

37. Максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции

Согласно Максвеллу, *всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле*. Последнее и является причиной появления индукционного тока в проводнике. *Циркуляция вектора напряжённости \vec{E} этого поля по любому неподвижному контуру определяется выражением*

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий контур поверхность, опирающуюся на контур Γ , – *формулировка Максвелла закона электромагнитной индукции*. Здесь для обозначения скорости изменения магнитного потока использован знак частной производной, а не полной, как написано выше. Это сделано для того, чтобы подчеркнуть, контур Γ и опирающаяся на него поверхность неподвижны.

Между предложенными Максвеллом и Фарадеем трактовками явления электромагнитной индукции имеется существенное отличие. Согласно Фарадею, *электромагнитная индукция заключается в возбуждении электрического тока*. Для её наблюдения необходимо наличие замкнутого проводника (провода). Максвелл, напротив, считает, что *сущность электромагнитной индукции – возбуждение электрического поля, а не тока*. Электромагнитная индукция, по Максвеллу, может наблюдаться и тогда, когда в пространстве вообще нет никаких проводников. Появление индукционного тока в замкнутом проводнике, когда он внесён в переменное магнитное поле, – одно из проявлений электрического поля \vec{E} , возникшего вследствие изменения магнитного поля. Но проявление электрического поля \vec{E} может быть и другим. Например, поляризовать диэлектрик, вызывать пробой конденсатора, ускорять и тормозить заряженные частицы. Оно может вызвать электрический ток и в незамкнутом проводнике, например *вихревые токи Фуко*.

Максвелловская формулировка закона электромагнитной индукции более общая, чем формулировка Фарадея. Математическая форма закона электромагнитной индукции по Максвеллу может быть представлена следующим образом.

$$\Phi = \int_{S_\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

– магнитный поток через произвольную поверхность, опирающуюся на некоторый контур

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{S_\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{S} \right) = \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S},$$

интегрирование по пространству и дифференцирование по времени, с точки зрения математики, независимые операции, их порядок можно менять местами. Окончательно,

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

– интегральная форма закона электромагнитной индукции (в формулировке Максвелла).

Используя формулу Стокса (см. §23 – 24), можно преобразовать полученное выражение в дифференциальную форму.

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{S_\Gamma} \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} \Rightarrow \int_{S_\Gamma} \text{rot } \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \Rightarrow$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

– дифференциальная (локальная) форма закона электромагнитной индукции, выражает локальную связь между электрическим и магнитным полями: изменение магнитного поля \vec{B} в данной точке определяет ротор электрического поля в этой же точке.

В электростатике, с которой мы начали знакомство с теорией электромагнетизма, источниками электрического поля являются неподвижные заряды. Для таких полей циркуляция по любому замкнутому контуру всегда обращается в нуль, т.е. электростатическое поле – потенциальное безвихревое поле:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad \text{и} \quad \text{rot } \vec{E} = 0.$$

По этой причине одно только электростатическое поле не может обеспечить непрерывное течение тока вдоль замкнутых проводов (нужны сторонние силы (см. §16)).

Напротив, электрическое поле, возбуждаемое магнитным полем, меняющимся во времени, – не потенциальное, вихревое поле (см. §7):

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_{S_\Gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad \text{и} \quad \text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (**)$$

Благодаря этому вихревое электрическое поле без каких-либо сторонних сил может вызывать непрерывное течение тока (индукционного) по замкнутым проводам.

Таким образом, теперь мы можем утверждать, что *электрические поля*, действующие в пространстве, *могут быть обусловлены наличием* в этом пространстве *электрических зарядов* и *переменных магнитных полей*. Результирующее поле \vec{E} будет складываться из двух соответствующих составляющих. Уравнения (**) выполняются как для общего случая, когда поле \vec{E} представляет собой сумму двух полей (потенциального и вихревого), так и для каждого по отдельности.