**13.36. Ток смещения. Система уравнений Максвелла для электромагнитного поля.**

  Если замкнуть ключ (рис. 6.1), то лампа при постоянном токе гореть не будет: емкость C – разрывает цепь постоянного тока. Но вот в моменты включения лампа будет вспыхивать.

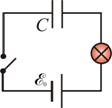


Рис. 7.1

      При переменном токе – лампа горит, но в то же время нам ясно, что электроны из одной обкладки в другую не переходят – между ними изолятор (или вакуум). А вот если бы взять прибор, измеряющий магнитное поле, то в промежутке между обкладками мы обнаружили бы магнитное поле (рис. 7.2).

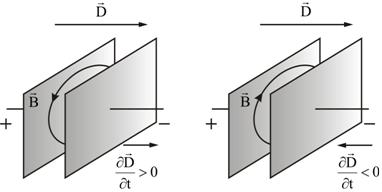


Рис. 7.2

      Для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем Максвелл ввел в рассмотрение **ток смещения**. Этот термин имеет смысл в таких веществах, как, например, диэлектрики. Там смещаются заряды под действием электрического поля. Но в вакууме зарядов нет – там смещаться нечему, а магнитное поле есть. То есть название Максвелла «ток смещения» – не совсем удачное, но смысл, вкладываемый в него Максвеллом, – правильный.

      Максвелл сделал вывод: всякое переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле.

      Токи проводимости в проводнике замыкаются токами смещения в диэлектрике или в вакууме. Переменное электрическое поле в конденсаторе создает такое же магнитное поле, как если бы между обкладками существовал ток проводимости, имеющий величину, равную току в металлическом проводнике.

      Это утверждение позволяет (на базе нашего примера с конденсатором) найти величину тока смещения. В свое время мы с вами доказали, что поверхностная плотность поляризационных зарядов σ равна http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image110.png– вектору электрического смещения:

http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1274.png   http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1276.png

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1278.png, | (7.2.2) |  |

      Полный заряд на поверхности диэлектрика и, следовательно, на обкладках конденсатора http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1280.png (S – площадь обкладки)

http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1282.png

      Тогда

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1284.png, | (7.2.3) |  |

т.е. ток смещения пропорционален скорости изменения вектора электрического смещения http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image110.png. Поэтому он и получил такое название – ток смещения.

      Плотность тока смещения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1287.png, | (7.2.4) |  |

      Вихревое магнитное поле ( http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image011.png) образующееся при протекании тока смещении, связано с направлением вектора http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1290.png **правилом правого винта** (рис. 7.2).

      Из чего складывается ток смещения?

      Из раздела «Электростатика и постоянный ток» (п. 4.3), известно, что относительная диэлектрическая проницаемость среды http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1292.png где χ – диэлектрическая восприимчивость среды. Тогда

*http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1294.png* или http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1296.png

Отсюда видно, что *http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1298.png –* вектор поляризации. Следовательно

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1300.png, | (7.2.5) |  |

В этой формуле http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1302.png – плотность тока смещения в вакууме; http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/%FD%EB%E5%EA%F2%F0%EE%EC%E0%E3%ED%E5%F2%E8%E7%EC/ima/image1304.png – ***плотность тока поляризации***, т.е. *плотность тока, обусловленная перемещением зарядов в диэлектрике*.

***Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Электромагнитное поле.***

В законе электромагнитной индукции (ЭМИ) ℇ = -*d*Ф/*dt* ЭДС можно представить по определению как циркуляцию поля сторонних сил

ℇ =  (см. часть 2, лекция №20), в данном случае (ЭМИ) сторонние силы не связаны ни с химическими, ни с тепловыми процессами, они также не могут быть магнитными силами, по тому, что такие силы работу над зарядами не совершают. Остается заключить, что индукционный ток обусловлен возникающим в проводе электрическим полем, тогда ЭДС

ℇ =  Магнитный поток по определению Ф = . Подставляя в закон ЭМИ получим



(30-4)

Это первое уравнение Максвелла.

Интеграл в правой части берется по произвольной поверхности *S,* опирающейся на контур *ℓ* (рис. 30.3).

*S*

(Поскольку в общем случае  может быть

функцией и координат, то берем частную

Рис. 30.3

*ℓ*

производную)

Смысл первого уравнения соответствует

максвелловской трактовке явления ЭМИ, то

есть, изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Второе уравнение Максвелла



(30-5)

Это уравнение выражает тот факт, что силовые линии магнитного поля не имеют источника (нет «магнитных зарядов») и всегда замкнуты и, что оно имеет вихревой характер, поток вектора магнитной индукции равен нулю.

Третье уравнение Максвелла



(30-6)

Это обобщенный закон полного тока (см. часть 3, лекция №24), который подчеркивает тот факт, что магнитное поле может создаваться не только токами проводимости ( ), но и перемещенным электрическим полем («ток смещения» ).

Четвертая теорема Максвелла (см. часть 3, лекция №18).



(30-7)

Физически эта теорема подчеркивает тот факт, что электрическое поле может создаваться зарядами, то есть источниками силовых линий электрического поля являются электрические заряды.

Уравнения (30-3,5,6,7) представляют уравнения Максвелла в интегральной форме.

Уравнения Максвелла подчеркивают тот факт, что электрическое поле может создаваться как зарядами, так и переменным магнитным полем, а магнитное поле может создаваться как токами проводимости, так и переменным электрическим полем. При этом магнитное поле всегда носит вихревой характер, о чем говорит второе уравнение Максвелла. Электрическое поле, создаваемое зарядами и переменным магнитным полем носят различный характер. Силовые линии в первом случае начинаются и кончаются на зарядах (четвертое уравнение Максвелла). А электрическое поле, создаваемое переменным магнитным полем не имеет источников и носит вихревой характер, также как магнитное поле (первое уравнение Максвелла).

В вакууме, где нет зарядов и токов, магнитное поле может создаваться только переменным электрическим полем, а электрическое поле только переменным магнитным полем.

Эту совокупность непрерывно изменяющихся и порождающих друг друга электрического и магнитного полей Максвелл назвал электромагнитным полем.

Кроме четырех рассмотренных уравнений в полную систему уравнений Максвелла входят еще три уравнения, называемых материальными. В них входят характеристики вещества («материи»), такие как диэлектрическая и магнитная проницаемости ℰ и µ, проводимость σ.

ℰℰ

Связь  и  (лекция №18, часть 3)

μμ

Связь  и  (лекция №23, часть 3)

σ

Закон Ома в локальной форме (лекция №20, часть 3)

Уравнения Максвелла (30-4) ÷ (30-7) можно представить в дифференциальной форме, т.е. в виде системы дифференциальных уравнений. Для этого используем теоремы Стокса



(30-8)

и Остроградского – Гаусса:

(30-9)



где  - некоторый вектор в нашем случае:  (О функции *rot* см. примечание к п.2).

Первое уравнение Максвелла



С другой стороны, используя теорему Стокса, получим



Поскольку равны левые части, равны и правые



откуда следует



(30-10)

Второе уравнение Максвелла



С другой стороны из теоремы Остроградского – Гаусса



получаем (30-11)



Третье уравнение запишем, предварительно выразив токи проводимости через плотность токов проводимости 

,

тогда



с другой стороны



получим



(30-12)

Аналогичный подход для четвертого уравнения дает систему уравнений

,

(в последнем уравнении мы заменили - объемная плотность заряда) из которой следует:



(30-13)

Сведем четыре уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах, а также три материальных уравнения в таблицу:

*Уравнения Максвелла*

|  |  |
| --- | --- |
| Интегральная форма | Дифференциальная форма |
|  |  |

ℰℰ; μμ; σ

Отметим, что физический смысл уравнений в дифференциальной форме такой же, что и соответствующих уравнений в интегральной форме. Интегрируя их, можно получить , , , .

Примечание. Вихревое электрическое поле характеризуется особой векторной величиной, называемой ротором напряженности поля: . Вектор ротора приложен в центре поля перпендикулярно плоскости его силовых линий (в случае круговых линий – в центре окружностей) и направлен относительно них согласно правилу правого винта.



По определению

.

Наглядное представление о роторе вектора можно получить, представив себе небольшую легкую турбинку, помещенную в данную точку текущей жидкости.



В тех местах, где ротор скорости жидкости  отличен от нуля, турбина будет вращаться (рис. 30.4), причем с тем большей скоростью, чем больше проекция ротора  на ось турбинки.

(Аналогично определяется )

Рис. 30.4