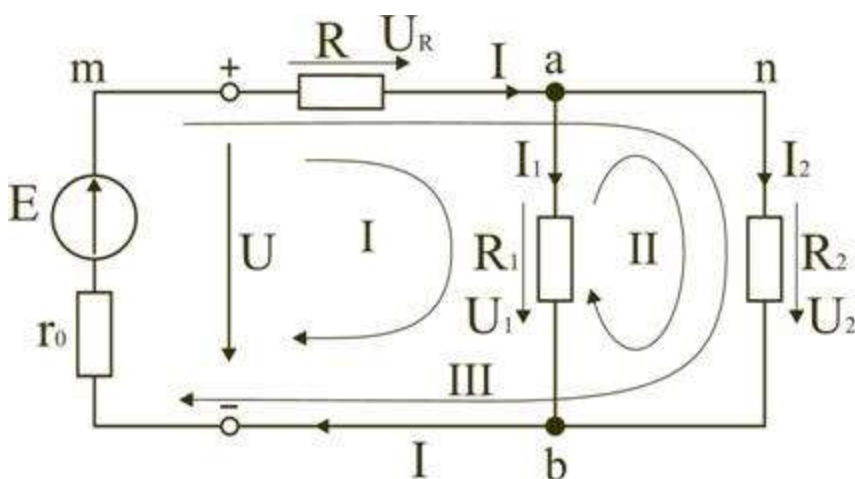


Рис. 1.2

Источник ЭДС на электрической схеме (рис. 1.2) может быть заменен источником напряжения  $U$ , причем условное положительное направление напряжения  $U$  источника задается противоположным направлением ЭДС.

При расчете в схеме электрической цепи выделяют несколько основных элементов.

Ветвь электрической цепи (схемы) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис. 1.2 имеет три ветви: ветвь  $bma$ , в которую включены элементы  $r_0, E, R$  и в которой возникает ток  $I$ ; ветвь  $ab$  с элементом  $R_1$  и током  $I_1$ ; ветвь  $amb$  с элементом  $R_2$  и током  $I_2$ .

Узел электрической цепи (схемы) – место соединения трех и более ветвей. В схеме на рис. 1.2 – два узла  $a$  и  $b$ . Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют параллельными. Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 1.2) находятся в параллельных ветвях.

Контур – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме на рис. 1.2 можно выделить три контура: I –  $bmaab$ ; II –  $amba$ ; III –  $manbm$ , на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

Условные положительные направления ЭДС источников питания, токов во всех ветвях, напряжений между узлами и на зажимах элементов цепи необходимо задать для правильной записи уравнений, описывающих процессы в электрической цепи или ее элементах. На схеме (рис. 1.2) стрелками укажем положительные направления ЭДС, напряжений и токов:

- а) для ЭДС источников – произвольно, но при этом следует учитывать, что полюс (зажим источника), к которому направлена стрелка, имеет более высокий потенциал по отношению к другому полюсу;
- б) для токов в ветвях, содержащих источники ЭДС – совпадающими с направлением ЭДС; во всех других ветвях произвольно;
- в) для напряжений – совпадающими с направлением тока в ветви или элемента цепи.

Все электрические цепи делятся на линейные и нелинейные.

Элемент электрической цепи, параметры которого (сопротивление и др.) не зависят от тока в нем, называют линейным, например электропечь.

Нелинейный элемент, например лампа накаливания, имеет сопротивление, величина которого увеличивается при повышении напряжения, а следовательно и тока, подводимого к лампочке.

Следовательно, в линейной электрической цепи все элементы – линейные, а нелинейной называют электрическую цепь, содержащую хотя бы один нелинейный элемент.

### **1.3. Основные законы цепей постоянного тока**

Расчет и анализ электрических цепей производится с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа. На основе этих законов устанавливается взаимосвязь между значениями токов, напряжений, ЭДС всей электрической цепи и отдельных ее участков и параметрами элементов, входящих в состав этой цепи.

#### **Закон Ома для участка цепи**

Соотношение между током  $I$ , напряжением  $U_R$  и сопротивлением  $R$  участка  $ab$  электрической цепи (рис. 1.3) выражается законом Ома

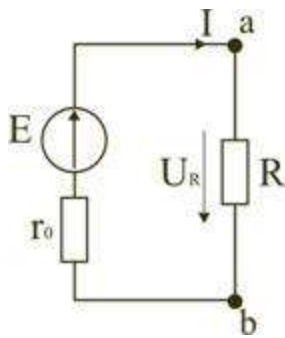


Рис. 1.3

(1.1)

$$I = \frac{U_R}{R} \text{ или } UR=RI.$$

В этом случае  $UR=RI$  – называют напряжением или падением напряжения на резисторе  $R$ ,

$$I = \frac{U_R}{R} \text{ – ток в резисторе } R.$$

При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением  $R$ , а величиной обратной сопротивлению, т.е. электрической проводимостью:

$$g = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}.$$

В этом случае закон Ома для участка цепи запишется в виде:

$$I=Ug.$$

### Закон Ома для всей цепи

Этот закон определяет зависимость между ЭДС  $E$  источника питания с внутренним сопротивлением  $r_0$  (рис. 1.3), током  $I$  электрической цепи и общим эквивалентным сопротивлением  $R_{\Sigma}=r_0+R$  всей цепи:

(1.2)

$$I = \frac{E}{R_{\Sigma}} = \frac{E}{r_0 + R}.$$

Сложная электрическая цепь содержит, как правило, несколько ветвей, в которые могут быть включены свои источники питания и режим ее работы не может быть описан только законом Ома. Но это можно выполнить на основании первого и второго законов Кирхгофа, являющихся следствием закона сохранения энергии.

### Первый закон Кирхгофа

В любом узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю

(1.3)

$$\sum_{K=1}^m I_K = 0$$

где  $m$  – число ветвей подключенных к узлу.

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут со знаком «плюс», а токи, направленные от узла – со знаком «минус». Например, для узла  $a$  (см. рис. 1.2)  $I - I_1 - I_2 = 0$ .

## Второй закон Кирхгофа

В любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на всех его участках

(1.4)

$$\sum_{K=1}^n E_K = \sum_{K=1}^m R_K I_K = \sum_{K=1}^m U_K$$

где  $n$  – число источников ЭДС в контуре;

$m$  – число элементов с сопротивлением  $R_k$  в контуре;

$U_k = R_k I_k$  – напряжение или падение напряжения на  $k$ -м элементе контура.

Для схемы (рис. 1.2) запишем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$E = UR + U_1.$$

Если в электрической цепи включены источники напряжений, то второй закон Кирхгофа формулируется в следующем виде: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура, включая источники ЭДС равна нулю

(1.5)

$$\sum_{K=1}^m U_K = 0$$

При записи уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо:

- 1) задать условные положительные направления ЭДС, токов и напряжений;
- 2) выбрать направление обхода контура, для которого записывается уравнение;
- 3) записать уравнение, пользуясь одной из формулировок второго закона Кирхгофа, причем слагаемые, входящие в уравнение, берут со знаком «плюс», если их условные положительные направления совпадают с обходом контура, и со знаком «минус», если они противоположны.

Запишем уравнения по II закону Кирхгофа для контуров электрической схемы (рис. 1.2):

контур I:  $E=RI+R_1I_1+r_0I$ ,

контур II:  $R_1I_1+R_2I_2=0$ ,

контур III:  $E=RI+R_2I_2+r_0I$ .

В действующей цепи электрическая энергия источника питания преобразуется в другие виды энергии. На участке цепи с сопротивлением  $R$  в течение времени  $t$  при токе  $I$  расходуется электрическая энергия

(1.6)

$$W=I^2Rt.$$

Скорость преобразования электрической энергии в другие виды представляет электрическую мощность

(1.7)

$$P = \frac{W}{t} = I^2R = UI$$

Из закона сохранения энергии следует, что мощность источников питания в любой момент времени равна сумме мощностей, расходуемой на всех участках цепи.

(1.8)

$$\sum EI = \sum I^2R$$

Это соотношение (1.8) называют уравнением баланса мощностей. При составлении уравнения баланса мощностей следует учесть, что если действительные направления ЭДС и тока источника совпадают, то источник ЭДС работает в режиме источника питания, и произведение  $EI$  подставляют в (1.8) со знаком плюс. Если не совпадают, то источник ЭДС работает в режиме потребителя электрической энергии, и произведение  $EI$  подставляют в (1.8) со знаком минус. Для цепи, показанной на рис. 1.2 уравнение баланса мощностей запишется в виде:

$$EI=I_2^2(r_0+R)+I_1^2R_1+I_2^2R_2.$$

При расчете электрических цепей используются определенные единицы измерения. Электрический ток измеряется в амперах (А), напряжение – в вольтах (В), сопротивление – в омах (Ом), мощность – в ваттах (Вт), электрическая энергия – ватт-час (Вт-час) и проводимость – в сименсах (См)

Кроме основных единиц используют более мелкие и более крупные единицы измерения: миллиампер ( $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$ ), килоампер ( $1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$ ), милливольт ( $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$ ), киловольт ( $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ ), килоом ( $1 \text{ k}\Omega = 10^3 \text{ }\Omega$ ), мегаом ( $1 \text{ M}\Omega = 10^6 \text{ }\Omega$ ), киловатт ( $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ ), киловатт-час ( $1 \text{ кВт-час} = 10^3 \text{ ватт-час}$ ).

## 1.4. Способы соединения сопротивлений и расчет эквивалентного сопротивления электрической цепи

Сопротивления в электрических цепях могут быть соединены последовательно, параллельно, по смешанной схеме и по схемам «звезда», «треугольник». Расчет сложной схемы упрощается, если сопротивления в этой схеме заменяются одним эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{экв}}$ , и вся схема представляется в виде схемы на рис. 1.3, где  $R=R_{\text{экв}}$ , а расчет токов и напряжений производится с помощью законов Ома и Кирхгофа.

### Электрическая цепь с последовательным соединением элементов

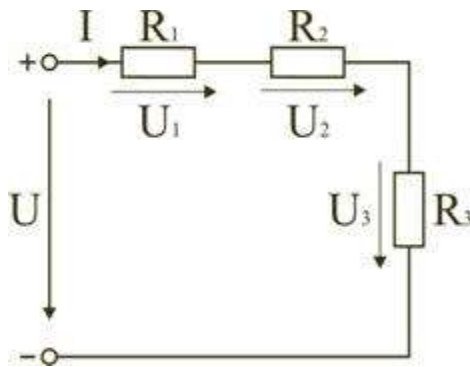


Рис. 1.4

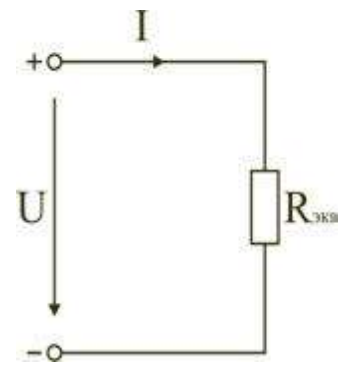


Рис. 1.5

Последовательным называют такое соединение элементов цепи, при котором во всех включенных в цепь элементах возникает один и тот же ток  $I$  (рис. 1.4).

На основании второго закона Кирхгофа (1.5) общее напряжение  $U$  всей цепи равно сумме напряжений на отдельных участках:

$$U=U_1+U_2+U_3 \text{ или } IR_{\text{экв}}=IR_1+IR_2+IR_3,$$

откуда следует

$$(1.5)$$

$$R_{\text{экв}}=R_1+R_2+R_3.$$

Таким образом, при последовательном соединении элементов цепи общее эквивалентное сопротивление цепи равно арифметической сумме сопротивлений отдельных участков. Следовательно, цепь с любым числом последовательно включенных сопротивлений можно заменить простой цепью с одним эквивалентным сопротивлением  $R_{\text{экв}}$  (рис. 1.5). После этого расчет цепи сводится к определению тока  $I$  всей цепи по закону Ома

$$I = \frac{U}{R_{\text{экв}}},$$

и по вышеприведенным формулам рассчитывают падение напряжений  $U_1, U_2, U_3$  на соответствующих участках электрической цепи (рис. 1.4).

Недостаток последовательного включения элементов заключается в том, что при выходе из строя хотя бы одного элемента, прекращается работа всех остальных элементов цепи.

### Электрическая цепь с параллельным соединением элементов

Параллельным называют такое соединение, при котором все включенные в цепь потребители электрической энергии, находятся под одним и тем же напряжением (рис. 1.6).

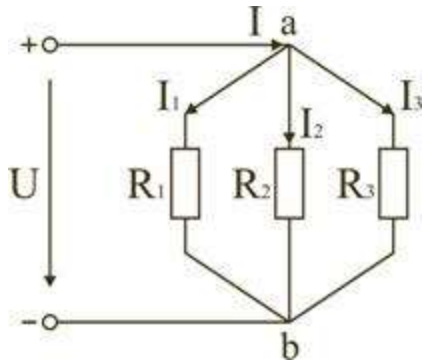


Рис. 1.6

В этом случае они присоединены к двум узлам цепи а и b, и на основании первого закона Кирхгофа (1.3) можно записать, что общий ток I всей цепи равен алгебраической сумме токов отдельных ветвей:

$$I=I_1+I_2+I_3, \text{ т.е. } \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

откуда следует, что

(1.6)

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

В том случае, когда параллельно включены два сопротивления \$R\_1\$ и \$R\_2\$, они заменяются одним эквивалентным сопротивлением

(1.7)

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

Из соотношения (1.6), следует, что эквивалентная проводимость цепи равна арифметической сумме проводимостей отдельных ветвей:

$$g_{\text{экв}}=g_1+g_2+g_3.$$



По мере роста числа параллельно включенных потребителей проводимость цепи гэкв возрастает, и наоборот, общее сопротивление  $R_{\text{экв}}$  уменьшается.

Напряжения в электрической цепи с параллельно соединенными сопротивлениями (рис. 1.6)

$$U = IR_{\text{экв}} = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

т.е. ток в цепи распределяется между параллельными ветвями обратно пропорционально их сопротивлениям.

По параллельно включенной схеме работают в номинальном режиме потребители любой мощности, рассчитанные на одно и то же напряжение. Причем включение или отключение одного или нескольких потребителей не отражается на работе остальных. Поэтому эта схема является основной схемой подключения потребителей к источнику электрической энергии.

### Электрическая цепь со смешанным соединением элементов

Смешанным называется такое соединение, при котором в цепи имеются группы параллельно и последовательно включенных сопротивлений.

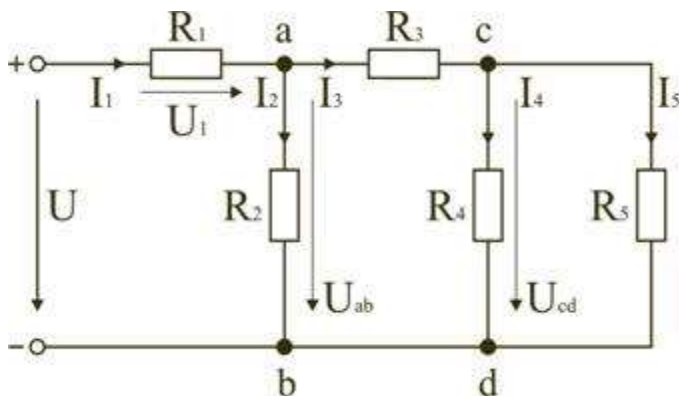


Рис. 1.7

Для цепи, представленной на рис. 1.7, расчет эквивалентного сопротивления начинается с конца схемы. Для упрощения расчетов примем, что все сопротивления в этой схеме являются одинаковыми:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$ . Сопротивления  $R_4$  и  $R_5$  включены параллельно, тогда сопротивление участка цепи  $cd$  равно:

$$R_{cd} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R R}{R + R} = \frac{R}{2}.$$

В этом случае исходную схему (рис. 1.7) можно представить в следующем виде (рис. 1.8):

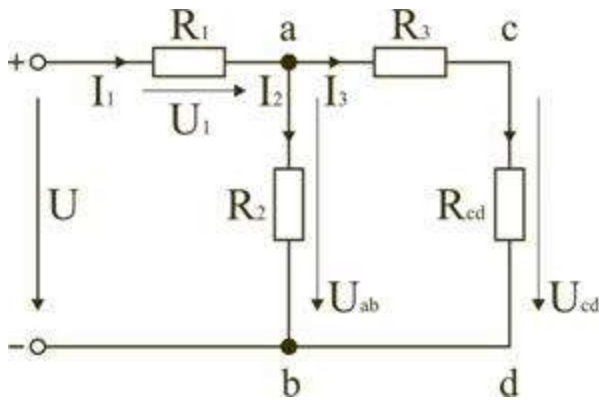


Рис. 1.8

На схеме (рис. 1.8) сопротивление  $R_3$  и  $R_{cd}$  соединены последовательно, и тогда сопротивление участка цепи  $ad$  равно:

$$R_{ad} = R_3 + R_{cd} = R + \frac{R}{2} = \frac{3}{2}R$$

Тогда схему (рис. 1.8) можно представить в сокращенном варианте (рис. 1.9):

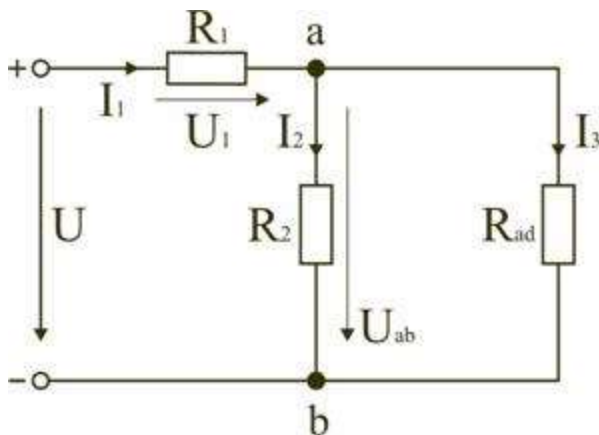


Рис. 1.9

На схеме (рис. 1.9) сопротивление  $R_2$  и  $R_{ad}$  соединены параллельно, тогда сопротивление участка цепи  $ab$  равно

$$R_{ab} = \frac{R_2 R_{ad}}{R_2 + R_{ad}} = \frac{R \cdot \frac{3}{2}R}{R + \frac{3}{2}R} = \frac{3}{5}R$$

Схему (рис. 1.9) можно представить в упрощенном варианте (рис. 1.10), где сопротивления  $R_1$  и  $R_{ab}$  включены последовательно.

Тогда эквивалентное сопротивление исходной схемы (рис. 1.7) будет равно:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_{ab} = R + \frac{3}{5}R = \frac{8}{5}R$$

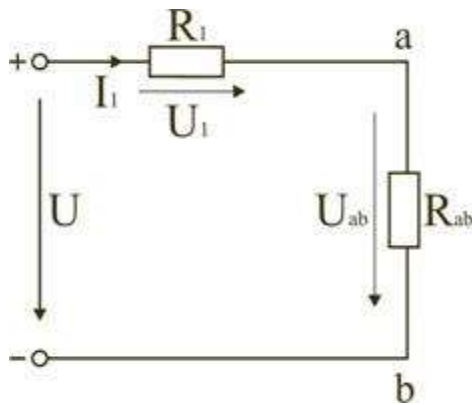


Рис. 1.10

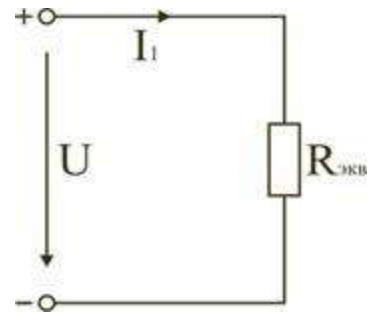


Рис. 1.11

В результате преобразований исходная схема (рис. 1.7) представлена в виде схемы (рис. 1.11) с одним сопротивлением  $R_{экв}$ . Расчет токов и напряжений для всех элементов схемы можно произвести по законам Ома и Кирхгофа.

### Соединение элементов электрической цепи по схемам «звезда» и «треугольник»

В электротехнических и электронных устройствах элементы цепи соединяются по мостовой схеме (рис. 1.12). Сопротивления  $R_{12}, R_{13}, R_{24}, R_{34}$  включены в плечи моста, в диагональ 1–4 включен источник питания с ЭДС  $E$ , другая диагональ 3–4 называется измерительной диагональю моста.

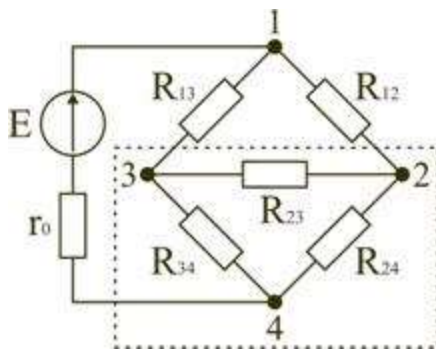


Рис. 1.12

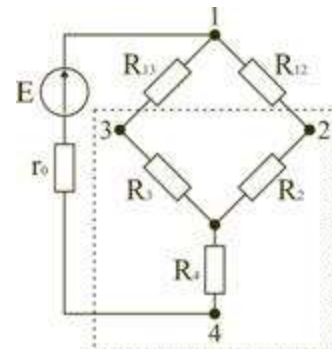


Рис. 1.13

В мостовой схеме сопротивления  $R_{13}, R_{12}, R_{23}$  и  $R_{24}, R_{34}, R_{23}$  соединены по схеме «треугольник». Эквивалентное сопротивление этой схемы можно определить только после замены одного из треугольников, например треугольника  $R_{24}R_{34}R_{23}$  звездой  $R_2R_3R_4$  (рис. 1.13). Такая замена будет эквивалентной, если она не вызовет изменения токов всех остальных элементов цепи. Для этого величины сопротивлений звезды должны рассчитываться по следующим соотношениям:

(1.8)

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{24}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}; \quad R_3 = \frac{R_{23}R_{34}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}; \quad R_4 = \frac{R_{24}R_{34}}{R_{23} + R_{24} + R_{34}}.$$

Для замены схемы «звезда» эквивалентным треугольником необходимо рассчитать сопротивления треугольника:

(1.9)

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_4}; \quad R_{24} = R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_3}; \quad R_{34} = R_3 + R_4 + \frac{R_3 R_4}{R_2}.$$

После проведенных преобразований (рис. 1.13) можно определить величину эквивалентного сопротивления мостовой схемы (рис. 1.12)

$$R_{\text{экв}} = \frac{(R_{12} + R_2)(R_{13} + R_3)}{(R_{12} + R_2) + (R_{13} + R_3)} + R_4.$$

## 1.5. Источник ЭДС и источник тока в электрических цепях

При расчете и анализе электрических цепей реальный источник электрической энергии с конечным значением величины внутреннего сопротивления  $r_0$  заменяют расчетным эквивалентным источником ЭДС или источником тока.

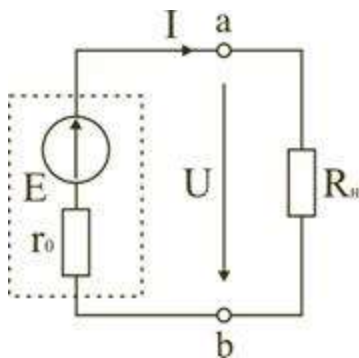


Рис. 1.14

Источник ЭДС (рис. 1.14) имеет внутреннее сопротивление  $r_0$ , равное внутреннему сопротивлению реального источника. Стрелка в кружке указывает направление возрастания потенциала внутри источника ЭДС.

Для данной цепи запишем соотношение по второму закону Кирхгофа

(1.10)

$$E = U + Ir_0 \quad \text{или} \quad E = U - Ir_0.$$

Эта зависимость напряжения  $U$  на зажимах реального источника от тока  $I$  определяется его вольт-амперной или внешней характеристикой (рис. 1.15). Уменьшение напряжения источника  $U$  при увеличении тока нагрузки  $I$  объясняется падением напряжения  $\Delta U = Ir_0$  на его внутреннем сопротивлении  $r_0$ .

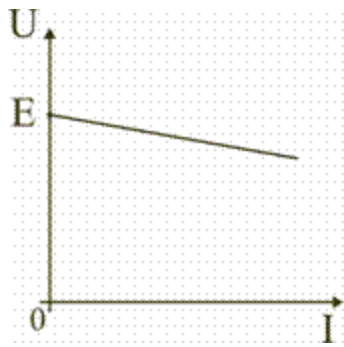


Рис. 1.15

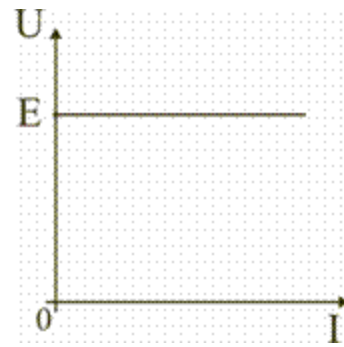


Рис. 1.16

У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление  $r_0 \ll R_n$  (приближенно  $r_0 \approx 0$ ). В этом случае его вольт-амперная характеристика представляет собой прямую линию (рис. 1.16), следовательно, напряжение  $U$  на его зажимах постоянно ( $U=E$ ) и не зависит от величины сопротивления нагрузки  $R_n$ .

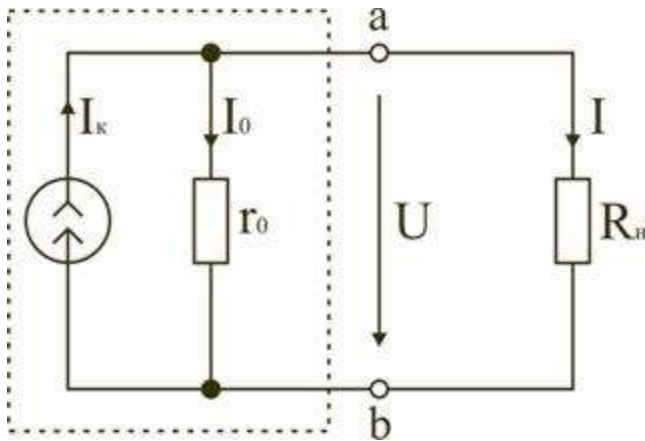


Рис. 1.17

Источник тока, заменяющий реальный источник электрической энергии, характеризуется неизменным по величине током  $I_k$ , равным току короткого замыкания источника ЭДС

$\left( I_k = \frac{E}{r_0} \right)$ , и внутренним сопротивлением  $r_0$ , включенным параллельно (рис. 1.17).

Стрелка в кружке указывает положительное направление тока источника. Для данной цепи запишем соотношение по первому закону Кирхгофа

$$I_k = I_0 + I; \quad I_0 = \frac{U}{r_0}.$$

В этом случае вольт-амперная (внешняя) характеристика  $I(U)$  источника тока определится соотношением

$$(1.11)$$

$$I = I_k - I_0 = I_k - U/r_0$$

и представлена на рис. 1.18.

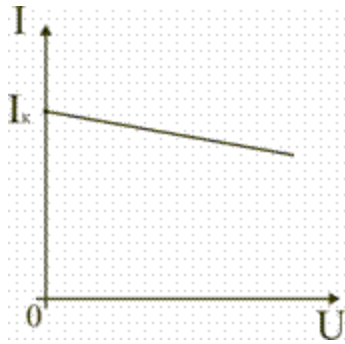


Рис. 1.18

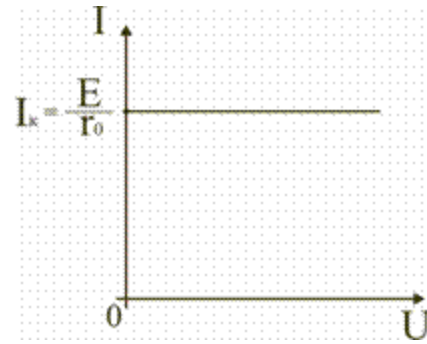


Рис. 1.19

Уменьшение тока нагрузки  $I$  при увеличении напряжения  $U$  на зажимах  $ab$  источника тока, объясняется увеличением тока  $I_0$ , замыкающегося в цепи источника тока.

В идеальном источнике тока  $r_0 \gg R_n$ . В этом случае можно считать, что при изменении сопротивления нагрузки  $R_n$  потребителя  $I_0 \approx 0$ , а  $I \approx I_k$ . Тогда из выражения (1.11) следует, что вольт-амперная характеристика  $I(U)$  идеального источника тока представляет прямую линию, проведенную параллельно оси абсцисс на уровне  $I = I_k = E/r_0$  (рис. 1.19).

При сравнении внешних характеристик источника ЭДС (рис. 1.15) и источника тока (рис. 1.18) следует, что они одинаково реагируют на изменение величины сопротивления нагрузки. Покажем, что в обоих случаях ток  $I$  в нагрузке определяется одинаковым соотношением.

Ток в нагрузке  $R_n$  для схем источника ЭДС (рис. 1.14) и источника тока (рис. 1.17)

$$I = \frac{E}{(r_0 + R_n)}$$

одинаков и равен

Для схемы (рис. 1.14) это следует из закона Ома, т.к. при последовательном соединении

сопротивления  $r_0$  и  $R_n$  складываются. В схеме (рис. 1.17) ток  $I_k = \frac{E}{r_0}$  распределяется обратно пропорционально сопротивлениям  $r_0$  и  $R_n$  двух параллельных ветвей. Ток в нагрузке  $R_n$

$$I = I_k \frac{r_0}{r_0 + R_n} = \frac{E}{r_0} \times \frac{r_0}{r_0 + R_n} = \frac{E}{r_0 + R_n},$$

т.е. совпадает по величине с током при подключении нагрузки к источнику ЭДС. Следовательно, схема источника тока (рис. 1.17) эквивалентна схеме источника ЭДС (рис. 1.14) в отношении энергии, выделяющейся в сопротивлении нагрузки  $R_n$ , но не эквивалентна ей в отношении энергии, выделяющейся во внутреннем сопротивлении источника питания.

Каким из двух эквивалентных источников питания пользоваться, не играет существенной роли. Однако на практике, особенно при расчете электротехнических устройств, чаще используется в качестве источника питания источник ЭДС с внутренним сопротивлением  $r_0$  и величиной электродвижущей силы  $E$ .

В тех случаях, когда номинальное напряжение или номинальный ток и мощность источника электрической энергии оказываются недостаточными для питания потребителей, вместо одного используют несколько источников. Существуют два основных способа соединения источников питания: последовательное и параллельное.

Последовательное включение источников питания (источников ЭДС) применяется тогда, когда требуется создать напряжение требуемой величины, а рабочий ток в цепи меньше или равен номинальному току одного источника ЭДС (рис. 1.20).

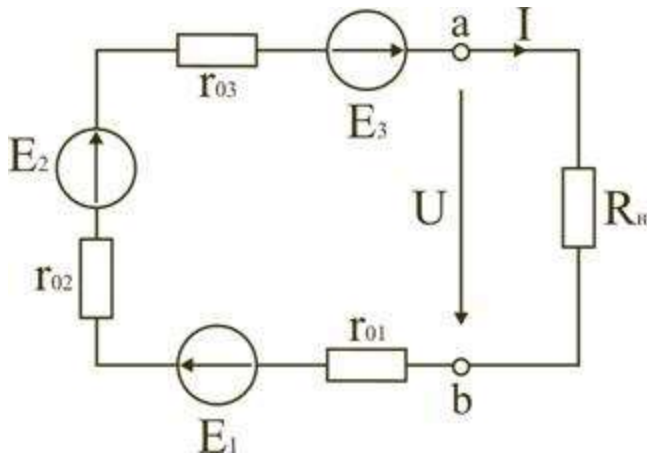


Рис. 1.20

Для этой цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$E_1 + E_2 + E_3 = I(r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_{\text{н}}),$$

откуда

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_{\text{н}}} = \frac{E_3}{r_3 + R_{\text{н}}}.$$

Таким образом, электрическая цепь на рис. 1.20 может быть заменена цепью с эквивалентным источником питания (рис. 1.21), имеющим ЭДС  $E_3$  и внутреннее сопротивление  $r_3$ .

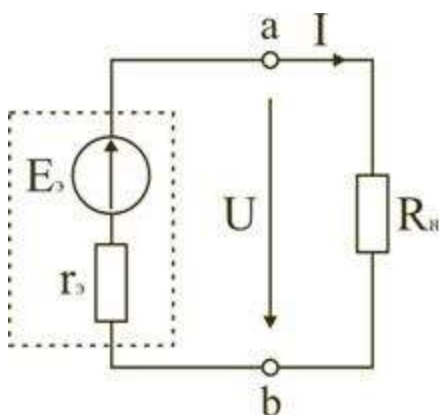


Рис. 1.21

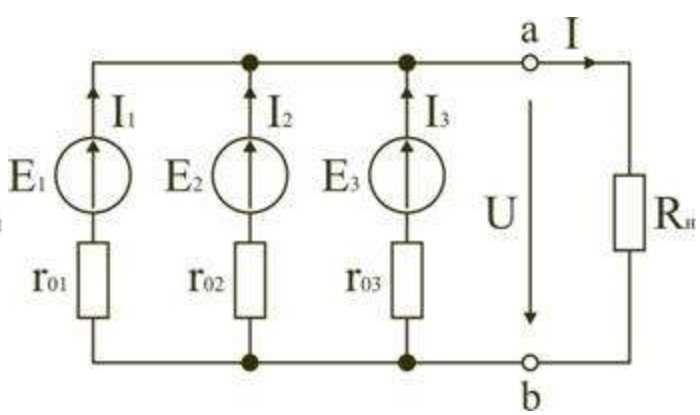


Рис. 1.22

При параллельном соединении источников (рис. 1.22) соединяются между собой положительные выводы всех источников, а также их отрицательные выводы. Характерным для параллельного соединения является одно и то же напряжение  $U$  на выводах всех источников. Для электрической цепи на рис. 1.22 можно записать следующие уравнения:

$$I=I_1+I_2+I_3; P=P_1+P_2+P_3=UI_1+UI_2+UI_3=UI.$$

Как видно, при параллельном соединении источников ток и мощность внешней цепи равны соответственно сумме токов и мощностей источников. Параллельное соединение источников применяется в первую очередь тогда, когда номинальные ток и мощность одного источника недостаточны для питания потребителей. На параллельную работу включают обычно источники с одинаковыми ЭДС, мощностями и внутренними сопротивлениями.

## 1.6. Режимы работы электрической цепи

При подключении к источнику питания различного количества потребителей или изменения их параметров будут изменяться величины напряжений, токов и мощностей в электрической цепи, от значений которых зависит режим работы цепи и ее элементов.

Реальная электрическая цепь может быть представлена в виде активного и пассивного двухполюсников (рис. 1.23).

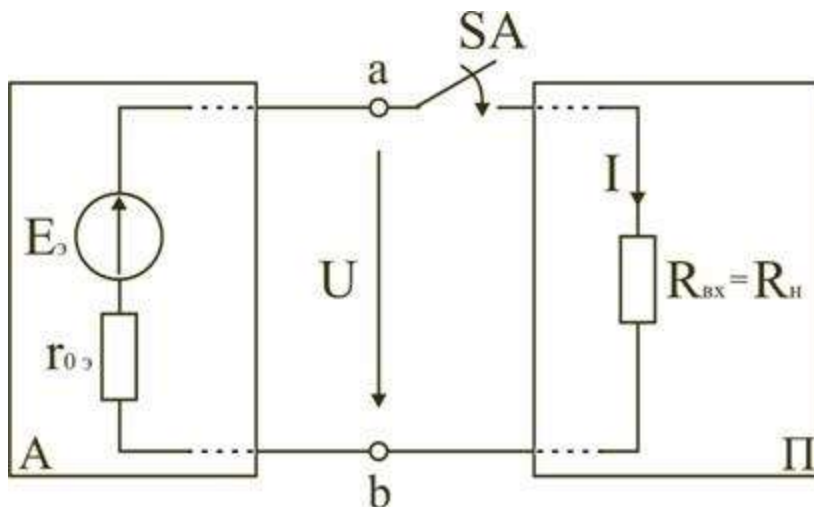


Рис. 1.23

Двухполюсником называют цепь, которая соединяется с внешней относительно нее частью цепи через два вывода а и b – полюса.

Активный двухполюсник содержит источники электрической энергии, а пассивный двухполюсник их не содержит. Для расчета цепей с двухполюсниками реальные активные и пассивные элементы цепи представляются схемами замещения. Схема замещения пассивного двухполюсника П представляется в виде его входного сопротивления

$$R_{\text{вх}} = \frac{U}{I}.$$



Схема замещения активного двухполюсника А представляется эквивалентным источником с ЭДС  $E_э$  и внутренним сопротивлением  $r_{0э}$ , нагрузкой для которого является входное сопротивление пассивного двухполюсника  $R_{вх}=R_n$ .

Режим работы электрической цепи (рис. 1.23) определяется изменениями параметров пассивного двухполюсника, в общем случае величиной сопротивления нагрузки  $R_n$ . При анализе электрической цепи рассматривают следующие режимы работы: холостого хода, номинальный, короткого замыкания и согласованный.

Работа активного двухполюсника под нагрузкой  $R_n$  определяется его вольт-амперной (внешней) характеристикой, уравнение которой (1.10) для данной цепи запишется в виде

(1.12)

$$U = E_э - I r_{0э}.$$

Эта вольт-амперная характеристика строится по двум точкам 1 и 2 (рис. 1.24), соответствующим режимам холостого хода и короткого замыкания.

## 1. Режим холостого хода

В этом режиме с помощью ключа SA нагрузка  $R_n$  отключается от источника питания (рис. 1.23). В этом случае ток в нагрузке становится равным нулю, и как следует из соотношения (1.12) напряжение на зажимах ab становится равным ЭДС  $E_э$  и называется напряжением холостого хода  $U_{хх}$

$$U = U_{хх} = E_э.$$

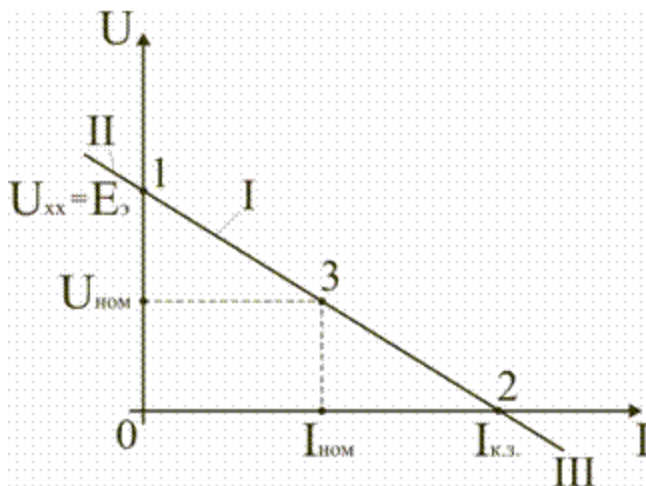


Рис. 1.24

## 2. Режим короткого замыкания

В этом режиме ключ SA в схеме электрической цепи (рис. 1.23) замкнут, а сопротивление  $R_n=0$ . В этом случае напряжение  $U$  на зажимах ab становится равным нулю, т.к.  $U=IR_n$ , а уравнение (1.12) вольт-амперной характеристики можно записать в виде

(1.13)

$$I = I_{к.з} = \frac{E_э}{r_{оэ}}$$

Значение тока короткого замыкания  $I_{к.з}$  соответствует т.2 на вольт-амперной характеристике (рис. 1.24).

Анализ этих двух режимов показывает, что при расчете электрических цепей параметры активного двухполюсника  $E_э$  и  $r_{оэ}$  могут быть определены по результатам режимов холостого хода и короткого замыкания:

(1.14)

$$r_{оэ} = \frac{U_{хх}}{I_{к.з}}$$

$E_э = U_{хх}$ ;

При изменении тока в пределах  $0 \leq I \leq I_x$  активной двухполюсник (эквивалентный источник) отдает энергию во внешнюю цепь (участок I вольт-амперной характеристики на рис. 1.24). При токе  $I < 0$  (участок II) источник получает энергию из внешней цепи, т.е. работает в режиме потребителя электрической энергии. Это произойдет, если к зажимам аb двухполюсника присоединена внешняя цепь с источниками питания. При напряжении  $U < 0$  (участок III) резисторы активного двухполюсника потребляют энергию источников из внешней цепи и самого активного двухполюсника.

### 3. Номинальный режим

Номинальный режим электрической цепи обеспечивает технические параметры как отдельных элементов, так и всей цепи, указанные в технической документации, в справочной литературе или на самом элементе. Для разных электротехнических устройств указывают свои номинальные параметры. Однако три основных параметра указываются практически всегда: номинальное напряжение  $U_{ном}$ , номинальная мощность  $P_{ном}$  и номинальный ток  $I_{ном}$ .

Работа активного двухполюсника под нагрузкой в номинальном режиме определяется уравнением (1.12), записанном для номинальных параметров

(1.15)

$$U_{ном} = E_э - I_{ном} r_{оэ}.$$

На вольт-амперной характеристике (рис. 1.24) это уравнение определяется точкой 3 с параметрами  $U_{ном}$  и  $I_{ном}$ .

### 4. Согласованный режим

Согласованный режим электрической цепи обеспечивает максимальную передачу активной мощности от источника питания к потребителю. Определим параметры электрической цепи (рис. 1.23), обеспечивающие получение согласованного режима. При подключении нагрузки  $R_n$  к активному двухполюснику (рис. 1.23) в ней возникает ток

$$I = \frac{E_3}{r_{03} + R_n}$$

При этом на нагрузке выделится активная мощность

(1.16)

$$P = I^2 R_n = \frac{E_3^2}{(r_{03} + R_n)^2} R_n$$

Определим соотношение между сопротивлением нагрузки  $R_n$  и внутренним сопротивлением  $r_{03}$  эквивалентного источника ЭДС, при котором в сопротивлении нагрузки  $R_n$  выделяется максимальная мощность при неизменных значениях  $E_3$  и  $r_{03}$ . С этой целью определим первую производную  $P$  по  $R_n$  и приравняем ее к нулю:

$$\frac{dP}{dR_n} = \frac{(r_{03} + R_n)^2 E^2 - 2(r_{03} + R_n) R_n E^2}{(r_{03} + R_n)^2} = \frac{E^2}{(r_{03} + R_n)^2} (r_{03}^2 - R_n^2) = 0$$

Так как выражение в знаменателе – конечное, то, отбрасывая не имеющее физического смысла решение  $R_n = -r_{03}$ , получим, что значение сопротивления нагрузки, согласованное с сопротивлением источника

(1.17)

$$R_n = r_{03}$$

Можно найти вторую производную и убедиться в том, что она отрицательна поэтому соотношение (1.17) соответствует максимуму функции  $P = F(R_n)$ .

$$\left( \frac{d^2 P}{dR_n^2} < 0 \right),$$

Подставив (1.17) в (1.16), получим значение максимальной мощности, которая может выделена в нагрузке  $R_n$

(1.18)

$$P_{\max} = \frac{E_3^2}{4r_{03}}$$

Полезная мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется уравнением (1.16). Полная активная мощность, выделяемая активным двухполюсником,

$$P_{\text{полн}} = E_3 I = \frac{E_3^2}{r_{03} + R_n}$$

Коэффициент полезного действия

(1.19)

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{R_{\text{н}}}{r_{\text{оэ}} + R_{\text{н}}}$$

если  $R_{\text{н}}=r_{\text{оэ}}$ , то  $\eta = 0,5$ .

Для мощных электротехнических устройств такое низкое значение КПД недопустимо. Но в электронных устройствах и схемах, где величина  $P$  измеряется в милливаттах, с низким КПД можно не считаться, поскольку в этом режиме обеспечивается максимальная передача мощности на нагрузку.

## 1.7. Расчет электрических цепей с использованием законов Ома и Кирхгофа

Законы Ома и Кирхгофа используют, как правило, при расчете относительно простых электрических цепей с небольшим числом контуров, хотя принципиально с их помощью можно рассчитать сколь угодно сложные электрические цепи.

При расчете электрических цепей в большинстве случаев известны параметры источников ЭДС или напряжения, сопротивления элементов электрической цепи, и задача сводится к определению токов в ветвях цепи. Зная токи, можно найти напряжения на элементах цепи, мощность, потребляемую отдельными элементами и всей цепью в целом, мощность источников питания и др.

### Расчет цепи с одним источником питания

Электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 1.25, состоит из одного источника питания, имеющего ЭДС  $E$  и внутреннее сопротивление  $r_0$ , и резисторов  $R_1, R_2, R_3$ , подключенных к источнику по смешанной схеме. Операции расчета такой схемы рекомендуется производить в определенной последовательности.

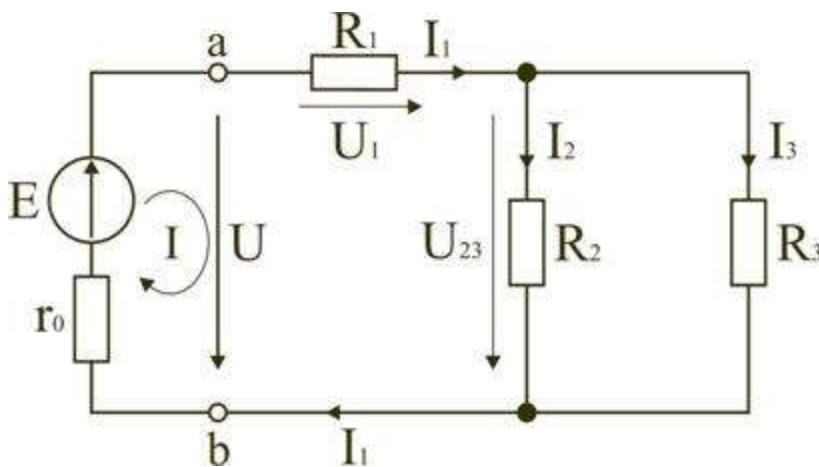


Рис. 1.25

1. Обозначение токов и напряжений на участках цепи.

Резистор R1 включен последовательно с источником, поэтому ток I1 для них будет общим, токи в резисторах R2 и R3 обозначим соответственно I2 и I3. Аналогично обозначим напряжения на участках цепи.

2. Расчет эквивалентного сопротивления цепи.

Резисторы R2 и R3 включены по параллельной схеме и заменяются согласно (1.7) эквивалентным сопротивлением:

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

В результате цепь на рис. 1.25 преобразуется в цепь с последовательно соединенными резисторами R1, R23 и r0. Тогда эквивалентное сопротивление всей цепи запишется в виде:

$$R_{\Sigma} = r_0 + R_1 + R_{23}$$

3. Расчет тока в цепи источника. Ток I1 определим по закону Ома (1.2):

$$I_1 = U / R_{\Sigma}$$

4. Расчет напряжений на участках цепи. По закону Ома (1.1) определим величины напряжений:

$$U_1 = I_1 R_1; \quad U_{23} = I_1 R_{23}$$

Напряжение U на зажимах ab источника питания определим по второму закону Кирхгофа (1.4) для контура I (рис. 1.25):

$$E = I_1 r_0 + U; \quad U = E - I_1 r_0.$$

5. Расчет токов и мощностей для всех участков цепи. Зная величину напряжения U23, определим по закону Ома токи в резисторах R2 и R3:

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{23}}{R_3}.$$

По формуле (1.8) определим величину активной электрической мощности, отдаваемую источником питания потребителям электрической энергии:

$$P = EI_1.$$

В элементах схемы расходуются активные мощности:

$$P_1 = I_1^2 R_1; \quad P_2 = I_2^2 R_2; \quad P_3 = I_3^2 R_3.$$

На внутреннем сопротивлении r0 источника питания расходуется часть электрической мощности, отдаваемой источником. Эту мощность называют мощностью потерь  $\Delta P$ :

$$\Delta P = I_1^2 r_0.$$

6. Проверка правильности расчетов. Эта проверка производится составлением уравнения баланса мощностей (1.8): мощность, отдаваемая источником питания, должна быть равна сумме мощностей, расходуемых в резистивных элементах схемы:

$$EI_1 = I_1^2(r_0 + R_1) + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3.$$

Кроме того, правильность вычисления токов можно проверить, составив уравнение по первому закону Кирхгофа (1.3) для узла схемы:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

### Расчет разветвленной электрической цепи с несколькими источниками питания

Основным методом расчета является метод непосредственного применения первого и второго законов Кирхгофа.

В качестве примера рассмотрим цепь, схема которой приведена на рис. 1.26. Схема цепи содержит 6 ветвей ( $m=6$ ) и 4 узла: a, b, c, d ( $n=4$ ). По каждой ветви проходит свой ток, следовательно число неизвестных токов равно числу ветвей, и для определения токов необходимо составить  $m$  уравнений. При этом по первому закону Кирхгофа (1.3) составляют уравнения для  $(n-1)$  узлов. Недостающие  $m-(n-1)$  уравнения получают по второму закону Кирхгофа (1.4), составляя их для  $m-(n-1)$  взаимно независимых контуров. Рекомендуется выполнять операции расчета в определенной последовательности.

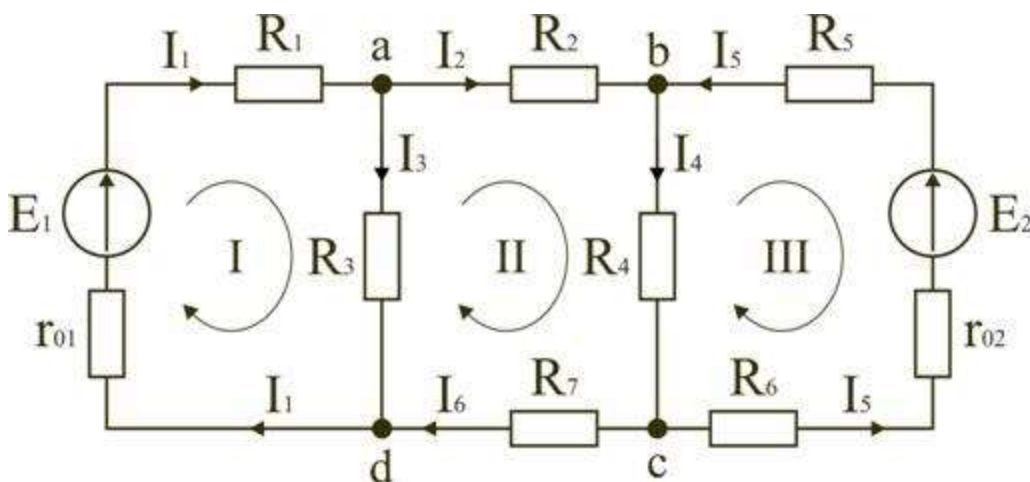


Рис. 1.26

1. Обозначение токов во всех ветвях. Направление токов выбираем произвольно, но в цепях с источниками ЭДС рекомендуются, чтобы направление токов совпадало с направлением ЭДС.

2. Составление уравнений по первому закону Кирхгофа. Выбираем  $4-1=3$  узла (a, b, c) и для них записываем уравнения:

узел a:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0;$

узел b:  $I_2 - I_4 + I_5 = 0$ ;

узел c:  $I_4 - I_5 + I_6 = 0$ .

3. Составление уравнений по второму закону Кирхгофа. Необходимо составить  $6 - 3 = 3$  уравнения. В схеме на рис. 1.26 выбираем контура I, II, III и для них записываем уравнения:

контур I:  $E_1 = I_1(r_{01} + R_1) + I_3 R_3$ ;

контур II:  $0 = I_2 R_2 + I_4 R_4 + I_6 R_7 - I_3 R_3$ ;

контур III:  $-E_2 = -I_5(r_{02} + R_5 + R_6) - I_4 R_4$ .

4. Решение полученной системы уравнений и анализ результатов. Полученная система из шести уравнений решается известными математическими методами. Если в результате расчетов численное значение тока получено со знаком «минус», это означает, что реальное направление тока данной ветви противоположно принятому в начале расчета. Если в ветвях с ЭДС токи совпадают по направлению с ЭДС, то данные элементы работают в режиме источников, отдавая энергию в схему. В тех ветвях, где направления тока и ЭДС не совпадают, источники ЭДС работают в режиме потребителя.

5. Проверка правильности расчетов. Для проверки правильности произведенных расчетов можно на основании законов Кирхгофа написать уравнения для узлов и контуров схемы, которые не использовались при составлении исходной системы уравнений:

узел d:  $I_3 + I_6 - I_1 = 0$

внешний контур схемы:  $E_1 - E_2 = I_1(r_{01} + R_1) + I_2 R_2 - I_5(r_{02} + R_5 + R_6) + I_6 R_7$ .

Независимой проверкой является составление уравнения баланса мощностей (1.8) с учетом режимов работы элементов схемы с ЭДС:

$$E_1 I_1 + E_2 I_5 = I_1^2 (r_{01} + R_1) + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 (r_{02} + R_5 + R_6) + I_6^2 R_7.$$

Если активная мощность, поставляемая источниками питания, равна по величине активной мощности, израсходованной в пассивных элементах электрической цепи, то правильность расчетов подтверждена.

## 1.8. Основные методы расчета сложных электрических цепей

С помощью законов Ома и Кирхгофа в принципе можно рассчитать электрические цепи любой сложности. Однако решение в этом случае может оказаться слишком громоздким и потребует больших затрат времени. По этой причине для расчета сложных электрических цепей разработаны на основе законов Ома и Кирхгофа более рациональные методы расчета, два из которых: метод узлового напряжения и метод эквивалентного генератора, рассмотрены ниже.

### Метод узлового напряжения

Этот метод рекомендуется использовать в том случае, если сложную электрическую схему можно упростить, заменяя последовательно и параллельно соединенные резисторы эквивалентными, используя при необходимости преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду. Если полученная схема содержит несколько параллельно соединенных активных и пассивных ветвей, как, например, схема на рис. 1.27, то ее расчет и анализ весьма просто можно произвести методом узлового напряжения.

Пренебрегая сопротивлением проводов, соединяющих ветви цепи, в ее схеме (рис. 1.27) можно выделить два узла: а и б. В зависимости от значений и направлений ЭДС и напряжений, а также значений сопротивлений ветвей между узловыми точками а и б установится определенное узловое напряжение  $U_{ab}$ . Предположим, что оно направлено так, как показано на рис. 1.27, и известно. Зная напряжение  $U_{ab}$  легко найти токи во всех ветвях.

Выберем положительные направления токов и обозначим их на схеме. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров (1.4), проходящих по первой и второй ветви, содержащих источники ЭДС, совершая обход контуров по часовой стрелке.

Первая ветвь:  $E_1 = I_1(r_{01} + R_1) + U_{ab}$ .

Вторая ветвь:  $-E_2 = -I_2(r_{02} + R_2) + U_{ab}$ .

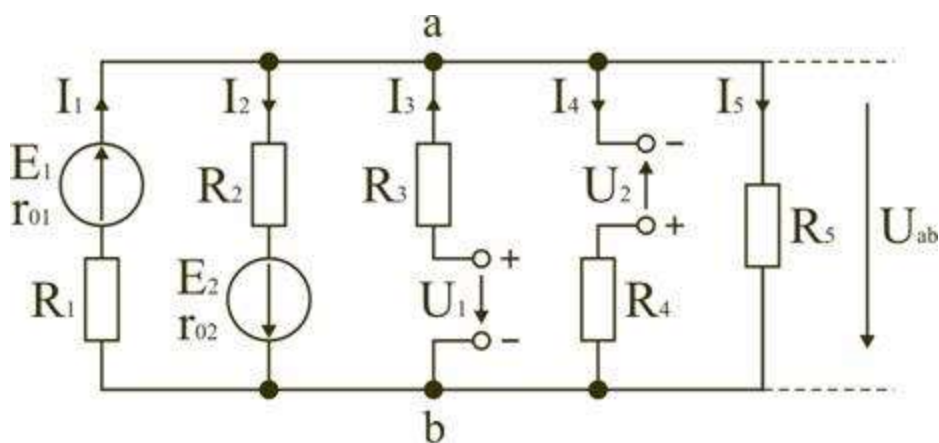


Рис. 1.27

Определим значения токов, возникающих в первой и второй ветвях,

(1.20)

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_{01} + R_1} = (E_1 - U_{ab})g_1,$$

(1.21)

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{ab}}{r_{02} + R_2} = (E_2 + U_{ab})g_2,$$



где:  $g_1 = \frac{1}{r_{01} + R_1}$ ;  $g_2 = \frac{1}{r_{02} + R_2}$  – проводимости соответственно первой и второй ветвей.

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для ветвей (1.5), содержащих источники напряжений, совершая обход контуров также по часовой стрелке.

Третья ветвь:  $U_{ab} - U_1 + I_3 R_3 = 0$ .

Четвертая ветвь:  $U_{ab} + U_2 - I_4 R_4 = 0$ .

Определим значения токов, возникающих в третьей и четвертой ветвях,

(1.22)

$$I_3 = \frac{U_1 - U_{ab}}{R_3} = (U_1 - U_{ab})g_3,$$

(1.23)

$$I_4 = \frac{U_2 + U_{ab}}{R_4} = (U_2 + U_{ab})g_4,$$

где:  $g_3 = \frac{1}{R_3}$ ;  $g_4 = \frac{1}{R_4}$  – проводимости соответственно третьей и четвертой ветвей.

Ток в пятой ветви определим по закону Ома:

(1.24)

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_5} = U_{ab}g_5,$$

где  $g_5 = \frac{1}{R_5}$  – проводимость пятой ветви.

Для вывода формулы, позволяющей определить напряжение  $U_{ab}$ , напомним уравнение по первому закону Кирхгофа (1.3) для узла а:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

После замены токов их выражениями (1.20) – (1.24) и соответствующих преобразований получим

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + U_1 g_3 - U_2 g_4}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}$$

Формула узлового напряжения в общем случае имеет вид

(1.25)

$$U_{ab} = \frac{\sum E g + \sum U g}{\sum g}$$

При расчете электрической цепи методом узлового напряжения после определения величины напряжения  $U_{ab}$  значения токов в ветвях находят по их выражениям (1.20) – (1.24).

При записи формулы (1.25) следует задаться положительным направлением узлового напряжения  $U_{ab}$ . Со знаком «+» в (1.25) должны входить ЭДС, направленные между точками а и b встречно напряжению  $U_{ab}$ , и напряжения ветвей, направленные согласно с  $U_{ab}$ . Знаки в формуле (1.25) не зависят от направления токов ветвей.

При расчете и анализе электрических цепей методом узлового напряжения рекомендуется выбирать положительные направления токов после определения узлового напряжения. В этом случае при расчете токов по выражениям (1.20) – (1.24) положительные направления токов нетрудно выбрать таким образом, чтобы все они совпадали с их действительными направлениями.

Проверка правильности произведенных расчетов проводится по первому закону Кирхгофа для узла а или b, а также составлением уравнения баланса мощностей (1.8).

### Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора позволяет произвести частичный анализ электрической цепи. Например, определить ток в какой-либо одной ветви сложной электрической цепи и исследовать поведение этой ветви при изменении ее сопротивления. Сущность метода заключается в том, что по отношению к исследуемой ветви  $amb$  (рис. 1.28, а) сложная цепь заменяется активным двухполюсником А (смотри рис. 1.23), схема замещения которого представляется эквивалентным источником (эквивалентным генератором) с ЭДС  $E_{\text{э}}$  и внутренним сопротивлением  $r_{\text{оэ}}$ , нагрузкой для которого является сопротивление  $R$  ветви  $amb$ .

Если известны ЭДС и сопротивление эквивалентного генератора, то ток  $I$  в ветви  $amb$  определяется по закону Ома

$$I = \frac{E_{\text{э}}}{r_{\text{оэ}} + R}$$

Покажем, что параметры эквивалентного генератора  $E_{\text{э}}$  и  $r_{\text{оэ}}$  можно определить соответственно по режимам холостого хода и короткого замыкания активного двухполюсника.

В исследуемую схему (рис. 1.28, а) введем два источника, ЭДС которых  $E_1$  и  $E_2$  равны и направлены в разные стороны (рис. 1.28, б). При этом величина тока  $I$  в ветви  $amb$  не изменится. Ток  $I$  можно определить как разность двух токов  $I = I_2 - I_1$ , где  $I_1$  – ток, вызванный всеми источниками двухполюсника  $A$  и ЭДС  $E_1$  (рис. 1.28, в);  $I_2$  – ток, вызванный только ЭДС  $E_2$  (рис. 1.28, г).

Если выбрать ЭДС  $E_1$  такой величины, чтобы получить в схеме (1.28, в) ток  $I_1 = 0$ , то ток  $I$  будет равен (рис. 1.28, г)

$$I = I_2 = \frac{E_2}{r_{02} + R},$$

где  $r_{02}$  – эквивалентное сопротивление двухполюсника  $A$  относительно выводов  $a$  и  $b$ .

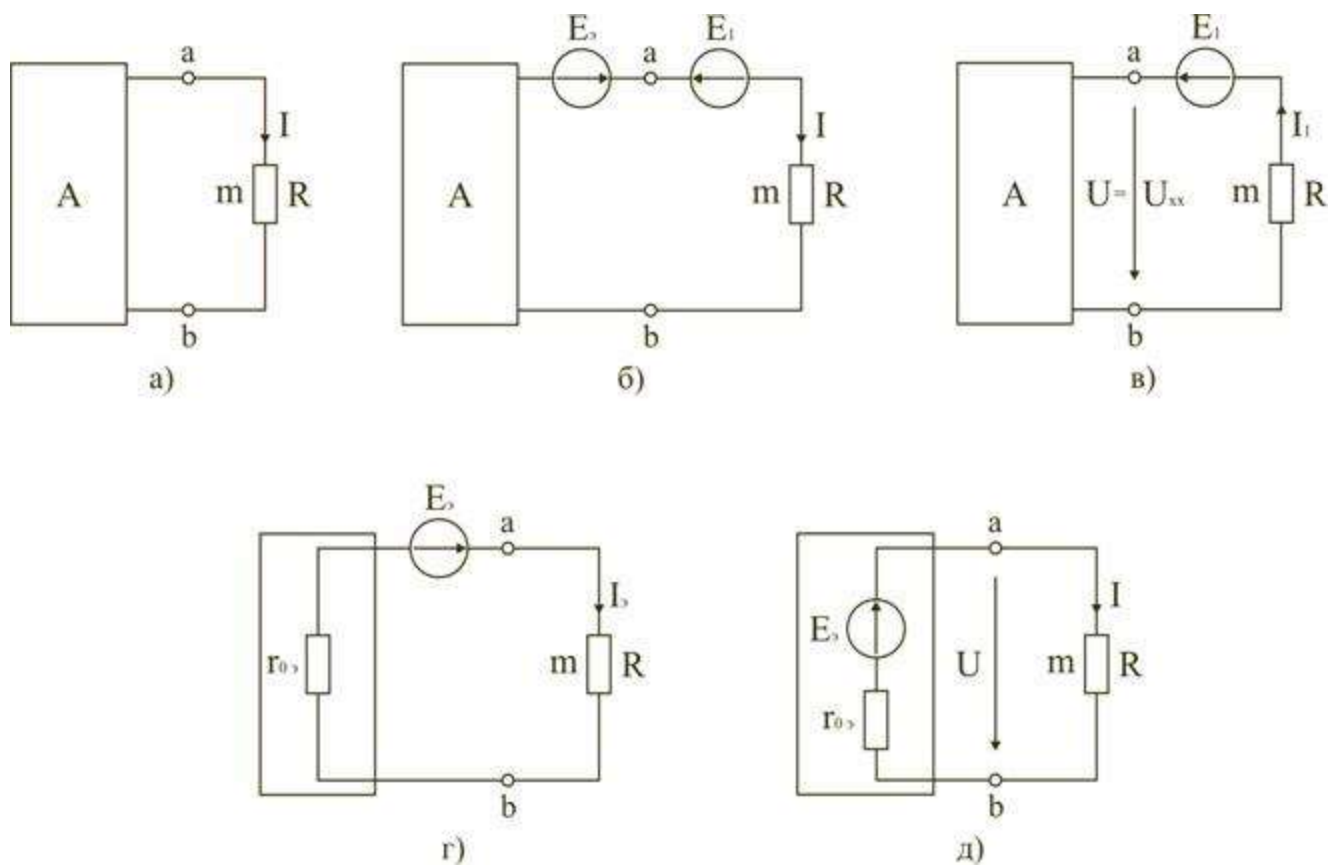


Рис. 1.28

Так как при  $I_1 = 0$  (рис. 1.28, в) активный двухполюсник  $A$  будет работать относительно ветви  $amb$  в режиме холостого хода, то между выводами  $a$  и  $b$  установится напряжение холостого хода  $U = U_{xx}$  и по второму закону Кирхгофа для контура  $amb$  получим  $E_1 = I_1 R + U_{xx} = U_{xx}$ . Но по условию  $E_2 = E_1$ , поэтому и  $E_2 = U_{xx}$ . Учитывая это, формулу для определения тока  $I$  можно записать в такой форме:

(1.26)

$$I = \frac{E_2}{r_{02} + R} = \frac{U_{xx}}{r_{02} + R}.$$

В соответствии с (1.26) электрическая цепь на рис. 1.28, а может быть заменена эквивалентной цепью (рис. 1.28, д), в которой  $E_{\Sigma} = U_{xx}$  и  $r_{0\Sigma}$  следует рассматривать в качестве параметров некоторого эквивалентного генератора.

Значения  $E_{\Sigma} = U_{xx}$  и  $r_{0\Sigma}$  можно определить как расчетным, так и экспериментальным путем. Для расчетного определения  $U_{xx}$  и  $r_{0\Sigma}$  необходимо знать параметры элементов активного двухполюсника и схему их соединения.

Для определения величины  $r_{0\Sigma}$  необходимо удалить из схемы двухполюсника все источники, сохранив все резистивные элементы, в том числе и внутренние сопротивления источников ЭДС. Внутренние сопротивления источников напряжений принять равными нулю. Затем рассчитать известными методами эквивалентное сопротивление относительно выводов ab.

Для определения величины  $E_{\Sigma}$  разомкнем цепь и определим по методу узлового напряжения напряжение  $U_{ab} = U_{xx} = E_{\Sigma}$  между выводами ab активного двухполюсника.

Экспериментально параметры эквивалентного генератора можно определить по результатам двух опытов. Разомкнув ветвь с сопротивлением R (рис. 1.28, д), измерим напряжение между выводами a и b  $U_{ab} = U_{xx} = E_{\Sigma}$  (опыт холостого хода).

Для определения  $r_{0\Sigma}$  проводится (если это допустимо) опыт короткого замыкания: заданная ветвь замыкается накоротко и в ней измеряется ток короткого замыкания  $I_{кз}$ . По закону Ома рассчитываем величину  $r_{0\Sigma} = E_{\Sigma} / I_{кз}$ .

