

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле» включает материал части 3. «Электромагнитное поле» курса «Теоретические основы электротехники», читаемый электротехническим и энергетическим специальностям вузов. Изучать его следует после освоения части 1 «Линейные электрические цепи» и части 2 «Переходные процессы в линейных электрических цепях. Нелинейные электрические цепи».

Пособие содержит материал, излагаемый автором в лекциях для студентов очной, заочной и очно-заочной форм обучения всех специальностей в Северо-Западном государственном заочном техническом университете.

Содержание учебного пособия соответствует государственным стандартам по высшему профессиональному образованию. При его разработке учитывались особенности получения высшего образования в условиях обучения без отрыва от трудовой деятельности. Все теоретические выкладки и практические расчеты производятся так, что студент может самостоятельно разобраться в их содержании и оценить полученный результат.

В пособии использованы традиционные материалы, излагаемые в аналогичных курсах, как то: методы моделирования и расчета электромагнитных полей в свободном пространстве и в ограниченных областях; распространение электромагнитных полей; энергия и механические проявления электромагнитного поля; поверхностные эффекты в электромагнитном поле; методы расчета электромагнитных полей. Кроме этого, уделено внимание вопросам электромагнитной совместимости технических средств и человека, оказавшегося в электроэнергетических системах, вопросам выбора защитных средств, в том числе экранирования.

При подготовке пособия использовались как известные фундаментальные учебники и книги, ссылки на которые приведены в каждой главе, так и публикации автора.

Учебное пособие состоит из 25 глав. Теоретический материал дополнен большим количеством примеров расчета. Этого может оказаться достаточно для решения большинства практических инженерных задач.

Материал разбит на три части. В первой части (11 глав) приведены методы расчета электромагнитных полей, которые обязательны для изучения. Во второй части (7 глав) рассмотрены типовые задачи по основным видам электромагнитного поля, позволяющие практически освоить теоретический материал, содержащийся в первой части. В третьей части (7 глав) приведен материал, который носит дополнительный характер. В зависимости от специальности и формы обучения некоторые из глав в третьей части можно изучать частично или исключать из рассмотрения совсем.

Более подробные разъяснения по объему учебного материала следует получить у преподавателя, ведущего занятия по данной дисциплине.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

f	— частота ЭМП, Гц
t	— время, ч
ω	— круговая частота ЭМП, с^{-1}
\vec{E}	— вектор электрической напряженности ЭМП, В/м
\vec{H}	— вектор магнитной напряженности ЭМП, А/м
\vec{B}	— вектор магнитной индукции ЭМП, В·с/м ²
\vec{D}	— вектор электрической индукции ЭМП, А·с/м ²
$\phi_{\text{м}}, \phi_{\text{э}}$	— магнитный и электрический потенциалы ЭМП, А, В
\vec{j}	— плотность тока, А/м ²
$\{x_1, x_2, x_3\}$	— криволинейная ортогональная система координат
ε	— диэлектрическая проницаемость среды, А·с/В·м
$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$	— диэлектрическая постоянная, А·с/В·м
μ	— магнитная проницаемость среды, В·с/А·м
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	— магнитная проницаемость воздуха, В·с/А·м
γ	— электрическая проводимость среды, Сим/м, Сим/см

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АД	— асинхронный двигатель
ВДТ	— видеодисплейный терминал
ВОЗ	— Всемирная организация здравоохранения
ГРЩ	— главный распределительный щит
ИНЧ	— инфранизкая частота
КНЧ	— крайне низкая частота
ЛЭП	— линия электропередачи
МГД	— магнитогидродинамический
МДС	— магнитодвижущая сила
МП	— магнитное поле
МСП	— магнитостатическое поле
ПДК	— предельно допустимая концентрация
ПДУ	— предельно допустимый уровень
ПМП	— постоянное магнитное поле
ППЭ	— плотность потока энергии
РЛС	— радиолокационная станция

РТУ — радиотехническое устройство
 РТС — радиотрансляционная станция
 РЭС — радиоэлектронная система
 СВЧ — сверхвысокая частота
 СГ — синхронный генератор
 СЗЗ — санитарно-защитная зона
 СНЧ — сверхнизкая частота
 ССС — станция спутниковой связи
 ТОЭ — теоретические основы электротехники
 УВЧ — ультравысокая частота
 УДС — управление движением судов
 УКВ — ультракороткая волна
 ЦПУ — центральный пост управления
 ЭВМ — электронно-вычислительная машина
 ЭДС — электродвижущая сила
 ЭЛТ — электронно-лучевая трубка
 ЭМ — электрическая машина
 ЭМИ — электромагнитное излучение
 ЭМП — электромагнитное поле
 ЭМС — электромагнитная совместимость
 ЭМО — электромагнитная обстановка
 ЭМЭ — электромагнитная экология
 ЭО — электрооборудование
 ЭП — электрическое поле
 ЭСП — электростатическое поле
 ЭЭС — электроэнергетическая система

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПОЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

1.1. ВЕКТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

ЭМП можно рассматривать как особое свойство материи. Оно характеризуется четырьмя векторными величинами: \vec{E} — напряженностью электрического поля (ЭП); \vec{D} — электрической индукцией; \vec{H} — напряженностью магнитного поля (МП); \vec{B} — магнитной индукцией. Определить ЭМП в некоторой области пространства — значит указать эти векторы в любой ее точке. Таким образом, ЭМП предстает как совокупность ЭП (\vec{E}, \vec{D}) и МП (\vec{H}, \vec{B}), находящихся во взаимной зависимости. Деление ЭМП на эти две составляющие относительно, оно зависит от условий наблюдения и возможно только при макроскопическом рассмотрении явлений. При движении заряженного тела в окружающем пространстве возникает ЭМП, и неподвижный наблюдатель обнаружит ЭП и МП по механическим силам, действующим на пробный заряд и магнитную стрелку. Однако наблюдатель с пробным зарядом и магнитной стрелкой, движущейся вместе с заряженным телом, не обнаружит отклонения магнитной стрелки, а отметит только воздействие на пробный заряд. Для такого наблюдателя существует только ЭП, а МП отсутствует.

При микроскопическом рассмотрении всегда обнаруживаются обе стороны ЭМП. Например, при рассмотрении неподвижного заряженного тела необходимо учесть также МП движущихся по своим орбитам электронов, из которых складывается общий заряд тела. Однако из-за хаотического расположения этих элементарных токов их МП чрезвычайно быстро убывает с увеличением расстояния от тела. При макроскопическом подходе вокруг неподвижного заряженного тела учитывается только ЭП.

Поскольку можно создать условия, при которых проявляется одна из составляющих ЭМП, возможно и раздельное изучение ЭП и МП. Это соответствует ряду практических задач, когда в электротехническом устройстве представляет интерес определение только одного из полей.

1.2. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1.2.1. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Напряженность ЭП — характеристика векторная, определяемая в каждой точке и величиной, и направлением. Если в ЭП поместить малый положительный заряд, который своим присутствием не вызовет заметного перераспределения зарядов на телах, создающих поле, то отношение силы, действующей на заряд, к величине заряда Q определяет напряженность поля в данной точке:

$$\vec{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q}, \quad (1.1)$$

Таким образом, \vec{E} — силовая характеристика ЭП, определяемая при условии, что внесенный в данную точку поля заряд не исказил поля, существовавшего до его внесения. Отсюда следует, что сила \vec{f} , действующая на точечный заряд Q , внесенный в поле, будет равна

$$\vec{f} = Q\vec{E}, \quad (1.2)$$

где \vec{E} — напряженность ЭП в точке расположения заряда, а напряженность численно равна силе, действующей на единичный заряд.

Если использовать закон Кулона, который определяет силу \vec{f} взаимодействия двух точечных электрических зарядов Q_1 и Q_2 , то сила, действующая по прямой x , соединяющей эти заряды, будет равна

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{x^2}, \quad (1.3)$$

где ϵ — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды. Тогда модуль напряженности E в поле точечного заряда можно определить в виде

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon x^2}. \quad (1.4)$$

Поскольку сила, действующая на электрический заряд со стороны ЭП, имеет вполне определенное направление, приходится говорить о направлении свойств этого поля. При этом за направление ЭП в данной точке пространства принимают направление вектора напряженности поля. Более наглядное представление о направлении ЭП можно получить, если, следуя предложению Фарадея, в пространстве наметить ряд линий так, чтобы векторы напряженности в той или иной точке поля были бы касательными к этим линиям (рис. 1.1). Их называют линиями

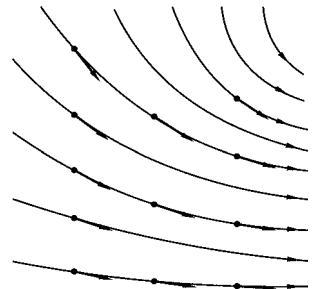


Рис. 1.1
Картина электрического поля

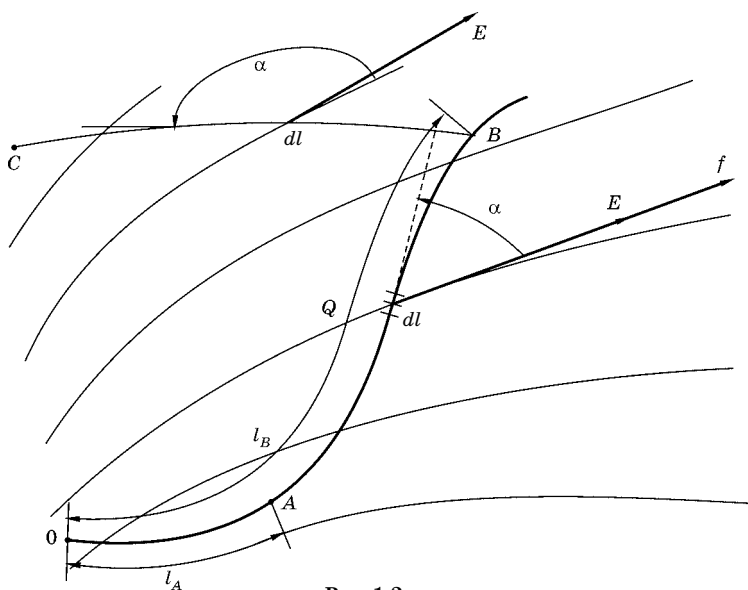


Рис. 1.2
Перемещение точечного заряда в электрическом поле

вектора напряженности ЭП, или, короче, электрическими линиями. Они всегда направлены от положительно заряженных тел к отрицательно заряженным. Совокупность электрических линий принято называть картиной ЭП.

Если ЭП создается n зарядами ($Q_i, i \in [1, n]$), то его напряженность равна геометрической сумме напряженностей от каждого из n зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{E}_i,$$

т. е. при расчете ЭП применим метод наложения.

Представим себе ЭП (рис. 1.2), в котором по некоторому пути от точки A до точки B под действием поля движется пробный точечный положительный заряд Q . Со стороны поля к заряду будет приложена сила f . Она направлена по касательной к линии движения и определяется формулой (1.2).

Работа A^* на пути от точки A до точки B определится линейным интегралом

$$A^* = \int_A^B Q E \cos \alpha dl = Q \int_A^B E \cos \alpha dl,$$

где dl — элемент длины пути интегрирования; заряд Q вынесен за знак интеграла, так как в процессе движения величина заряда не меняется.

Таким образом, работа по перемещению заряда равна произведению заряда Q на линейный интеграл от напряженности поля вдоль пути движения заряда. Этот интеграл, определяющийся характеристиками поля по выбранному пути, получил название электрического напряжения между точками A и B , которое обозначается как указано ниже:

$$U_{AB} = \int_A^B E \cos \alpha dl. \quad (1.5)$$

Выражение (1.5) можно записать в векторной форме:

$$U_{AB} = \int_A^B \vec{E} d\vec{l}. \quad (1.6)$$

Напряжение U_{AB} характеризует собой энергетические возможности поля в данной области пространства. Электрическое напряжение является скалярной величиной и в общем случае может приобретать как положительные, так и отрицательные значения.

Единицей электрического напряжения является вольт (В). Если напряжение между двумя точками поля 1 В, то при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую будет совершена работа в 1 Дж.

Нетрудно показать, что электрическое напряжение между точками не зависит от пути его вычисления и определяется только положением начальной и конечной точек.

Для пояснения выберем две произвольные точки A и B в поле и рассмотрим два различных пути m и n между ними (рис. 1.3). Очевидно, что оба эти пути составляют замкнутый контур $AmBnA$, для которого справедливо условие — линейный интеграл вектора напряженности в электростатическом поле по любому замкнутому контуру равен нулю:

$$\oint_{AmBnA} \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

Этот линейный интеграл вектора напряженности по замкнутому контуру можно разбить на два интеграла по двум его участкам:

$$\oint_{AmBnA} \vec{E} d\vec{l} = \int_{AmB} \vec{E} d\vec{l} + \int_{BnA} \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

Если изменить направление интегрирования во втором слагаемом на обратное, т. е. вычисляя линейный интеграл по пути n от A к B , получим

$$\int_{AmB} \vec{E} d\vec{l} - \int_{AnB} \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

А так как перестановка пределов интегрирования приводит к изменению знака интеграла, то

$$\int_{AmB} \vec{E} d\vec{l} = \int_{AnB} \vec{E} d\vec{l},$$

т. е. оба интеграла и представляемые ими напряжения U_{AB} между точками A и B , вычисленные по разным путям, равны друг другу. Это и является доказательством ранее высказанного тезиса.

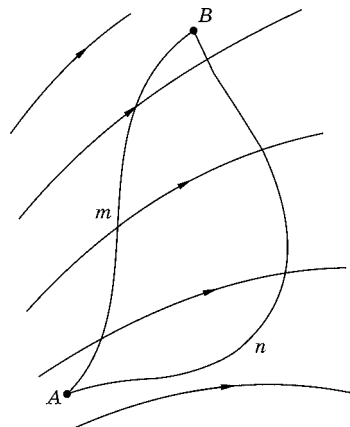


Рис. 1.3
Пути перемещения заряда в электрическом поле

1.2.2. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Если в качестве конечной точки при определении напряжения условиться всегда брать фиксированную в пространстве точку P , которую назовем опорной точкой, то напряжение

$$U_{AP} = \int_A^P \vec{E} d\vec{l}$$

между произвольной точкой A и опорной точкой P будет являться функцией положения только точки A . В этом случае напряжение называют электрическим потенциалом точки A и обозначают буквой φ :

$$\varphi_A = \int_A^P \vec{E} d\vec{l} = \int_A^P E \cos \alpha dl.$$

По своей физической природе потенциал не отличается от напряжения и потому является также скалярной величиной и измеряется в вольтах.

Если поинтересоваться потенциалом самой точки P , то придем к выводу:

$$\varphi_P = \int_P^P \vec{E} d\vec{l},$$

что он равен нулю, так как определенный интеграл с одинаковыми нижним и верхним пределами обращается в нуль. Поэтому опорную точку нередко называют точкой нулевого потенциала.

В принципе, за опорную точку можно принять любую точку пространства. Однако в отдельных случаях ее рациональный выбор позволяет упростить расчет потенциалов остальных точек поля. В частности, в теоретических задачах, связанных с полем ограниченной системы заряженных тел, опорную точку часто располагают в бесконечности.

В практической электротехнике точку нулевого потенциала обычно связывают с поверхностью земли или основанием электромеханического устройства.

В заключение следует остановиться еще на некоторых важных понятиях в ЭП.

1. Если точка перемещается в ЭП таким образом, что приращение потенциала при перемещении равно нулю, то потенциал всех точек этой линии будет оставаться одним и тем же. Такие линии в ЭП называют линиями равного потенциала или эквипотенциальными линиями.

2. Если точка перемещается в ЭП по поверхности, проложенной всюду перпендикулярно электрическим линиям, то придем к понятию о поверхностях равного потенциала, или эквипотенциальных поверхностях.

3. Электрические заряды располагаются на проводящих телах в поверхностном слое, все точки которого обладают равным потенциалом. Внутри заряженного тела ЭП отсутствуют.

4. ЭП, позволяющее ввести понятие потенциала как однозначной функции координат точки поля, принято называть потенциальным полем.

1.2.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1.2.3.1. ПОТЕНЦИАЛ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА

Рассчитаем потенциал в произвольной точке A поля точечного заряда Q (рис. 1.4), полагая, что точка P нулевого потенциала удалена в бесконечность:

$$\varphi_A = \int_A^P \vec{E} d\vec{l} = \int_A^P E \cos \alpha dl.$$

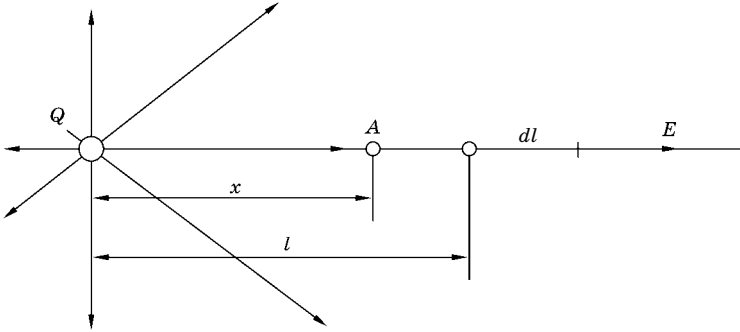


Рис. 1.4
Точечный заряд в электрическом поле

Проинтегрируем напряженность от точки A с координатой x до бесконечности непосредственно по электрической линии, проходящей через интересующую нас точку. Тогда угол α на всем пути интегрирования равен нулю, при этом $\cos \alpha = 1$. Поэтому, определяя положение произвольной точки на пути интегрирования расстоянием l до заряда и учитывая выражение для напряженности поля точечного заряда Q , для потенциала получим

$$\varphi_A = \int_x^\infty E dl = \int_x^\infty \frac{Q}{4\pi\epsilon l^2} dl = -\frac{Q}{4\pi\epsilon l} \Big|_x^\infty = \frac{Q}{4\pi\epsilon x}.$$

Таким образом, потенциал в произвольной точке поля точечного заряда убывает по мере удаления от заряда обратно пропорционально расстоянию от точки до заряда, стремясь к нулю в бесконечности. При $x = 0$ потенциал обращается в бесконечность, однако этот результат следует рассматривать как математическую абстракцию, поскольку в действительности всякий заряд занимает определенный объем и точечных зарядов реально не существует.

1.2.3.2. ПОТЕНЦИАЛ ЭП ДИПОЛЯ

Под диполем понимается система из двух зарядов Q_1 и Q_2 , равных по величине и противоположных по знаку ($Q_1 = -Q_2 = Q$), размещающихся на некотором расстоянии d друг от друга. Потенциал ЭП, окружающего диполь (см. рис. 1.5), в произвольной точке A пространства можно найти наложением потенциалов от каждого из зарядов:

$$\varphi_A = \varphi_{A1} + \varphi_{A2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon x_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon x_2}$$

или

$$\varphi_A = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{x_2 - x_1}{x_1 x_2}.$$

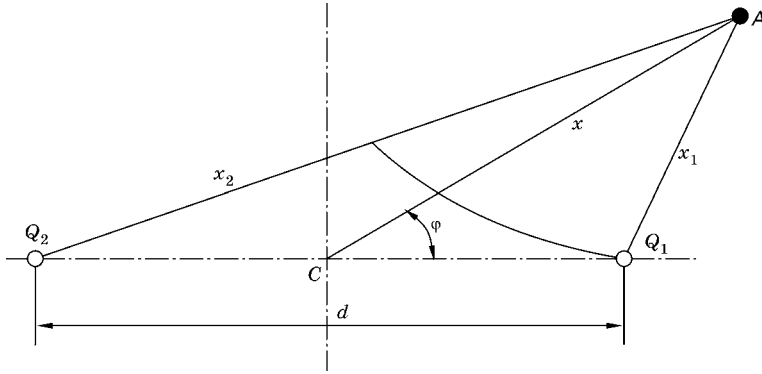


Рис. 1.5
Диполь в электрическом поле

Переходя к определению положения точки A полярными координатами x и φ относительно центра C диполя и его оси, приходим к заключению, что при значительном удалении от диполя справедливы следующие приближенные равенства: $x_1 x_2 \approx x^2$, $x_2 - x_1 \approx d \cos \varphi$, откуда для потенциала имеем

$$\Phi_A = \frac{Qd}{4\pi\epsilon x^2} \cos \varphi.$$

Таким образом, потенциал поля диполя убывает при удалении от него с квадратом расстояния.

1.3. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И МАГНИТНЫЙ ПОТОК

1.3.1. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Согласно современным научным представлениям об электромагнитных явлениях, МП неразрывно связано с электрическим током: МП не может существовать без тока, и нельзя себе представить электрический ток без МП. Даже в случае, когда речь идет о МП постоянного магнита, мы связываем это поле с молекулярными токами в теле магнита.

Если в пространстве, где существует МП, поместить магнитную стрелку, то она стремится занять определенное положение, что свидетельствует о направленности свойств МП. Условились направлением МП в данной точке пространства считать направление, в котором устанавливается ось свободно подвешенной бесконечно малой магнитной стрелки, центр которой совме-

щен с этой точкой пространства. При этом из двух возможных направлений вдоль оси стрелки МП условно приписывают направление от южного конца стрелки к северному.

Более наглядное представление о направленности МП можно получить, если в пространстве провести ряд линий, по отношению к которым оси всех магнитных стрелок являлись бы касательными. Такие линии называются магнитными. Совокупность магнитных линий принято называть картиной МП. Для примера на рис. 1.6 приведены плоскостные картины МП постоянного магнита в форме параллелепипеда (рис. 1.6а), МП тока в прямом проводе круглого сечения (рис. 1.6б), МП соленоида (рис. 1.6в) и МП обмоток возбуждения электрической машины постоянного тока (рис. 1.6г).

Направление МП, созданного током, зависит от направления тока в проводах. Это направление принято определять по правилу правого винта. В электротехнике это правило применяют в двух вариантах в зависимости от того, идет ли речь о поле, созданном током в отрезке провода, или током, замыкающемся в витке, в частности протекающим по обмотке индуктивной катушки.

В первом случае, обращаясь к МП проводника с током (см. рис. 1.7), винт с правой нарезкой мысленно располагают так, чтобы его ось оказалась совмещенной с осью провода, по которому течет ток. Если вращать винт в направле-

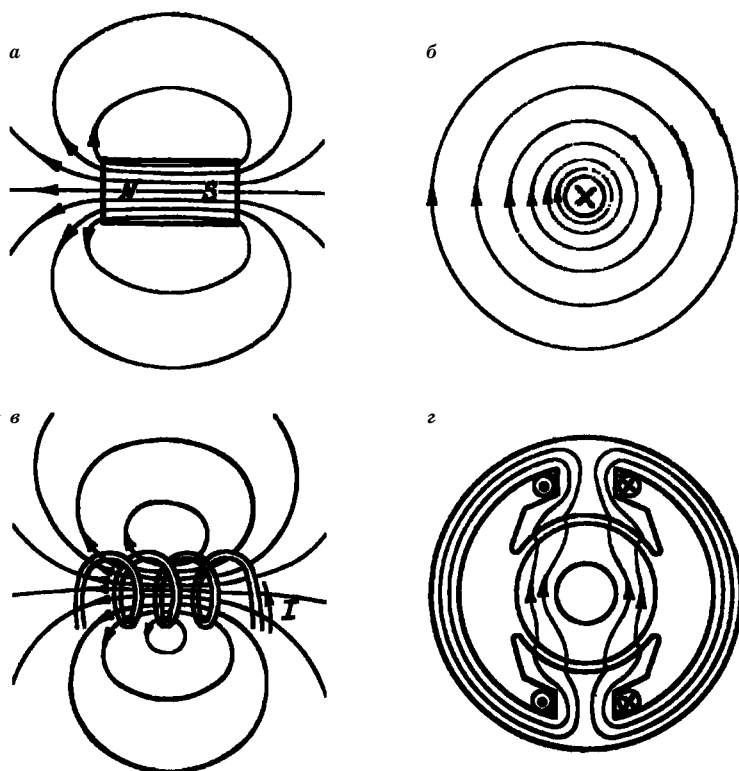


Рис. 1.6
Картины МП постоянного магнита

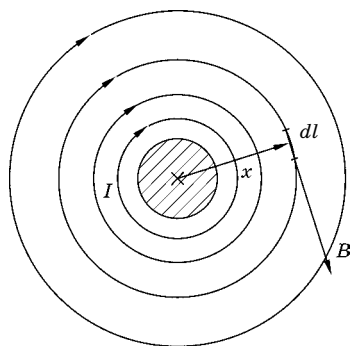


Рис. 1.7
Расположение магнитных
линий у прямолинейного
проводника с током

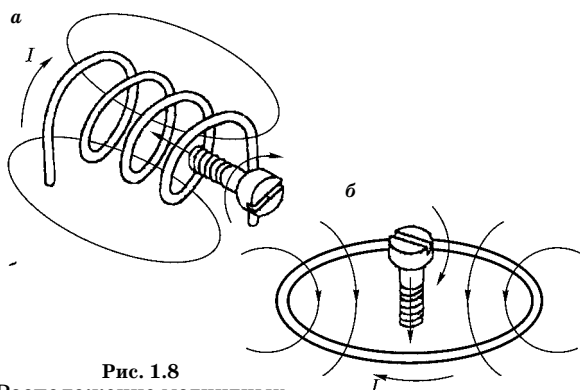


Рис. 1.8
Расположение магнитных
линий у индукционной
катушки

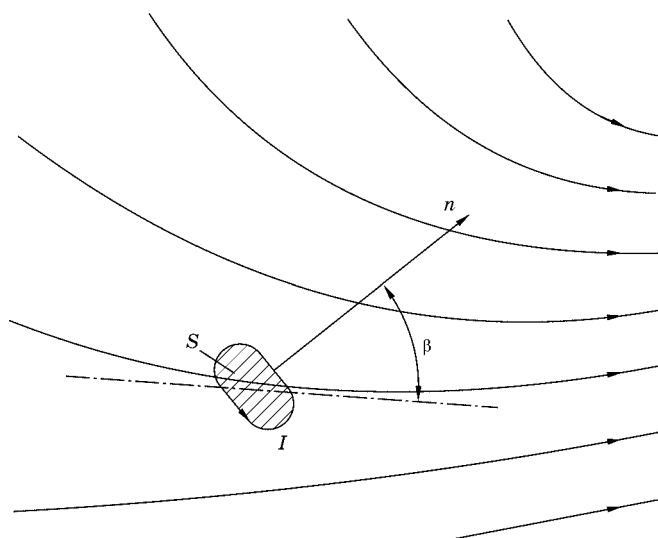


Рис. 1.9
Воздействие магнитного
поля на плоский контур
с током

нии магнитных линий, то направление его поступательного перемещения будет соответствовать направлению тока в проводе.

Во втором случае, когда МП образовано индуктивной катушкой (рис. 1.8а) или витком с током (рис. 1.8б), ось винта следует совместить с осью витка или катушки. Тогда при вращении винта в направлении движения тока в витке или по обмотке катушки поступательное перемещение винта укажет направление МП сквозь рассматриваемые виток или катушку.

Кроме направления, МП характеризуется еще и интенсивностью. Рассмотрим, для примера, воздействие МП на небольшой плоский контур с электрическим током. Такой контур будет стремиться занять в пространстве определенное положение, при котором нормаль к плоскости контура совпадает с направлением МП в одной из точек плоскости, ограниченной этим контуром. При выведении контура из указанного положения на него начинает действовать момент, стремящийся вернуть контур в первоначальное поло-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru