**ЛЕКЦИЯ №1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ЭМП. ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.**

**План:**

1.1. Введение в теорию ЭМП.

1.2. Понятие электромагнитного поля.

1.3. Векторы электромагнитного поля.

**1.1. Введение в теорию ЭМП.**

ЭМП как одна из форм материи. Макроскопические и квантовые свойства ЭМП. Предмет классической электродинамики. Роль теории ЭМП в развитии науки, систем связи и вещания, телекоммуникации и др. Определение диапазонов, относящихся к области СВЧ.

Основные понятия теории ЭМП. Векторы ЭМП. Макроскопические параметры материальных сред. Материальные уравнения. Законы Ома и Джоуля в интегральной и дифференциальной формах.

Описание свойств векторных полей. Интегральные и дифференциальные характеристики физических полей. Основные теоремы векторного анализа. Операторы набла (Гамильтона) и Лапласа. Классификация векторных полей.

**Указания к теме**

Необходимо запомнить деление радиоволн и области СВЧ на диапазоны, выучить определения ЭМП, ЭМВ, электрического заряда, составляющих ЭМП. Необходимо вспомнить основы векторной алгебры и электромагнетизма.

Следует изучить основные этапы развития теории ЭМП, обратить внимание на принципиальные отличия диапазонов СВЧ от ВЧ и НЧ, на ограничения теории цепей и макроскопической электродинамики.

**Основные сведения**

В диапазонах УВЧ и СВЧ размеры устройств соизмеримы с длиной волны, поэтому приходится учитывать волновой характер ЭМП. Законы теории цепей, справедливые на более низких частотах, перестают действовать, поскольку в этом случае нельзя использовать понятие «электрическая цепь», которое позволяет существующее в системе ЭМП разделить на независимые электрические и магнитные составляющие, локализованные в соответствующих элементах электрической цепи. Поэтому при изучении быстропеременных электрических процессов необходим анализ именно ЭМП с учетом его волнового характера и конечной скорости распространения ЭМВ.

**Краткая история развития теории ЭМП.** Понятие поля (электрического и магнитного) впервые было введено М. Фарадеем в 30-х годах XIX века. ***Система уравнений Максвелла*** (1864) обобщила и дополнила известные в то время законы электромагнетизма. В 1888 г. радиоволны были экспериментально получены Г. Герцем.

Началом практического применения ЭМВ считаются опыты А.С. Попова, в которых в 1895 г. была продемонстрирована возможность беспроводной связи.

Теория относительности придала фундаментальный смысл понятию поля как первичной физической реальности, что позволило приравнять понятия ***«вещество»*** и ***«поле»*** как ***две формы существования материи***. Один из важнейших выводов теории А. Эйнштейна – взаимосвязь массы и энергии (***W* *=* *mc2***). Квантовый эффект аннигиляции электронно-позитронной пары с выделением ***фотона*** (и обратный переход) отражает существующую в микромире связь различных видов материи (***вещества*** и ***поля***). В масштабах микромира проявляется ***корпускулярно-волновой дуализм*** ЭМП. Протяженное ЭМП в этом случае следует рассматривать как систему независимых ***дискретных*** микрообъектов – фотонов. В этом случае действуют законы ***квантовой электродинамики***.

В таблице приведена классификация радиоволн по диапазонам.

Таблица

**Классификация радиоволн**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Границы диапазона по частотам  и длинам волн | Название диапазона  по частотам  и длинам волн | Сокращенное  обозначение | |
| русское | международное |
| 3–30 кГц  100–10 км | Очень низкие частоты  Мириаметровые волны  (сверхдлинные волны) | ОНЧ  (СДВ) | VLF |
| 30–300 кГц  10–1 км | Низкие частоты  Километровые волны  (длинные волны) | НЧ  (ДВ) | LF |
| 300–3000 кГц  1000–100 м | Средние частоты  Гектометровые волны  (средние волны) | СЧ  (СВ) | MF |
| 3–30 МГц  100–10 м | Высокие частоты  Декаметровые волны  (короткие волны) | ВЧ  (КВ) | HF |
| 30–300 МГц  10–1 м | Очень высокие частоты  Метровые волны  (ультракороткие волны) | ОВЧ  (УКВ) | VHF |
| 300–3000 МГц  100–10 см | Ультравысокие частоты  Дециметровые волны  (ультракороткие волны) | УВЧ  (УКВ) | UHF |
| 3–30 ГГц  10–1 см | Сверхвысокие частоты  Сантиметровые волны  (ультракороткие волны) | СВЧ  (УКВ) | SHF |
| 30–300 ГГц  10–1 мм | Крайне высокие частоты  Миллиметровые волны | КВЧ | EHF |

**Основные понятия теории ЭМП.** Классическая (макроскопическая) ***электродинамика*** – теория поведения ЭМП, осуществляющего взаимодействие между электрическими зарядами. В этом случае ЭМП приписывают только волновые свойства и считают его непрерывным, что очень удобно в макромире.

Например, в случае излучения одиночного радиоимпульса при значительном расстоянии между передающей и приемной антеннами в какой-то момент времени окажется, что сигнал уже излучен передающей антенной, но еще не принят приемной. Следовательно, в данный момент времени энергия сигнала будет локализована в пространстве. В этом случае очевидно, что носитель энергии не является привычной вещественной средой, а представляет собой иную физическую реальность, которая называется ***полем***.

***ЭМП*** – это особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрическими зарядами, отличающаяся ***непрерывным*** распределением в пространстве (ЭМВ, ЭМП заряженных частиц) и обнаруживающая ***дискретность*** структуры (фотоны), характеризующаяся способностью распространяться в вакууме со скоростью, близкой к ***с***, оказывающая на заряженные частицы силовое воздействие, зависящее от их скорости [11, 12].

***Электрический заряд*** – свойство частиц вещества или тел, характеризующее их взаимосвязь с собственным ЭМП и взаимодействие с внешним ЭМП; имеет два вида, известные как положительный заряд (заряд протона) и отрицательный заряд (заряд электрона); количественно определяется по силовому взаимодействию тел, обладающих электрическими зарядами [11, 12].

***ЭМВ*** – ЭМ колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени с конечной скоростью [1].

При исследовании ЭМП обнаруживаются две формы его проявления – электрическое и магнитное поля, которым можно дать следующие определения.

***Электрическое поле*** – одно из проявлений ЭМП, обусловленное электрическими зарядами и изменением магнитного поля, оказывающее силовое воздействие на заряженные частицы и тела, выявляемое по силовому воздействию как на неподвижные, так и на движущиеся заряженные тела и частицы.

***Магнитное поле*** – одно из проявлений ЭМП, обусловленное электрическими зарядами ***движущихся*** заряженных частиц (и тел) и изменением электрического поля, оказывающее силовое воздействие только на ***движущиеся*** заряженные частицы, выявляемое по силовому воздействию, направленному нормально к направлению движения этих частиц и пропорциональному их скорости.

Разделение ЭМП на электрическое и магнитное поля имеет относительный характер, поскольку зависит от выбора инерциальной системы отсчета, в которой исследуется ЭМП. Например, если некоторая система состоит из покоящихся электрических зарядов, то при исследовании ЭМП в данной системе будет установлено наличие электрического поля и отсутствие магнитного. Однако если другая система координат будет двигаться относительно данной системы, то во второй системе будет обнаружено и магнитное поле [11].

Основными векторами ЭМП являются  (***напряженность электрической составляющей поля***) и  (***магнитная индукция***), которые описывают соответствующее проявление механических сил в ЭМП и могут быть непосредственно измерены. Напряженность электрического поля определяется как сила, действующая на точечный заряд известной величины (***сила Ш. Кулона***)  .

***Магнитная индукция*** определяется через силу, действующую на точечный заряд ***q*** известной величины, ***движущийся*** в магнитном поле со скоростью , (***силу Г. Лоренца***) :  .

Вспомогательными векторами ЭМП являются  (***электрическая индукция*** или ***электрическое смещение***) и  (***напряженность магнитной составляющей ЭМП***). Названия характеристик ЭМП сложились исторически.

Единицы измерения основных характеристик ЭМП (в Международной системе единиц ***СИ***) приведены на с. 3–4.

Связь между основными и вспомогательными векторами ЭМП осуществляется с помощью ***материальных уравнений***

 ;  . (1.1)

В большинстве сред векторы  и , как и  и , ***коллинеарны***. Но в случае гироэлектрических (сегнетоэлектрики) и гиромагнитных (ферромагнетики) сред *ε* и *μ* становятся ***тензорными*** величинами, и указанные в парах векторы могут утратить коллинеарность.

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

 . (1.2)

Уравнение (1.2) 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 [3, с. 14–15].

Наибольшую наглядность понятия векторного анализа имеют в случае поля вектора скорости текущей несжимаемой жидкости [3, 15].

В зависимости от значений ротора и дивергенции векторного поля различают ***потенциальное***, ***вихревое*** (***соленоидальное***) поле и ***поле общего типа*** [1].

Векторное поле  ***потенциально***, если существует некоторая скалярная функция ***U***, которая связана с  следующим образом: . Функцию ***U*** называют ***скалярным потенциалом поля*** . Необходимым условием ***потенциальности*** является ***равенство нулю ротора*** векторного поля ().

***Соленоидальным*** (***вихревым***) называется векторное поле , в каждой точке которого , а . Вихревое векторное поле  можно представить как . В этом случае векторную величину  называют ***векторным потенциалом поля*** ().

Если у векторного поля   и , то это ***поле общего типа***. Произвольное векторное поле можно представить в виде суммы потенциальной и вихревой частей  , где  описывает ***источники поля*** (), а  – ***вихри поля*** () [11].

**1.1. Силовые векторы электромагнитного поля**

Электромагнитное поле характеризуется силами, действующими на заряды. Эти силы являются векторами. Поэтому электромагнитное поле описывается с помощью системы векторов.

На заряд, находящийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.1) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| где | *q* | - величина заряда частицы, взаимодействующей с полем, Кл; |
|  | **Е** | - вектор напряженности электрического поля, В/м; |
|  | **v** | - вектор скорости движения заряженной частицы, м/с; |
|  | **В** | - вектор магнитной индукции, Т. |

Векторы напряженности электрического поля и магнитной индукции описывают силы, действующие на заряды в электромагнитном поле, поэтому они называются ***силовыми***.

Формула (1.1) наглядно показывает, что все проявления электромагнитного поля делятся на две группы явлений - электрические и магнитные. Поэтому обычно выделяют две составляющие электромагнитного поля - ***электрическое поле и магнитное поле***.

Формула (1.1) подчеркивает еще один важный факт. Электрическое поле действует на любые заряды, движущиеся и неподвижные, а магнитное – только на движущиеся.

Таким образом, можно сформулировать следующие определения силовых векторов электромагнитного поля.

***Вектором напряженности электрического поля называется сила, действующая на единичный электрический заряд:***

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.2) |

***Вектором магнитной индукции называется сила, действующая на единичный заряд, движущийся с единичной скоростью:***

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1.3) |

Так как вектор напряженности электрического поля воздействует на любой заряд, электрическое поле можно использовать для ускорения потока электронов и для изменения траектории его движения. Оба этих эффекта используются в осциллографических электронно-лучевых трубках.

Взаимодействие магнитного поля с потоком движущихся электронов описывается векторным произведением. Значит, сила действия магнитного поля направлена перпендикулярно траектории движения электронов. Поэтому магнитное поле может только изменять направление движения заряженных частиц - сфокусировать поток электронов или отклонять его. Оба эти эффекта используются в кинескопах.

Для описания процессов в вакууме знания напряженности электрического поля и магнитной индукции достаточно. Однако для правильного описания электромагнитного поля в материальных средах требуется ввести в рассмотрение параметры этих сред.

**Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите основные исторические этапы развития теории ЭМП.
2. Дайте определение ЭМП, электрическому заряду, перечислите основные свойства ЭМП.
3. Можно ли ЭМП разделить на электрическое и магнитное поля?
4. Дайте определение векторам, характеризующим ЭМП.
5. Чем векторное поле отличается от скалярного?
6. Назовите принципиальные отличия между понятиями «поле» и «вещество».
7. Укажите единицы измерения основных величин ЭМП.
8. Укажите ограничения области применения законов теории электрических цепей и макроскопической электродинамики.
9. На какие диапазоны частот и длин волн делится область СВЧ?
10. Назовите области науки и техники, использующие область СВЧ.
11. Дайте определение циркуляции и потоку вектора.
12. Дайте определение градиенту, дивергенции, ротору векторного поля.
13. Дайте формулировку теорем Остроградского–Гаусса и Стокса. Каково место этих теорем в векторном анализе?
14. Как классифицируются векторные поля?
15. Каковы математический смысл и назначение операторов набла и Лапласа?
16. На какие диапазоны разделены радиоволны?