

# Участок цепи с источником тока

А. ЧЕРНОУЦАН

**П**ОЖАЛУЙ, большинство школьников согласится, что основные законы постоянного тока достаточно просты. И законы Ома, и закон Джоуля — Ленца легко запомнить и несложно применять. Но, к сожалению, эта простота кончается при переходе к участку цепи, содержащему источник тока. Начнем с того, что закон Ома для такого участка — назовем его обобщенным законом Ома для участка цепи — в школе вообще не проходят, а он очень полезен как для решения задач, так и для более глубокого понимания теоретических вопросов. Как мы увидим, опираясь на обобщенный закон Ома, можно лучше разобраться в энергетических соотношениях для участка цепи с источником тока.

## Обобщенный закон Ома

Обсудим сначала физический смысл закона Ома, относящегося к участку цепи, содержащему только идеальный резистор. Закон Ома утверждает, что для поддержания тока на участке к нему надо приложить постоянное напряжение, причем сила тока и напряжение пропорциональны друг другу:  $U = IR$ . Но это означает, что для поддержания направленного движения свободных зарядов на них должна действовать постоянная сила со стороны электрического поля  $\vec{E}$ . В случае участка цепи без источников это поле является электростатическим:  $\vec{E} = \vec{E}_{\text{эл}}$ , оно создается самими зарядами проводника. (В процессе установления тока заряды вдоль всей цепи за очень короткое время перераспределяются таким образом, чтобы создать нужное поле.) Переформулируем закон Ома следующим образом: если ток на участке цепи поддерживается полем  $\vec{E}$ , то сила тока пропорциональна работе этого поля по переносу единичного заряда с одного конца участка на другой. Напомним, что в случае электростатического поля эта работа равна разности потенциалов.

Обозначим один конец участка цифрой 1, а другой цифрой 2 и запишем

закон Ома в виде

$$U_{12} = I_{12}R, \quad (1)$$

где  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ ,  $I_{12} = +I$ , если ток течет от 1 к 2, и  $I_{12} = -I$  для тока, текущего навстречу движению, т.е. от 2 к 1. Такая форма записи, позволяющая передвигаться по участку цепи в любом направлении, очень удобна.

Теперь предположим, что на этом же участке цепи действуют сторонние силы. Вспомним, что численной характеристикой сторонних сил является ЭДС (электродвижущая сила), которая определяется как работа сторонних сил по переносу единичного заряда с одного конца участка цепи на другой. Определим величину  $\varepsilon_{12}$  как работу сторонних сил по переносу единичного заряда от 1 к 2, т.е.  $\varepsilon_{12} = +\varepsilon$ , если сторонние силы направлены по движению (от 1 к 2), и  $\varepsilon_{12} = -\varepsilon$  в противоположном случае (рис.1).

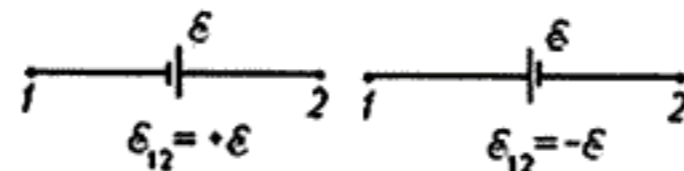


Рис. 1

Направленное движение зарядов на участке цепи теперь поддерживается как электростатическим полем  $\vec{E}_{\text{эл}}$ , так и полем сторонних сил  $\vec{E}_{\text{ст}}$ . Точнее, оно определяется суммарным полем  $\vec{E} = \vec{E}_{\text{эл}} + \vec{E}_{\text{ст}}$ , и поскольку заряды не могут «отличить» суммарное поле от чисто электростатического, то разумно предположить, что сила тока так же зависит от суммарного поля, как раньше (в отсутствие источников) она зависела от электростатического поля. А именно, сила тока пропорциональна работе суммарного поля  $\vec{E}$  по переносу единичного заряда с одного конца участка на другой. Эта работа состоит из двух частей — из работы электростатического поля, равной разности потенциалов, и из работы сторонних сил, равной, по определению, ЭДС:

$$I_{12}R = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}, \quad (2)$$

где  $R$  — сопротивление участка цепи, включая внутреннее сопротивление источника.

Еще раз сформулируем правила знаков. Если направление тока на рассматриваемом участке неизвестно, то его выбирают произвольным образом (если после расчетов получится  $I < 0$ , значит, действительное направление тока противоположно выбранному, но величина тока найдена правильно). При движении от точки 1 к точке 2 надо записать  $I_{12} = I$ , если мы идем по току, и  $I_{12} = -I$ , если против. Если мы идем по сторонним силам, то  $\varepsilon_{12} = \varepsilon$ , а если

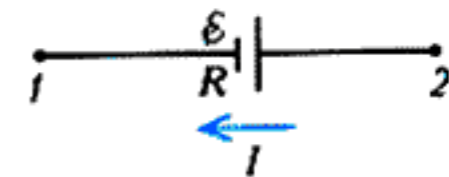


Рис. 2

против, то  $\varepsilon_{12} = -\varepsilon$ . Например, для рисунка 2 получаем

$$-IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon.$$

Разберем теперь несколько примеров на применение обобщенного закона Ома.

**Вывод закона Ома для полной цепи.** Рассмотрим замкнутую неразветвленную цепь. Начнем с простейшего случая, когда в цепи имеется только один источник тока (рис.3). Ток течет в

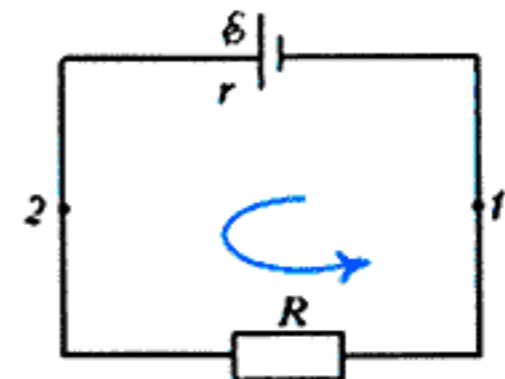


Рис. 3

направлении сторонних сил этого источника; пройдя контур в этом направлении, запишем обобщенный закон Ома для участка с источником и для участка с внешним сопротивлением:

$$Ir = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad IR = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Складывая эти уравнения, получаем

$$I(r + R) = \varepsilon.$$

Разности потенциалов сократились, потому что работа электростатических сил по замкнутому контуру равна нулю. В случае многих источников направление тока заранее неизвестно; выбираем его произвольно и пройдем контур в этом направлении. Записав соответствующие уравнения,