**ЛЕКЦИЯ №3. МАТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.**

**План:**

3.3. Электромагнитное поле.

3.2. Электрические заряды.

3.3. Электрический ток.

3.4. Закон сохранения заряда.

3.5. Закон Гаусса

3.6. Закон электромагнитной индукции

3.7. Материальные уравнения электромагнитного поля для вакуума

**3.1. Электромагнитное поле**

Как известно, объективная реальность, в которой существует человек, называется материей. Материя существует в двух формах: в виде вещества и в виде поля. Предметом нашего изучения является электромагнитное поле.

***Под электромагнитным полем*** понимают особую форму материи, с помощью которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Электромагнитное поле, как и вещество, имеет следующие свойства: обладает массой, импульсом, переносит энергию, испытывает воздействие гравитационных сил.

Электромагнитное поле представляет собой взаимосвязь двух полей: электрического и магнитного. Разделение единого электромагнитного поля на электрическую и магнитную составляющие имеет относительный характер. Источниками электромагнитного поля являются электрические заряды. Причем электрическое поле порождается электрическим зарядом, независимо от того находится он в покое или движется в выбранной системе координат. Магнитное поле порождается движущимся зарядом, т.е. электрическим током.

Относительный характер электромагнитного поля связан с выбором системы отсчета. Напомним, что система отсчета представляет собой совокупность элементов: тело отсчета, система координат и часы, служащие отсчету времени. Если в выбранной системе отсчета электрический заряд движется прямолинейно с постоянной скоростью, то он порождает и электрическое, и магнитное поле. Однако для наблюдателя, движущегося в направлении движения заряда с той же скоростью, заряд будет восприниматься неподвижным, и, следовательно, будет порождать только электрическое поле. Для наблюдателя это поле будет электростатическим, т.к. порождено неподвижным электрическим зарядом.

В природе, как известно, существуют положительные и отрицательные заряды. Элементарным положительным зарядом является заряд протона. Элементарным отрицательным – заряд электрона. Численные значения (модули) этих зарядов одинаковы, а знаки зарядов – разные. Численное значение элементарного заряда составляет q0=1,6⋅10-19 Кл.

Электрическое поле описывается вектором напряженности электрического поля  и вектором индукции электрического поля . Магнитное поле описывается вектором напряженности магнитного поля  и вектором индукции магнитного поля . Таким образом, в целом электромагнитное поле описывается четырьмя векторами , , , .

В международной системе СИ единицами измерения указанных физических величин являются следующие: напряженность электрического поля (Е) – вольт на метр (); индукция электрического поля (D) – кулон на квадратный метр (); напряженность магнитного поля (Н) – ампер на метр (); индукция магнитного поля (В) – тесла (Тл);

Электромагнитное поле распространяется в пространстве с течением времени с некоторой скоростью. В вакууме значение этой скорости соответствует значению скорости света с=3⋅108 м/с. Поэтому векторы электромагнитного поля являются функциями пространственных координат и времени.

Источники электромагнитного поля (заряды) и векторные характеристики поля связаны между собой. Такая связь выражается с помощью соответствующих уравнений, которые выражают законы электродинамики. Приступим к более подробному рассмотрению этих законов. Отметим, что запись всех законов приведена в международной системе измерений СИ.

**3.2. Электрические заряды**

Электродинамика изучает макроскопические заряженные тела. Минимальный заряд, существующий в природе в свободном состоянии, равен величине заряда электрона. Заряд реально заряженного тела кратен заряду электрона. Поэтому суммарный заряд тела  определяется формулой

, (3.1)

где qi – элементарный заряд, входящий в состав тела.

Для описания заряда и его пространственного распределения введем соответствующие характеристики, к рассмотрению которых мы перейдем ниже.

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики заряженного тела | Точечный заряд |
| Объемная плотность заряда |
| Поверхностная плотность заряда |
| Линейная плотность заряда |

Под ***точечным зарядом*** понимают заряд тела, размеры которого много меньше расстояния, на котором оно рассматривается в выбранной системе координат.

Если заряд распределен по объему тела, то вводят понятие объемной плотности заряда. ***Объемная плотность заряда*** – это заряд, содержащийся в единице объема. Обозначается объемная плотность заряда ρе и определяется формулой

 . (3.2)

Объемную плотность заряда измеряют в кулонах на кубический метр ().

Очевидно, заряд элементарного объема определяется формулой

 . (3.3)

Полный заряд тела, имеющего объем V, равен сумме элементарных зарядов и определяется

, (3.4)

где *qT* – полный заряд тела, *ρе* - объемная плотность заряда, *dV* – элементарный объем.

В ряде случаев заряд расположен по поверхности тела. Поэтому удобно пользоваться поверхностной плотностью заряда σ. ***Поверхностная плотность заряда*** – это заряд, приходящийся на единичную площадь заряженного тела. Поверхностная плотность заряда  определяется формулой

 , (3.5)

где *Δq* – заряд, *ΔS* – площадь поверхности. Единицей измерения поверхностной плотности заряда является кулон на квадратный метр ().

Очевидно, заряд элементарной поверхности находится из выражения

 . (3.6)

Полный заряд, находящийся на поверхности тела площадью S, определяется формулой

 . (3.7)

В случае расположения заряда вдоль нити вводят линейную плотность заряда. При таком идеализированном распределении заряда толщину нити принимают нулевой. ***Линейная плотность заряда*** – это заряд, приходящийся на единицу длины заряженной нити. Линейная плотность заряда определяется формулой

 , (3.8)

где Δq – заряд, Δl – длина элемента нити. Единицей измерения линейной плотности заряда является кулон на метр ().

Исходя из данного определения, заряд элемента длины нити определяется выражением

 . (3.9)

Полный заряд, приходящийся на нить длиной L, определяется формулой

 . (3.10)

Отметим, в реальных условиях распределение заряда является объемным.

Точечные заряды взаимодействуют между собой по закону Кулона, который для вакуума имеет вид

 , (3.11)

где  - значения зарядов, r – расстояние между зарядами,  - единичный радиус-вектор.

Понятие точечного заряда, поверхностной и линейной плотности заряда являются идеальными, использование которых существенно помогает упростить изучение содержания электродинамики.

**3.3. Электрический ток**

Проводящая среда характеризуется, как известно, наличием свободных заряженных частиц. Если в проводящей среде создано электрическое поле напряженностью , то заряды приходят в упорядоченное движение, т.к. электрическое поле действует на каждый заряд силой

 . (3.12)

Формула (3.12) показывает, что при положительном заряде q векторы  и  являются сонаправленными. В случае отрицательного заряда векторы  и  направлены в противоположные стороны.

Если на тело действует сила, то тело приобретает ускорение, величина и направление которого определяется вторым законом Ньютона

 , (3.13)

где  - ускорение,  - действующая сила, m – масса тела.

Таким образом, в проводящей среде свободные заряды под действием напряженности электрического поля приходят в упорядоченное движение, т.е. возникает электрический ток.

***Электрический ток*** – это направленное движение зарядов. Для описания электрического тока вводят характеристики: сила тока и плотность тока.

***Сила тока*** – это заряд, протекающий в единицу времени через поперечное сечение проводника. Обозначается сила тока *I* и определяется формулой

 . (3.14)

Сила тока *I* является скалярной величиной и измеряется в амперах

, (3.15)

т.е.

 .

Для характеристики интенсивности движения зарядов и учета направления их движения ввели понятие объемной плотности электрического тока или часто говорят о плотности тока.

***Плотность электрического тока*** - это векторная величина, направленная вдоль напряженности электрического поля и численно равная отношению силы тока к размеру площади поверхности, через которую он протекает. Плотность электрического тока определяется формулой

 , (3.16)

где  - плотность тока,  - единичный вектор, *ΔI* – сила тока, *ΔS* – площадь поверхности. Единицей измерения плотности тока является ампер на квадратный метр

 . (3.17)

В общем случае плотность тока неодинакова в разных точках пространства и является векторной функцией координат, т.е.

 . (3.18)

Характеристики электрического поля, т.е. сила тока и плотность тока, связаны между собой. Такая связь выражается формулой

, (3.19)

где *I* – сила тока, протекающая через поверхность S,  - плотность тока,  - направленная элементарная площадка площадью dS.

Заметим, что ориентацию элементарной площадки dS учитывают с помощью единичного нормального вектора, проведенного к площадке (рис. 3.1).





Рис. 3.1 Нормаль, проведенная к элементарной площадке

Поэтому вектор  определяется формулой

 . (3.20)

В формуле (3.19) произведение  представляет собой поток вектора плотности тока, проходящего через указанную поверхность

 . (3.21)

Иными словами, ***электрический ток*** есть поток вектора плотности тока. Добавим, что электрический ток, обусловленный направленным движением реальных заряженных частиц, называется ***током проводимости***.

По способности проводить электрический ток все среды классифицируют на проводники, диэлектрики и полупроводящие среды.

Проводники характеризуются способностью проводить электрический ток. Для характеристики проводящей среды ввели понятие ***удельной проводимости σ,*** которая зависит от физических свойств материала, температуры. Удельная проводимость измеряют в сименсах на метр ();

.

Диэлектрики не проводят электрический ток. Полупроводящая среда одновременно обладает свойствами и проводника, и диэлектрика.

Проводящей средой могут быть твердые тела, жидкости и газы. К проводникам в виде твердого тела относят металлы, в которых свободными зарядами являются свободные электроны. К жидкостям, проводящим электрический ток, относят кислоты, растворы солей, щелочи. В них свободными заряженными частицами являются ионы: положительные и отрицательные. В газах, при соответствующих условиях, проводят ток и ионы, и электроны.

Для конкретной точки проводящей среды связь между векторами напряженности электрического поля и плотности тока выражается **законом Ома в дифференциальной форме:**

 , (3.22)

где  - плотность тока, σ - удельная проводимость,  - напряженность электрического поля.

Из формулы (3.22) видно, что вектор плотности электрического поля сонаправлен с вектором напряженности электрического поля, т.к. удельная проводимость вещества является положительной величиной.

**3.4. Закон сохранения заряда**

Результаты многократно проведенных экспериментов показали, что электрические заряды ни при каких условиях самопроизвольно не могут бесследно исчезать или зарождаться. Иными словами, экспериментально установлен ***закон сохранения заряда:*** в замкнутой системе полный заряд остается величиной постоянной, т.е.

 . (3.23)

Напомним, что система называется ***замкнутой***, если тела, входящие в рассматриваемую систему, взаимодействуют только между собой, а с внешними телами не взаимодействуют.

Под полным зарядом подразумевают суммарный заряд всех заряженных тел, входящих в систему. На рисунке 3.2 показана замкнутая система, состоящая из четырех заряженных тел, обладающих соответственно зарядами q1, q2, q3, q4.



Рис. 3.2 Замкнутая система зарядов

Полный (суммарный) заряд системы равен

 (3.24)

или такое сложение записывают в виде

, (3.25)

где  - суммарный заряд системы, qi – заряд тела этой системы, i – индекс, указывающий номер тела, входящего в систему, Σ - знак суммы.

Закон сохранения заряда является фундаментальным физическим законом.

**3.5. Закон Гаусса**

Закон Гаусса устанавливает связь между электрическим зарядом и напряженностью электрического поля , которое он порождает.

Пусть внутри некоторого объема V, имеющего поверхность S, заключен суммарный электрический заряд qΣ (рис. 3.3).









V

S



Рис. 3.3 Заряд, заключенный внутри объема V

Предварительно введем понятие потока вектора напряженности электрического поля в виде скалярного произведения двух векторов

 . (3.26)

Для пояснения содержания понятия потока вектора напряженности электрического поля  представим две параллельные плоскости, одна из которых заряжена положительно, т.е. имеет поверхностную плотность заряда +σ, вторая, соответственно, отрицательно - σ (рис. 3.4).



Рис. 3.4 Две параллельные заряженные плоскости

Пусть в пространстве между плоскостями расположена элементарная площадка , которая может принимать любую ориентацию. Очевидно, если вектор нормали, проведенный к площадке, сонаправлен (параллелен) вектору  (), то площадку  пересекает максимальное число линий напряженности электрического поля.

Если изменить ориентацию площадки таким образом, что , т.е. угол между нормалью и направлением вектора  соответствует 90°, то при таком расположении силовые линии электрического поля не пересекают поверхности рассматриваемой площадки. В этом случае поток вектора напряженности электрического поля

, (3.27)

т.е. поток вектора  равен нулю, силовые линии не пересекают поверхность.

Рис. 3.4 соответствует случаю максимального значения потока вектора напряженности электрического поля, т.к. векторы  и  являются сонаправлеными.

Можно заключить, что понятие потока вектора показывает количество линий, пересекающих рассматриваемую поверхность.

Закон Гаусса математически записывают в виде

 , (3.28)

где  - напряженность поля,  - направленная площадка,  - суммарный заряд, заключенный внутри поверхности S,  - диэлектрическая постоянная.

Скалярное произведение  представляет собой поток вектора напряженности электрического поля, проходящий через площадку . Интеграл означает, что рассматриваем полный поток вектора через всю замкнутую поверхность.

Закон Гаусса можно записать с помощью вектора индукции электрического поля. Для этого, уравнение (3.28) нужно несколько видоизменить, освободившись от знаменателя, т.е.

, (3.29)

но произведение

, (3.30)

поэтому можно записать

 . (3.31)

Закон, записанный с помощью интеграла вдоль замкнутой поверхности, называется законом Гаусса в интегральной форме. Такая форма указывает на выполнение закона в целом, независимо от свойств среды.

Заряды, как вы знаете, бывают положительные и отрицательные. Кроме того, нормаль к поверхности проводится внешняя (рис. 3.5). Для расчета потока вектора  угол между вектором  и нормалью  в скалярном произведении отсчитывается от нормали к направлению вектора напряженности. Если суммарный заряд является положительным, то угол между внешней нормалью и напряженностью электрического поля будет меньше 90°, > 0, значит  > 0 (рис. 3.5а).





S



а) б) в)

Рис. 3.5 Примеры определения потока вектора напряженности электрического поля

Если заряд отрицательный, то угол <0. В случае, если суммарный заряд заключенный в рассматриваемом объеме, равен нулю, то и поток вектора  сквозь замкнутую поверхность равен нулю (рис. 3.5в). В этом случае число силовых линий , входящих в объем V равно числу силовых линий , выходящих из этого объема.

Часто необходимо знать проявление закона в конкретных точках рассматриваемого пространства. Для этого заменим интеграл по поверхности через интеграл по объему на основе известного соотношения векторного анализа

 . (3.32)

Таким образом, левую часть формулы (3.28) преобразовали, заменив интеграл по поверхности на интеграл по объему. Правую часть  можно записать с помощью объемной плотности заряда ρе. Суммарный заряд в формуле (3.31) выразим через объемную плотность заряда, т.е.

 . (3.33)

Тогда от интегральной формы записи закона перейдем к дифференциальной форме

 , (3.34)

Так как мы рассматриваем произвольный объем, то последнее равенство выполняется, если подынтегральные выражения равны между собой. Тогда можно записать

 . (3.35)

Формулу (3.35) можно также записать в виде

, (3.36)

т.е. пришли к формуле:

 . (3.37)

Формулы (3.35) и (3.37) называют законом Гаусса в дифференциальной форме.

Физически эти соотношения означают, что источниками электрического поля являются только электрические заряды. Иными словами, ***электрическое поле порождается электрическими зарядами***.

Подчеркнем, что нормаль к элементу , выделенному по поверхности объема, проводится внешняя (рис. 3.6).

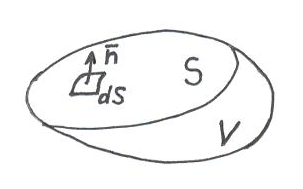


Рис. 3.6 Расположение внешней нормали к произвольной поверхности

Заряд в объеме может быть расположен произвольным образом. Кроме того, заряд внутри объема может изменяться с течением времени по произвольному закону.

Как известно, оператор дивергенции определяется как .

Дивергенция является пределом отношения потока вектора через замкнутую поверхность S к величине объема V, ограниченной этой поверхностью. Дивергенция отлична от нуля, если силовые линии поля начинаются или заканчиваются в данной точке. Закон Гаусса указывает, что силовые линии поля могут начинаться или заканчиваться только в точках пространства, где существуют заряды. Если во всех точках рассматриваемой области заряд отсутствует, т.е. q = 0, то силовые линии поля пронизывают эту область насквозь, либо являются замкнутыми.

Таким образом, в точке пространства, в которой находится положительный заряд, т.е. q>0, является «истоком» векторного электрического поля.

Если заряд отрицательный, т.е. q<0,(соответственно, ρе<0), то и . Такая точка пространства является «стоком» векторного электрического поля. На рис. 3.7 приведены соответствующие графические пояснения

+

ρ>0, Ф>0

div >0

«исток»

ρ<0, Ф<0

div <0

«сток»



Ρ=0, Ф=0

div =0

Рис. 3.7 К определению понятия дивергенция

Закон Гаусса является фундаментальным, из него можно получить аналитическое выражение закона Кулона.

**3.6. Закон электромагнитной индукции**

В истории человечества открытие закона электромагнитной индукции сыграло важную роль, так как именно этот закон дал толчок развитию всей электротехники, позволил создать способы получения электромагнитной энергии, разработать различные типы двигателей и многочисленных устройств. В основе всей электротехники лежит открытие М. Фарадея, который в 1831 году обнаружил появление электрического тока в замкнутом контуре, находящемся в изменяющемся магнитном потоке.

В чем заключается сущность закона электромагнитной индукции? Предварительно напомним сущность понятия потока электромагнитной индукции. Поток вектора электромагнитной индукции в соответствии с определением потока (любого) вектора записывается в виде

 , (3.50)

, (3.50)

где  - поток вектора, - индукция магнитного поля, - направленная площадка, ограниченная контуром, - нормаль, проведенная к площадке , - угол между направлениями вектора индукции магнитного поля  и нормали .

Магнитный поток измеряется в веберах .

Из формулы (3.50) видно, что поток вектора магнитной индукции можно изменить с течением времени тремя способами, связанными с изменением:

* модуля вектора магнитной индукции , т.е. изменением численного значения индукции поля;
* площади контура;
* угла между направлением вектора  и нормали , восстановленной к площадке , т. е. поворотом контура  в магнитном поле произвольным образом.

Все рассмотренные способы приводят к изменению магнитного потока .

Фундаментальный закон электромагнитной индукции устанавливает связь между изменяющимся магнитным потоком и возникающим электрическим полем. Пусть имеется изменяющееся магнитное поле, причем его изменение связано непосредственно с изменением вектора магнитной индукции . Соответственно, имеется изменяющийся магнитный поток . В таком поле рассмотрим произвольный замкнутый контур длиной  (рис. 3.14).



Рис. 3.14 Замкнутый контур в магнитном поле

В курсе общей физики закон электромагнитной индукции записывается в виде:

, (3.51)

где  - ЭДС индукции, - изменение потока магнитной индукции, - время, в течение которого произошло изменение магнитного потока. Знак минус выражает правило Ленца, указывающее на противодействующий характер магнитного поля, возникающего вследствие индукции по отношению к внешнему магнитному полю.

В интегральной форме закон электромагнитной индукции имеет вид

, (3.52)

где - напряженность электрического поля, - направленный элемент длины проводника, - магнитная индукция, - площадь, ограниченная контуром длиной .

Циркуляция вектора напряженности электрического поля, т. е.  выражает собой электродвижущую силу (ЭДС), возникающую в контуре под действием которой появляется электрический ток. Отметим, что контур может быть как мысленно рассматриваемый, так и реально взятый в виде замкнутого проводника.

Для получения закона электромагнитной индукции в дифференциальной форме необходимо воспользоваться теоремой Стокса, в результате применения которой, интеграл по длине контура преобразуют в интеграл по площади:

.

Закон электромагнитной индукции можно записать в виде

 .

Так как взят произвольный контур, то интегралы будут равны, если подынтегральные выражения равны, т. е.

 . (3.53)

Формула (3.53) выражает дифференциальную форму закона электромагнитной индукции, которая указывает на связь между электрическим и магнитным полем в каждой точке пространства.

Оператор  содержит только пространственные производные, в правой части формулы (3.53) член  выражает производную по времени. Отсюда видно, что характер изменения напряженности магнитного поля  с течением времени определяет характер изменения напряженности электрического поля  в пространстве.

Таким образом, закон электромагнитной индукции выражает фундаментальную связь между изменением магнитного поля в пространстве с течением времени и возникновением электрического поля.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 3. Пусть электрическое поле отсутствует, т.е. напряженность электрического поля . Тогда  и . Равенство производной нулю означает, что магнитная индукция  может быть только постоянной величиной, т. е. . Полученные выражения показывают, что в отсутствии электрического поля, магнитное поле может быть только постоянным.

Пример 2. Пусть имеется изменяющееся магнитное поле. Это означает, что  и , т. е. существует производная по времени. Тогда согласно закону электромагнитной индукции , т.е. . Отсюда следует, что .

Таким образом, изменение во времени магнитного поля приводит к возникновению электрического поля.

Пример 3. Определим связь между направлениями силовых линий электрического и магнитного поля. Пусть имеется изменяющееся магнитное поле, как показано на рис. 3.15. В первом случае (рис. 3.15а) поле возрастает, во втором (рис. 3.15б) – убывает.

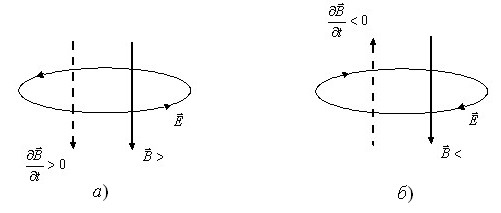


Рис. 3.15 Направление силовых линий наведенного магнитного поля

Поместим замкнутый контур в такое изменяющееся магнитное поле. Так как магнитный поток, пересекающий контур, изменяется, то возникает электрическое поле напряженностью , в контуре будет наводиться ЭДС, и возникнет электрический ток. Возникший ток будет иметь такое направление, что порождаемое им магнитное поле будет противодействовать первоначальному внешнему магнитному полю. В результате, в случае (рис. 3.15а) векторы  и  сонаправлены, силовые линии напряженности электрического поля имеют направление против часовой стрелки; в случае рис. 3.15б векторы  и  направлены в противоположные стороны, силовые линии напряженности электрического поля направлены по часовой стрелке

Подчеркнем, что наличие проводящего контура не является обязательным. Ток, индуцированный в проводящем контуре, возникает в результате силового действия напряженности электрического поля на свободные заряды, существующие в проводнике. Возникновение самого электрического поля не связано с наличием реального контура. Если отсутствует контур, то электрическое поле возникает не только в вакууме, но и в любой другой среде. Именно такую закономерность утверждает закон электромагнитной индукции.

Электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем, является вихревым. Силовые линии такого поля являются замкнутыми.

Уравнения Максвелла, выражающие закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах, содержат характеристики магнитного и электрического полей. Иными словами, уравнения Максвелла никак не связаны с материальным контуром, они в чистом виде содержат поля и отражают обобщенный характер выявленных закономерностей. Уравнения Максвелла являются полевыми уравнениями и связывают поле в данном месте пространства в конкретный момент времени. Переменное магнитное поле создает вокруг себя вихревое электрическое поле.

**3.7. Материальные уравнения электромагнитного поля**

Силовое воздействие электромагнитного поля на среды учитывается в материальных уравнениях, которые представляют собой соотношения, связывающие попарно векторы  и ,  и . Вывод этих уравнений связан с описанием процессов, которые происходят в среде под действием сил электромагнитного поля.

Имеются многочисленные вещества-диэлектрики, которые не проводят электрический ток, но электрическое поле внутри их зависит от напряженности внешнего электрического поля. Диэлектрики, помещенные в электрическое поле (постоянное или переменное во времени), специфическим образом меняют свое состояние – они поляризуются. В результате появляется дополнительное электрическое поле, которое налагается на первичное. При этом суммарное электрическое поле будет отличным от того, каким оно было бы в вакууме, и разным в различных диэлектрических средах. Поляризация – сложный физический процесс, связанный с атомной структурой конкретного вещества. Поэтому ограничимся лишь кратким и упрощенным рассмотрением процесса поляризации.

Молекулы и атомы вещества представляют собой объединение электрически заряженных частиц (связанные заряды), суммарный заряд молекулы (атома) равен нулю. Для диэлектриков характерны прочные связи заряженных частиц, поэтому при внешнем электрическом поле не происходит движения носителей заряда в толще материала, по крайней мере в не слишком сильных полях. Однако при этом молекула диэлектрика деформируется так, что ее можно представить в виде малого электрического диполя – системы двух разноименных зарядов (+*q* и -*q*), смещенных в пространстве на малое расстояние *l*. Диполи характеризуются дипольным моментом  (  – орт вектора , направленный вдоль оси диполя от отрицательного заряда к положительному). Упрощенно этот процесс можно показать на модели атома водорода, состоящего из протона и электрона (рис. 2.1).



Рис. 2.3. Процесс поляризации атома водорода

Рассмотренные выше четыре уравнения Максвелла образуют фундаментальную систему уравнений электродинамики. Такая система уравнений справедлива для любой среды, в которой происходит распространение полей. Однако, чтобы система уравнений была полной и однозначно определяла поле в любой точке среды, необходимо добавить уравнения, учитывающие свойства самой среды, которые проявляются в характере связи между характеристиками поля, то есть между  и ,  и . Уравнения, устанавливающие связь между указанными характеристиками поля с учетом свойств среды, называются материальными уравнениями.

Среду, в которой происходят электрические и магнитные явления, характеризуют диэлектрической проницаемостью , магнитной проницаемостью  и удельной проводимостью σ.

В вакууме материальные уравнения имеют вид:

 ,

 , (3.54)  
где  - диэлектрическая постоянная,  - магнитная постоянная.

С точки зрения способности проводить электрический ток все среды делят на проводники, диэлектрики, и полупроводники.

***Проводники*** – это вещества, способные проводить электрический ток, обладают удельной проводимостью  (сименс на метр).

***Диэлектрики*** – это вещества, не способные проводить электрический ток. Диэлектрики характеризуются удельной проводимостью .

диэлектрики полупроводники проводники

σ, 





Рис. 3.16 Классификация сред по способности проводить электрический ток

***Полупроводники*** – это вещества, которые обладают одновременно и свойствами проводника, и свойствами диэлектрика. Для полупроводников удельная проводимость изменяется в пределах . На рис. 3.16 показано разделение веществ по значению удельной проводимости.

Во многих задачах электродинамики удобно реальные проводники и диэлектрики заменить идеальными проводниками и диэлектриками. В этом случае, для идеального проводника принимаем σ=∞, идеального диэлектрика .

Поведение проводников в электрическом поле рассмотрено выше, где выяснено, что под действием внешнего электрического поля в проводнике наводится ток проводимости в соответствии с **дифференциальным законом Ома**, т.е. . Влиянием магнитного поля пренебрегаем.

Величина ***σ*** – ***удельная проводимость*** среды. С помощью этой величины можно связать ***плотность тока проводимости*** ***jпр*** и напряженность поля следующей зависимостью:

 . (3.55)

Уравнение (3.55) представляет собой дифференциальную форму ***закона Г. Ома*** для участка цепи.

#### Математический аппарат, применяемый для описания свойств векторных полей, называется векторным анализом. Важными характеристиками векторного поля являются *циркуляция*, *поток* (интегральные), *градиент*, *дивергенция* и *ротор* (дифференциальные) [3, гл. 2, с. 10–14]. Эти понятия пришли из физики как удобные и наглядные величины.

#### Связь между характеристиками поля осуществляется с помощью теорем М. Остроградского – К. Гаусса и Д. Стокса.

Наибольшую наглядность понятия векторного анализа имеют в случае поля вектора скорости текущей несжимаемой жидкости .

В зависимости от значений ротора и дивергенции векторного поля различают ***потенциальное***, ***вихревое*** (***соленоидальное***) поле и ***поле общего типа***.