

Преобразование энергии в электрических цепях

Токопроводящую рамку, вращающуюся в однородном магнитном поле, которую в учебной литературе традиционно представляют в качестве простейшей электрической машины, необходимо заменить отрезком прямолинейного проводника. Знакомство с процессами, протекающими в прямолинейном проводнике, который движется в однородном магнитном поле, способствует более полному (более глубокому) пониманию принципа действия электрических машин. Рассматривая движение отрезка проводника в однородном магнитном поле, можно убедиться в том, что между механическими и электрическими силами, действующими в электрических машинах, нет принципиальной разницы, и это значительно упрощает процедуру знакомства с процессами преобразования энергии в электрических машинках и в электрических цепях.

Знакомство с принципом действия простейшей электрической машины, необходимо начинать с элементарного электрического заряда, движущегося в магнитном поле.

§5.2. Электрический заряд, движущийся в магнитном поле

На рис. 5.1-а крестиком (\otimes) показано направление движения положительного электрического заряда $+q$ (заряд движется от нас), а concentric окружности, обозначенные символом B – это силовые линии магнитного поля, которое наведено зарядом и является следствием движения этого заряда. В дальнейшем наведенное зарядом магнитное поле будет называться *собственным магнитным полем движущегося заряда*. Стрелки, находящиеся на окружностях B , указывают направление собственного магнитного поля. Определение указанного направления производится с помощью правила правого винта (с помощью правила буравчика).

На рис. 5.1-б показано междуполюсное пространство магнита и некоторая часть его северного N и южного S магнитного полюса. Линии со стрелками, соединяющие полюса магнита, – это силовые линии *однородного* магнитного поля, которое принадлежит этому магниту и является *внешним магнитным полем* по отношению к заряду $+q$.

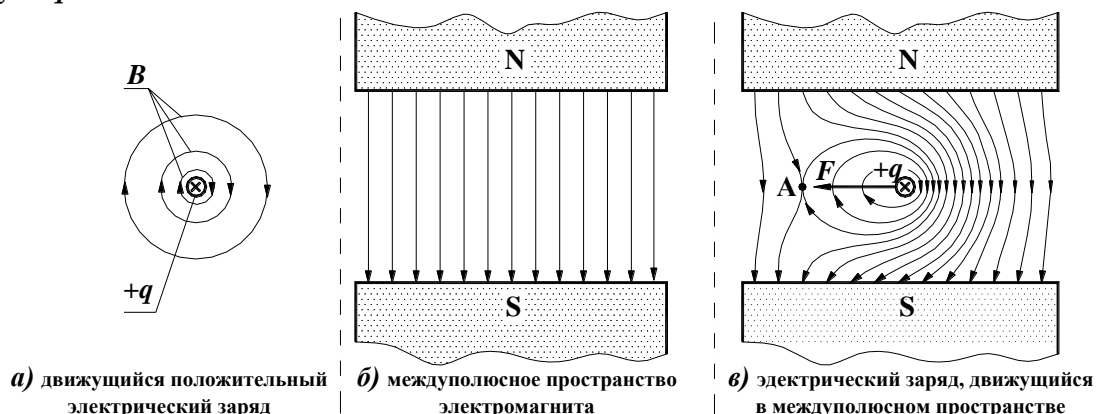


Рис. 5.1. Взаимодействие движущегося электрического заряда с внешним магнитным полем

Если заряд $+q$, сохраняя показанное на рис. 5.1-а направление движения, окажется в междуполюсном пространстве электромагнита, то справа от заряда направления силовых линий собственного и внешнего магнитного поля совпадут, а слева от заряда магнитные силовые линии окажутся встречно направленными. Взаимное наложение собственного магнитного поля и внешнего магнитного поля приведет к появлению результирующего магнитного поля, картина которого представлена на рис. 5.1-в.

Любое магнитное поле находится под действием сил продольного натяжения и поперечных сил взаимного отталкивания (§4.21). **Примечание:** если здесь и в

дальнейшем номер формулы, рисунка или параграфа заключен в фигурные {} скобки, то это означает, что указанная формула рисунок или параграф содержится в учебном пособии «Основы электротехники», полный текст которого размещен на сайте <http://sites.google.com/site/nikolanech/>.

Силы продольного натяжения стремятся сократить длину каждой магнитной силовой линии до минимально-возможных размеров, а соседние магнитные силовые линии, направления которых *совпадают*, находятся под действием сил взаимного отталкивания {§4.21}. Действие силы продольного натяжения и поперечного отталкивания направлено на восстановление первоначальной формы собственного (рис. 5.1-а) и внешнего (рис. 5.1-б) магнитного поля, и, как следствие, на вытеснение заряда $+q$ в направлении вектора F (рис. 5.1-в).

На рис. 5.1-в отмечена точка A – точка соприкосновения двух *противоположно* направленных магнитных силовых линий. Без таких точек невозможно преобразование магнитных полей и сохранения в целостности магнитных силовых линий {§4.23} – невозможно сохранение вихревого характера преобразуемых магнитных полей, а результаты опытов указывают на существование только вихревых магнитных полей.

§5.3. Силы Лоренца

Продольную ось прямолинейного проводящего ток I проводника, длина которого равна l , необходимо расположить перпендикулярно магнитным силовым линиям внешнего магнитного поля (рис. 5.1-б) так, чтобы направление текущего в проводнике тока совпадало с направлением движения заряда $+q$ (рис. 5.1-а). В этом случае текущий в проводнике ток I наведет такое же по направлению магнитное поле, как и заряд $+q$, поэтому проводник окажется под действием силы F (рис. 5.1-в).

Значение индукции B внешнего магнитного поля определяется с помощью уравнения $B = F/Il$ {4.7}. Знаменатель правой части уравнения {4.7} необходимо умножить и разделить на время t – время, в продолжение которого упорядочено движущиеся заряды проводимости проходят расстояние l , которое равно длине проводника, находящегося во внешнем магнитном поле:

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{F}{Il \frac{t}{t}} = \frac{F}{It \cdot \frac{l}{t}} \quad (5.1)$$

В знаменателе крайней правой части выражения (5.1) появился сомножитель (l/t) , значение которого равно скорости $v = l/t$ {2.3}, с которой происходит упорядоченное движение зарядов проводимости, а произведение It равно величине заряда $q = It$ {2.2}, переместившегося через поперечное сечение проводника в продолжение времени t , поэтому

$$B = \frac{F}{qv} \quad (5.2)$$

Преобразовав уравнение (5.2), получим формулу, с помощью которой определяется значение силы, действующей на движущийся в магнитном поле электрический заряд:

$$F = Bqv \quad (5.3)$$

С помощью уравнения (5.3) определяется значение силы F , действующей на движущийся со скоростью v точечный электрический заряд, величина которого равна q , а его траектория перпендикулярна силовым линиям внешнего магнитного поля.

С помощью уравнения (5.3) определяется так же значение силы F , действующей на движущийся заряд q , который обладает произвольной формой, размерами, величиной и движется со скоростью v перпендикулярно магнитным силовым линиям и весь объем этого заряда при движении остается в *однородном* внешнем магнитном поле.

Следовательно, с помощью уравнения (5.3) можно определить значение силы F , действующей на заряд q , и величина этого заряда равна сумме величин всех зарядов проводимости, которые при протекании тока I упорядочено движутся со скоростью v перпендикулярно силовым линиям **однородного** внешнего магнитного поля.

Сила F , которая действует на заряд q и является результатом взаимодействия собственного и внешнего магнитного поля называется силой Лоренца.

На месте положительного электрического заряда $+q$ (рис. 5.1-а) может оказаться отрицательный заряд $-q$. Вокруг движущегося отрицательного заряда наводится магнитной поле противоположно направленное тому, что наводится вокруг положительного заряда. Следовательно, **на разноименные заряды, движущиеся в одном направлении и в одном внешнем магнитном поле, действуют противоположно направленные силы Лоренца, а на разноименные заряды, движущиеся в противоположных направлениях (упорядоченно движущихся в проводниках второго рода), действуют силы Лоренца одного направления.**

§5.4. ЭДС – это результат действия сил Лоренца

На рис. 5.2-а изображен проводник Π , который движется в междуполюсном пространстве магнита в направлении вектора v . На рис. 5.2-б изображено междуполюсное пространство представленного на рис. 5.2-а магнита, рассматриваемое со стороны северного N магнитного полюса. Северный полюс на рис. 5.2-б не показан, а на южном полюсе S крестиками отмечено направление силовых линий, которыми изображается однородное магнитное поле междуполюсного пространства (крестик означает, что магнитные силовые линии направлены от нас – направлены вглубь рисунка).

Находящиеся в проводнике разноименные электрические заряды, двигаясь вместе с проводником, перемещаются в направлении вектора v и наводят собственные магнитные поля, которые взаимодействуют с полем междуполюсного пространства, в результате чего содержащиеся в проводнике разноименные заряды оказываются под действием противоположно направленных сил Лоренца F_1, F_2 (рис. 5.2-б).

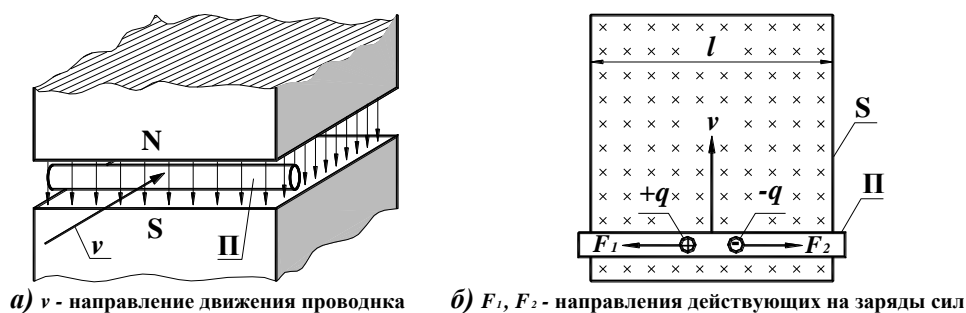


Рис. 5.2. Движение проводника в междуполюсном пространстве электромагнита

Составляющую сил Лоренца, действующую на содержащиеся в проводнике заряды **проводимости** условились называть электродвижущей силой. Следовательно, **сумма сил Лоренца, действующих на все заряды проводимости, содержащиеся в проводнике, который движется во внешнем магнитном поле – это и есть действующая в этом проводнике электродвижущая сила.**

На противоположных сторонах движущегося в магнитном поле проводника под действием сил Лоренца накапливаются избыточные разноименные заряды. Эти заряды формируют общее для них электрическое поле, поэтому противоположные концы проводника оказываются под действием разности электрических потенциалов, следовательно, проводник и содержащиеся в нем электрические заряды оказываются под действием электрического напряжения. Действие ЭДС направлено на разделение разноименных электрических зарядов, а силы электрического напряжения (силы взаимного притяжения, действующие на разноименные заряды), противодействуют

разделению разноименных зарядов. При этом если в проводнике отсутствует электрический ток, то ЭДС E и электрическое напряжение U , противодействуя друг другу, находятся в состоянии взаимной уравновешенности:

$$E = U$$

Между электрическим напряжением U и напряженностью электрического поля \mathcal{E} существует зависимость: $U = \mathcal{E}l$ {1.19}. Значение напряженности электрического поля \mathcal{E} определяется с помощью уравнения $\mathcal{E} = F/q$ {1.6}, а значение силы F , входящее в числитель правой части уравнения {1.6}, определяется с помощью уравнения $F = Bqv$ (5.3), поэтому

$$E = U = \mathcal{E}l = \frac{F}{q}l = \frac{Bqv}{q}l = Blv$$

Следовательно, значение ЭДС, наведенной в проводнике, продольная ось которого движется перпендикулярно магнитным силовым линиям, определяется с помощью уравнения

$$E = Blv \quad (5.4)$$

где E – наведенная в проводнике ЭДС; B – индукция внешнего магнитного поля; l – длина участка проводника, находящегося в однородном внешнем магнитном поле; v – скорость движения проводника.

Наведенная в проводнике ЭДС, находится в состоянии **противодействия** с действующим на этот проводник электрическим напряжением. Следовательно, ЭДС и напряжение, действующие на электрические заряды, которые содержатся в проводниках электрических машин, являются силами антиподами. Без противодействия ЭДС и электрического напряжения невозможно было бы преобразование энергии в электрических машинках и само существование таких машин.

К противоположным концам проводника Π (рис. 5.2-б) необходимо подсоединить вольтметр, который зафиксирует определенную разность потенциалов. Помимо вольтметра к противоположным концам проводника Π необходимо поочередно подсоединять различные по величине нагрузочные сопротивления. В этом случае показания вольтметра будут уменьшаться на величину падения напряжения в проводнике Π , а значение наведенной в проводнике ЭДС будет при этом оставаться неизменным, потому как неизменными остаются значения величин входящих в правую часть уравнения (5.4). Это свидетельствует о том, что *действие ЭДС распространяется только на внутреннюю цепь источника ЭДС*, а вольтметр с его измерительными проводниками является *внешней* цепью по отношению к источнику ЭДС, следовательно, **значение ЭДС невозможно измерить вольтметром**. Более подробные сведения о действии ЭДС и напряжения содержатся в главе {3} учебного пособия «Основы электротехники», полный текст которого размещен на сайте <http://sites.google.com/site/nikolanech/>.

§5.5. Сила Ампера – это результат действия сил Лоренца

На проводящий ток проводник, который находится во внешнем магнитном поле, действует сила Ампера. *Сумма сил Лоренца, действующих на все заряды проводимости, которые в процессе протекания тока участвуют в упорядоченном движении, условились называть силой Ампера.*

При протекании тока заряды проводимости находятся в состоянии упорядоченного движения, скорость которого определяется с помощью уравнения $v = \Pi/q$ {2.5}. Если в правую часть уравнения (5.3) вместо значения скорости v подставить правую часть уравнения {2.5}, то получим следующее выражение

$$F = Bqv = Bq \frac{Il}{q} = BIl$$

Следовательно, значение силы Ампера F , действующей на упорядоченно движущиеся в проводнике заряды проводимости, определяется с помощью уравнения:

$$F = BIl \quad (5.5)$$

На разноименные заряды, движущиеся в одном направлении, действуют противоположно направленные силы Лоренца, поэтому значение результирующей силы Лоренца, действующей на электрически нейтральный проводник, который движется во внешнем магнитном поле, будет равно нулю. Следовательно, *при появлении тока в электрически нейтральном проводнике, который движется во внешнем магнитном поле в направлении продольной оси этого проводника, значение действующей на проводник силы Ампера будет пропорционально значению текущего в проводнике тока, и никоим образом не зависит от направления и скорости движения самого проводника.*

§5.6. Правило правой руки

Направление наведенной ЭДС определяется с помощью правила правой руки. *Если в раскрытую ладонь правой руки направлены силовые линии внешнего магнитного поля, а отогнутый большой палец указывает направление движения проводника, то остальные четыре пальца укажут направление наведенной в проводнике ЭДС.*

Для определения направления действия силы Ампера используют правило левой руки. *Если в раскрытую ладонь левой руки направлены силовые линии магнитного поля, а четыре выпрямленных пальца указывают направление текущего в проводнике тока, то отогнутый большой палец укажет направление действующей на проводник силы Ампера.*

Уравнение (5.4) и уравнение (5.5) – это результат преобразования одного уравнения (5.3), это означает, что *ЭДС и сила Ампера – это единое в своей сути природное явление.* Следовательно, если при формулировке двух правил, с помощью которых определяется направление ЭДС и направление силы Ампера, будет соблюдаться одинаковый подход в отношении причин и следствия, то эти два правила превратятся в одно правило.

При наведении ЭДС причинами являются направление внешнего магнитного поля и направление движения проводника, а следствием – направление наведенной ЭДС. Для силы Ампера причинами являются направление внешнего магнитного поля и направление тока, а следствием – направление действия силы Ампера. Следовательно, если причины совмещать с раскрытой ладонью (направление магнитного поля) и отогнутым большим пальцем (направление движения проводника или направление тока), то следствие (направление наведенной ЭДС или направление силы Ампера) определят четыре выпрямленных пальца, и эти четыре пальца будут принадлежать правой руке.

Если же причины совмещать с раскрытой ладонью (направление магнитного поля) и четырьмя выпрямленными пальцами (направление движения проводника или направление тока), то следствие (направления наведенной ЭДС или силы Ампера) укажет отогнутый большой палец левой руки. Следовательно, и для определения направления ЭДС, и для определения направления силы Ампера можно и целесообразно пользоваться единым правилом одной какой-либо руки.

Наличие двух правил сопровождается необходимостью запоминания этих двух правил, но из-за этого не стоило бы менять давно установившиеся порядки. Намного хуже то, что наличие двух правил может вызвать сомнения относительно идентичности процессов, связанных с наведением ЭДС и с действием силы Ампера, а может привести и к твердому убеждению, что ЭДС и сила Ампера – это различные по своей природе явления. Однако и ЭДС, и сила Ампера – это две одинаковые по своему происхождению силы – силы Лоренца, поэтому в дальнейшем при определении направления действия сил Лоренца, направления силы Ампера и направления наведенной ЭДС, мы будем

пользоваться только одним правилом – **правилом правой руки**.

Приведем *общую* формулировку правила правой руки, с помощью которого определяется направление действия силы Лоренца. **Если силовые линии внешнего магнитного поля направлены в сторону раскрытой ладони правой руки (рис. 5.3-а или рис.5.3-б), а отогнутый большой палец указывает направление движения положительных зарядов, то остальные четыре выпрямленных пальца укажут направление действующих на положительные заряды сил Лоренца.**

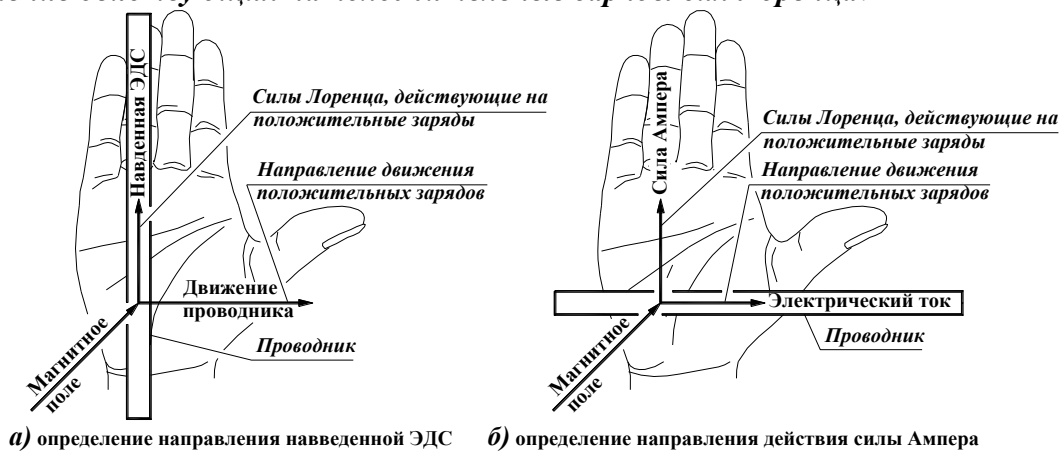


Рис. 5.3. Общее правило правой руки для наведенной ЭДС и силы Ампера

Приведем формулировку правила правой руки, с помощью которого определяется направление наведенной ЭДС или направление действующей на проводник силы Ампера. **Если в раскрытую ладонь правой руки направлены магнитные силовые линии, а отогнутый большой палец указывает направление движения проводника (рис. 5.3-а) или направление текущего в проводнике тока (рис. 5.3-б), то остальные четыре выпрямленных пальца укажут направление наведенной ЭДС или направление действия силы Ампера.**

§5.7. Простейший генератор электрической энергии

Направление ЭДС условились совмещать с направлением сил Лоренца, действующих на положительные электрические заряды, и направление тока принято совмещать с направлением упорядоченного движения положительных зарядов. Такие условности позволяют считать, что при рассмотрении процессов, происходящих в электрических машинах, в состоянии движения находятся одни только положительные электрические заряды, и только на положительные заряды действуют силы Лоренца, такое допущение не приведет к искажению сути рассматриваемых процессов, но намного упростит процедуру такого рассмотрения.

В междуполосном пространстве магнита находится проводник Π (рис. 5.4). На рис. 5.4 показан южный магнитный полюс, на поверхности которого крестиками (\times) показано направление силовых линий магнитного поля, которое является внешним по отношению к проводнику Π полем. С помощью скользящих контактов противоположные стороны проводника Π подсоединены к двум токопроводящим полосам $T1$, $T2$. К этим же полосам подсоединена электрическая цепь, состоящая из контакта выключателя K и резистора R . Полосы $T1$, $T2$, выключатель K и резистор R находятся в состоянии покоя и располагаются за пределами междуполосного пространства.

Подчиняясь действию сил стороннего двигателя, проводник Π перемещается в направлении вектора v_2 (рис. 5.4-а). Перемещение проводника в направлении вектора v_2 приводит к наведению в этом проводнике ЭДС E , значение которой определяется с помощью уравнения (5.4), а ее направление – с помощью правила правой руки (рис. 5.3-а).

После замыкания контакта K образуется замкнутый токопроводящий контур, в котором, подчиняясь действию наведенной ЭДС E , течет электрический ток I (рис. 5.4-

б). Протекание тока вызывает нагрев резистора R , следовательно, резистор R является потребителем электрической энергии, а источником (генератором) этой энергии является проводник Π и магнит, в междуполлюсном пространстве которого движется этот проводник.

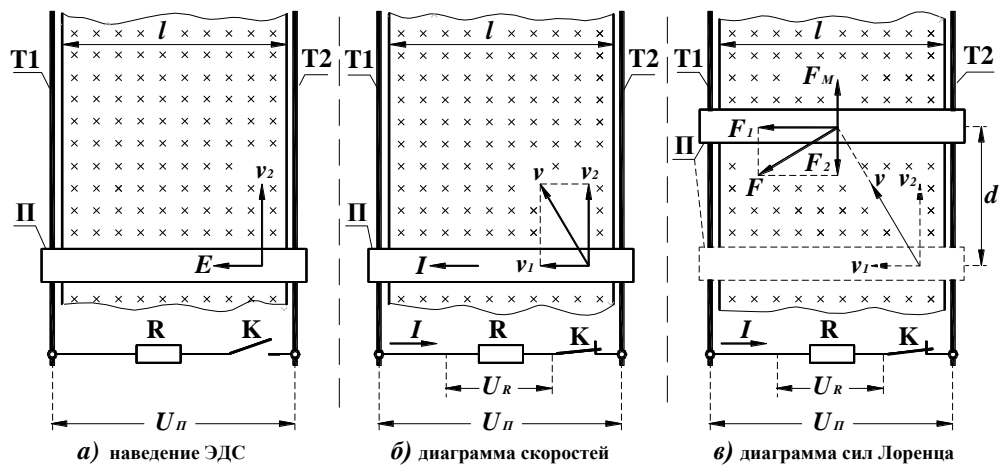


Рис. 5.4. Простейший генератор электрической энергии

После появления тока I заряды проводимости, продолжая двигаться вместе с проводником в направлении вектора v_2 , будут перемещаться и в направлении вектора v_1 – в направлении протекания тока I (рис. 5.4-б). Следовательно, после замыкания контакта K , направление движения зарядов проводимости будет определяться вектором v , значение которого равно векторной сумме двух скоростей $v = v_1 + v_2$.

Появление тока привело к изменению направления движения зарядов проводимости, а соответственно и к изменению направления силы Лоренца. Вектор v (рис. 5.4-в) указывает направление движения зарядов проводимости после появления тока I , вектор F указывает определяемое с помощью правила правой руки (рис. 5.3) направление действия силы Лоренца, а расстояние d – это расстояние, пройденное проводником в процесс его движения.

Силы Лоренца действуют на заряды проводимости, а заряды проводимости могут двигаться только в двух направлениях – в направлении движения проводника и вдоль продольной оси проводника, поэтому и силу Лоренца F (рис. 5.4-в) целесообразно разложить на две составляющие. Одну из составляющих F_1 необходимо направить вдоль продольной оси проводника Π (в направлении вектора v_1), а вторую составляющую F_2 необходимо направить перпендикулярно продольной оси проводника (противоположно направлению вектора v_2).

Составляющая силы Лоренца F_1 – это ЭДС, действие которой поддерживает протекание электрического тока I , поэтому сила F_1 по своей сути является электрической силой. Значение силы F_1 определяется с помощью уравнения (5.3), которое в данном случае будет иметь следующий вид

$$F_1 = Bqv_2 \quad (5.6)$$

где B – индукция магнитного поля междуполлюсного пространства; q – суммарный электрический заряд всех зарядов проводимости; v_2 – скорость движения проводника.

Составляющая силы Лоренца F_2 – это сила Ампера, которая противодействует движению проводника, поэтому сила F_2 проявляет себя как механическая сила. Значение силы F_2 определяется с помощью все того же уравнения (5.3):

$$F_2 = Bqv_1 \quad (5.7)$$

где v_1 – скорость упорядоченного движения зарядов проводимости.

Уравнение (5.4) и уравнение (5.5) – это преобразованное уравнение (5.3), следовательно, значения ЭДС и силы Ампера можно определить с помощью уравнения (5.6) и (5.7), а можно воспользоваться уравнениями $E = Blv$ (5.4) и $F_2 = BI$ (5.5), которые являются результатом преобразования уравнения (5.3).

Наведенная ЭДС (электрическая сила F_1) и сила Ампера (механическая сила F_2), действующие в простейшем электрогенераторе, – это две составляющие одной силы – силы Лоренца F (рис. 5.4-в), поэтому разделение силы F на электрическую и механическую составляющие является условным. Вместе с тем между механическими и электрическими силами, как и между механическим и электрическим движением существует принципиальная разница.

Действие механической силы направлено на перемещение макротела, например, проводника – это движение доступно визуальному наблюдению. Электрические силы взаимодействуют только с содержащимися внутри проводника электрическими зарядами, поэтому электрические силы приводят в движение содержащиеся в проводнике заряды проводимости, движение зарядов проводимости недоступно визуальному наблюдению.

Механическое движение – это движение проводника электрического тока вместе с содержащимися в проводнике электрическими зарядами. Электрическое движение – это движение зарядов проводимости внутри проводника, который может оставаться в состоянии покоя.

Сила F_2 противодействует движению проводника, поэтому должен существовать первичный (приводной) двигатель, который создает силу F_M (рис. 5.4-в), преодолевающую тормозное действие силы Ампера F_2 и поддерживающую движение проводника. В качестве первичного двигателя может использоваться паровая или гидравлическая турбина, двигатель внутреннего сгорания и т. п. На рис. 5.4 первичный двигатель не показан.

При разомкнутом контакте выключателя K , значение тока I равно нулю ($v_1 = 0$), а соответственно и значение силы F_2 , определенное с помощью уравнения (5.7), будет равно нулю. После замыкания контакта K , значение силы F_2 оказывается пропорциональным значению тока I (пропорционально скорости v_1) и при всяких изменениях значения тока I будет изменяться значение силы F_2 , поэтому первичный двигатель должен обеспечивать соответствующие изменения силы F_M .

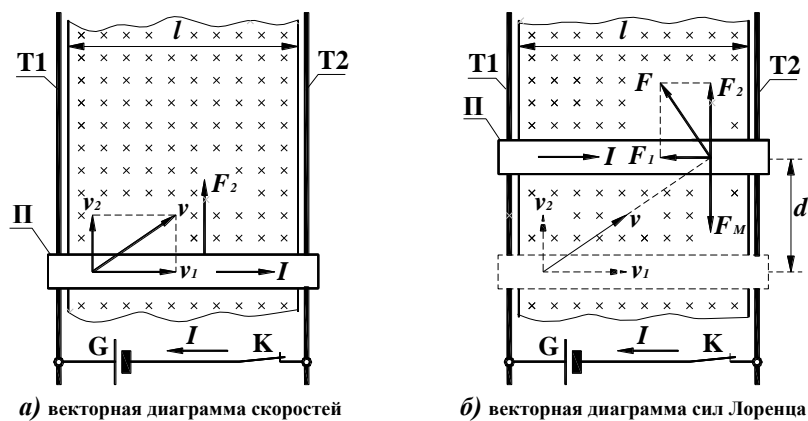
§5.8. Простейший электрический двигатель

На рис. 5.4 и рис. 5.5 изображен один и тот же проводник Π , находящийся в одном и том же междуполюсном пространстве магнита. Отличие рисунков состоит в том, что вместо изображенного на рис. 5.4 резистора R , на рис. 5.5 показан гальванический элемент G , который является источником электрической энергии.

После замыкания контакта K , заряды проводимости, содержащиеся в проводнике Π , подчиняясь действию напряжения, которое присутствует на выводах источника G , придут в состояние упорядоченного движения – в образовавшемся замкнутом контуре появится электрический ток I (рис. 5.5-а). Этому току будет соответствовать определенная скорость v_1 упорядоченного движения зарядов проводимости.

На проводник с током, который находится во внешнем магнитном поле, действует сила Ампера F_2 (рис. 5.5-а), направление которой определяется с помощью правила правой руки (рис. 5.3-б). Проводник, подчиняясь действию силы Ампера, приходит в состояние движения. В процессе движения может совершаться работа, связанная, например, с поднятием прикрепленного к проводнику Π груза. Следовательно, устройство, представленное находящимся в междуполюсном пространстве проводником Π (рис. 5.5), является простейшим электрическим двигателем.

Подчиняясь действию силы Ампера, проводник Π перемещается в направлении вектора v_2 (рис. 5.5-б). Одновременно с этим, в проводнике продолжается упорядоченное движение зарядов проводимости в направлении вектора v_1 – это результат прохождения в проводнике электрического тока. Следовательно, результирующий вектор v , определяющий направление движения зарядов проводимости, будет равен векторной суммой двух скоростей: $v = v_1 + v_2$.



а) векторная диаграмма скоростей

б) векторная диаграмма сил Лоренца

Рис. 5.5. Простейший электрический двигатель

После начала движения проводника изменилось направление движения зарядов проводимости, а вместе с ним изменилось и направление действия сил Лоренца. На рис. 5.5-б вектором v показано направление движения зарядов проводимости, а вектором F – направление действия силы Лоренца, определенное с помощью правила правой руки (рис. 5.3-б). Также как и силу Лоренца F , действующую в проводнике простейшего электрогенератора (рис. 5.4-в), так и силу Лоренца F , действующую в проводнике простейшего электродвигателя (рис. 5.5-б), целесообразно разложить на две составляющие. Направление одной составляющей F_1 необходимо совместить с продольной осью проводника, а направление второй составляющей F_2 – с направлением движения проводника.

Составляющая силы Лоренца F_1 – это наведенная внутри проводника Π ЭДС, действие которой направлено на ограничение значения тока I , следовательно, сила F_1 действует как электрическая сила. Значение силы F_1 определяется с помощью уравнения $F_1 = Bqv_2$ (5.6) или с помощью уравнения $E = Blv$ (5.4).

Составляющая силы Лоренца F_2 – это сила Ампера, действие которой поддерживает движение проводника, поэтому сила F_2 проявляет себя как механическая сила. Значение силы F_2 определяется с помощью уравнения $F_2 = Bqv_1$ (5.7) или с помощью уравнения $F_2 = BIl$ (5.5).

Сила Ампера, преодолевая силу сопротивления исполнительного механизма F_M , поддерживает движение проводника. Исполнительным механизмом, работоспособность которого обеспечивает электродвигатель, может быть, грузоподъемное устройство, транспортное средство, механизм токарного станка и т. п. На рис. 5.5 исполнительный механизм не показан.

Электрическая сила F_1 и механическая сила F_2 , действующие в электрогенераторе или в электродвигателе – это две составляющие одной силы – силы Лоренца F (рис. 5.5-б), поэтому и было рекомендовано при определении направления действия сил F , F_1 и F_2 пользоваться одним правилом – правилом правой руки. Но если кому-то удобно пользоваться правилами двух рук, то он волен в своем выборе. Использование одного правила – правила правой руки – упрощает процедуру рассмотрения вопросов,

касающихся электрических машин, принципа обратимости электрических машин, преобразования энергии в электрических машинах и многих других явлений.

§5.9. Преобразование энергии в электрических устройствах

Только энергия проявляет себя действием силы, и никакой иной объект, кроме объекта, стремящегося излучать или поглощать энергию, не может быть источником силы. Рассматривая действие сил необходимо помнить о третьем законе Ньютона или, применимо к электрическим цепям, о втором законе Кирхгофа, который гласит, что силу невозможно приложить к пустоте. Сила проявляется при том непременном условии, что этой силе противодействует другая равновеликая сила.

Преобразование механической, электрической, химической, ядерной и любой другой энергии происходит в процессе движения, сопровождаемого не менее чем двумя силами, которые находятся в состоянии взаимно-уравновешенного противодействия. Взаимно-уравновешенное противодействие означает, что всегда, и в статике, и в динамике, значение результирующей силы равно нулю. В связи с этим может появиться вопрос, а стоит ли рассматривать силу, как физическую величину, конечное (результирующее) значение которой всегда равно нулю? Рассматривать необходимо потому, что *источник силы, которая поддерживает движение, одновременно является источником энергии, а источник силы, которая противодействует движению, является потребителем энергии.*

Сопоставляя направление сил F , F_1 , F_2 , и направление скоростей v , v_1 , v_2 (рис. 5.4), не составит труда установить порядок преобразования энергии в простейшем генераторе.

В процессе преобразования энергии сила F_M находятся в состоянии взаимно-уравновешенного противодействия с силой F_2 (рис.5.4-в). Сила F_2 – это одна из составляющих силы Лоренца F , а сила Лоренца – это результат действия магнитных сил, при этом значение силы F_2 находится в прямой зависимости от величины тока I текущего в проводнике: $F_2 = BI$ (5.5). Сила F_M поддерживает движение проводника Π , а сила F_2 противодействует движению этого проводника. Следовательно, источником механической энергии является первичный двигатель, а потребителем механической энергии является магнитное поле, наведенное током I вокруг проводника Π .

При взаимодействии ЭДС (сила F_1 , рис. 5.4-в) и противодействующего ей электрического напряжения U_{Π} , которое присутствует на выводах генератора, поступающая в генератор *механическая* энергия, преобразуется в вырабатываемую генератором *электрическую* энергию.

ЭДС – сила Лоренца F_1 поддерживает течение тока I в проводнике Π , а напряжение U_{Π} противодействует течению тока в этом проводнике. Следовательно, источником энергии, в этом случае, является магнитное поле, наведенное током I вокруг проводника Π , а потребителем этой энергии является электрическое поле, сформированное избыточными зарядами, накопившимися на противоположных сторонах проводника Π .

В цепи резистора R ток I течет, подчиняясь действию напряжения U_{Π} , а падение напряжения U_R , противодействует течению тока, это означает, что вырабатываемая генератором *электрическая* энергия преобразуется в потребляемую резистором *электрическую* энергию. Следовательно, электрическое поле, сформированное избыточными зарядами, накопившимися на противоположных сторонах проводника Π , является источником электроэнергии. А электрическое поле, сформированное избыточными зарядами, накопившимися на противоположных сторонах резистора R , является потребителем электроэнергии.

Внутренняя токопроводящая цепь резистора, обладающая активным сопротивлением, оказывает противодействие текущему в резисторе току. Это противодействие преодолевается действием присутствующей на выводах резистора разностью потенциалов U_R (преодолевается действием падения напряжения в резисторе). В процессе противодействия падения напряжения U_R и активного сопротивления резистора потребляемая резистором *электрическая* энергия преобразуется в выделяемую резистором *тепловую* энергию. *Примечание:* о двояко-направленном действии разности электрических потенциалов см. {§3.10}.

Следовательно, энергия, преобразуемая в электрических цепях, от источника энергии поступает в наведенное током магнитное поле или в созданное избыточными зарядами электрическое поле. В магнитных и электрических полях энергия не накапливается. Количество энергии, поступившей за определенное время в электрические и магнитные поля, всегда равно количеству энергии, отданной этими полями, за тот же промежуток времени, потребителям энергии. Значения напряженностей электрических и магнитных полей свидетельствуют об интенсивности (о скорости) преобразования энергии, но они не определяют общее количество преобразованной энергии.

Из всего сказанного следует, что в электрических цепях *каналами транспортировки энергии являются электрические и магнитные поля, наведенные вокруг проводников электрического тока, но никак не сами эти проводники*. Магнитное поле, наведенное вокруг проводника Π , является каналом транспортировки преобразуемой в генераторе механической энергии, а в магнитном поле, наведенном *вдоль всей токопроводящей цепи*, в которой течет ток I , заключена *вся* кинетическая энергия упорядоченно движущихся зарядов проводимости.

В процессе преобразования энергии могут участвовать две взаимно уравновешенные силы, но чаще всего в таких преобразованиях участвуют более двух сил. Так, например, механическая сила F_M (рис. 5.4-в) будет уравновешена одной лишь силой F_2 только при том условии, что КПД генератора равен **100%** (генератор без потерь). Если же учитывать то, что в скользящих контактах $T1$, $T2$ действуют силы трения, то придется согласиться с тем, что сила F_M частично уравновешена силой F_2 , и частично – силами трения, действующими в скользящих контактах. А вместо одного резистора R (рис. 5.4) может быть установлено несколько последовательно и параллельно соединенных резисторов, в этом случае напряжению, присутствующему на выводах электрогенератора, будут противодействовать несколько появляющихся на выводах резисторов падений напряжений.

С процессом преобразования энергии в электрическом двигателе можно познакомиться, рассматривая векторные диаграммы сил F , F_1 , F_2 и скоростей v , v_1 , v_2 , которые действуют в электрическом двигателе (рис. 5.5).

Необходимо отметить внимание на то, что принцип действия электрических машин и преобразование энергии в электрических цепях будет соответствовать описанию, приведенному в настоящей статье, только при соблюдении того условия, что внешние электрические и магнитные поля свободно проникают внутрь проводников электрического тока.

Источник

Выше приведенный текст скопирован из учебного пособия «Основы электротехники, Ч1» и после незначительных правок опубликован здесь. Указанное пособие размещено на сайте <http://sites.google.com/site/nikolanech/>.

Связь с автором: E-mail: nikola-nech@yandex.ua