

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Глава первая

Обобщение понятий и законов электромагнитного поля

1.1. Общая физическая основа задач теории электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей

Электромагнитное поле является тем основным физическим агентом, который широко применяется в технических и физических устройствах для передачи и преобразования энергии или сигналов. Связанные с электромагнитным полем процессы характерны тем, что требуют описания электромагнитного поля во времени и в пространстве. Это предопределяет необходимость развития методов теории электромагнитного поля. Сложный характер описания электромагнитных явлений в конкретных устройствах заставляет изыскивать способы расчета этих процессов главным образом в зависимости от времени, что связано с развитием теории электрических цепей.

Выделив определенные устройства, в которых проявляются те или иные особенности электромагнитного поля, в качестве элементов электрических цепей, мы получаем возможность использовать теорию электрических цепей для создания новых сложных приборов и устройств, выполняющих заданные функции.

Теория электрических цепей получила исключительно большое развитие именно благодаря тому обстоятельству, что она дает возможность упростить расчеты электромагнитных процессов. Вместе с тем эти упрощения в своей основе содержат ряд допущений и предположений, которые необходимо осознать и оценить, для чего необходимо располагать четкими знаниями основных физических законов электромагнитных явлений и их широких обобщений.

Первые две главы первой части курса и предназначены служить таким физическим фундаментом для последующих частей, в которых будут излагаться математические методы расчета электрических и магнитных цепей и электромагнитных полей. Наличие такого фундамента обеспечит критическое отношение к исходным положениям формальных математических методов и исключит воз-

возможные ошибки при их формулировании. Это обеспечит также рассмотрение физической стороны процессов в электрических цепях и электромагнитных полях, описываемых формальными методами. В конце первой части, в ее третьей главе, мы сможем при таком подходе ввести основные понятия теории электрических и магнитных цепей, основываясь на физических представлениях об электромагнитных явлениях и, следовательно, давая себе ясный отчет в принимаемых при этом допущениях.

1.2. Заряженные элементарные частицы и электромагнитное поле как особые виды материи

Исследования в области электромагнитных явлений дали основные идеи и инструменты для создания современных представлений о строении вещества. Особо важное место в этих исследованиях заняли элементарные заряженные частицы — с положительным элементарным электрическим зарядом (например, протон и позитрон) и отрицательным элементарным электрическим зарядом (например, электрон). Элементарные заряженные частицы входят в состав атомов и молекул веществ, а также могут быть и в свободном состоянии. Они находятся в непрерывном движении и окружены, как мы говорим, электромагнитным полем, которое в зависимости от характера этого движения может проявляться в виде электрического или магнитного поля. Обладающие электрическим зарядом частицы и их электромагнитное поле представляют собой особый вид материи в том смысле, что им присущи свойства, не учитываемые при рассмотрении других, например механической, форм движения материи.

Электрический заряд этих частиц является их важнейшим физическим свойством, характеризующим взаимосвязь частиц с собственным электромагнитным полем и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем. Электрический заряд — основное отличительное свойство этих частиц материи, обладающих также и другими свойствами: массой, энергией и т. д., — присущими и другим формам движения материи, изучаемым, например, в механике.

Движение материи, с которым мы связываем понятие об электрически заряженной частице, а также понятие об электромагнитном поле не может быть сведено к механическому движению, и электромагнитные явления не могут быть сведены к явлениям, изучение которых составляет предмет механики. В механике рассматривается движение в пространстве материальных тел, обладающих инертной массой. То, что эти тела могут обладать электрическими зарядами, а также то, что сами тела состоят из положительно и отрицательно заряженных элементарных частиц, совершенно не входит в круг вопросов, рассматриваемых в механике. Поэтому и естественно, что из законов механики не могут быть выведены более глубокие законы электромагнитных явлений.

Для характеристики электромагнитных явлений необходимо ввести новые понятия, которые не рассматриваются механикой и принципиально не могут быть полностью определены только через величины, достаточные для построения механики, например только через массу, длину и время. Необходимо ввести четвертую основную величину, отражающую специфику электромагнитных явлений. Таковой может быть выбрана любая электромагнитная величина, например электрический заряд. Количественно электрический заряд частицы материи

или тела может быть определен только по их взаимодействию с другой электрически заряженной частицей или другим заряженным телом или же по их взаимодействию с внешним электромагнитным полем.

Точно так же не представляется возможным при определении понятия об электромагнитном поле обойтись без использования понятия о заряженной частице, так как основным отличительным от других видов материи свойством электромагнитного поля является его силовое воздействие на заряженные частицы. Силовое воздействие электромагнитного поля на заряженные частицы носит векторный характер и зависит от скорости движения частиц и значения их электрического заряда. В соответствии со сказанным выше можно дать следующие определения.

Электромагнитное поле есть вид материи, определяющийся во всех точках двумя векторными величинами, которые характеризуют две его стороны, называемые «электрическое поле» и «магнитное поле», оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы, зависящее от их скорости и значения их заряда.

Элементарный электрический заряд есть свойство электрона или протона, характеризующее их взаимосвязь с собственным электрическим полем и их взаимодействие с внешним электрическим полем, определяемое для электрона и протона численными значениями, равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку (при этом условно отрицательный знак приписывается заряду электрона, а положительный — заряду протона).

В свете этих определений любая заряженная частица, содержащая один или несколько элементарных электрических зарядов, является носителем заряда. Например, носителями заряда являются электрон, протон, ион, а также условно и «дырка» в полупроводнике.

По сути дела, заряженные элементарные частицы и их электромагнитное поле представляют собой единое целое. Строго говоря, мы не можем указать точной границы между частицей с электрическим зарядом и ее электромагнитным полем. Вместе с тем все же можно полагать, что частица и ее электрический заряд, например заряд электрона, протона и т. д., сосредоточены в весьма малой области пространства. Именно для этой весьма малой области пространства характерна та форма движения материи, с которой связывается понятие об электрически заряженной частице. Вне этой области на первый план выступает то физическое явление, та форма движения материи, с которыми мы связываем понятие об электромагнитном поле. Это обстоятельство дает возможность ввести представление о том, что электрический заряд элементарной частицы, как и сама частица, занимает только некоторую ограниченную область пространства. Согласно такому представлению, в пространстве, окружающем эту область, существует только связанное с обладающей зарядом частицей электромагнитное поле.

При такой широко используемой научной абстракции возникает необходимость дать наименование той области пространства, в которой существует электромагнитное поле, но в которой отсутствуют известные нам частицы материи. В дальнейшем для обозначения такой области пространства условимся применять термин *пустота*. Этот термин будем относить только к понятию о пространстве как форме существования материи в виде поля, но не к происходящим в этом пространстве физическим процессам, помня при этом, что пространство

неотделимо от происходящих в нем материальных процессов, что абсолютно пустого пространства, не заполненного физической материей, нет и не может быть и что в той области пространства, которую будем называть пустотой, всегда существует электромагнитное поле, а также поле тяготения, представляющие собой особые виды материи.

Нередко, стремясь избежать слова «пустота», используют в аналогичном смысле термин в а к у у м. Однако слово «вакуум» находит широкое применение в вакуумной технике, где понимается в ином смысле, а именно как степень разрежения. Говорят о низком, среднем или высоком вакууме, о вакуумметрах — приборах для измерения вакуума. Термин «пустота» в этом отношении является более определенным — он означает предельное значение вакуума при указанной выше абстракции, когда предполагается, что в некоторой области пространства материя существует только в форме поля.

Следует отметить, что если обладающую зарядом элементарную частицу вещества нельзя мыслить без ее электромагнитного поля, то электромагнитное поле может существовать в свободном состоянии, отделенное от частицы. Такими являются фотон, а также электромагнитное поле, излученное антенной. Электромагнитное поле в свободном состоянии, не связанное с частицами вещества, распространяется в пустоте при отсутствии весьма сильных гравитационных полей с естественной для него скоростью $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

В веществе, а также при наличии весьма сильных гравитационных полей, т. е. вблизи весьма больших масс вещества, скорость распространения электромагнитного поля меньше величины c .

Для измерения электромагнитных величин будем пользоваться международной системой единиц СИ (система интернациональная). Эта система содержит семь основных единиц: *метр* — единица длины, *килограмм* — единица массы, *секунда* — единица времени, *ампер* — единица силы электрического тока, *кельвин* — единица термодинамической температуры, *моль* — единица количества вещества, *кандела* — единица силы света. Она охватывает единицы механических, электромагнитных, тепловых и световых величин.

Для измерения электромагнитных величин необходимо и достаточно иметь четыре основные единицы соответственно тому, что было сказано ранее о необходимости принятия четырех основных величин в области учения об электромагнитных явлениях. Остальные электромагнитные величины и, соответственно, их единицы являются производными от выбранных четырех основных, т. е. могут быть установлены с помощью тех или иных закономерностей. В системе единиц СИ в качестве четвертой основной единицы для электромагнитных величин принят *ампер* — единица силы электрического тока. Это сделано потому, что именно единица силы тока может быть в настоящее время определена абсолютным методом с наибольшей точностью на основе измерения механического взаимодействия электрических токов в пустоте с помощью токовых весов.

Система единиц МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер) является частью системы СИ. Система МКСА связана с рационализованной системой уравнений электромагнитного поля, в которой множитель 4π расположен в уравнениях в наиболее естественном месте, а именно: он явно входит в те зависимости, кото-

рые соответствуют случаям, характеризующимся сферической симметрией. Весьма существенно также, что при рационализованной форме уравнений электромагнитного поля достигается симметрия зависимостей, относящихся к электрическим и магнитным величинам.

Единицей электрического заряда (количества электричества) является *кулон* (Кл).

1.3. Связь между электрическими и магнитными явлениями. Электрическое и магнитное поля как две стороны единого электромагнитного поля

Любое электромагнитное явление, рассматриваемое в целом, характеризуется двумя сторонами — электрической и магнитной, между которыми существует тесная связь. Так, электромагнитное поле имеет две взаимосвязанные стороны — электрическое поле и магнитное поле. Важнейшей нашей задачей в первой главе будет рассмотрение связи между электрическими и магнитными явлениями. Вместе с тем можно создать условия, когда в некоторой области пространства обнаруживаются только электрические или только магнитные явления. Например, вне заряженных неподвижных проводящих тел обнаруживается только электрическое поле. Аналогично в пространстве, окружающем неподвижные постоянные магниты, обнаруживается только магнитное поле. Однако и в этих случаях, если рассматривать явление в целом, нетрудно усмотреть как электрическую, так и магнитную его стороны. Так, заряды неподвижных заряженных тел образуются совокупностью зарядов элементарных заряженных частиц, движущихся хаотически около поверхностей тел. Каждая такая частица окружена электромагнитным полем, но вследствие хаотического движения частиц их результирующее магнитное поле практически исчезает уже на ничтожных расстояниях от поверхностей тел. Электрические же поля частиц при избытке на теле частиц с зарядами того или иного знака суммируются и обнаруживаются в окружающем тела пространстве. В окружающем неподвижные постоянные магниты пространстве, наоборот, взаимно компенсируются электрические поля элементарных частиц, образующих вещество магнитов, вследствие равенства суммарных зарядов положительно и отрицательно заряженных частиц. Магнитные поля вследствие согласованного движения частиц, возникшего при намагничивании магнитов, суммируются в пространстве, окружающем магниты. Таким образом, и в этих особых случаях, когда в некоторой области пространства обнаруживается только электрическое поле или только магнитное поле, явление в целом оказывается электромагнитным. Но весьма важно в этом смысле, и это будет особо рассмотрено дальше, что в переменном электромагнитном поле само электрическое поле возникает вследствие изменения во времени магнитного поля и, в свою очередь, возникновение магнитного поля является результатом изменения во времени электрического поля.

Электрическое поле создается электрическими зарядами, а также изменяющимся магнитным полем. Магнитное поле создается движущимися заряженными частицами, а также изменяющимся электрическим полем.

Для обнаружения электрического и магнитного полей можно воспользоваться тем или иным их проявлением.

Электрическим полем называют одну из сторон электромагнитного поля, характеризующуюся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и не зависящей от ее скорости.

Для выявления электрического поля достаточно взять неподвижное заряженное тело, так как независимость силы от скорости позволяет выбирать любые скорости, в том числе и нулевую.

Для исследования электрического поля, которое характеризуется непрерывным распределением в пространстве, необходимо взять пробное точечное заряженное тело, имеющее столь малые линейные размеры, что в пределах малого объема, занимаемого этим телом, исследуемое поле можно рассматривать как однородное. Это условие обеспечивается, если линейные размеры пробного тела пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием от него до других тел. Кроме того, заряд пробного тела должен быть достаточно малым, чтобы его внесение не вызвало сколь-нибудь заметного перераспределения зарядов на других телах.

В соответствии с тем, что электрическое поле непрерывно распределено в пространстве, в каждой точке пространства и в каждый момент времени пробное заряженное тело будет испытывать вполне определенную по значению и направлению механическую силу. Пользуясь этим, можно определить *основную физическую величину*, характеризующую электрическое поле в каждой его точке и называемую *напряженностью электрического поля*.

Напряженность электрического поля есть векторная величина, характеризующая электрическое поле и определяющая силу, действующую на заряженную частицу со стороны электрического поля.

(Везде далее буквы, обозначающие векторные величины, набраны жирным курсивным шрифтом.)

Напряженность электрического поля изображают вектором $\mathbf{E}$, по направлению совпадающим с вектором $\mathbf{f}$ механической силы, действующей на положительно заряженное пробное тело. Имеем

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{f}}{q_0}.$$

Полное отсутствие влияния заряда q_0 на распределение зарядов, определяющих исследуемое поле, будет при q_0 , стремящемся к нулю. Соответственно, можно дать следующее точное определение.

Напряженность электрического поля есть векторная величина, равная пределу отношения силы, с которой электрическое поле действует на неподвижное точечное заряженное тело, внесенное в рассматриваемую точку поля, к заряду этого тела, когда этот заряд стремится к нулю, и имеющая направление, совпадающее с направлением силы, действующей на положительно заряженное точечное тело:

$$\mathbf{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\mathbf{f}}{q_0}.$$

Определив напряженность поля во всех его точках, можно провести ряд линий так, чтобы в каждой точке этих линий касательные к ним совпадали по направлению с вектором напряженности поля (рис. 1.1). Эти линии называют *ли-*

ниями напряженности электрического поля. На чертеже их изображают со стрелками, указывающими направление вектора $\mathbf{E}$. Совокупность таких линий образует картину электрического поля.

Вообразим замкнутый контур, ограничивающий некоторую поверхность, и проведем через все точки этого контура линии напряженности поля. Совокупность этих линий образует трубчатую поверхность. Область электрического поля, ограниченную такой трубчатой поверхностью, называют *трубкой напряженности поля*.

На рис. 1.1 изображена картина электростатического поля около двух заряженных тел с равными и противоположными по знаку зарядами. На рисунке показан также ряд линий напряженности электрического поля, проходящих через точки контура, ограничивающих поверхность s и образующих трубку напряженности поля.

В соответствии с вышеизложенным любое неподвижное точечное тело с зарядом q испытывает в электромагнитном поле силу

$$\mathbf{f}_1 = q\mathbf{E}.$$

Эта сила, согласно данному выше определению, возникает под действием электрического поля.

Если сила, действующая на движущуюся заряженную частицу, зависит и от скорости движения, то это означает, что кроме силы электрического поля на частицу действует также и дополнительная сила $\mathbf{f}_2$, возникновение которой приписываем наличию магнитного поля.

В соответствии с этим *магнитным полем называют одну из двух сторон электромагнитного поля, характеризующуюся воздействием на движущуюся электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости*.

Отсюда следует, что магнитное поле действует только на движущиеся заряженные частицы и тела.

Значение дополнительной силы $\mathbf{f}_2$ пропорционально заряду q движущихся частиц, и ее направление зависит от направления вектора $\mathbf{v}$ их скорости. В каждой точке магнитного поля в каждый момент времени есть определенное направление (обозначим его единичным вектором $\mathbf{n}$), характеризующееся тем, что сила $\mathbf{f}_2$ оказывается наибольшей, когда вектор скорости $\mathbf{v}$ перпендикулярен вектору $\mathbf{n}$ (рис. 1.2), т. е. лежит в плоскости s , перпендикулярной $\mathbf{n}$. При любом другом направлении вектора скорости $\mathbf{v}$ сила $\mathbf{f}_2$ будет меньше — она пропорциональна проекции v_t (рис. 1.3) вектора $\mathbf{v}$ на эту плоскость. Вектор силы $\mathbf{f}_2$ перпендикулярен к указанному направлению, т. е. вектору $\mathbf{n}$, а также, как уже было отмечено, перпендикулярен вектору скорости $\mathbf{v}$.

Пользуясь этим, определим *основную физическую величину*, характеризующую магнитное поле в каждой его точке и называемую *магнитной индукцией*. Магнитная индукция есть векторная величина. Она изображается векто-

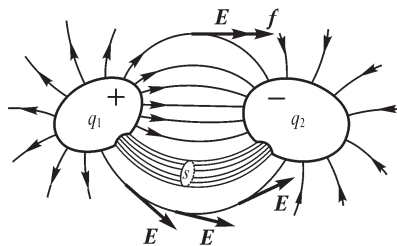


Рис. 1.1

ром $\mathbf{B}$, имеющим направление, совпадающее с направлением $\mathbf{n}$ (рис. 1.2 и 1.3). Сила f_2 пропорциональна значению магнитной индукции. Существует равенство

$$f_2 = q[\mathbf{v}\mathbf{B}],$$

где $[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ — векторное произведение векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$.

Это выражение и может служить определением значения и направления век-

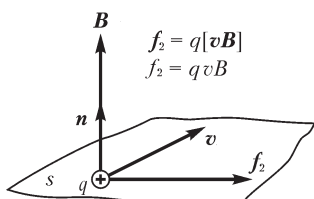


Рис. 1.2

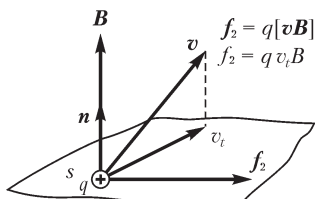


Рис. 1.3

тора $\mathbf{B}$. Сила f_2 перпендикулярна $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$. Если еще выбрать такое направление скорости $\mathbf{v}$, чтобы было $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ (рис. 1.2), то значение силы f_2 , как уже было сказано, будет наибольшим. При этом все три вектора, $\mathbf{f}_2$, $\mathbf{v}$ и $\mathbf{B}$, будут взаимно перпендикулярны и взаимно ориентированы, как показано на рис. 1.2. Это определяет направление вектора $\mathbf{B}$. Зная в этих условиях значения v и f_2 , значение магнитной индукции B находим из выражения

$$B = \frac{f_2}{qv}.$$

Следовательно, магнитная индукция есть векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

Магнитная индукция численно равна отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы, если направление скорости таково, что эта сила максимальна, и имеет направление, перпендикулярное направлению векторов силы и скорости, совпадающее с поступательным перемещением правого винта при вращении его от направления силы к направлению скорости частицы с положительным зарядом.

Магнитную индукцию можно определять также по воздействию на отрезок проводника длиной l с электрическим током i . Соответствующее выражение легко может быть получено из только что написанного. Пусть $\mathbf{l}$ — вектор, имеющий длину, равную длине отрезка проводника, и направленный по оси проводника в направлении тока i . Пусть q — заряд в объеме отрезка проводника, движущийся упорядоченно вдоль оси проводника со скоростью $\mathbf{v}$ и образующий при своем движении ток i . Если заряд q проходит путь l за время t , то $\mathbf{v} = \mathbf{l}/t$. Так как при этом сквозь сечение проводника за время t проходит заряд q , то $i = q/t$. Имеем

$$qv = q \frac{l}{t} = \frac{q}{t} l = il$$

и, следовательно,

$$f_2 = q[vB] = i[lB].$$

Если $l \perp B$, то сила при данных i , l и B имеет наибольшее значение, равное

$$f_2 = ilB.$$

В этом случае

$$B = \frac{f_2}{il}$$

и направление вектора B определяется согласно рис. 1.4.

Для неоднородного поля необходимо взять отношение силы Δf_2 к отрезку проводника Δl , когда этот отрезок стремится к нулю:

$$B = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta f_2}{i \Delta l}.$$

Использование элемента проводника с током для определения вектора магнитной индукции имеет то преимущество по сравнению с использованием движущейся заряженной частицы, что суммарный заряд элемента проводника может быть равен нулю, так как заряд движущихся в нем частиц равен и противоположен по знаку заряду неподвижной решетки, образующей тело проводника. При этом сила f_1 со стороны электрического поля равна нулю и вся сила, действующая на такой проводник в электромагнитном поле, определяется только магнитным полем.

Для частицы же с зарядом q , движущейся в электромагнитном поле со скоростью v , результирующая сила имеет обе составляющие, определяемые одна — электрическим, а другая — магнитным полем:

$$f = f_1 + f_2 = qE + q[vB].$$

Эту силу часто именуют силой Лоренца. Она является векторной величиной и имеет две составляющие: электрическую, не зависящую от скорости частицы, обусловленную электрическим полем, и магнитную, пропорциональную скорости частицы, действующую со стороны магнитного поля.

Действие сил f_1 и f_2 существенно различно. Сила f_1 со стороны электрического поля может изменять как направление скорости заряженной частицы, так и значение этой скорости, т. е. изменять кинетическую энергию частицы. Сила же f_2 со стороны магнитного поля, направленная всегда перпендикулярно вектору скорости частицы, изменяет только направление движения частицы, но не изменяет значения скорости и, соответственно, ее кинетической энергии.

Эти обстоятельства широко используются для ускорения заряженных частиц и управления их движением в электронных осциллографах, электронных микроскопах и ускорителях заряженных частиц.

Выражение для результирующей силы f позволяет сделать весьма существенный, имеющий принципиальное значение вывод, что деление единого электромагнитного процесса на две его составляющие — электрическую и магнитную — относительно. Действительно, говорить о скорости v частицы можно только по отношению к некоторой системе координат, т. е. к некоторой системе отсчета. Если наблюдатель неподвижен в этой системе координат, то v есть скорость час-

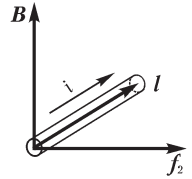


Рис. 1.4

тицы по отношению к наблюдателю. Если такой наблюдатель обнаруживает обе составляющие, f_1 и f_2 , силы $\mathbf{f}$, то, согласно данным выше определениям, он утверждает, что существует как электрическое поле с напряженностью $\mathbf{E}$, так и магнитное поле с магнитной индукцией $\mathbf{B}$.

Представим теперь другую систему отсчета, движущуюся относительно первой со скоростью $\mathbf{v}$. Наблюдатель, неподвижный в этой новой системе координат, будет воспринимать в тот же момент времени частицу с зарядом q как неподвижную и, следовательно, всю силу $\mathbf{f}$ будет относить за счет действия электрического поля с напряженностью $\mathbf{E}'$

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E}'.$$

Следовательно,

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + [\mathbf{v}\mathbf{B}].$$

Таким образом, напряженность электрического поля в одной и той же точке и в один и тот же момент времени для разных движущихся относительно друг друга наблюдателей оказывается различной. То же положение, как нетрудно показать, относится и к магнитной индукции.

Все это еще раз подчеркивает главную мысль, что мы всегда имеем дело с единым, объективно существующим электромагнитным явлением, не зависящим от условий наблюдения. Деление же его на электрическую и магнитную составляющие относительно. Эти две составляющие находятся друг с другом в тесной взаимосвязи.

Отметим здесь, что, рассматривая то или иное электромагнитное явление, будем относить его к некоторой определенной системе отсчета, хотя специально это и не оговаривая.

В заключение приведенных выше основных положений еще раз обратим внимание на важное обстоятельство, что в определениях первых понятий электромагнитного поля и электрического заряда принципиально нельзя было обойти зависимость одного от другого. Точно такое же положение имеет место и в отношении полных определений электрического и магнитного полей, поскольку эти поля являются двумя сторонами единого электромагнитного поля.

Определения всех последующих понятий должны содержать в себе только понятия, ранее уже определенные на основе использования тех или иных количественных закономерностей.

1.4. Связь заряда частиц и тел с их электрическим полем. Теорема Гаусса

Введем понятие о потоке вектора сквозь некоторую поверхность, в данном случае о потоке вектора напряженности электрического поля.

Представим в электрическом поле поверхность s , ограниченную некоторым контуром (рис. 1.5). Обозначим через β угол между вектором $\mathbf{E}$ и условно выбранной положительной нормалью $\mathbf{N}$ к поверхности в некоторой ее точке. Условимся также, что при замкнутой поверхности положительная нормаль всегда будет направлена во внешнее пространство. Составляющая вектора $\mathbf{E}$, нормальная к элементу поверхности ds , равна $E_n = E \cos \beta$. Интеграл от произведений элемен-