В ближайших главах рассматриваются обычный электрический *ток проводимости*, т. е. движение зарядов в проводниках первого и второго рода, а также явления электрического *пробоя* диэлектриков и *электронного и ионного тока в вакууме*.

Об одном из видов электрического тока — о *конвекционном токе*, когда движение зарядов в разрыве проводящей части цепи происходит совместно с перемещением капелек, крупинок или макроскопических масс вещества, связанных с перемещающимися зарядами, некоторые сведения уже сообщены в § 24, дополнительные сведения даны в § 76.

В ближайших главах излагается электрофизика постоянного тока. Далее будут рассмотрены способы возбуждения, свойства и некоторые применения переменного тока. Заключительные главы данной части курса посвящены обзору особых свойств и важнейших применений быстропеременных токов — электрических колебаний.

§ 26. Закон Ома. Законы Кирхгофа

На основе многочисленных опытов и руководствуясь формальной аналогией между постоянным электрическим током и установившимся, спокойным током жидкости, Ом в 1827 г. открыл закон, чрезвычайная точность которого была позже подтверждена самыми тщательными измерениями.

Закон Ома гласит:

Величина тока пропорциональна падению напряжения, т. е. разности потенциалов на концах проводника, и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}. \tag{4}$$

Сопротивление же R, как показал Ом, зависит от длины проводника l, от площади его поперечного сечения S и, наконец, от того материала, из которого он изготовлен. Эта зависимость выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}. \tag{5}$$

Таким образом, *сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади сечения*.

Коэффициент ρ, зависящий от материала проводника, называют его *удельным сопротивлением*.

Вместо понятия о сопротивлении проводника R часто применяют понятие о его *электропроводности*, подразумевая под этим величину, обратную величине сопротивления.

Точно так же вместо удельного сопротивления ρ часто применяют *удельную электропроводность* γ:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

За практическую единицу сопротивления принимается сопротивление такого проводника, по которому при разности потенциалов на его концах, равной 1 вольту, проходит в секунду количество электричества в 1 кулон, т. е. проходит ток в 1 ампер. Такое сопротивление называют омом (*ом*).

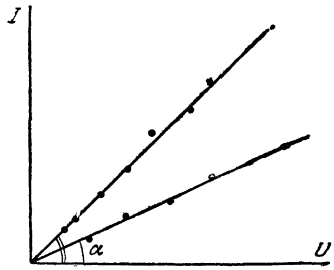

Рис. 69. Вольт-амперная характеристика по закону Ома. Для проводника с сопротивлением R наклон вольт-амперной характеристики определяется соотношением $\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{R}$.

Сопротивление в миллион раз большее, чем ом, называют мегомом[1]) (сокращенно *мгом*). Иногда обозначают ом знаком Ω (греческая буква «омега»), а мегом — знаком $M\Omega$.

Если сопротивление R выражено в омах, длина l — в сантиметрах и сечение S — в квадратных сантиметрах, то удельное сопротивление ρ будет выражаться в *омосантиметрах*, т. е. в омах, помноженных на сантиметр.

В технике под удельным сопротивлением часто понимают сопротивление провода длиной 1 *м* с поперечным сечением 1 *мм*^{2}. Так как уменьшение поперечного сечения в 100 раз (1 *мм*^{2} вместо 1 *см*^{2}) приводит к увеличению сопротивления тоже в 100 раз и увеличение длины в 100 раз (1 *м* вместо 1 *см*) приводит к увеличению сопротивления еще в 100 раз, то очевидно, что

$$\rho_{\left(\text{в ом } \frac{мм^2}{м}\right)} = 10^4 \cdot \rho_{(\text{в омосантиметрах})}.$$

На рис. 69 представлен график закона Ома. Каждая прямая соответствует определенному проводнику, который отличается от других проводников величиной электрического сопротивления. По оси абсцисс отложены величины падения напряжения на концах проводника U, а по оси ординат — величины тока в проводнике. Такой график называют *вольт-амперной характеристикой*. Как уже было сказано, закон Ома устанавливает прямую пропорциональность между величиной тока и падением напряжения на концах проводника. В вольт-амперной характеристике это соответствует прямым линиям, проходящим через начало координат. Тангенс угла наклона

---

[1]) От греч. megas—большой.

указанных прямых равен электропроводности $\frac{1}{R}$ взятых проводников.

Измерение сопротивлений чаще всего производят сравнением измеряемого сопротивления с эталонными сопротивлениями, которые изготовляют из проволок и пластинок таких металлов, проводимость которых мало меняется с изменением температуры. Набор эталонных сопротивлений, позволяющий путем комбинирования их получить все значения сопротивлений в некоторых пределах с интервалами в 0,01 ома, в 0,1 ома и в 1 ом, называют *магазином сопротивлений*.

Для регулировки величины тока применяют переменные сопротивления — *реостаты* разнообразных конструкций.

Закон Ома математически выражен выше в виде сочетания двух формул (4) и (5). Первую из них часто применяют для вычисления падения напряжения (падения потенциала) на концах проводника по величине тока и сопротивлению проводника:

$$V_1 - V_2 = IR. \qquad (6)$$

Коль скоро электрический ток I по всей длине цепи одинаков, то, очевидно, *падение потенциала в различных частях цепи будет пропорционально сопротивлению рассматриваемой части* (рис. 70).

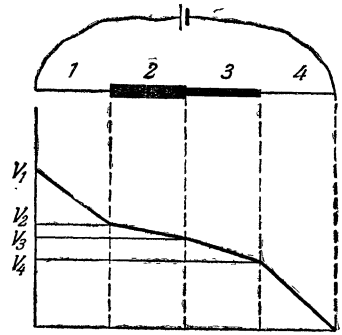

Рис. 70. Чем больше сопротивление отдельного участка проводника (участки *1* и *4*), тем больше в нем падение потенциала.

Движение электричества в проводниках, как показал Ом, можно уподобить движению с трением жидкости в какой-нибудь среде, например в песке, грунте или трубе с малым сечением. Законы этого движения аналогичны закону Ома для электрического тока. Величине электрического тока здесь соответствует количество воды q, протекающей ежесекундно через данное поперечное сечение, а разности потенциалов — разность давлений (напоров) или разность соответствующих манометрических высот $h_1 - h_2$. При токе жидкости

$$q = \frac{h_1 - h_2}{R}, \quad R = p\frac{l}{S},$$

где коэффициент p зависит от трения воды о песок или о стенки трубы.

Закон Ома справедлив как для проводников первого рода, так и для электролитов. Это — весьма точный и общий закон. Он справедлив не только для постоянного, но также и для переменного тока. Ограниченную применимость закон Ома имеет только в тех случаях,

когда «не хватает» частиц — носителей зарядов, что может наблюдаться при достаточно большом токе через слабо ионизированный газ и при разряде в вакууме. О таких отступлениях от закона Ома сказано в §§ 45 и 52.

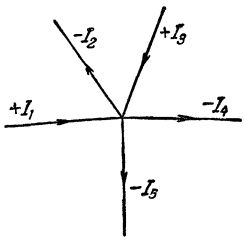

Рис 71. В точке встречи проводников алгебраическая сумма токов равна нулю.

Закон Ома определяет ток по падению напряжения или падение напряжения по величине тока для простейшей, неразветвленной цепи тока. В более сложных случаях расчет цепей тока производится на основе двух правил, указанных в 1847 г. Кирхгофом.

1. Снабдим токи, идущие по направлению к точке встречи нескольких проводников, знаком плюс (+), а токи, идущие от этой точки, знаком минус (—). Тогда согласно первому закону Кирхгофа *для каждой точки проводника алгебраическая сумма токов равна нулю* (рис. 71):

$$\sum I = 0.$$

Этот закон выражает то, что в любой момент времени в данную точку проводника притекает столько же электричества, сколько и утекает, так что в этой точке электричество не накопляется и не убывает.

2. Второй закон Кирхгофа относится к замкнутому контуру тока, состоящему из системы разветвленных проводников, и представляет собой обобщение закона Ома:

В замкнутом контуре тока алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме произведений токов на сопротивления отдельных участков цепи (рис. 72):

$$\sum \mathscr{E} = \sum IR.$$

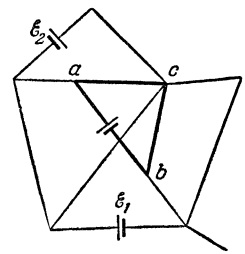

Рис. 72. В любом замкнутом контуре (например, *a*, *b*, *c*) алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме произведений величин токов на сопротивления отдельных участков цепи.

При этом токи, идущие в одном направлении следует считать положительными, идущие в противоположном направлении — отрицательными.

Вычисляя сумму произведений токов на сопротивления отдельных участков цепи, следует учитывать также и внутренние сопротивления источников тока.

Чтобы убедиться, что второй закон Кирхгофа представляет собой обобщение закона Ома, следует вспомнить сказанное в § 25. Там

было пояснено, что при наличии нескольких источников тока суммарная электродвижущая сила в замкнутой цепи равна сумме падений напряжения на всех участках цепи [формула (3)]. Заменяя падение напряжения на каждом участке цепи по закону Ома произведением из величины тока на сопротивление этой части цепи, получаем второй закон Кирхгофа.

Применим законы Кирхгофа к двум особенно важным случаям: к случаю последовательного соединения сопротивлений и к случаю параллельного соединения сопротивлений. В первом случае мы придем к закону Ома для замкнутой цепи. Во втором — к правилу, определяющему величину ответвленного тока.

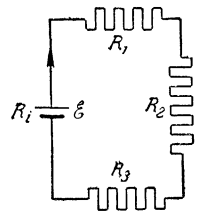

Рис. 73. Неразветвленная цепь тока.

Пусть имеется неразветвленная цепь тока (рис. 73), в которой действует электродвижущая сила гальванического элемента. Обозначим внутреннее сопротивление элемента через R_i, а сопротивления отдельных частей внешней цепи, замыкающей полюсы элемента, обозначим через R_1, R_2, R_3. Тогда на основании второго закона Кирхгофа, учитывая, что величина тока внутри элемента и во внешней цепи одинакова, получаем закон Ома для замкнутой цепи:

$$\mathscr{E} = I(R_i + R_1 + R_2 + R_3),$$

или

$$I = \frac{\mathscr{E}}{(R_i + R_1 + R_2 + R_3)}. \qquad (7)$$

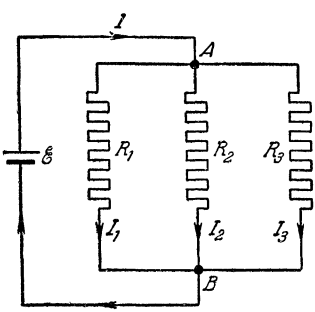

Рис. 74. Разветвление токов.

Мы видим, таким образом, что *общее сопротивление цепи, составленной из ряда последовательно соединенных сопротивлений, равно сумме отдельных сопротивлений.*

Для еще более общего случая, когда в замкнутой цепи действуют несколько источников электродвижущей силы, имеющих внутреннее сопротивление, равное ΣR_i, а сопротивление внешних участков цепи равно ΣR_e, согласно второму закону Кирхгофа, закон Ома должен быть записан в следующем виде:

$$I = \frac{\sum \mathscr{E}}{\sum R_i + \sum R_e}. \qquad \textbf{(7a)}$$

Теперь представим себе, что источник с электродвижущей силой $\mathscr{E}$ (рис. 74) замкнут проводником, который между точками A и B разветвляется на параллельные сопротивления R_1, R_2 и R_3.

Прилагая второй закон Кирхгофа к контуру тока AR_1BR_2, получим:

$$I_1R_1 - I_2R_2 = 0,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \tag{8}$$

Следовательно, *величины тока в двух параллельно включенных проводниках обратно пропорциональны сопротивлениям проводников.*

В каждом ответвлении величина тока по закону Ома будет:

$$I_1 = \frac{V_A - V_B}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_A - V_B}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V_A - V_B}{R_3}.$$

По первому закону Кирхгофа, примененному к точке A или же к точке B,

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Следовательно,

$$I = (V_A - V_B)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right),$$

или

$$I = \frac{V_A - V_B}{R},$$

где R есть общее сопротивление разветвления; мы видим, что R определяется формулой

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \tag{9}$$

Итак, *общая проводимость разветвления равна сумме проводимостей каждой из ветвей.* Это справедливо для любого числа ветвей.

На практике ответвление тока часто приходится осуществлять так, чтобы через проводник с сопротивлением R_0 проходила определенная, например $\frac{1}{n}$, часть тока главной цепи I. Найдем сопротивление X, которое нужно приключить для этого к проводнику R_0. По формуле (8)

$$\frac{X}{R_0} = \frac{I_0}{I_X} \quad \text{и} \quad I = I_0 + I_X,$$

причем, по условию,

$$I_0 = \frac{1}{n} I, \quad \text{откуда} \quad I_X = \frac{n-1}{n} I.$$

Следовательно,

$$X = \frac{R_0}{n-1}. \qquad (10)$$

Таким образом, если через проводник R_0 нужно пропустить 0,1, или 0,01, или 0,001 тока в главной цепи, то к проводнику R_0 нужно параллельно приключить добавочный проводник [так называемый *шунт*[1])] с сопротивлением $X = \frac{1}{9}R_0$, или $\frac{1}{99}R_0$, или $\frac{1}{999}R_0$.

Приборы для измерения малых токов — *гальванометры* — часто приспособляют посредством шунта для измерения больших токов (рис. 75). Например, если приключить к гальванометру шунт, сопротивление которого в 999 раз меньше внутреннего сопротивления

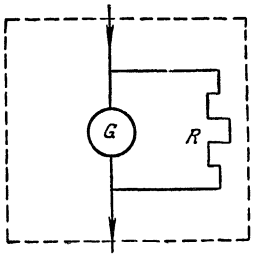

Рис. 75. Гальванометр с шунтом (схема некоторых амперметров).

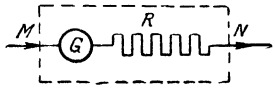

Рис. 76. Схема вольтметра. R — добавочное сопротивление.

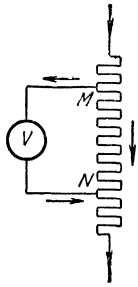

Рис. 77 Схема включения вольтметра.

гальванометра, то показания гальванометра, умноженные на 1000, дадут величину тока в главной цепи.

Если к чувствительному гальванометру вместо шунта присоединить последовательно достаточно большое сопротивление R, то получается прибор, пригодный для измерения напряжения тока,— *вольтметр* [добавочное сопротивление R обычно монтируют в коробке прибора и градуируют гальванометр так, чтобы отсчеты по его шкале непосредственно указывали разность потенциалов на зажимах MN прибора (рис. 76)]. Схема включения вольтметра показана на рис. 77. Очевидно, что чем больше сопротивление вольтметра (практически сопротивление R), тем меньше влияет приключение вольтметра на величину сопротивления цепи между точками M и N. Если сопротивление вольтметра недостаточно велико, то после приключения вольтметра сопротивление цепи между участками M и N сделается заметно меньше, чем было, и соответственно уменьшится падение напряжения на этом (теперь разветвленном) участке

[1]) От англ. shunt—запасный путь.

цепи, так что в этом случае показания вольтметра окажутся заниженными.

Ответвлением тока часто пользуются также для того, чтобы от источника большого напряжения тока получить ток меньшего напряжения. Для этой цели служат так называемые *потенциометры*, устройство которых понятно из рис. 78; на этом рисунке жирная стрелка символизирует контакт, скользящий по сопротивлению, на котором падает напряжение V_1-V_0; перемещая этот контакт, получаем в цепи ответвления, между клеммами *2* и *O*, любое падение напряжения V_2-V_0, меньшее, чем V_1-V_0.

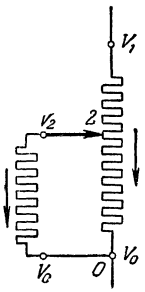

Рис. 78. Схема потенциометра (делителя напряжений).

В лабораторной практике часто применяют для измерения сопротивлений так называемый *мостик Уитстона*, схема которого показана на рис. 79.

На этом рисунке $\mathcal{E}$ означает источник тока, *G*—чувствительный гальванометр, *K*—ключ для замыкания тока, r_1, r_2, r_3 и r_4—сопротивления. Эти сопротивления всегда можно подобрать таким образом, что при замыкании ключа *K* ток в ветви *CB*, где включен гальванометр, будет отсутствовать. В этом случае потенциалы в точках *C* и *B* должны быть равны: $V_C=V_B$. Тогда весь ток, проходящий через сопротивление r_1, пройдет через сопротивление r_3, и весь ток, проходящий через сопротивление r_2, прой-

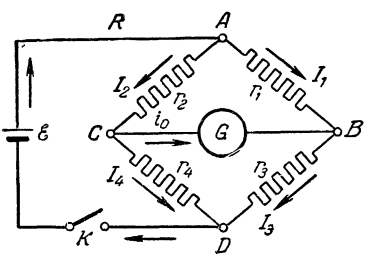

Рис. 79. Схема мостика Уитстона.

дет через сопротивление r_4; $I_1=I_3$ и $I_2=I_4$. Следовательно, принимая во внимание закон Ома и памятуя, что $V_C=V_B$, имеем:

$$\frac{V_A-V_B}{r_1}=\frac{V_B-V_D}{r_3} \quad \text{и} \quad \frac{V_A-V_B}{r_2}=\frac{V_B-V_D}{r_4},$$

откуда

$$\frac{r_1}{r_2}=\frac{r_3}{r_4},$$

т. е. *ток, проходящий через гальванометр, включенный по диагонали в мостик Уитстона, равен нулю, когда сопротивления ветвей мостика пропорциональны друг другу.*

Измеряемое сопротивление включают в качестве одной из ветвей мостика Уитстона ($r_1=r_X$); второй ветвью мостика является «переменное» (т. е. легко

изменяемое) сопротивление r_2; в две другие ветви включают постоянные сопротивления, составляющие удобное для вычислений отношение, например 1 : 1000, или 1 : 10, или 1 : 1 и т. п. Переменное сопротивление подгоняют так, чтобы при замыкании ключа K стрелка чувствительного гальванометра G не отклонялась ни в ту, ни в другую сторону. Тогда величину измеряемого сопротивления вычисляют из предыдущей формулы:

$$r_X = r_2 \left(\frac{r_3}{r_4}\right).$$

В качестве переменного сопротивления берут или магазин сопротивления (*магазинный мостик Уитстона*), или же потенциометр в виде струны, натянутой на шкалу—линейку, по которой перемещается движок с контактом (*линейный мостик Уитстона*).

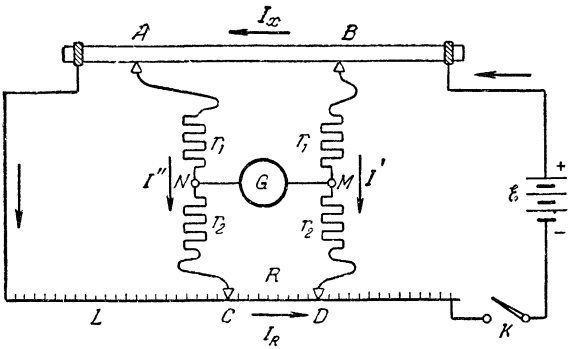

Рис. 80. Схема мостика Томсона

Для измерения очень малых сопротивлений применяют *мостик Томсона*; схема этого прибора показана на рис. 80. Здесь AB—испытуемый проводник с сопротивлением X; G—гальванометр, r_1 и r_1—два одинаковых магазинных сопротивления, включенных в две ветви мостика; r_2 и r_2—тоже одинаковые сопротивления, включенные в две другие ветви мостика; L—толстая нейзильберовая проволока, натянутая на линейку со шкалой; R—сопротивление части упомянутой проволоки между движками C и D; K—ключ, замыкающий цепь; $\mathcal{E}$—источник тока (батарея). Передвигая контакты C и D, подбирают такое сопротивление R, чтобы ток через гальванометр был равен нулю. В этом случае должны иметь место два уравнения, вытекающие из второго закона Кирхгофа, примененного к контурам $ABMN$ и $CDMN$:

$$I_X \cdot X + I'' r_1 - I' r_1 = 0,$$
$$I_R \cdot R + I'' r_2 - I' r_2 = 0.$$

По первому закону Кирхгофа $I_X = I_R$, следовательно,

$$\frac{X}{R} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Когда имеется несколько источников тока (например, гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы), то в зависимости от соотношения между сопротивлением внешней цепи и внутренним сопротивлением источника тока в одних случаях является более

выгодным последовательное включение источников тока, в других случаях более выгодным оказывается параллельное или же «смешанное» включение источников тока. Применим законы Кирхгофа для выяснения этого вопроса. Для упрощения предположим, что все рассматриваемые источники тока одинаковы и каждый из них дает электродвижущую силу $\mathscr{E}$ и имеет внутреннее сопротивление R_i. Ток во внешней цепи обозначим через I, а сопротивление внешней цепи — через R_e.

В случае последовательного включения n источников тока, применяя второй закон Кирхгофа, находим, что

$$\mathscr{E} + \mathscr{E} + \ldots = IR_e + IR_i + IR_i + \ldots, \quad \text{или} \quad n\mathscr{E} = I(R_e + nR_i),$$

откуда

$$I = \frac{n\mathscr{E}}{R_e + nR_i}. \tag{11}$$

В случае параллельного включения источников тока, применяя оба закона Кирхгофа, получаем:

$$I = nI_1, \quad \mathscr{E} = IR_e + I_1R_i,$$

где I_1— ток, проходящий через один из источников. Следовательно,

$$I = \frac{\mathscr{E}}{R_e + \frac{R_i}{n}}. \tag{12}$$

Итак, *при последовательном включении* n одинаковых источников тока электродвижущая сила образующейся «батареи» в n раз превышает электродвижущую силу отдельного источника тока, однако в этом случае *складываются не только электродвижущие силы, но также и внутренние сопротивления источников тока.* Такое включение является выгодным, когда внешнее сопротивление цепи весьма велико в сравнении с внутренним сопротивлением. В этом случае «батарея последовательного включения» может дать ток, почти в n раз превышающий ток от отдельного источника тока; при $R_e \gg nR_i$ по формуле (11) для последовательного включения

$$I \approx n\frac{\mathscr{E}}{R}.$$

Если же внешнее сопротивление цепи мало в сравнении с внутренним сопротивлением, то последовательное включение является бесполезным (при коротком замыкании ток от батареи окажется равным току от отдельного источника).

Напротив, параллельное включение является выгодным как раз, когда внешнее сопротивление цепи невелико в сравнении с внутренним. *При параллельном включении электродвижущая сила батареи остается такой же, как электродвижущая сила отдельного источ-*

ника тока, но зато благодаря разветвлению тока в n раз уменьшается внутреннее сопротивление.

Нередко применяют *смешанное* (групповое) соединение источников тока. Допустим, что n источников тока соединены последовательно, образуя группу, электродвижущая сила которой будет $n\mathscr{E}$, а внутреннее сопротивление nR_i. Если m таких групп соединить параллельно, то электродвижущая сила батареи останется равной $n\mathscr{E}$, а внутреннее сопротивление батареи будет $\frac{n}{m}R_i$, следовательно, величина тока, даваемая такой смешанной батареей, определится формулой

$$I = \frac{n\mathscr{E}}{R_e + \frac{n}{m} R_i}. \tag{13}$$

Мощность, отдаваемая источниками тока во внешнюю цепь, определяется произведением тока на падение напряжения во внешней цепи. *Отдаваемая мощность будет наибольшей* (§ 79), *когда сопротивление внешней цепи равно суммарному внутреннему сопротивлению источников тока.*

§ 27. Закон Джоуля — Ленца

Когда количество электричества Q переходит от потенциала V_1 к потенциалу V_2, то при этом совершается работа (§ 15)

$$A = QU,$$

где U — падение напряжения (разность потенциалов):

$$U = V_1 - V_2.$$

В электрическом токе происходит постоянное перемещение электричества от высшего потенциала к низшему; поэтому ток непрерывно производит работу, которая частично или полностью превращается в теплоту, нагревающую провода, по которым идет ток. Если величина тока равна I и ток проходил в течение t сек., то количество прошедшего за это время электричества $Q = It$, причем ток совершит работу

$$A = IUt.$$

Работа, совершаемая в единицу времени, называется мощностью, или эффектом, тока. Мы видим, что *мощность тока равна произведению величины тока на напряжение тока*:

$$P = IU. \tag{14}$$

Основываясь на законе Ома, можно в этой формуле I заменить отношением $\frac{U}{R}$, можно также U заменить произведением IR. Таким