

«Даже самое крохотное действие
маленького существа может привести
к значительным изменениям во вселенной»
Никола Тесла

Предисловие

В промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве представители различных специальностей в своей работе имеют дело с различного рода электрооборудованием. Поэтому в учебных программах студентов различных профилей подготовки в вузах или в средних специальных учебных заведениях включен предмет по изучению вопросов теории и практики использования различных электроустановок и полупроводниковых приборов. При этом задача специалистов заключается не только в эксплуатации электротехники, а также в анализе функциональных возможностей устройств, оценке потерь в элементах.

Изложенный материал базируется на знаниях, полученных студентами при изучении курсов физики, математики в области электричества, физических законов электромагнитного поля.

Методика изложения материала во многом базируется на большом практическом опыте преподавания электротехники и основ электроники в СПбПУ Петра Великого [1] и СПбГЛТУ им. С. М. Кирова [2].

Настоящее издание отличается простотой изложения основных разделов электротехники и электроники. Описание разделов сопровождается наглядными примерами. Рассмотрены перспективы развития полупроводниковой элементной базы и схемотехники на их основе.

Авторы выражают благодарность коллегам Высшей школы электроэнергетических систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а также коллегам других учебных заведений, которые в своих устных и письменных отзывах сделали полезные замечания по учебнику.

Отзывы об учебнике направлять по адресу: 194251, СПб., ул. Политехническая, 29.

Введение

Электротехника – область науки и техники, которая занимается изучением электрических и магнитных явлений и их использованием для нужд промышленного производства и быта.

Практически вся энергия в настоящее время вырабатывается электрическими машинами. При этом для передачи и распределения электроэнергии требуются трансформаторы, линии электропередачи, преобразователи и т. д. Кроме того, две трети электроэнергии, выработанной на электростанциях, преобразуется различными электроприводами в механическую энергию.

Широкое применение электротехники во всех областях деятельности человека объясняется преимуществами электрической энергии перед другими видами энергии, а именно:

- универсальность, легкая преобразуемость в другие виды энергии (световую, тепловую, механическую и т. д.). Вместе с тем в электрическую энергию преобразуются любые другие виды энергии;

- простота получения и передачи на большие расстояния;
- удобство распределения между потребителями;
- возможность использования для автоматизации и контроля за производственными процессами.

Электроника – область науки и техники, которая занимается изучением, разработкой и совершенствованием электронных приборов для нужд производства и быта.

Широкое использование электронной аппаратуры обусловлено ее быстрым действием, точностью, высокой чувствительностью, малым потреблением энергии, постоянно возрастающей экономичностью.

Электронные приборы составляют основу важнейших средств современной связи, автоматики, измерительной техники, схемотехники и т. д. На основе электроники реален переход к полностью автоматизированному производству, созданию промышленных роботов и автоматов, наделенных искусственным интеллектом.

Эти обстоятельства требуют обеспечения профессиональной подготовки студентов, при которой они будут располагать надежной системой знаний, умений и навыков (профессиональных компетенций) в актуальных для них областях электротехники и электроники.

Предлагаемый учебник имеет целью в доступной форме дать учащимся неэлектротехнических специальностей основные сведения о важнейших разделах электротехники и электроники.

Глава 1

Электрические цепи постоянного тока

1.1. Основные понятия об электрических цепях

Электрический ток проводимости – это явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе (электроны в металлах).

Для возникновения электрического тока должна быть создана электрическая цепь, состоящая из проводников. Для поддержания тока необходим источник электрической энергии.



Закон Ома выражает количественную зависимость между током, напряжением и сопротивлением. Согласно закону, сопротивление участка цепи (без источника энергии) прямо пропорционально напряжению U между ее концами и обратно пропорционально току I :

$$r = \frac{U}{I}, [\text{Ом}],$$

Георг Симон Ом,
немецкий физик (1787–1854)

В замкнутой электрической цепи электродвижущая сила (ЭДС) равна сумме падений напряжений на отдельных участках цепи. На основании закона Ома сопротивление этой цепи:

$$r = \frac{E}{I}.$$

Такое сопротивление складывается из сопротивлений отдельных участков цепи, в него входит и внутреннее сопротивление источника электроэнергии (обычно оно мало).

Одним из важных вопросов этого раздела является расчет распределения токов в разветвленных линейных цепях с одним или несколькими источниками питания (ЭДС). Основным методом расчета является метод непосредственного применения законов Кирхгофа.

1.2. Законы Кирхгофа

Ветвь – это несколько последовательно соединенных элементов, по которым протекает один и тот же ток.

Контур цепи – это ряд ветвей, образующих замкнутую электрическую цепь.

1-й закон Кирхгофа (закон для токов) – сумма токов, притекающих к любой точке разветвления (узловой точке), равна сумме токов, уходящих из нее.

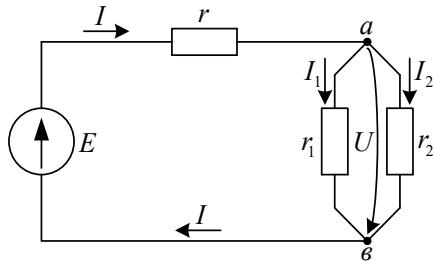


Рис. 1.1. Электрическая схема, демонстрирующая 1-й закон Кирхгофа

$I = I_1 + I_2$ или арифметическая сумма токов в любом узле равна нулю:
 $\sum I_i = 0$ (положительное направление токов – от узла).

1-й закон Кирхгофа – следствие принципа сохранения заряда элементарных частиц, при направленном движении которых образуется ток.

На основании 1-го закона Кирхгофа и закона Ома определяется общая проводимость и сопротивление разветвления, т. е. параллельного соединения сопротивлений (резисторов).

Параллельное соединение – когда сопротивления подключены к одной и той же паре узлов (узлы a и b на рис. 1.1) и находятся под одним и тем же напряжением U .

При параллельном соединении сопротивлений r_1 и r_2 токи по закону Ома будут равны:

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}.$$

Тогда на основании 1-го закона Кирхгофа $I = I_1 + I_2 = U \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$.

$$\text{Отсюда } r_s = \frac{U}{I} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

$$\text{В общем случае при соединении } N \text{ сопротивлений: } r_s = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{r_k}}.$$

При замене сопротивлений соответствующими проводимостями (величинами, обратными сопротивлениям):

$$g_k = \frac{1}{r_k},$$

$$r_g = \frac{1}{\sum_{k=1}^N g_k} \Rightarrow g_g = \frac{1}{r_g} = \sum_{k=1}^N g_k .$$

Общий ток. $I = \frac{U}{r_s} = U \cdot g_s = U \cdot \left(\sum_{k=1}^N g_k \right)$.

Применяя 1-й закон Кирхгофа и закон Ома, можно рассчитать смешанное соединение сопротивлений.

Смешанное соединение – когда несколько сопротивлений, включенных параллельно, соединены последовательно с другими сопротивлениями.

На рис. 1.1 r_1 и r_2 соединены параллельно и включены последовательно с r .

Для расчета подобной цепи нужно сначала заменить разветвление эквивалентным сопротивлением, а затем рассчитывать цепь как последовательное соединение двух сопротивлений. Эквивалентное сопротивление: $r_s = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$.

Теперь цепь можно рассматривать как последовательное соединение r и r_s . Общий ток:

$$I = \frac{E}{r + r_s} = \frac{E}{r + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}}.$$

Напряжение между узлами разветвления будет: $U = I \cdot r_a$.

И на основании закона Ома находим токи в ветвях: $I_1 = \frac{U}{r_1}$ и $I_2 = \frac{U}{r_2}$.

Пример № 1

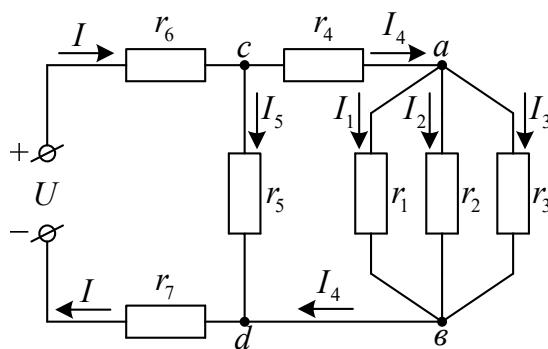


Рис. 1.2. Электрическая схема к примеру № 1

Дано:

$$U = 240 \text{ V}; r_1 = 10 \text{ }\Omega\text{m}; r_2 = 20 \text{ }\Omega\text{m}; r_3 = 60 \text{ }\Omega\text{m}; r_4 = 9 \text{ }\Omega\text{m}; r_5 = 30 \text{ }\Omega\text{m}; r_6 = 4 \text{ }\Omega\text{m}; r_7 = 2 \text{ }\Omega\text{m}.$$

Найти: все токи.

Решение.

1. Определяем эквивалентное сопротивление между a и b :

$$\frac{1}{r_{ab}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{60} = \frac{1}{6} \Rightarrow r_{ab} = 6 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление смешанного соединения:

$$r' = r_{ab} + r_4 = 6 + 9 = 15 \text{ Ом.}$$

3. Так как r' соединено параллельно с r_5 , то

$$\frac{1}{r_{cd}} = \frac{1}{r'} + \frac{1}{r_5} = \frac{1}{15} + \frac{1}{30} = \frac{1}{10} \Rightarrow r_{cd} = 10 \text{ Ом.}$$

4. Общее сопротивление цепи:

$$r_s = r_6 + r_{cd} + r_7 = 4 + 10 + 2 = 16 \text{ Ом.}$$

5. Общий ток:

$$I = \frac{U}{r_s} = \frac{240}{16} = 15 \text{ А.}$$

6. $U_{cd} = I \cdot r_{cd} = 15 \cdot 10 = 150 \text{ В.}$

7. Токи в сопротивлениях r' и r_5 :

$$I_4 = \frac{U_{cd}}{r'} = \frac{150}{15} = 10 \text{ А; } I_5 = \frac{U_{cd}}{r_5} = \frac{150}{30} = 5 \text{ А.}$$

8. $U_{ab} = I_4 \cdot r_{ab} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ В.}$

9. Токи в сопротивлениях r_1 , r_2 , r_3 :

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{r_1} = \frac{60}{10} = 6 \text{ А, } I_2 = \frac{U_{ab}}{r_2} = \frac{60}{20} = 3 \text{ А, } I_3 = \frac{U_{ab}}{r_3} = \frac{60}{60} = 1 \text{ А.}$$

Пример № 2

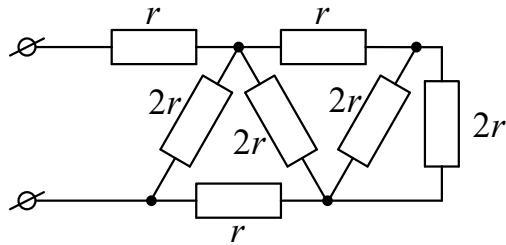
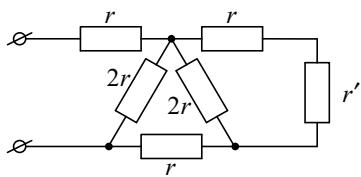


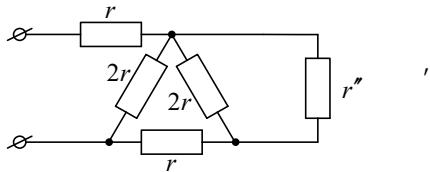
Рис. 1.3. Электрическая схема к примеру № 2

Определить эквивалентное сопротивление цепи r_s .

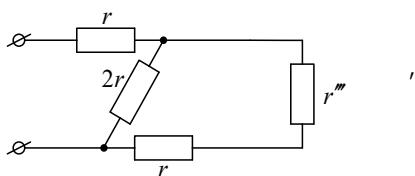
$$1. r' = \frac{1}{\frac{1}{2r} + \frac{1}{2r}} = r;$$



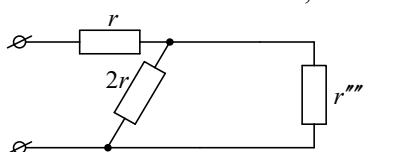
$$2. r'' = r + r' = 2r;$$



$$3. \frac{1}{r'''} = \frac{1}{2r} + \frac{1}{r''} = \frac{1}{2r} + \frac{1}{2r} = \frac{1}{r} \Rightarrow r''' = r;$$



$$4. r'''' = r''' + r = 2r;$$



$$5. r''''' = \frac{1}{\frac{1}{2r} + \frac{1}{2r}} = r;$$

$$6. r_s = r + r''''' = 2r.$$

2-й закон Кирхгофа характеризует равновесие в замкнутых контурах электрической цепи. Он гласит, что алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения на всех сопротивлениях, входящих в контур:

$$\sum E = \sum I \cdot r.$$

При обходе замкнутого контура по часовой стрелке (или против часовой стрелки) ЭДС и токи, направления которых совпадают с принятым направлением обхода, следует считать положительными.

2-й закон Кирхгофа является следствием того, что потенциал любой точки цепи однозначно определяется ее положением в цепи. Это наглядно показывает следующая форма записи 2-го закона Кирхгофа: $\sum E - \sum I \cdot r = 0$, т. е. алгебраическая сумма изменений потенциала при обходе замкнутого контура равна нулю, так как после обхода любого замкнутого контура мы возвращаемся в исходную точку, следовательно, к исходному потенциальному.

Применение 2-го закона Кирхгофа необходимо при расчетах электрических цепей, содержащих два и более источников электрической энергии.

1.3. Методы расчета электрических цепей

Метод непосредственного применения законов Кирхгофа

а) Для составления уравнений по двум законам Кирхгофа при расчете токов цепи, подобной (рис. 1.4), следует сначала произвольно наметить направление токов в ней.

б) Затем составляют по 1-му закону Кирхгофа уравнения для $(m - 1)$ узлов. Число независимых уравнений на единицу меньше числа узлов. Например, цепь (рис. 1.4) содержит два узла (*a* и *б*) ($m = 2$), и для нее можно составить только одно независимое уравнение 1-го закона Кирхгофа для узла *a* $-I_1 - I_2 + I_3 = 0$, а уравнение для узла *б* будет: $-I_3 + I_1 + I_2 = 0$, т. е. оно содержит те же токи, что и первое уравнение.

Входящие в узел токи со знаком « $-$ », выходящие со знаком « $+$ ».

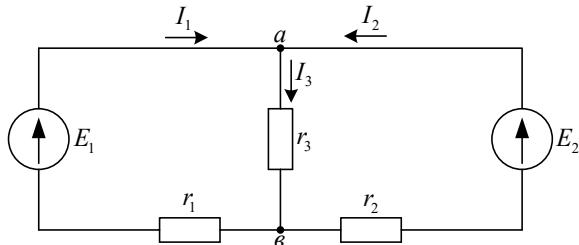


Рис. 1.4. Электрическая схема, демонстрирующая оба закона Кирхгофа

в) Недостающие уравнения получают по 2-му закону Кирхгофа. При составлении уравнений по 2-му закону Кирхгофа нужно так выбирать контур обхода, чтобы в каждый последующий контур входило не менее одной новой ветви.

Число ветвей n равно числу независимых токов. Для определения этих n токов уже составлено на основании 1-го закона Кирхгофа $(m - 1)$ уравнений. Следовательно, недостает $(n - m + 1)$ уравнений.

Для рис. 1.4, где $n = 3$, $m = 2$, число недостающих уравнений будет: $n - m + 1 = 3 - 2 + 1 = 2$.

Эти уравнения:

$$E_1 = I_1 \cdot r_1 + I_3 \cdot r_3,$$

$$E_2 = I_2 \cdot r_2 + I_3 \cdot r_3.$$

Третий контур в этой схеме содержит ветви, уже вошедшие в первые два контура, поэтому уравнение $E_1 - E_2 = I_1 \cdot r_1 - I_2 \cdot r_2$ будет для расчета ненужным.

Подобный расчет, связанный с совместным решением системы n уравнений, требует значительной затраты времени, поэтому существует ряд специальных методов расчета (метод контурных токов, узловых напряжений и т. д.), но все они базируются на законах Кирхгофа.

Пример № 3 (непосредственное применение законов Кирхгофа)

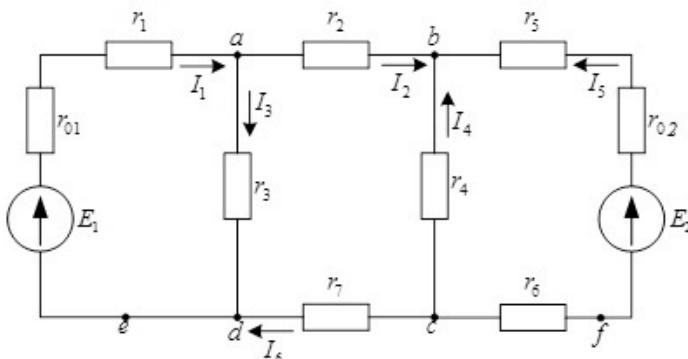


Рис. 1.5. Электрическая схема к примеру № 3

Схема содержит: 6 ветвей и 4 узла ($n = 6$, $m = 4$). На схеме даны положительные направления всех шести токов.

По первому закону Кирхгофа составляем $m - 1 = 4 - 1 = 3$ уравнения для узлов a , b , c :

$$\text{узел } a: I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

$$\text{узел } b: I_2 + I_4 + I_5 = 0;$$

$$\text{узел } c: -I_4 - I_5 - I_6 = 0.$$

По 2-му закону Кирхгофа составляем $n - m + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ уравнения для контуров *adea*; *abcsa*; *bfcf* (направление обхода принимаем по часовой стрелке):

$$\text{контур } adea: E_1 = I_1 \cdot (r_{01} + r_1) + I_3 \cdot r_3;$$

$$\text{контур } abcsa: 0 = I_2 \cdot r_2 - I_4 \cdot r_4 + I_6 \cdot r_7 - I_3 \cdot r_3;$$

$$\text{контур } bfcf: -E_2 = -I_5 \cdot r_5 + I_4 \cdot r_4 - I_5 \cdot r_6 - I_5 \cdot r_{02}.$$

Таким образом, при расчете данной цепи по методу непосредственного применения закона Кирхгофа приходится решать систему из шести уравнений.

Метод контурных токов

При расчете сложных цепей с большим числом узловых точек предпочтительен метод контурных токов, который позволяет освободиться от составления уравнений по 1-му закону Кирхгофа и тем самым значительно сократить общее число совместно решаемых уравнений (с n до $(n - m + 1)$).

Последовательность операций расчета:

- выбирают в схеме взаимно независимые контуры (так, чтобы одна из ветвей соответствующего контура входила только в этот контур);
- для выбранных независимых контуров принимают произвольно направления контурных токов в них;
- составляют для выбранных контуров уравнения по 2-му закону Кирхгофа относительно контурных токов.

Пример № 4

Для цепи, изображенной на рис. 1.5 (пример № 3), выбирая прежние независимые контуры и принимая указанные на рис. 1.6 направления контурных токов, получим следующие три уравнения:

$$\begin{cases} E_1 = I_1 \cdot (r_{01} + r_1 + r_3) - I_{II} \cdot r_3, \\ 0 = I_{II} \cdot (r_2 + r_4 + r_7 + r_3) - I_1 \cdot r_3 + I_{III} \cdot r_4, \\ E_2 = I_{III} \cdot (r_{02} + r_5 + r_4 + r_6) + I_{II} \cdot r_4. \end{cases}$$

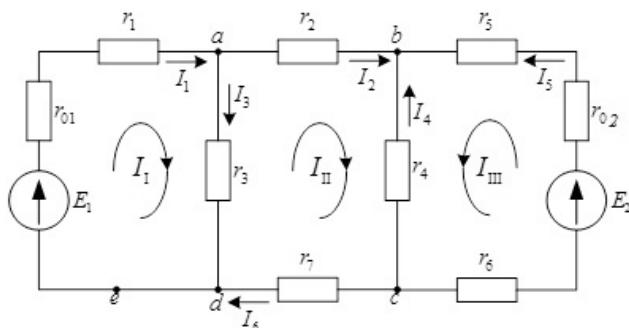


Рис. 1.6. Электрическая схема к примеру № 4

После того как найдены контурные токи, определяют действительные токи в ветвях ($I_1 \dots I_6$).

В ветвях, не являющихся общими для смежных контуров, найденный контурный ток будет равен действительному току ветви.

В ветвях же, общих для смежных контуров, действительный ток равен алгебраической сумме контурных токов.

Таким образом, в нашем примере действующие токи равны:

$$I_1 = I_1; I_2 = I_{\text{II}}; I_3 = I_1 - I_{\text{II}}; I_4 = -(I_{\text{II}} + I_{\text{III}}); I_5 = I_{\text{III}}; I_6 = I_{\text{II}}.$$

1.4. Основные определения и законы электромагнетизма

Атомы металлов (проводников) имеют неустойчивые электроны на внешней орбите. Эти электроны отрываются от ядра, становятся свободными, что создает электропроводность материала.

Атомы диэлектриков характеризуются устойчивой связью с ядром.

Электрическим током называется упорядоченное движение свободных электронов (носителей заряда) в металлическом проводнике под воздействием приложенного напряжения или ЭДС.

Прохождение электрического тока сопровождается следующими его действиями.

1. Тепловым, определяемым законом Джоуля – Ленца:

$Q = I^2 R t$ [Дж] – количество теплоты равно работе, совершающейся электрическим полем при перемещении заряда.

2. Химическим, определяемым законом Фарадея:

$$M = K_x It,$$

где M – масса вещества, выделенная электрическим током из раствора (электролита); K_x – электрохимический эквивалент выделяемого вещества.

Растворы всех кислот, щелочей, солей проводят электрический ток, при этом происходят перенос и оседание ионов на катодах. Этот процесс электролиза используется в промышленности для: а) нанесения покрытий одного металла на другой; б) копирования металлических изделий; в) рафинирования (очистки) металлов; г) извлечения металлов из растворов (в цветной металлургии).

3. Электромагнитным.

Если подать на катушку переменное напряжение, то возникший переменный ток, проходя по каждому витку катушки, создает свое магнитное поле. Направление силовых линий этого поля определяется по правилу буравчика.

Эти магнитные потоки имеют одинаковое направление в любой момент времени и поэтому складываются, образуя результирующее магнитное поле катушки (соленоида).

Этот результирующий переменный магнитный поток, пронизывая своими силовыми линиями витки катушки, индуцирует в ней ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \text{ или } e_L = -W \frac{d\Phi}{dt} [\text{Вб}]. \quad (1)$$

Знак « $-$ » показывает, что ЭДС самоиндукции препятствует причине, ее вызывающей, т. е. изменению тока (i) и магнитного потока (Φ) во времени.

L – индуктивность [Гн]; W – число витков катушки; Φ – магнитный поток [Вб].

Помимо ЭДС самоиндукции существует понятие о ЭДС взаимной индукции, создаваемой результирующим магнитным потоком двух близко расположенных катушек.

Закон электромагнитной индукции (закон М. Фарадея)

Закон служит для определения ЭДС, возникающей в проводниках при пересечении ими силовых магнитных линий, или при изменении магнитного потока, сцепленного с контуром (рис. 1.7). Индукция (сила) магнитного поля:

$$B = \frac{\Phi}{S} [\text{Тл}],$$

где S – площадь, пересекаемая магнитным потоком. Если проводник с активной длиной l_a перемещать со скоростью V перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией B , то в проводнике будет индуцироваться ЭДС, равная:

$$E = Bl_a V \sin \alpha, \sin \alpha = 1, \quad (2)$$

где α – угол наклона проводника к силовым линиям магнитного поля.

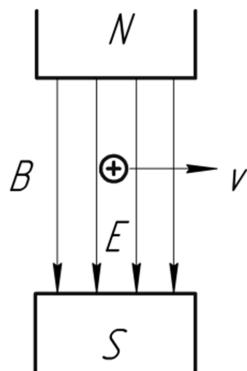


Рис. 1.7. Проводник в магнитном поле

Направление этой ЭДС может быть определено по правилу правой руки: силовые линии – в ладонь, большой палец – по направлению движения, четыре пальца указывают направление ЭДС.

Закон электромагнитных сил (закон Био – Савара – Лапласа)

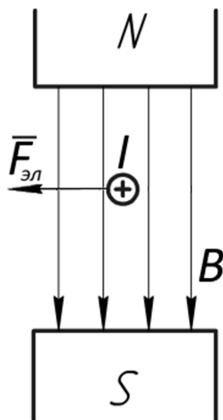


Рис. 1.8. Проводник в магнитном поле под действием электромагнитных сил

На проводник с током I активной длиной l_a , находящийся в зоне действия магнитного поля с индукцией B , действует выталкивающая сила:

$$\bar{F}_{\text{эл}} = \bar{B} \cdot I \cdot l_a [\text{H}], \quad (3)$$

направление которой определяется по правилу левой руки: силовые линии – в ладонь, четыре пальца – по направлению тока, большой палец укажет направление силы F .

Законы электромагнитной индукции и электромагнитных сил чаще действуют совместно.

Из уравнений (2), (3) следует принцип обратимости электрических машин Ленца:

$$Bl_a = \frac{E}{V} = \frac{F_{\text{эл}}}{I} \Rightarrow EI(\text{эл.}) = F_{\text{эл}} V(\text{мех.}).$$

Если левую и правую части умножить на время t :

$$EIt (\text{эл. энергия}) = F_{\text{эл}} Vt (\text{мех. энергия}).$$

Принцип Ленца: любая электрическая машина может работать как в качестве ЭД (преобразует электрическую энергию в механическую), так и в качестве ЭГ (преобразует механическую энергию в электрическую).

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон Ома для замкнутой электрической цепи или ее участка?
2. Как формулируются первый и второй законы Кирхгофа?
3. Как определяется эквивалентное сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединениях сопротивлений?
4. Каковы основные методы расчета электрических цепей?
5. Сформулируйте основные законы электромагнетизма.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru