

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ м} = 6000 \text{ км.}$$

Для линий небольшой протяженности, например для линий, расположенных в пределах города или района, это условие при стандартной частоте промышленного тока ($f = 50$ Гц) хорошо выполняется. В сверхдальней линии Куйбышев—Москва (длина порядка 1000 км) между током в начале и в конце линии возникает сдвиг фаз на 60° , который компенсируют специальными методами; естественно, что при таком сдвиге фаз ток уже нельзя было бы считать квазистационарным.

2. Рассматриваемое поле не должно охватывать больших участков пространства, иначе говоря, точка наблюдения должна отстоять от проводов с током на расстояниях, малых по сравнению с длиной волны λ . При этом условии можно пренебречь тем запаздыванием, с которым изменения поля следуют за изменениями тока, и условно считать, что те и другие протекают одновременно (синхронно).

§ 32. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ (II УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА)

Открытая Фарадеем (1791—1863) в 1831 г. электромагнитная индукция принадлежит к числу самых фундаментальных физических явлений; ее практические приложения, в первую очередь в области генерации токов, необозримы, и не без основания считают год ее открытия датой рождения электротехники.

Фарадей обнаружил, что при всяком изменении потока магнитной индукции сквозь контур в нем индуцируется электродвижущая сила, которая вызывает ток (индукционный ток). Пусть L —проволочный контур (рис. 62), охватывающий поверхность S , которую пронизывает переменный поток Φ , мгновенное значение которого равно:

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

Как известно, ЭДС индукции \mathcal{E} пропорциональна скорости изменения потока (числу линий индукции, «пересекаемых» проводником за единицу времени):

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (32.1)$$

Знак минус в этом законе выражает правило Ленца: индукционный ток имеет такое направление, при котором он своим магнитным полем противодействует той причине, которая его вызывает. Если,

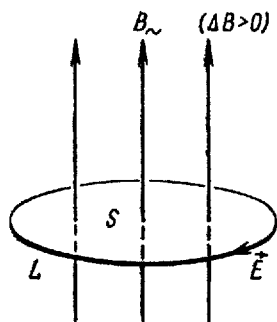


Рис. 62

например, поток сквозь контур возрастает, то индукционный ток своим полем противодействует этому возрастанию; отсюда легко можно определить направление индукционного тока.

Максвелл предложил замечательное истолкование закона электромагнитной индукции. Возникновение тока в проволочном контуре, по Максвеллу, не следует считать основной чертой явления. Поскольку любой ток обусловлен электрическим полем, следовательно, и индукционный ток в контуре вызван электрическим полем, порожденным переменным потоком магнитной индукции независимо от того, имелся ли в месте возникновения поля проволочный контур или нет. Проволочный контур служит в явлении лишь для обнаружения и практического использования электрического поля.

Итак, по Максвеллу, всякий переменный поток магнитной индукции порождает электрическое поле, линии которого замкнуты и охватывают магнитный поток. Напомним, что в статических и стационарных электрических полях силовые линии всегда имеют источники (т. е. эти поля являются потенциальными); предположение о существовании замкнутых, т. е. вихревых электрических полей, явилось очень смелой гипотезой.

Рассмотрим циркуляцию вектора \vec{E} по замкнутому контуру, охватывающему переменный поток Φ ; она очевидно, равна той электродвижущей силе, которая появится в контуре L :

$$\mathcal{E} = \oint_L E_t dl = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (32.2)$$

При замене здесь Φ его выражением, приведенным выше, мы приходим ко II уравнению Максвелла в интегральной форме

$$\oint_L E_t dl = - \frac{d}{dt} \int B_n dS. \quad (32.3)$$

Преобразуем левую часть выражения (32.3) согласно теореме Стокса:

$$\int_S \text{rot}_n \vec{E} dS = - \int_S \frac{\partial B_n}{\partial t} dS. \quad (32.4)$$

Переход к частной производной в правой части выражает то обстоятельство, что речь идет об изменении вектора \vec{B} в определенной точке пространства. Перестановка порядка действий в правой части допустима, так как дифференцирование выполняется по времени, интегрирование — по поверхности. Выражение (32.4) справедливо для произвольной поверхности S , что возможно при равенстве подынтегральных выражений:

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (32.5)$$

Уравнение (32.5) представляет собой II уравнение Максвелла в дифференциальной форме.

Здесь снова используется идея Максвелла о переходе к бесконечно малому объему, к точке. Если в какой-либо точке происходит изменение магнитного вектора, то это приводит к появлению вихревого электрического поля, т. е. переменный вектор магнитной индукции охватывается замкнутыми силовыми линиями электрического поля. Итак, по Максвеллу, поле электрическое может быть определено ротором вектора \vec{E} через производную \vec{B} по времени. Поскольку ротор \vec{E} определяется совокупностью частных производных вектора \vec{E} по координатам, физический смысл II уравнения Максвелла можно изложить так: изменение вектора \vec{B} во времени вызывает изменение вектора \vec{E} в пространстве. Таким образом, II уравнение выражает установленную еще Фарадеем фундаментальную связь между магнитным и электрическим полями: изменение магнитного поля приводит к возникновению электрического поля.

§ 33. I УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

В § 26 было получено дифференциальное уравнение для магнитного поля постоянных токов:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}.$$

Максвелл дополнил это уравнение новым видом тока, не связанным с движением зарядов вдоль цепи. Пусть в цепь переменного тока включен конденсатор C (рис. 63). Как принято говорить в физике и электротехнике, конденсатор не является разрывом в цепи переменного тока; однако ток проводимости на пластинах конденсатора, несомненно, обрывается (предполагается наличие идеального диэлектрика, исключающего токи утечки).

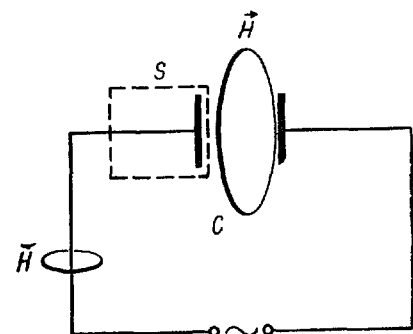


Рис. 63

В промежутке между пластинами, как предположил Максвелл, возникает новый вид тока, который замыкает цепь тока проводимости; Максвелл назвал его током смещения. Данное название связано с некоторыми устаревшими представлениями о природе этого тока. С современной точки зрения в пространстве между пла-