

и т. д., на рисунке не показаны. Поле \mathbf{B} создается двумя неподвижными катушками. Предположим, что рамка вращается с угловой скоростью ω рад/сек. Ее положение в любой момент времени определено углом θ и $\theta = \omega t + \alpha$, где постоянная α определяет положение рамки при $t=0$. Компонента \mathbf{B} , перпендикулярная к плоскости рамки, равна $B \sin \theta$, следовательно, поток сквозь рамку в момент времени t равен

$$\Phi(t) = SB \sin(\omega t + \alpha), \quad (19)$$

где S — поверхность рамки. Тогда для индуцированной электродвижущей силы мы имеем

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{SB\omega}{c} \cos(\omega t + \alpha). \quad (20)$$

Если рамка не замкнута, а соединена вращающимися вместе с ней кольцами через щетки с внешними проводами, как показано на рис. 7.13, мы обнаружим на зажимах осциллографа разность потенциалов, изменяющуюся по синусоиде.

Поясним вопрос об единицах на численном примере. Предположим, что величина магнитного поля B равна 500 гс, скорость вращения 30 об/сек, площадь рамки 100 см². Тогда $\omega = 2\pi \times 30$, или 188 рад/сек и амплитуда, т. е. максимальная величина переменной электродвижущей силы, равна

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\max} &= \frac{SB\omega}{c} = \frac{(188 \text{ сек}^{-1})(100 \text{ см}^2)(500 \text{ гс})}{3 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}} = \\ &= 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ гс} \cdot \text{см} \quad (\text{или ед. СГСЭ}_V). \end{aligned} \quad (21)$$

Поскольку \mathcal{E} представляет собой работу на единицу заряда, ее можно выражать в единицах СГСЭ_V. Заметьте, что единицы в уравнении (21) сводятся к гс·см. Величины электрического поля E и магнитного поля B имеют одинаковую размерность в гауссовой системе СГС. Например, в формуле преобразования $\mathbf{E}' = (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$ мы умножаем величину магнитного поля на безразмерное отношение v/c для получения электрического поля. (Единица электрического поля, СГСЭ_V/см, не имеет собственного названия.) Итак, гс·см непосредственно преобразуется в 1 (ед. СГСЭ_V/см)·см, т. е. в 1 ед. СГСЭ_V. В практической системе единиц амплитуда электродвижущей силы в этом примере составляет $3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 300$, или 0,093 в.

7.4. Рамка покоится, источник поля движется

Мы можем при желании рассматривать опыт, изображенный на рис. 7.6, из системы координат, которая движется вместе с рамкой. Это не меняет физической сущности дела, а изменит только слова, которыми мы пользуемся для ее описания. Пусть F' — система координат x', y', z' , связанная с рамкой, которую мы теперь считаем неподвижной (рис. 7.14). Катушка и батарея, неподвижные в системе координат F , движутся в отрицательном направлении оси y' со

скоростью $\mathbf{v}' = -\mathbf{v}$. Обозначим через B'_1 и B'_2 магнитные поля, измеренные у двух концов рамки наблюдателями в F' в некоторый момент времени t' . В системе F' будет существовать электрическое поле. Из уравнения (6.62) следует

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}'_1 &= -\frac{\mathbf{v}' \times \mathbf{B}'_1}{c} = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}'_1}{c}, \\ \mathbf{E}'_2 &= -\frac{\mathbf{v}' \times \mathbf{B}'_2}{c} = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{B}'_2}{c}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Для наблюдателя в F' это — реальное электрическое поле. Оно не является электростатическим полем. Линейный интеграл от \mathbf{E}'

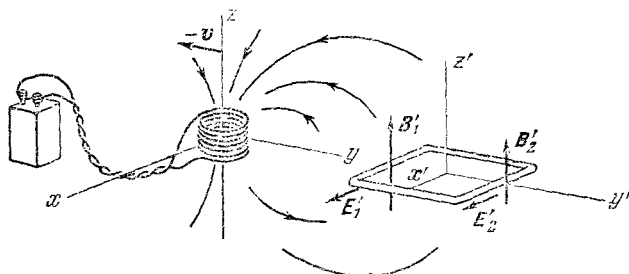


Рис. 7.14. Рамка неподвижна в системе координат F' , источник поля движется. Поля \mathbf{B} и \mathbf{E}' меняются как в пространстве, так и во времени.

вокруг любого замкнутого пути в F' в общем случае не равен нулю. Действительно, линейный интеграл от \mathbf{E}' , взятый по рамке, равен

$$\int \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{s}' = \frac{\omega \cdot \mathbf{v}}{c} (B'_1 - B'_2). \quad (23)$$

Линейный интеграл в уравнении (23) можно назвать электродвижущей силой \mathcal{E}' на этом пути. Если заряженная частица пройдет по этому пути один раз, то \mathcal{E}' будет работой, совершенной на этом пути над единицей заряда. Величина \mathcal{E}' связана со скоростью изменения потока через рамку. Для того чтобы убедиться в этом, заметим, что, в то время как сама рамка неподвижна, силовые линии магнитного поля движутся со скоростью $-\mathbf{v}$ источника. Следовательно, для потери или приращения потоков у каждого конца рамки за время dt' мы получаем результат, подобный уравнению (11), откуда следует, что

$$\mathcal{E}' = \frac{1}{c} \frac{d\Phi'}{dt'}. \quad (24)$$

Теперь можно следующим образом суммировать наблюдения в обеих заданных системах координат: F , в которой неподвижен источник поля \mathbf{B} , и F' , в которой неподвижна рамка.

Наблюдатель в F говорит: «Мы имеем магнитное поле, которое меняется в пространстве, но постоянно во времени. Электрического поля здесь нет. Рамка движется со скоростью \mathbf{v} в магнитном поле, и

на заряды, расположенные в ней, действует сила $(v/c) \times \mathbf{B}$ дин на единицу заряда. Линейный интеграл от этой силы на единицу заряда, взятый вокруг рамки, является электродвижущей силой \mathcal{E} и равен $-(1/c) (d\Phi/dt)$. Поток Φ равен $\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$ по поверхности S , стягивающей рамку, в некоторый момент времени t по моим часам».

Наблюдатель в F' говорит: «Эта рамка неподвижна, и только электрическое поле могло бы заставить двигаться находящиеся в ней заряды. И действительно, здесь имеется некоторое электрическое поле \mathbf{E}' . Кажется, оно возникло благодаря похожему на магнит предмету, который в данный момент со свистом пронесится мимо рамки со скоростью $-\mathbf{v}$, создавая довольно сильное магнитное поле \mathbf{B}' . Электрическое поле таково, что $\int \mathbf{E}' \cdot d\mathbf{s}'$ по этой неподвижной рамке равен не нулю, а $-1/c$, умноженной на скорость изменения потока сквозь петлю, $d\Phi/dt'$. Поток Φ' равен $\int \mathbf{B}' \cdot d\mathbf{a}'$ по поверхности, стягивающей рамку, значения B' должны быть измерены по всей этой поверхности в некоторый момент времени t' по моим часам».

До сих пор наши выводы были релятивистски точными. Они справедливы для любой скорости $v \leq c$ при условии, что мы добросовестно соблюдаем различия между \mathbf{B} и \mathbf{B}' , t и t' и т. д. Если $v \ll c$, так что величиной v^2/c^2 можно пренебречь, B' будет практически равно B и мы можем спокойно пренебречь также различием между t и t' .

7.5. Универсальный закон индукции

Проведем три опыта с приборами, изображенными на рис. 7.15. Столы расположены на колесиках и их можно легко передвигать.

Чувствительный гальванометр соединен с хорошо знакомой нам рамкой, в которой для увеличения индуцированной электродвижущей силы прибавлено несколько новых витков. Откровенно говоря,

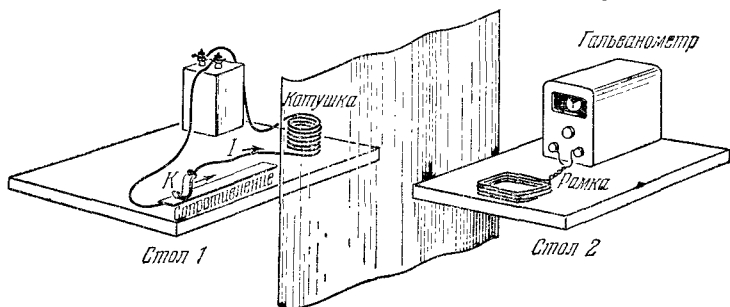


Рис. 7.15. Опыт состоит или в движении каждого из столов в отдельности, или в изменении тока I в катушке при неподвижных столах.

чувствительность нашего опыта ограничена еще и тем, что мы пользуемся слабым источником магнитного поля. Может быть, в вашей лаборатории вам удастся поставить более удачный опыт.