**.1 Закон Ома для участка цепи**

Оказалось, что сила тока в металлическом проводнике прямо пропорциональна напряжению на его концах: I ∼ U. Коэффициент пропорциональности принято записывать в виде 1/R:

I = U/R .                                                            (1)

Величина R называется *сопротивлением* проводника. Измеряется сопротивление в *омах* (Ом). Как видим, Ом=В/А.

Дадим словесную формулировку закона Ома.

Закон Ома для участка цепи. *Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению участка.*

Закон Ома оказался справедливым не только для металлов, но и для растворов электролитов.

Сформулированный закон имеет место для так называемого однородного участка цепи — участка, не содержащего источников тока. Закон Ома для неоднородного участка (на котором имеется источник тока) мы обсудим позже.

Вольт-амперная характеристика (1) является линейной функцией. Её графиком служит прямая линия (рис. 1).



Рис. 1 Вольт-амперная характеристика металлического проводника

По этой причине металлические проводники (и электролиты) называются линейными элементами. А вот газоразрядная трубка, например, является нелинейным элементом — её вольт- амперная характеристика уже не будет линейной функцией. Но об этом мы поговорим позднее.

**2 ЭДС. Закон Ома для полной цепи**

До сих пор при изучении электрического тока мы рассматривали направленное движение свободных зарядов во внешней цепи, то есть в проводниках, подсоединённых к клеммам источника тока.

Как мы знаем, положительный заряд q:

* уходит во внешнюю цепь с положительной клеммы источника;
* перемещается во внешней цепи под действием стационарного электрического поля, создаваемого другими движущимися зарядами;
* приходит на отрицательную клемму источника, завершая свой путь во внешней цепи.

Теперь нашему положительному заряду q нужно замкнуть свою траекторию и вернуться на положительную клемму. Для этого ему требуется преодолеть заключительный отрезок пути — внутри источника тока от отрицательной клеммы к положительной. Но вдумайтесь: идти туда ему совсем не хочется! Отрицательная клемма притягивает его к себе, положительная клемма его от себя отталкивает, и в результате на наш заряд внутри источника действует электрическая сила Fэл, направленная*против* движения заряда (т. е. против направления тока).

**2.1 Сторонняя сила**

Тем не менее, ток по цепи идёт; стало быть, имеется сила, «протаскивающая» заряд сквозь источник вопреки противодействию электрического поля клемм (рис. 2).



Рис. 2 Сторонняя сила

Эта сила называется сторонней силой; именно благодаря ей и функционирует источник тока. Сторонняя сила Fст не имеет отношения к стационарному электрическому полю — у неё, как говорят, неэлектрическое происхождение; в батарейках, например, она возникает благодаря протеканию соответствующих химических реакций.

Обозначим через Aст работу сторонней силы по перемещению положительного заряда q внутри источника тока от отрицательной клеммы к положительной. Эта работа положительна, так как направление сторонней силы совпадает с направлением перемещения заряда. Работа сторонней силы Aст называется также работой источника тока.

Во внешней цепи сторонняя сила отсутствует, так что работа сторонней силы по перемещению заряда во внешней цепи равна нулю. Поэтому работа сторонней силы по перемещению заряда q вокруг всей цепи сводится к работе по перемещению этого заряда только лишь внутри источника тока. Таким образом, Aст — это также работа сторонней силы по перемещению заряда по всей цепи.

Мы видим, что сторонняя сила является непотенциальной — её работа при перемещении заряда по замкнутому пути не равна нулю. Именно эта непотенциальность и обеспечивает циркулирование электрического тока; потенциальное электрическое поле, как мы уже говорили ранее, не может поддерживать постоянный ток.

Опыт показывает, что работа Aст прямо пропорциональна перемещаемому заряду q. Поэтому отношение Aст/q уже не зависит от заряда и является количественной характеристикой источника тока. Это отношение обозначается

ε = Аст/q                                                                 (2)

Данная величина называется электродвижущей силой (ЭДС) источника тока. Как видим, ЭДС измеряется в вольтах (В), поэтому название «электродвижущая сила» является крайне неудачным. Но оно давно укоренилось, так что приходится смириться.

Когда вы видите надпись на батарейке: «1,5 В», то знайте, что это именно ЭДС. Равна ли эта величина напряжению, которое создаёт батарейка во внешней цепи? Оказывается, нет! Сейчас мы поймём, почему.

**2.2 Закон Ома для полной цепи**

Любой источник тока обладает своим сопротивлением r, которое называется внутренним сопротивлением этого источника. Таким образом, источник тока имеет две важных характеристики: ЭДС и внутреннее сопротивление.

Пусть источник тока с ЭДС, равной E, и внутренним сопротивлением r подключён к резистору R (который в данном случае называется внешним резистором, или внешней нагрузкой, или полезной нагрузкой). Всё это вместе называется полной цепью (рис. 3).



Рис. 3 Полная цепь

Наша задача — найти силу тока I в цепи и напряжение U на резисторе R.

За время t по цепи проходит заряд q = It. Согласно формуле (60) источник тока совершает при этом работу:

Aст = εq = εIt.                                             (3)

Так как сила тока постоянна, работа источника целиком превращается в теплоту, кото- рая выделяется на сопротивлениях R и r.

Данное количество теплоты определяется законом Джоуля–Ленца:

Q = I2Rt + I2 rt = I2(R + r)t.                  (4)

Итак, Aст = Q, и мы приравниваем правые части формул (3) и (4):

εIt = I2 (R + r)t.

После сокращения на It получаем:

ε = I(R + r).

Вот мы и нашли ток в цепи:

I = ε /(R + r ).                                          (5)

Формула (5) называется *законом Ома для полной цепи.*

Если соединить клеммы источника проводом пренебрежимо малого сопротивления (R = 0), то получится короткое замыкание. Через источник при этом потечёт максимальный ток — ток короткого замыкания:

Iкз = ε /r .

Из-за малости внутреннего сопротивления ток короткого замыкания может быть весьма большим. Например, пальчиковая батарейка разогревается при этом так, что обжигает руки.

Зная силу тока (формула (5)), мы можем найти напряжение на резисторе R с помощью закона Ома для участка цепи:

U = IR = εR/(R + r) .                      (6)

Это напряжение является разностью потенциалов между точками a и b (рис. 3). Потенциал точки a равен потенциалу положительной клеммы источника; потенциал точки b равен потенциалу отрицательной клеммы. Поэтому напряжение (6) называется также напряжением на клеммах источника.

Мы видим из формулы (6), что в реальной цепи будет U < ε — ведь ε умножается на дробь, меньшую единицы. Но есть два случая, когда U = ε.

1.Идеальный источник тока. Это источник с нулевым внутренним сопротивлением. При r = 0 формула (6) даёт U = ε.

2.Разомкнутая цепь. Рассмотрим источник тока сам по себе, вне электрической цепи. В этом случае можно считать, что внешнее сопротивление бесконечно велико: R = ∞. Тогда величина R + r неотличима от R, и формула (6) снова даёт нам U =ε.

Смысл этого результата прост: если источник не подключён к цепи, то идеальный вольтметр, подсоединённый к полюсам источника, покажет его ЭДС.

**3 Электрическое сопротивление**

А сейчас давайте подумаем вот о чём. Пусть к концам проводника приложено постоянное напряжение U. Тогда на свободные заряды проводника действует сила со стороны стационарного электрического поля. Раз есть сила — значит, эти заряды должны двигаться с ускорением; скорость их направленного движения будет увеличиваться, а вместе с ней будет возрастать и сила тока. Но закон Ома гласит, что сила тока будет постоянной. Как же так?

Дело в том, что сила со стороны стационарного поля — не единственная сила, действующая на свободные заряды проводника.

Например, свободные электроны металла, совершая направленное движение, сталкиваются с ионами кристаллической решётки. Возникает своего рода сила сопротивления, действующая со стороны проводника на свободные заряды. Эта сила уравновешивает электрическую силу, с которой на свободные заряды действует стационарное поле. В результате скорость направленного движения заряженных частиц не меняется по модулю; вместе с ней остаётся постоянной и сила тока.

Так что величина R названа сопротивлением не случайно. Она и в самом деле показывает, в какой степени проводник «сопротивляется» прохождению тока.

**3.1 Удельное сопротивление**

Возьмём два проводника из одинакового материала с равными поперечными сечениями; пусть отличаются только их длины. Ясно, что сопротивление будет больше у того проводника, у которого больше длина. В самом деле, при большей длине проводника свободным зарядам труднее пройти сквозь него: каждый свободный электрон встретит на своём пути больше ионов кристаллической решётки. Аналогия такая: чем длиннее заполненная машинами улица, тем труднее будет через неё проехать.

Пусть теперь проводники отличаются только площадью поперечного сечения. Ясно, что чем больше площадь, тем меньше сопротивление проводника. Снова аналогия: чем шире шоссе, тем больше его пропускная способность, т. е. тем меньше его «сопротивление» движению машин.

Опыт подтверждает эти соображения и показывает, что сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S:

R = ρ l /S . (7)

Коэффициент пропорциональности ρ уже не зависит от геометрии проводника; он является характеристикой вещества проводника и называется удельным сопротивлением данного вещества. Величины удельных сопротивлений различных веществ можно найти в соответствующей таблице.

В каких единицах измеряется удельное сопротивление? Давайте выразим его из формулы (7):

ρ = RS/l .

Получим:

[ρ] = Ом · м2 /м = Ом · м.

Однако такая «теоретическая» единица измерения не всегда удобна. Она вынуждает при расчётах переводить площадь поперечного сечения в квадратные метры, тогда как на практике чаще всего речь идёт о квадратных миллиметрах (для проводов, например). На такой случай предусмотрена «практическая» единица:

Ом · мм2/ м .