получим

$$I\sum R_i=\sum \pm\mathscr{E}_i$$

(разности потенциалов опять сократятся, поскольку потенциал каждой точки встретится дважды, но с разными знаками). Если сила тока окажется отрицательной, то направление тока надо изменить на противоположное.

Правила Кирхгофа. Перейдем теперь к рассмотрению разветвленной цепи. В качестве конкретного примера применения общих правил будем использовать цепь на рисунке 4. Задача — найти токи на всех участках цепи.

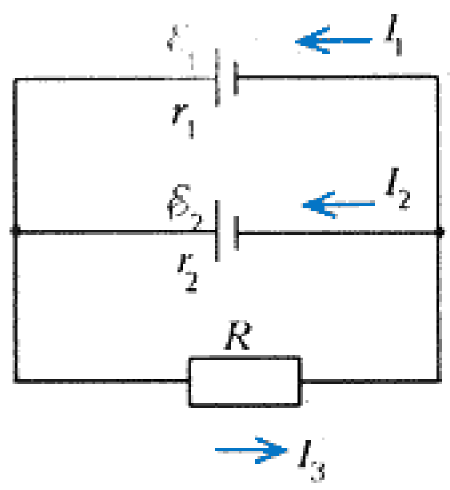

Рис. 4

В любом случае начинают с того, что произвольным образом выбирают направления неизвестных токов. Так как при протекании токов через любой узел на нем не должен накапливаться заряд, алгебраическая сумма входящих в этот узел токов и токов, выходящих из узла, должна быть равна нулю. (Принято входящие токи брать со знаком плюс, а выходящие — со знаком минус.) Это — *первое правило Кирхгофа*, или *правило узлов*. Его можно записать для каждого из $n-1$ узлов. Для получения оставшихся уравнений поступают так: выбирают произвольный замкнутый контур и обходят его в произвольном направлении. Если записать на каждом участке обобщенный закон Ома, а потом сложить полученные уравнения, то разности потенциалов сократятся, и мы придем к уравнению

$$\sum \pm I_iR_i=\sum \pm\mathscr{E}_i\,,$$

где правила знаков соответствуют описанным раньше. Это — *второе правило Кирхгофа*. Для схемы на рисунке 4 получаем такую систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1+I_2-I_3=0,\\ I_1r_1+I_3R=\mathscr{E}_1,\\ I_1r_1-I_2r_2=\mathscr{E}_1-\mathscr{E}_2 \end{cases}$$

(направление обхода контуров — против часовой стрелки).

Метод узловых потенциалов. Если в методе Кирхгофа неизвестными в уравнениях являются токи, то в данном методе составляются уравнения для потенциалов узлов. При этом один из потенциалов принимают равным нулю (потенциал определен с точностью до константы), так что число уравнений получается на одно меньше, чем число узлов. С помощью обобщенного закона Ома выражают каждый из проходящих узел токов, после чего записывают правило узлов — алгебраическая сумма входящих и выходящих токов равна нулю.

Для схемы на рисунке 4 примем потенциал левого узла равным нулю, а потенциал правого обозначим через φ; тогда получим *одно* уравнение

$$\frac{(\varphi-0)+\mathscr{E}_1}{r_1}+\frac{(\varphi-0)+\mathscr{E}_2}{r_2}-\frac{0-\varphi}{R}=0$$

(сумма токов, входящих в левый узел и выходящих из него, равна нулю). Найдя потенциалы всех узлов, с помощью обобщенного закона Ома вычисляем токи (заметим, что выражения для токов нами были уже записаны при составлении уравнения).

Батарея источников тока. Несколько соединенных между собой источников, подключенных к внешней цепи, удобно заменить одним эквивалентным источником. В школьном курсе приводится ответ для параллельного и последовательного соединения *одинаковых* источников. Для последовательного соединения ответ легко обобщается на случай разных источников. Для случая параллельного соединения разных источников поступим следующим образом.

Запишем обобщенный закон Ома для каждого источника:

$$I_kr_k=\varphi_1-\varphi_2\pm\mathscr{E}_k$$

(разности потенциалов на всех источниках одинаковы), разделим на r_k и сложим все уравнения:

$$I=(\varphi_1-\varphi_2)\sum\left(\frac{1}{r_k}\right)+\sum\left(\pm\frac{\mathscr{E}_k}{r_k}\right)$$

(ток через батарею равен сумме токов). Если разделить на $\sum\left(\frac{1}{r_k}\right)$, то уравнение приобретает вид закона Ома для участка цепи с эквивалентным сопротивлением, вычисляемым по формуле для параллельного соединения сопротивлений:

$$\frac{1}{r}=\sum\left(\frac{1}{r_k}\right),$$

и с эквивалентой ЭДС:

$$\mathscr{E}=\frac{\sum\left(\pm\frac{\mathscr{E}_k}{r_k}\right)}{\sum\left(\frac{1}{r_k}\right)}.$$

В случае N одинаковых источников ($\mathscr{E}_0, r_0$) получаем обычный ответ: $\mathscr{E}=\mathscr{E}_0$, $r=r_0/N$. Для примера на рисунке 4 можно два источника заменить одним эквивалентным, после чего легко найти ток I_3. (Сделайте это сами и убедитесь, что ответ получается такой же, как с помощью двух других методов.)

Энергетический баланс на участке цепи

Если на участке цепи действуют сторонние силы, то следует говорить о трех членах в энергетическом балансе:

1) Чтобы найти количество выделившегося тепла, надо вычислить работу суммарного поля над зарядами цепи. Как утверждает обобщенный закон Ома, работа суммарного поля над единичным зарядом равна $I_{12}R$; значит, за время t суммарное поле совершит работу

$$Q=I_{12}Rq=I_{12}R(I_{12}t)=I_{12}^2Rt$$

(закон Джоуля – Ленца). Эта величина всегда положительна.

2) Работу сторонних сил над зарядами нужно трактовать как поступление энергии от неэлектростатических источников энергии. Она равна

$$A_{ст}=\mathscr{E}_{12}q=\mathscr{E}_{12}I_{12}t\,.$$

Эта величина может быть как положительной, так и отрицательной.

3) Работа электростатических сил над зарядами равна

$$A_{эл}=(\varphi_1-\varphi_2)q=U_{12}I_{12}t\,.$$

Чтобы понять энергетический смысл этого выражения, заметим, что, в соответствии с обобщенным законом Ома,

$$I_{12}Rq=(\varphi_1-\varphi_2+\mathscr{E}_{12})q\,,$$

или

$$Q=A_{эл}+A_{ст}\,.$$

Значит, исходя из закона сохранения энергии, можно утверждать, что *работа электростатических сил на участке цепи равна энергии, поступившей в данный участок из оставшейся части цепи* (т.е. *из внешней цепи*). Если эта работа отрицательна, то во внешней цепи работа электростатических сил положительна, т.е. UI имеет смысл энергии, переданной во внешнюю цепь. Таким образом, электростатические