

ными. Э.д.с.  $\mathcal{E}_k$  источников тока, включенных на различных участках контура, считают положительными, если они создают ток, направленный в сторону обхода контура. Так, например, в случае обхода по часовой стрелке замкнутого контура  $ABCD$ , изображенного на рис. 9.7, уравнение (9.17) записывается следующим образом:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3.$$

3. При решении задач рекомендуется следующий порядок расчета сложной цепи постоянного тока:

а) произвольно выбрать и обозначить на чертеже направления токов во всех участках цепи;

б) подсчитать число узлов в цепи ( $m$ ). Записать выражения (9.16) для каждого из  $m - 1$  узлов. Уравнение (9.16) для  $m$ -го узла ничего нового не дает, так как оно является простым следствием предыдущих  $m - 1$  уравнений;

в) выделить произвольные замкнутые контуры в цепи и, условившись о направлении обхода, записать для них систему уравнений (9.17). Уравнения (9.17) следует писать не для всех контуров, так как часть из этих уравнений является следствием предыдущих. Оказывается, что в разветвленной цепи, состоящей из  $p$  ветвей (участков цепи между соседними узлами) и  $m$  узлов, число независимых уравнений (9.17) равно  $p - m + 1$ .

При составлении независимых уравнений (9.17) следует выбирать контуры таким образом, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок цепи, не входивший в уже рассмотренные контуры.

Примеры использования правил Кирхгофа при расчете цепей постоянного тока приведены в задачах к этой главе.

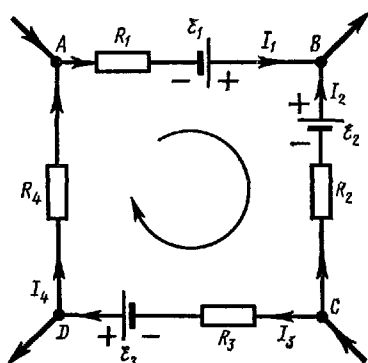


Рис. 9.7

### Вопросы для повторения

1. Какие силы называются сторонними?
2. Поясните физический смысл электродвижущей силы, напряжения и разности потенциалов.
3. В чем состоит закон Ома для участка цепи, для замкнутой цепи? Каков его физический смысл?
4. В чем состоят и на чем основаны правила Кирхгофа?

### Примеры решения задач

**Задача 9.1.** Имеется миллиамперметр с внутренним сопротивлением  $R_0 = 9,9$  Ом, предназначенный для измерения токов не более 10 мА. Что нужно сделать для того, чтобы этот прибор можно было применять для измерения: 1) токов до 1 А и 2) напряжений до 1 В?

Дано:

$$I_0 = 10^{-2} \text{ A}$$

$$R_0 = 9,9 \text{ Ом}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$U = 1 \text{ В}$$

$$R_{\text{ш}} - ? \quad R_{\text{д}} - ?$$

Решение. 1. Амперметр включается в цепь последовательно. Поэтому, если ток  $I$  в цепи больше максимального тока  $I_0$ , на который рассчитан амперметр, то параллельно последнему следует включить добавочное сопротивление  $R_{\text{ш}}$ , называемое шунтом (рис. 9.8, а). Величина  $R_{\text{ш}}$  выбирается таким образом, чтобы ток в приборе не превышал  $I_0$ .

Из правил Кирхгофа следует, что

$$I = I_0 + I_{\text{ш}}, \quad I_0 R_0 = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}},$$

где  $I_{\text{ш}}$  — сила тока в шунте. Исключая из этих уравнений  $I_{\text{ш}}$ , получим

$$R_{\text{ш}} = R_0 I_0 / (I - I_0).$$

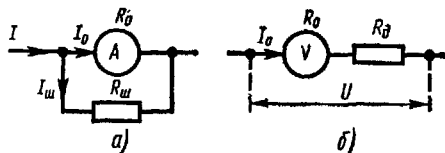


Рис. 9.8

2. Вольтметр включается параллельно тому участку цепи, напряжение  $U$  на котором необходимо измерить. Это напряжение не должно быть выше  $U_0$ , соответствующего максимальной силе тока  $I_0$ , на которую рассчитан прибор ( $U_0 = I_0 R_0$ ). Поэтому для измерения напряжений  $U > U_0$  последовательно с вольтметром следует включить добавочное сопротивление  $R_{\text{д}}$  (рис. 9.8, б), кото-

рое выбирается таким, чтобы ток в приборе не превышал  $I_0$ :

$$(R_0 + R_{\text{д}}) I_0 = U; \quad R_{\text{д}} = (U/I_0) - R_0.$$

Произведем вычисления в СИ:

$$1. R_{\text{ш}} = \frac{R_0 I_0}{I - I_0} = \frac{9,9 \cdot 0,01}{1 - 0,01} \text{ Ом} = 0,1 \text{ Ом}.$$

$$2. R_{\text{д}} = \frac{U}{I_0} - R_0 = \left( \frac{1}{0,01} - 9,9 \right) \text{ Ом} = 90,1 \text{ Ом}.$$

Задача 9.2. В приведенной на рис. 9.9 электрической схеме заданы сопротивления  $R_2, R_3, R_4$  и электродвижущие силы  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}_1$ . Определить сопротивление  $R_1$ , если известно, что ток в цепи гальванометра  $G$  отсутствует ( $I_g = 0$ ). Рассмотреть полученный результат при  $\mathcal{E}_1 = 0$ .

Решение. Выберем направления токов в различных ветвях контура так, как показано на рис. 9.9. Применим первое правило Кирхгофа к узлам  $A, B$  и  $C$ :

$$\text{а) } I_2 - I_1 = 0, \quad \text{б) } I_1 + I_3 - I = 0, \quad \text{в) } I_4 - I_3 = 0.$$

Применим второе правило Кирхгофа к замкнутым контурам  $ABCGA$ ,  $ADCGA$  и  $BCDB$ , считая положительным обход этих контуров против часовой стрелки:

$$\text{г) } -I_1 R_1 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1, \quad \text{д) } I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0, \quad \text{е) } I_3 R_3 + I_4 R_4 = \mathcal{E}.$$

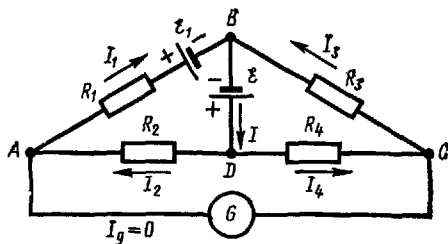


Рис. 9.9

Из уравнений (а) и (в) следует, что  $I_1 = I_2$  и  $I_3 = I_4$ , а из уравнения (е) находим

$$I_3 = I_4 = \mathcal{E}/(R_3 + R_4).$$

Из уравнения (д) следует, что

$$I_1 = I_2 = I_4 R_4 / R_2.$$

Подставив значения  $I_1$  и  $I_3$  в (г), после некоторых преобразований получим

$$R_1 = \frac{R_3 R_2}{R_4} - \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_4} \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}}.$$

Если  $\mathcal{E}_1 = 0$ , то результат не зависит от  $\mathcal{E}$ :

$$R_1 = R_3 R_2 / R_4.$$

В этом случае схема, изображенная на рис. 9.9, представляет собой схему мостика Уитстона, применяемого для измерения сопротивлений. Можно показать, что последняя формула для неизвестного сопротивления  $R_1$  справедлива и в том случае, если гальванометр  $G$  и источник  $\mathcal{E}$  поменять в мостике Уитстона местами, а сопротивления  $R_1$ ,  $R_3$  и  $R_4$  подобрать такими, чтобы сила тока, проходящего через гальванометр, была по-прежнему равна нулю.