**ЛЕКЦИЯ №2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ПАРАМЕТРЫ СРЕД.**

**План:**

2.2. Общие сведения.

2.2. Векторы электромагнитного поля.

2.3. Классификация сред.

2.4. Графическое изображение полей.

2.5. Потенциальные и вихревые поля

**2.1 Общие сведения.**

Современная физика признает 2 формы существования материи: вещество и поле. Нам известны многие разновидности полей: электромагнитные, силовые, внутриядерных и других взаимодействий. Во многом свойства их сходны. Вещество состоит из дискретных элементов (молекул, атомов ...). Движущееся электромагнитное поле тоже можно представить в виде потока дискретных частиц — фотонов. Электромагнитное поле характеризуется энергией, массой, импульсом. Масса и импульс характерны 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. С другой стороны поток материальных частиц способен реализовать явление дифракции, интерференции, которые присущи электромагнитным волнам. Будем рассматривать 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, характерных для внутриатомных колебательных процессов. На основе классической теории электромагнитного поля решается большинство задач. Эта теория не позволяет решать задачи связанные с поглощением и излучением электромагнитных волн веществом. Строгий анализ электромагнитный явлений на уровне микроструктуры вещества возможен на основе квантовой теории электромагнитного поля. Для описания любых процессов радиотехники достаточно *классической электродинамики.* Как известно источниками электромагнитного поля являются электрические заряды. Неподвижные электрические заряды создают только электрическое поле. Движущиеся заряды — создают 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. Источником электромагнитного поля являются 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 т.к. электромагнитное поле обладает направленным действием, то для его описания вводят векторные характеристики.

**Векторы электромагнитного поля**

Электромагнитное поле представляет собой совокупность переменных во времени взаимосвязанных и влияющих друг на друга электрического и магнитного полей. Электромагнитное поле проявляется в виде силы, действующей на электрические заряды. Любое силовое воздействие характеризуется величиной и направлением, поэтому для описания электромагнитных полей необходимо использовать векторные функции.

Электрическое поле оказывает силовое воздействие как на неподвижные, так и на движущиеся заряды. Математической моделью электрического поля в вакууме служит вектор  – напряженность электрического поля, определяемая по силе , действующей на пробный заряд *q*, внесенный в рассматриваемую точку поля с радиус-вектором 

 (2.1)

В системе СИ напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр – В/м. Для описания электрического поля в материальной среде, как будет показано в дальнейшем, требуется ввести еще вектор электрической индукции , который в вакууме связан с вектором  соотношением

, (2.2)

где  – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость) вакуума.

Вектор электрической индукции  измеряется в кулонах на квадратный метр – Кл/м2, а диэлектрическая проницаемость – в фарадах на метр Ф/м. Величина определена экспериментально и равна  =10-9/36π Ф/м =   
= 8,842·10-12 Ф/м.

Магнитное поле взаимодействует только с движущимися зарядами. В вакууме магнитное поле описывается вектором магнитной индукции , который определяется по силе Лоренца , действующей на заряд , движущийся со скоростью 

. (2.3)

Вектор магнитной индукции  измеряется в веберах на квадратный метр – Вб/м2, то есть вольт-секундах на квадратный метр или в теслах [Тл]. Для описания магнитного поля в материальной среде дополнительно вводится вектор , который называется напряженностью магнитного поля. В вакууме векторы  и  связаны соотношением

, (2.4)

где  – магнитная постоянная (магнитная проницаемость) вакуума.

Вектор  имеет размерность амперы на метр – А/м, а величина  – Гн/м (Генри на метр). Численное значение Гн/м.

* 1. **Векторы электромагнитного поля.**

**2.2(a) Векторы электрического поля.**

Одной из основных векторных характеристик электромагнитного поля является *напряженность* электрическогополя. Под напряженностью электрического поля подразумевают силу, с которой электрическое поле действует на положительный единичный точечный заряд внесенный в поле.

 **(1)** 

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

 **(2)**

Сила взаимодействия электрических зарядов, а стало быть, и напряженность электрического поля, различны в различных средах и определяются по закону Кулона. Причина этого лежит в эффекте поляризации вещества под действием внешнего электрического поля. Процесс поляризации является сложным физическим процессом и непосредственно связан со структурой вещества. Рассмотрим этот процесс упрощенно в рамках классической теории:

Вещество состоит из атомов. Атом состоит из положительного ядра и отрицательных электронов. Сочетание атомов образуют 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 *.* Диполи характеризуются дипольным моментом:

** (3)**

Эффект поляризованности вещества характеризуют суммарным дипольным моментом: в рассмотренном объеме :

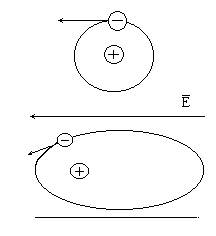
**(4)** — дипольный момент соответствующий отдельным атомам или молекулам. Формула **(4)** осуществляется геометрическим суммирование в объеме V.

В случае вещества с полярными молекулами:

В 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. Внутренне поле накладывается на первичное (внешнее) при этом результирующее поле отличается от того, каким оно было бы в вакууме. В отсутствии внешнего электрического поля суммарный момент поляризованных молекул равен нулю. В дипольном моменте ориентированном хаотически происходит перекомпенсация полей. При этом на заряды диполя в электрическом поле будут действовать пара сил или момент сил:

 **(5)**

В случае вещества с неполярными молекулами:

Рассмотрим упрощенно процесс поляризации в случае неполярных атомов и полярных атомов. Под действием внешнего электрического поля в неполярных атомах происходит перераспределение отрицательных зарядов (т.е. атом деформируется) и процесс называется электронной поляризацией.

Первый способ поляризации вещества с полярными молекулами:

В случае полярных молекул под действием внешнего электрического поля дипольные моменты начинают ориентироваться по полю. Такой процесс поляризации называется ориентационным. Такая поляризация сопровождается всегда электронной поляризацией (второй способ поляризации с неполярными молекулами). Для характеристики поляризации вещества вводят вектор поляризованности, который определяют как предел:

 **(6)**, где 

При не очень сильных электрических полях можно считать, что вектор поляризованности пропорционален напряженности внешнего электрического поля:  **(7),** где εо = 10-9/36π [Ф/м]— электрическая постоянная, коэффициент - (безразмерный коэффициент) характеризует поляризационные свойства вещества и называется диэлектрической восприимчивостью.

Предел **(6)** следует рассматривать не как математическое приближение, а как физическое соотношение, т.е. при любом уменьшении Δ предел всегда будет существенно больше размеров молекул.

Наряду с напряженностью электрического поля используют также еще одну векторную величину: — вектор электрической индукции, либо вектор электрического смещения:  **(8); ;**

Используя **(7)**:  **(9)** ⇒  **(10),** где  — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (**8).** Так как диэлектрическая восприимчивость вакуума кэ=0, то ε называется абсолютной диэлектрической проницаемостью вакуума. Чаще пользуются не кэ, а относительной диэлектрической проницаемостью:

 (**9)**

Соотношения **(7)** и **(10)** являются приближенными, справедливыми для случая не очень сильных полей. В дальнейшем мы будем полагать, что **(7)** и **(10)** справедливы. В сильных электрических полях диэлектрическая восприимчивость зависит от величины электрического пробоя.



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

В соответствии с приведенными соотношениями:

.

Используя **(7)**, получаем:.

Отсюда следует, что при одинаковом расположении и величине электрических зарядов векторное поле  не зависит от свойств среды.

### 2.2(b) Векторы магнитного поля.

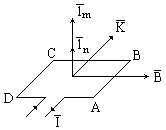
Сила взаимодействия электромагнитного поля на точечный электрический заряд зависит не только от величины и положения заряда, но также от скорости и направления его движения. Как известно, сила, действующая на положительный точечный электрический заряд движущийся в магнитном поле определяется силой Лоренца:  **(1),**

где  **(2)**;  **(3)**; .

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

Физический смысл: величина  называется вектором магнитной индукции и равна силе, с которой магнитное поле действует на положительный точечный заряд, движущийся с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном .

В различных средах силы взаимодействия магнитного поля на движущийся электрический заряд различны. Причина заключается в эффекте ненамагничиваемости 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 , в котором протекает ток, действует сила:  **(4),** где — электрический ток, протекающий по проводнику и совпадающий по направлению и направлением перемещения положительных зарядов в проводнике. Если в однородное магнитное поле внести рамку с током, то на нее будет действовать пара сил (момент сил):



 **(5)**

В пределах рамки магнитное поле можно считать однородным (так как рамка мала): . Обычно рамки с током характеризуют магнитным моментом:

 **(6)**

**** **(7)**

Моментсил **** стремится повернуть рамку таким образом, чтобы вектор магнитного момента совпал с вектором . Величина магнитной индукции в различных средах различна. Это можно объяснить эффектом намагничивания среды внешним магнитным полем. Эффект намагничивания непосредственно связан с молекулярной структурой вещества. Упрощенно атомы и молекулы большинства веществ обладают собственным магнитным моментом, т.е. таким молекулам и атомам можно сопоставить некие элементарные рамки с током. Как известно рамка с током создает собственное магнитное поле пропорциональное магнитному моменту. Для элемента объема Δ можно вычислить как суммарный магнитный момент: **(8)**. В отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты соответствующие отдельным атомам и молекулам ориентированы хаотически и поэтому  и собственное магнитное поле объема Δ 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, называются *парамагнитными.* Среды, в которых происходит значительное усиление, называются *ферромагнитными.* Эффект намагничивания среды внешним магнитным полем характеризуется вектором намагниченности, который определяют следующим образом:

 **(9),**

где .

Наряду с вектором магнитной индукции для описания используют напряженность магнитного поля:

 **(10)**; ;

где μ0 = 4π\*10-7 [Гн/м] - магнитная постоянная.

При не очень сильных магнитных полях вектор  пропорционален вектору . Учитывая линейность уравнения **(10)** можно считать, что  в относительно слабых полях пропорционален :

**(11)**

где  — магнитная восприимчивость среды (безразмерный коэффициент, характеризующий среду). Подставляя **(11)** в **(10)**, получим:

 **(12)**

**(13),**

где, μа — абсолютная магнитная проницаемость среды: .

;  **(14).**

Так как для вакуума магнитная восприимчивость равна нулю, то μ0 называется *абсолютной магнитной проницаемостью вакуума.*

Из рассмотренных с точки зрения магнитных свойств, среды можно классифицировать, анализируя величину магнитной восприимчивости:

**А)** диамагнитная и парамагнитная среда — ⏐км⏐<<2.

**Б)** диамагнитная среда — км<0.

**В)** парамагнитная и ферромагнитная среда — км>0.

**Г)** ферромагнитная среда — км>>2.

В радиотехнике пользуются относительной магнитной проницаемостью:

 **(15)**

Особенность вектора напряженности магнитного поля заключается в том, что при одинаковом расположении и величине магнитного поля векторное поле напряженности магнитного поля одинаково во всех средах.

Следует подчеркнуть, что **(11)** и **(13)** являются приближенными. В общем случае в ферромагнитных средах зависит не только от величины магнитного поля в данный момент, но также и от величины магнитного поля в предыдущие моменты (явление Гистерезиса).

Будем полагать, что **(11)** и **(13)** во всех случаях справедливы. Особенность заключается в следующем: для диамагнитных и парамагнитных сред - постоянная величина. Для подмагниченных ферромагнитных сред абсолютная магнитная проницаемость является тензорной величиной.

### 2.3. Классификация сред.

Все среды классифицируют в зависимости от выбранного признака, положенного в основание классификации. Различают следующие виды сред:

* однородные – неоднородные;
* линейные – нелинейные;
* изотропные – анизотропные.

Дадим определение каждой среде.

***Однородная среда*** – это среда, параметры которой (,,) не зависят от координат.

***Неоднородная среда*** – это среда, параметры которой (,,) являются функциями координат.

***Линейная среда*** – это среда, параметры которой (,,) не зависят от внешнего воздействующего поля, а материальные уравнения носят линейный характер.

***Нелинейная среда*** – это среда, параметры которой (,,) зависят от внешнего воздействующего поля.

***Изотропная среда*** – это среда, свойства которой не зависят от направления векторов поля и параметры которой (,,) являются скалярными величинами.

***Анизотропная среда*** – это среда, свойства которой зависят от направления векторов поля и параметры среды (,,) являются тензорными величинами.

Свойства среды по отношению к электромагнитному полю определяются параметрами . Наряду с абсолютной диэлектрической проницаемостью  часто вводится относительная диэлектрическая проницаемость

 (2.16)

Для большинства сред >2. Значения  для некоторых диэлектриков, часто используемых в радиоэлектронных устройствах, приведены в табл. 2.1

Таблица 2.1

Относительные диэлектрические проницаемости некоторых диэлектриков

|  |  |
| --- | --- |
| Материал |  |
| Фторопласт-4 | 2,08 |
| Полиэтилен | 2,25 |
| Полистирол | 2,56 |
| Плавленый кварц | 3,80 |

Следует отметить, что существуют среды с <1 (ионосфера, плазма).

Аналогично вводится относительная магнитная проницаемость

 (2.17)

Относительная магнитная проницаемость диамагнитных и парамагнитных веществ незначительно отличается от единицы и в практических расчетах эффектами диамагнетизма и парамагнетизма обычно пренебрегают, считая , т. е. . Ферромагнитные вещества (железо, никель и т. д.) имеют  и ее величина существенно зависит от величины внешнего магнитного поля. Кроме того, в ферромагнитных материалах намагниченность среды зависит не только от величины магнитного поля в данный момент, но и от того, как оно изменялось раньше (явление магнитного гистерезиса).

Удельная проводимость  имеет большие значения у металлов, для некоторых из них проводимость приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Удельная проводимость некоторых металлов

|  |  |
| --- | --- |
| Металл | , См/м |
| Серебро | 6,1∙107 |
| Медь | 5,7∙107 |
| Цинк | 1,7∙107 |
| Латунь | 1,4∙107 |

Удельная проводимость других сред на несколько порядков ниже, чем металлов. Для описания проводящих свойств этих сред используют другую числовую характеристику – угол диэлектрических потерь, которая будет введена в дальнейшем.

По «поведению» параметров среды в электромагнитном поле вводится классификация сред.

Среда называется линейной, если ее параметры  и  не зависят от величины векторов поля. В линейной среде материальные уравнения (2.15) линейные, то есть представляют собой соотношения прямой пропорциональности. Среда называется нелинейной, если ее параметры  и  (или хотя бы один из них) зависят от величины векторов поля. Реальные среды при не очень сильных полях рассматриваются как линейные, и в дальнейшем речь пойдет только о линейных средах.

Линейные среды делятся на однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные. Однородными называют среды, параметры которых  и  не зависят от координат, т.е. свойства среды одинаковы во всех ее точках. Среды, у которых хотя бы один из параметров  и  является функцией координат, называются неоднородными. Примером неоднородных сред являются тропосфера, ионосфера, диэлектрическая проницаемость которых изменяется с высотой.

Если свойства среды одинаковы для любых ориентаций векторов воздействующего поля, среду называют изотропной. В изотропных средах векторы  и ,  и , а так же  и ,  и  параллельны, параметры  – скалярные величины. Среды, свойства которых зависят от ориентации векторов воздействующего поля, называются анизотропными. В анизотропных средах векторы  и  или  и  оказываются не параллельными. При этом диэлектрическая или магнитная проницаемости не могут быть скалярными величинами. Они должны быть представлены в виде квадратной матрицы из девяти компонентов, называемой тензором. К анизотропным средам относятся, например, намагниченная плазма и намагниченный феррит. В намагниченной плазме тензором является диэлектрическая проницаемость . Запись материального уравнения, связывающего векторы  и , формально остается прежней

 (2.18)

Двойная стрелка над  служит обозначением тензорной величины. Запись (2.18) в декартовой системе координат примет вид



Система скалярных уравнений, эквивалентных векторному уравнению (2.18), получается по правилам умножения матриц

 (2.19)

Непараллельность векторов  и  (а также  и ) в анизотропной среде объясняется тем, что направление вторичного электрического поля, возникшего в результате поляризации анизотропной среды, составляет некоторый угол с направлением первичного электрического поля.

В намагниченной ферритовой среде тензором является магнитная проницаемость и материальное уравнение, связывающее векторы  и , принимает вид

 2.20)

В линейных, однородных и изотропных средах, в которых справедливы материальные уравнения в виде

 ; 

электромагнитное поле может быть определено двумя векторами. В прикладной электродинамике обычно используют пару векторов  и , через которые выражаются электромагнитные волны в различных средах и устройствах.

Свойства сред характеризуются электродинамическими параметрами, к которым относятся εа, μа, 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 электрических и магнитных полей называются *линейными*. Среды, в которых наблюдается зависимость (εа, μа, σ) = f (E,H) 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. В свою очередь линейные среды делятся на: однородные, неоднородные, изотропные и анизотропные.

*Однородными* называются среды, в которых электродинамические параметры не меняются от точки к точке, т.е. не являются функциями системы координат. Иначе — *неоднородные.*

*Изотропными* называются среды, в которых электродинамические параметры одинаковы по всем направлениям. *Анизотропными* называются среды, в которых хотя бы один из параметров в некотором направлении имеет отличные электродинамические параметры.

В изотропных средах электродинамические параметры являются постоянными скалярными величинами. В этих средах электрические векторы параллельны друг другу также как и магнитные.



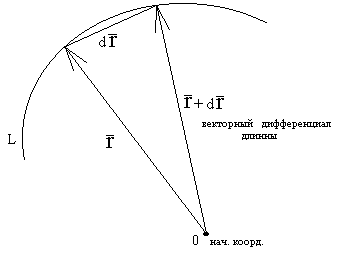
В анизотропных средах эта параллельность нарушается. Причина заключается в следующем: вторичное поле, которое возникает в результате *эффекта поляризации,* оказывается направленным неколлинеарной с исходным полем (составляют некоторый угол). Для кристаллических диэлектриков анизотропия проявляется вследствие тензорного характера абсолютной диэлектрической проницаемости. При этом: , , где - тензорная диэлектрическая проницаемость. При этом взаимосвязь сохраняет следующий вид. Последнее выражение, с учетом тензорного характера, может быть записано в виде:

.

Аналогичное соотношение можно записать и для магнитного поля:

 ****

### 2.4. Графическое изображение полей.

Поля изображают с помощью силовых линий. Под “силовыми” подразумевают линии, в каждой точке которых касательные изображают направление изображаемого поля. Изменение амплитуды поля указывают числом силовых линий, приходящихся на единицу площади поверхности перпендикулярно силовым линиям. Пусть имеется векторное поле **А**, которое в каждой точке пространства может быть выражено в декартовой системе:



l - силовая линия поля **А**, - единичные орты. Получим дифференциальное уравнение силовой линии: dr можно записать через его проекцию:  **(1),**

Предполагаем, что известна функция, описывающая силовую линию:

 **(2).**

Из векторного анализа известно, что два вектора параллельны, если равны отношения соответствующих проекций:

 **(3).**

Это и есть дифференциальное уравнение силовой линии.

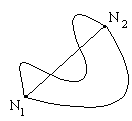
### 2.5. Потенциальные и вихревые поля.

Все множество векторных полей классифицируют, разбивая их на два вида: **1)** потенциальные и **2)** соленоидальные (вихревые).

К потенциальным полям относят поля, для которых:

 (теорема Стокса).

Векторные потенциальные поля имеют начало — исток и конец — сток. Для потенциальных векторных полей можно ввести понятие потенциала, причем ,(скалярный потенциал). Возьмем в векторном потенциальном поле две точки N1, N2: Ψ1, Ψ2 тогда: .



Разность потенциалов не зависит от пути интегрирования. Интенсивность потенциального поля характеризуется величиной его источников , которая, для потенциального поля равна нулю. Точки, в которых < 0 называются *стоком.* Точки, в которых > 0 называются *истоком.*

К соленоидальным относятся поля, для которых интеграл по замкнутой поверхности равен нулю .

Вихревые поля не имеют источников. Силовые линии соленоидального поля всегда замкнуты. Для него = 0. Соленоидальные поля характеризуются интенсивностью вихря .

*Электростатические поля всегда потенциальны. Магнитные поля всегда соленоидальны.* Переменные электрические поля, в общем случае композицияпотенциального и соленоидального полей.

Связь между соответствующей парой векторов поля в веществе выражается через параметры https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image571.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif следующими уравнениями состояния:

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image577.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image579.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image581.gif .

Макроскопические электромагнитные параметры среды определяются экспериментально.

В вакууме векторы https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image472.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image404.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif связаны соотношениями

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image476.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image478.gif ,

где https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image589.gif − диэлектрическая проницаемость свободного пространства (вакуума), https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image591.gif − магнитная проницаемость свободного пространства (вакуума).

Часто, особенно в курсе антенн и устройств СВЧ, пользуются не абсолютными величинами диэлектрической и магнитной проницаемостей, а относительными, взятыми по отношению к https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image442.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image491.gif : https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image595.gif − относительная диэлектрическая проницаемость, https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image597.gif − относительная магнитная проницаемость.

На рисунке 28 приведена фотография прибора Agilent E4991A, используемого для измерения параметров сред. Этот прибор есть у нас в институте.

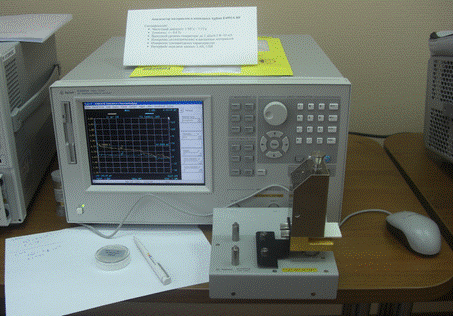


Рисунок 28 − Прибор Agilent E4991A для определения параметров сред

В зависимости от свойств параметров https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image571.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif среды подразделяются на линейные и нелинейные.

Линейные среды – среды, в которых параметры https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image571.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif не зависят от величин и направлений электрического и магнитного полей; в этом случае зависимости https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image601.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image603.gif являются линейными ()

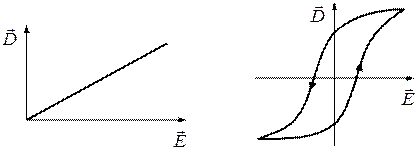


Рисунок 29 − Нелинейные и линейные среды

Нелинейные среды – среды, в которых параметры https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image571.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif , или хотя бы один из них, зависят от величины электрического или магнитного полей. В этом случае соотношения https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image601.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image603.gif оказываются нелинейными функциями.

Строго говоря, все реальные среды являются нелинейными. Однако при не очень сильных полях в большинстве случаев, представляющих практический интерес, можно пренебречь зависимостью параметров https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image607.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif от величины электрического и магнитного полей и считать рассматриваемые среды линейными. В нашем курсе в дальнейшем мы будем рассматривать только линейные среды. Примерами нелинейных сред при слабых полях являются ферромагнетики (магнитная нелинейность) и сегнетоэлектрики (электрическая нелинейность).

Линейные среды, в свою очередь, делятся на неоднородные и однородные, изотропные и неизотропные.

Однородными называют среды, параметры которых https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image607.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif не зависят от координат, т.е., одинаковы во всех точках рассматриваемой среды.

Неоднородными называют среды, у которых хотя бы один из параметров https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image607.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif является функцией пространственных координат: https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image609.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image611.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image613.gif .

Изотропными называют среды, электромагнитные свойства которых одинаковы по всем направлениям, т.е. не зависят от направления векторов внешнего поля. Для изотропных сред параметры https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image607.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif являются скалярами, а векторы https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image472.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image404.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif параллельны друг другу и связаны соотношениями

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image619.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image579.gif .

Подавляющее большинство сред относится к изотропным. Однако существует ряд сред, свойства которых существенно зависят от направления векторов внешнего электромагнитного поля. Такие среды называют анизотропными. В них пары векторов https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image472.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image404.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif могут быть непараллельными и, по крайней мере, один из параметров https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image607.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image575.gif является тензором.

Например, вектор https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif направлен по оси https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image623.gif , т.е., имеет одну составляющую https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image625.gif , а вектор https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif не совпадает по направлению с вектором https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif и имеет все три составляющие: https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image629.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image631.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image633.gif (рисунок 29). Каждая из составляющих вектора https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif пропорциональна вектору https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif с разными коэффициентами пропорциональности https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image637.gif :

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image639.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image641.gif , https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image643.gif .

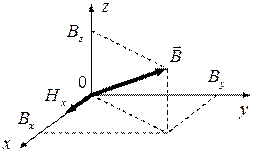
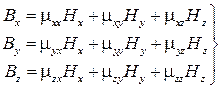
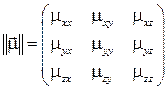


Рисунок 30 − Анизотропная система

В общем случае каждая проекция вектора https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif на оси координат зависит от всех трех составляющих вектора https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif , связь между ними определяется системой уравнений:



Таким образом, параметр https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image573.gif анизотропной ферромагнитной среды характеризуется девятью коэффициентами, записываемыми в виде матрицы − тензора:

 .

В этом случае векторы https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image406.gif и https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image474.gif связаны соотношением

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image664.gif .

Аналогично для анизотропного диэлектрика

https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image666.gif ,

где https://helpiks.org/helpiksorg/baza5/114505883116.files/image668.gif − тензор диэлектрической проницаемости.