

Глава 1

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ СРЕД

1.1. Общие сведения

Современная физика признает две формы существования материи: вещество и поле. Известны многие разновидности полей: электромагнитные, силовые, внутриядерные и поля других взаимодействий. Во многом свойства их сходны. Вещество состоит из дискретных элементов (молекул, атомов и т. д.). Движущееся электромагнитное поле тоже можно представить в виде потока дискретных частиц – фотонов. Электромагнитное поле характеризуется энергией, массой, импульсом. Масса и импульс присущи только движущемуся электромагнитному полю (электромагнитное поле не имеет массы покоя). Энергия электромагнитного поля может преобразовываться в другие виды энергии. Электромагнитное поле подвержено действию гравитационных сил. Также поток материальных частиц способен реализовать явления дифракции, интерференции, которые присущи электромагнитным волнам.

Рассмотрим классическую теорию электромагнитного поля (теорию Максвелла, или макроскопическую теорию электромагнитного поля). Классическая электродинамика оперирует понятиями на уровне макроструктуры вещества, т. е. рассматриваемые области пространства всегда во много раз больше размеров атомов и молекул. Временные интервалы, характерные для изменения электромагнитного поля, всегда во много раз больше временных интервалов, присущих внутриатомным колебательным процессам. На основе классической теории электромагнитного поля решается большинство задач, кроме тех, которые связаны с поглощением и излучением электромагнитных волн веществом. Строгий анализ электромагнитных явлений на уровне микроструктуры вещества возможен на основе квантовой теории электромагнитного поля. Для описания любых процессов радиотехники достаточно классической электродинамики.

Источники электромагнитного поля – электрические заряды. неподвижные электрические заряды создают только электрическое поле. Движущиеся заряды – как электрическое, так и магнитное поле. Разделение электромагнитного поля на электрическое и магнитное носит относительный характер и зависит от выбора системы координат. Прямолинейно движущийся электрический заряд создает электрическое и магнитное поле, но для прямолинейно движущегося наблюдателя он создает только электрическое поле. Источник электромагнитного поля – не только отдельные заряды, но и электрические и конвекционные токи (токи – это упорядоченно движущиеся электрические заряды). Электрическое и магнитное поля проявляются через силовое воздействие на единичный элементарный электрический заряд, внесенный в поле. Под действием электрического поля пробный электрический заряд, внесенный в поле, начинает перемещаться. Далее магнитное поле изменяет траекторию перемещения электрического заряда, а также ориентирует пробный постоянный магнит. Так как электромагнитное поле обладает направленным действием, то для его описания вводят векторные характеристики.

1.2. Векторы электромагнитного поля

1.2.1. Векторы электрического поля

Одна из основных векторных характеристик электромагнитного поля – *напряженность электрического поля*, т. е. сила, с которой электрическое поле действует на положительный единичный точечный заряд, внесенный в поле.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1.1)$$

$$[\vec{E}] = \frac{[\vec{F}]}{[q]} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

В физике это понятие уточняется: заряд q должен быть достаточно малым, чтобы можно было пренебречь изменением распределения электрических зарядов, формирующих это поле.

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1.2)$$

Сила взаимодействия электрических зарядов, а стало быть, и напряженность электрического поля неодинаковы в различных средах и определяются по закону Кулона. Причина этого – в эффекте поляризации (поляризованности) вещества под действием внешнего электрического поля. Процесс поляризации – сложный физический процесс, непосредственно связанный со структурой вещества. Рассмотрим этот процесс упрощенно в рамках классической теории.

Вещество состоит из атомов, атом – из положительного ядра и отрицательных электронов. Сочетание атомов образует молекулу. Различают вещества с полярными и неполярными молекулами. В случае неполярных атомов или молекул точка приложения равнодействующей всех сил, действующих на отрицательные заряды, совпадает с точкой приложения равнодействующей всех сил, действующих на положительные заряды. Это возможно в том случае, если центр тяжести молекулы совпадает с центром тяжести протонов. В полярных молекулах эти центры не совпадают, и полярную молекулу можно уподобить элементарному диполю, т. е. системе, состоящей из двух разноименных зарядов, разнесенных в пространстве на расстояние l (рис. 1.1). Диполи характеризуются *дипольным моментом*

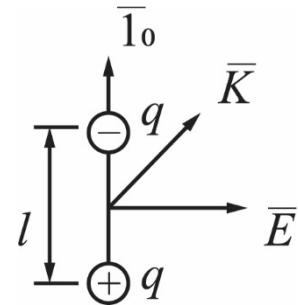


Рис. 1.1

$$\vec{p} = \vec{l}_0 p = \vec{l}_0 ql. \quad (1.3)$$

Эффект поляризованности вещества характеризуют суммарным дипольным моментом в рассматриваемом объеме dV

$$\vec{p}_\Sigma = \sum_{\Delta V} \vec{p}_i, \quad (1.4)$$

где \vec{p} – дипольный момент, соответствующий отдельным атомам или молекулам, Кл·м. В формуле (1.4) осуществляется их геометрическое суммирование в объеме ΔV .

В случае вещества с полярными молекулами при отсутствии внешнего электрического поля диполи расположены хаотически и суммарный дипольный момент равен нулю. Под действием внешнего электрического поля дипольные моменты отдельных молекул начинают ориентироваться по полю, образуя внутреннее электрическое поле. Внутреннее поле накладывается на первичное (внешнее), и результирующее поле отличается от того, каким оно было бы в вакууме. При

этом суммарный дипольный момент не равен нулю. Такой процесс называется *ориентационной поляризацией*. При этом на заряды диполя в электрическом поле будет действовать пара сил (момент сил)

$$\vec{K} = [\vec{p}\vec{E}]. \quad (1.5)$$

В случае вещества с неполярными молекулами (рис. 1.2) под действием внешнего электрического поля в неполярных атомах происходит перераспределение отрицательных зарядов (рис. 1.3) и молекула становится полярной. Такой процесс называется *электронной поляризацией*.

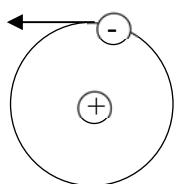


Рис. 1.2

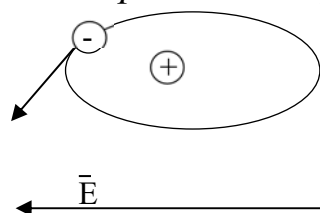


Рис. 1.3

Для характеристики поляризации вещества вводят *вектор поляризованности* (поляризации), Кл/м², который определяют как предел:

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{\Delta V} P_i}{\Delta V}. \quad (1.6)$$

При не очень сильных электрических полях можно считать, что вектор поляризованности пропорционален напряженности внешнего электрического поля:

$$\vec{P} = \epsilon_0 k_3 \vec{E}, \quad (1.7)$$

где $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ Ф/м – электрическая постоянная; k_3 – безразмерный коэффициент, характеризует поляризационные свойства вещества и называется *диэлектрической восприимчивостью*.

Предел (1.6) следует рассматривать не как математическое приближение, а как физическое соотношение, т. е. при любом уменьшении ΔV предел всегда будет существенно больше размеров молекул.

Наряду с напряженностью электрического поля используют также еще одну векторную величину – *вектор электрической индукции* \vec{D} (вектор электрического смещения), Кл/м²,

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (1.8)$$

Используя выражение (1.7), получаем

$$\bar{D} = \varepsilon_0 (1 + k_3) \bar{E}. \quad (1.9)$$

Следовательно,

$$\bar{D} = \varepsilon_a \bar{E}. \quad (1.10)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 (1 + k_3) \quad (1.11)$$

Соотношение (1.11) определяет *абсолютную диэлектрическую проницаемость среды*.

Так как диэлектрическая восприимчивость вакуума $k_3 = 0$, то ε_0 называется *абсолютной диэлектрической проницаемостью вакуума*. Чаще пользуются не абсолютной, а относительной диэлектрической проницаемостью среды

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}. \quad (1.12)$$

Соотношения (1.7) и (1.10) приближенные, справедливые для случая не очень сильных полей. В дальнейшем будем полагать, что соотношения (1.7) и (1.10) справедливы. В сильных электрических полях диэлектрическая восприимчивость зависит от величины электрического поля.

На примере взаимодействия двух электрических зарядов уточним некоторые особенности, присущие двум векторным характеристикам электрического поля. На основании закона Кулона сила взаимодействия двух зарядов описывается формулой

$$\bar{F} = \bar{1}_r \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_a r^2}.$$

В соответствии с приведенными соотношениями

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q} = \bar{1}_r \frac{Q}{4\pi\varepsilon_a r^2}.$$

Используя выражение (1.7), получаем

$$\bar{D} = \varepsilon_a \bar{E} = \bar{1}_r \frac{Q}{4\pi r^2}.$$

Отсюда следует, что при одинаковых расположении и величине электрических зарядов векторное поле \bar{D} не зависит от свойств среды.

1.2.2. Векторы магнитного поля

Сила воздействия электромагнитного поля на точечный электрический заряд зависит не только от величины и положения заряда, но также от скорости и направления его движения. Сила, действующая на положительный точечный электрический заряд, движущийся в магнитном поле, определяется силой Лоренца

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{V}\vec{B}] = \vec{F}_э + \vec{F}_M, \quad (1.13)$$

где $\vec{F}_э = q\vec{E}$ – электрическая сила; (1.14)

$$\vec{F}_M = q[\vec{V}\vec{B}] – магнитная сила. \quad (1.15)$$

Магнитная сила пропорциональна скорости перемещения заряда и направлена перпендикулярно направлению движения заряда.

$$[\vec{B}] = \frac{[\vec{F}_M]}{[q][\vec{V}]} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}.$$

Величина \vec{B} называется *вектором магнитной индукции*. Она равна силе, с которой магнитное поле действует на положительный точечный заряд, движущийся с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном \vec{B} .

В различных средах силы воздействия магнитного поля на движущийся электрический заряд различны. Причина заключается в эффекте намагничивания вещества под действием внешнего магнитного поля. Очевидно, что магнитное поле действует не только на движущиеся положительные единичные заряды, но также и на проводники с током. На проводник длиной l , в котором протекает ток $I^э$, действует сила

$$\vec{F} = l[\vec{I}^э\vec{B}], \quad (1.16)$$

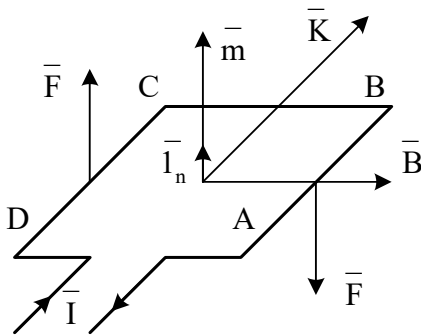


Рис. 1.4

где $\vec{I}^э$ – электрический ток, протекающий по проводнику и совпадающий по направлению с направлением перемещения положительных зарядов в проводнике.

Если в однородное магнитное поле внести элементарную рамку с током (рис. 1.4), то на нее будет действовать пара сил (момент сил)

$$\bar{K} = I^3 S [\bar{l}_n \bar{B}]. \quad (1.17)$$

В пределах рамки магнитное поле можно считать однородным, а токи на участках AB и CD определяются выражением $I_{AB} = -I_{CD}$.

Обычно рамки с током характеризуют магнитным моментом, A/m^2 ,

$$\bar{m} = \bar{l}_n I^3 S. \quad (1.18)$$

Подставив выражение (1.18) в формулу (1.17), получим

$$\bar{K} = [\bar{m} \bar{B}]. \quad (1.19)$$

Момент сил \bar{K} стремится повернуть рамку таким образом, чтобы вектор магнитного момента совпал с вектором \bar{B} . Величина магнитной индукции в различных средах неодинакова. Это можно объяснить эффектом намагничивания среды внешним магнитным полем. Эффект намагничивания непосредственно связан с молекулярной структурой вещества. Упрощенно его можно пояснить следующим образом. Атомы и молекулы большинства веществ обладают собственным магнитным моментом, т. е. такие молекулы и атомы можно сопоставить с некоторыми элементарными рамками с током. Рамка с током создает собственное магнитное поле, пропорциональное магнитному моменту. При этом для элемента объема ΔV можно вычислить суммарный магнитный момент

$$\bar{m}_{\Delta V} = \Sigma_{\Delta V} \bar{m}_i. \quad (1.20)$$

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов и молекул ориентированы хаотически, поэтому \bar{m}_{Σ} и собственное магнитное поле объема ΔV равны нулю. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты, соответствующие отдельным атомам, ориентируются по полю. Магнитные поля, соответствующие элементарным рамкам, складываются и накладываются на первичное магнитное поле. В результате наложения суммарное магнитное поле может быть больше или меньше исходного. *Среды*, в которых происходит уменьшение результирующего поля, называются *диамагнитными*. *Среды*, в которых происходит незначительное усиление результирующего поля, называются *парамагнитными*. *Среды*, в которых происходит значительное усиление результирующего поля, называются *ферромагнитными*.

Эффект намагничивания среды внешним магнитным полем характеризуется *вектором намагниченности*, А/м, который определяют следующим образом:

$$\bar{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{\Delta V} \bar{m}_i}{\Delta V}. \quad (1.21)$$

Наряду с вектором магнитной индукции \bar{B} для описания используют *напряженность магнитного поля*, А/м,

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{M}, \quad (1.22)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

При не очень сильных магнитных полях вектор \bar{M} пропорционален вектору \bar{B} . Учитывая линейность уравнения (1.22), можно считать, что \bar{M} в относительно слабых полях пропорционален \bar{H} :

$$\bar{M} = k_m \bar{H}, \quad (1.23)$$

где k_m – *магнитная восприимчивость среды* (безразмерный коэффициент, характеризующий магнитные свойства среды).

Подставляя соотношение (1.23) в выражение (1.22), получаем

$$\bar{B} = \mu_0 (1 + k_m) \bar{H}, \quad (1.24)$$

$$\bar{B} = \mu_a \bar{H}, \quad (1.25)$$

где μ_a – *абсолютная магнитная проницаемость среды*, $\mu_a = \mu_0 (1 + k_m)$.

$$\mu_a = \mu \mu_0; \quad \mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}, \quad (1.26)$$

где μ – *относительная магнитная проницаемость среды*.

Так как для вакуума магнитная восприимчивость равна нулю, то μ_0 называется *абсолютной магнитной проницаемостью вакуума*.

Магнитные свойства сред можно классифицировать, анализируя величину магнитной восприимчивости:

- для диамагнитной и парамагнитной сред $|k_m| \ll 1$;
- для диамагнитной среды $|k_m| < 0$;
- для парамагнитной и ферромагнитной сред $|k_m| > 0$;
- для ферромагнитной среды $|k_m| \gg 1$.

Из выражений (1.22) – (1.26) видно, что вектор напряженности магнитного поля обладает следующей особенностью: при одинаковых расположении и величине источников магнитного поля напряженность магнитного поля одинакова во всех средах.

Выражения (1.23) и (1.25) приближенные. В общем случае в ферромагнитных средах \bar{M} зависит не только от величины магнитного поля в данный момент, но также и от величины магнитного поля в предыдущие моменты времени (явление гистерезиса).

В дальнейшем будем полагать, что соотношения (1.23) и (1.25) во всех случаях справедливы. Важная особенность, присущая магнитным средам, следующая: для диамагнитных и парамагнитных сред k_m – постоянная величина. Для подмагниченных ферромагнитных сред абсолютная магнитная проницаемость – тензорная величина.

1.3. Классификация сред

Свойства сред характеризуются электродинамическими параметрами ϵ_a , μ_a , σ (σ – объемная удельная проводимость, См/м).

В зависимости от свойств электродинамические параметры среды делятся на линейные и нелинейные. *Среды*, в которых электродинамические параметры не зависят от интенсивности электрических и магнитных полей, называются *линейными*. Среды, в которых эта зависимость наблюдается, называются *нелинейными*. В природе все среды следует рассматривать как нелинейные. Тем не менее большинство сред при малых полях со слабо выраженной зависимостью от величины поля для простоты полагают линейными.

Линейные среды делятся на однородные, неоднородные, изотропные и анизотропные. *Однородными* называются *среды*, в которых электродинамические параметры не меняются от точки к точке. Среды, в которых электродинамические параметры – функции системы координат, относят к *неоднородным*.

Изотропными называются среды, в которых электродинамические параметры одинаковы по всем направлениям. *Анизотропными* называются среды, в которых хотя бы один из параметров зависит от направления.