

Электромагнитное поле

Темы кодификатора ЕГЭ: электромагнитное поле.

Вспомним, каким образом Максвелл объяснил явление электромагнитной индукции. **Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.** Если в переменном магнитном поле находится замкнутый проводник, то вихревое электрическое поле приводит в движение заряженные частицы этого проводника — так возникает индукционный ток, наблюдаемый в эксперименте.

Линии вихревого электрического поля охватывают линии магнитного поля. Если смотреть с конца вектора \vec{B} , то линии вихревого электрического поля идут по часовой стрелке при возрастании магнитного поля и против часовой стрелки при убывании магнитного поля. Такое направление вихревого электрического поля, напомним, задаёт направление индукционного тока в соответствии с правилом Ленца.

Таким способом Максвелл объяснил, почему в экспериментах Фарадея появлялся индукционный ток. Но затем Максвелл пошёл ещё дальше и уже без какой-либо опоры на экспериментальные данные высказал симметричную гипотезу: **переменное электрическое поле порождает магнитное поле** (рис. 1, 2).

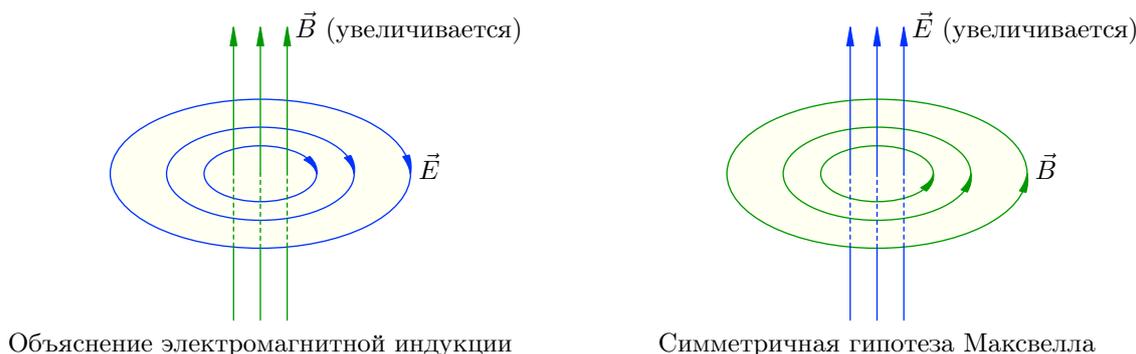


Рис. 1. Симметричная гипотеза Максвелла (возрастание поля)

Линии этого магнитного поля охватывают линии переменного электрического поля и идут *в другую сторону* по сравнению с линиями вихревого электрического поля. Так, *при возрастании электрического поля линии порождаемого магнитного поля направлены против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора \vec{E}* (рис. 1, справа).

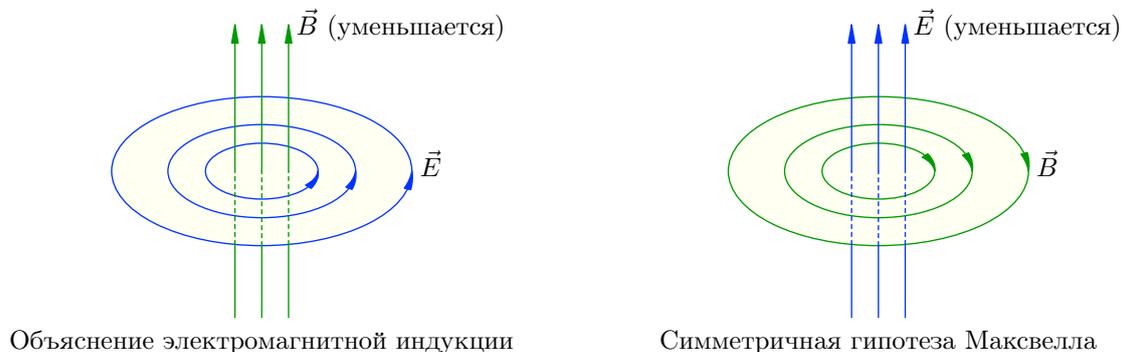


Рис. 2. Симметричная гипотеза Максвелла (убывание поля)

Наоборот, при убывании электрического поля линии порождаемого магнитного поля идут по часовой стрелке (рис. 2, справа).

У электрического поля может быть два источника: электрические заряды и переменное магнитное поле. В первом случае линии электрического поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Во втором случае электрическое поле является вихревым — его линии оказываются замкнутыми.

У магнитного поля также может быть два источника: электрический ток и переменное электрическое поле. При этом линии магнитного поля замкнуты в обоих случаях (оно всегда вихревое). Максвелл предположил, что оба источника магнитного поля равноправны в следующем смысле. Рассмотрим, например, процесс зарядки конденсатора (рис. 3):

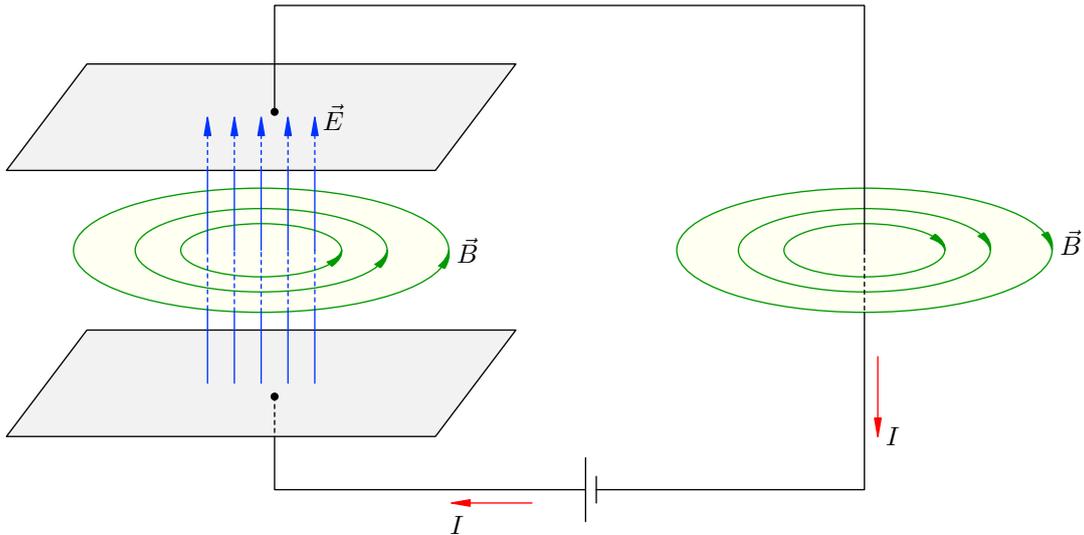


Рис. 3. Магнитное поле внутри конденсатора совпадает с магнитным полем тока

В данный момент по проводам, соединяющим обкладки конденсатора, течёт ток I . Заряд конденсатора увеличивается, и, соответственно, возрастает электрическое поле между обкладками. Это переменное электрическое поле порождает магнитное поле \vec{B} . Так вот, согласно гипотезе Максвелла *магнитное поле \vec{B} внутри конденсатора оказывается точно таким же, как и магнитное поле тока I — как если бы ток I протекал в пространстве между обкладками конденсатора.*

Подчёркнём ещё раз, что симметричная гипотеза Максвелла была поначалу чисто умозрительной. На тот момент не наблюдалось каких-либо неясных физических явлений, для объяснения которых потребовалась бы такая гипотеза. Лишь впоследствии (и уже после смерти Максвелла) она получила блестящее экспериментальное подтверждение. Об этом — чуть ниже.

Прежде всего, симметричная гипотеза указала на то, что электрическое и магнитное поля тесно взаимосвязаны. Они не являются обособленными физическими объектами и всегда существуют рядом друг с другом. *Если в какой-то системе отсчёта электрическое (магнитное) поле отсутствует, то в другой системе отсчёта, движущейся относительно первой, оно непременно появится.*

Допустим, например, что в движущемся автомобиле покоится электрический заряд. В системе отсчёта, связанной с автомобилем, этот заряд не создаёт магнитного поля. Но относительно земли заряд *движется*, а любой движущийся заряд является источником магнитного поля. Поэтому наблюдатель, стоящий на земле, зафиксирует магнитное поле, создаваемое зарядом в автомобиле.

Пусть также на земле лежит магнит. Наблюдатель, стоящий на земле, регистрирует постоянное магнитное поле, создаваемое этим магнитом; коль скоро это поле не меняется со

временем, никакого электрического поля в земной системе отсчёта не возникает. Но относительно автомобиля магнит *движется* — приближается к автомобилю или удаляется от него. В системе отсчёта автомобиля магнитное поле меняется со временем — нарастает или убывает; наблюдатель в автомобиле фиксирует вихревое электрическое поле, порождаемое переменным магнитным полем нашего магнита.

Но все инерциальные системы отсчёта абсолютно равноправны, среди них нет какой-то одной привилегированной. Законы природы выглядят одинаково в любой инерциальной системе отсчёта, и никакой физический эксперимент не может отличить одну инерциальную систему отсчёта от другой¹. Поэтому естественно считать, что *электрическое поле и магнитное поле служат двумя различными проявлениями одного физического объекта — электромагнитного поля*.

Таким образом, в произвольной, наудачу выбранной системе отсчёта будут присутствовать обе компоненты электромагнитного поля — поле электрическое и поле магнитное. Но может случиться и так, что в некоторой системе отсчёта, специально приспособленной для данной задачи, одна из этих компонент обратится в нуль. Мы видели это в наших примерах с автомобилем.

Электромагнитное поле можно наблюдать и исследовать по его действию на заряженные частицы. Силовой характеристикой электромагнитного поля является пара векторов \vec{E} и \vec{B} — напряжённость электрического поля и индукция магнитного поля. Сила, с которой электромагнитное поле действует на заряд q , движущийся со скоростью \vec{v} , равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{эл}} + \vec{F}_{\text{магн}}.$$

Силы в правой части нам хорошо известны. Сила $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$ действует со стороны электрического поля. Она не зависит от скорости заряда.

Сила $\vec{F}_{\text{магн}}$ действует со стороны магнитного поля. Её направление определяется по правилу часовой стрелки или левой руки, а модуль — по формуле $F_{\text{магн}} = qvB \sin \alpha$, где α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Теория электромагнитного поля была создана Максвеллом. Он предложил свою знаменитую систему дифференциальных уравнений (*уравнений Максвелла*), которые позволяют найти векторы \vec{E} и \vec{B} в любой точке заданной области пространства по известным источникам — зарядам и токам². Уравнения Максвелла легли в основу электродинамики и позволили объяснить все известные на тот момент явления электричества и магнетизма. Но мало того — уравнения Максвелла дали возможность предсказывать новые явления!

Так, среди решений уравнений Максвелла обнаружили поля с неизвестными ранее свойствами — электромагнитные волны. А именно, уравнения Максвелла допускали решения в виде электромагнитного поля, которое может распространяться в пространстве, захватывая с течением времени все новые и новые области. Скорость этого распространения конечна и зависит от среды, заполняющей пространство. Но электромагнитные волны не нуждаются ни в какой среде — они могут распространяться даже сквозь пустоту. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме совпадает со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (сам свет также является электромагнитной волной).

Это был один из удивительных случаев в физике, когда фундаментальное открытие делалось «на кончике пера» — новое явление открывалось чисто теоретически, опережая эксперимент. Опытное подтверждение пришло позже: электромагнитные волны были впервые обнаружены в опытах Герца через восемь лет после смерти Максвелла. Эти опыты подтвердили

¹Это — *принцип относительности Эйнштейна*, о котором пойдёт речь в листке «Принципы СТО».

²Для однозначного нахождения полей необходимо знать ещё *начальные условия* — значения полей в начальный момент времени, а также *граничные условия* — некоторые условия для полей на границе рассматриваемой области.

справедливость симметричной гипотезы и основанной на ней теории электромагнитного поля, построенной Максвеллом.