

IV. КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 31. УСЛОВИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНОСТИ

Обращаем внимание на то обстоятельство, что во все приведенные выше уравнения для векторов и потенциалов поля не входит время. Независимость φ , \vec{E} , \vec{A} , \vec{H} от времени является выражением стационарности поля. Физически это означает, что значения потенциалов и напряженностей поля (а также связанные с ним величины, например силы, потоки векторов и т. д.) в каждый данный момент зависят от распределения зарядов и токов ρ , σ , \vec{j} , \vec{i} , существующего в этот же момент времени. Такие стационарные поля обусловлены неподвижными зарядами и постоянными (стационарными) токами.

Для переменных токов, когда в обтекаемых ими проводниках плотности зарядов и токов непрерывно изменяются, необходимо установить, как изменяется порождаемое токами поле—синхронно с током, с опережением или отставанием во времени от изменения тока. Пусть за бесконечно малый промежуток времени dt в точке M проводника происходит изменение плотности тока на величину $d\vec{j}$ (рис. 61). С этим изменением тока связано, конечно, и изменение окружающего поля. Произойдет ли изменение поля, обусловленное изменением тока $d\vec{j}$, на конечном расстоянии r , в точке наблюдения A , в тот же промежуток времени или оно произойдет в какой-то другой интервал времени—более ранний или более поздний?

Опережения во времени быть, конечно, не может, так как изменение поля, как следствие, не может произойти раньше своей причины (изменения тока). В первой половине XIX в. почти всеобщее признание получила точка зрения, согласно которой изменение поля происходит одновременно с изменением тока, а это равносильно предположению о мгновенной «передаче» изменения из точки M в точку A без участия промежуточной среды (бесконечно большой скорости передачи); отсюда название

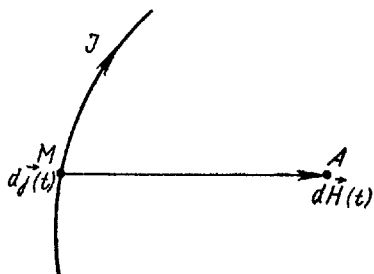


Рис. 61

такой «передачи» действия на расстоянии — дальное действие (*actio in distans*).

Иные взгляды отстаивали сторонники теории близкого действия, т. е. передачи изменений с конечной скоростью. Огромную роль при обосновании этой теории сыграло введение Максвеллом локальных величин и процессов, относящихся к бесконечно малым объемам, к точкам. Согласно Фарадею и Максвеллу, выразившему идеи Фарадея в математической форме, изменение тока в точке M вызывает изменение поля в прилегающих точках пространства. Это изменение, в свою очередь, вызывает изменение поля в соседних с ним точках, и, таким образом, начальное изменение в виде некоторого волнового электромагнитного процесса передается от точки к точке, пока не дойдет до точки наблюдения A . Воздействие процесса в одной точке на процесс в соседней, т. е. передача сигнала, происходит с конечной скоростью v , поэтому изменение поля в точке A произойдет позже, чем его причина — изменение тока в точке M ; время запаздывания $\Delta t = \frac{r}{v}$.

В пользу дального действия, казалось бы, говорило то обстоятельство, что запаздывание процессов долгое время не удавалось наблюдать. Запаздывание было доказано экспериментально лишь в конце XIX в. Г. Герцем (1857—1894), воспользовавшимся для этой цели быстропеременными токами (токами высокой частоты). Таким образом, в длительной борьбе двух точек зрения одержала верх теория близкого действия.

Из сказанного следует, что в переменном поле значения потенциалов и векторов поля в данный момент времени t определяются тем распределением величин ρ , σ , \vec{j} , \vec{i} , которое существовало в некоторый предшествующий момент времени $t - \Delta t = t - \frac{r}{v}$.

Однако существуют переменные поля, к которым в первом приближении приложимы законы стационарных полей; соответствующие им переменные токи можно рассматривать как стационарные. Такие токи и их поля называются квазистационарными.

Сформулируем условия, при которых переменные токи и их поля можно считать квазистационарными (их обоснование будет дано в § 48).

1. Переменные токи должны в каждый момент времени обладать одинаковой величиной во всех участках неразветвленной цепи, иначе говоря, колебания тока во всех точках линии должны совпадать по фазе; это условие означает, что длина линии должна быть малой по сравнению с длиной λ электромагнитной волны, распространяющейся при переменном токе со скоростью света вдоль линии. Очевидно, при частоте $f = 50$ Гц

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

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,

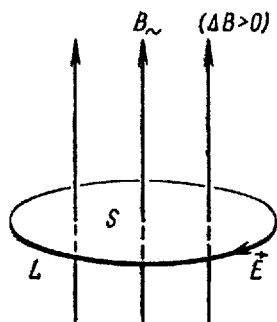


Рис. 62