

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

THE MECHANISM OF OCCURRENCE OF AN ELECTROMOTIVE FORCE AT CONDUCTOR MOVEMENT IN A MAGNETIC FIELD

© Колонутов М.Г.

© Kolonutov M.

Доцент, канд. техн. наук, ООО «Новгородаудит–ЭНЕРГО»

Великий Новгород

В статье показан основной недостаток традиционного объяснения и предложен новый механизм возникновения ЭДС.

Известно, что магнитное поле создаётся движением носителей заряда. Кинетическая энергия движения электрического поля этих носителей приводит к появлению электрокинетического поля. Возникновение ЭДС в проводнике при его движении в магнитном поле является следствием существования электрокинетического поля. Предлагаемая теория содержит необходимые математические доказательства.

In article the basic defect of a traditional explanation is shown and the new mechanism of occurrence electromotive force is offered.

It is known that the magnetic field is created by movement of carriers of a charge. Kinetic energy of movement of electric field of these carriers causes occurrence of an electrokinetic field. Occurrence electromotive force in a conductor at its movement in a magnetic field is a consequence of this electrokinetic field. The offered theory contains necessary mathematical proofs.

1 Сила Лоренца

Сила Лоренца — сила воздействия магнитного поля с индукцией \mathbf{B} на движущийся со скоростью \mathbf{V} носитель заряда q ,

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Современная электродинамика утверждает, что макроскопическими проявлениями силы Лоренца являются два экспериментально установленных факта:

- 1) Силовое воздействие магнитного поля на проводник с током,
- 2) Возникновение ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Причина первого из этих явлений без какого-либо привлечения силы Лоренца была объяснена в статье [1].

Происхождение второго феномена объяснено ниже, причём также без использования силы Лоренца.

Прежде всего, выясним, насколько хорошо сила Лоренца объясняет механизм возникновения ЭДС в проводнике при его движении в магнитном поле.

Для оценки возможности участия этой силы в разделении зарядов вдоль движущегося проводника найдём радиус траектории движения электронов при обычно используемых в электрических машинах токах и магнитных полях. Будем считать, что индукция $B = 1$ Тл, а скорость дрейфового движения электрона, участвующего в создании тока, $V = 10^{-4}$ м/с (это значение скорости указано на стр. 26 пятого тома фейнмановских лекций по физике). В этих условиях радиус r движения электрона, обусловленный силой Лоренца, составит

$$r = \frac{mV}{qB} = \frac{0,9 \cdot 10^{-30} \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1} = 0,56 \cdot 10^{-15} \text{ м} \quad (1.1)$$

Получившееся значение радиуса приблизительно в пять раз меньше классического радиуса электрона. Это скорее вращение вокруг оси, смещённой относительно оси симметрии, нежели движение по окружности.

Ясно, что такое вращение никак не может привести к макроскопическому разделению зарядов вдоль проводника, т.е. к созданию ЭДС. Следовательно, дело не в силе Лоренца.

Далее предлагается принципиально другой механизм возникновения ЭДС, не опирающийся на феномен силы Лоренца.

Предварительно будет рассмотрено влияние движения носителей заряда на напряжённость электрического поля, после чего, с использованием полученных результатов, описан механизм возникновения ЭДС в движущемся проводнике.

2 Электрическое поле движущегося носителя заряда

Электрическое поле уединённого неподвижного точечного носителя заряда обладает потенциальной энергией $W_{\text{п}}$,

$$W_{\text{п}} = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 R} \quad (2.1)$$

и, следовательно, имеет массу m ,

$$m = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 c^2 R}. \quad (2.2)$$

Электрическое поле носителя, движущегося поступательно, кроме потенциальной энергии приобретает кинетическую энергию $W_{\text{к}}$,

$$W_{\text{к}} = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{Q^2}{16\pi\epsilon_0 R} \frac{V^2}{c^2} = \frac{1}{2} W_{\text{п}} \frac{V^2}{c^2}. \quad (2.3)$$

Проанализируем производные величин потенциальной и кинетической энергии по аргументам Q и R .

Дифференцирование выражения (2.1) по заряду Q даёт выражение электростатического потенциала $\varphi_{\text{с}}$:

$$\varphi_{\text{с}} = \frac{dW_{\text{п}}}{dQ} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}. \quad (2.4)$$

Результат аналогичного дифференцирования кинетической энергии (2.3) с полным правом можно назвать электрокинетическим потенциалом:

$$\varphi_k = \frac{dW_k}{dQ} = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 R} \frac{V^2}{c^2} = \frac{1}{2} \varphi_c \frac{V^2}{c^2}. \quad (2.5)$$

Введём цилиндрическую систему координат (r, z, θ) , на оси z которой находится рассматриваемый носитель заряда (рисунок 1). Расстояние R , как это следует из рисунка, выражается формулой $R = (s^2 + r^2)^{1/2}$, где $s = z - Vt$. Как известно, градиент электростатического потенциала (2.4), взятый с обратным знаком является напряжённостью \mathbf{E}_c электростатического поля,

$$\mathbf{E}_c = -grad \varphi_c. \quad (2.6)$$

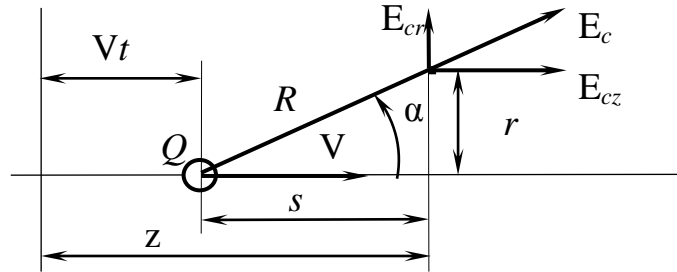


Рисунок 1

Из выражения (2.6) следует, что проекции вектора напряжённости \mathbf{E}_c на оси координат r, z определяются формулами (2.7) и (2.8):

$$E_{cr} = -\frac{\partial \varphi_c}{\partial r}, \quad (2.7)$$

$$E_{cz} = -\frac{\partial \varphi_c}{\partial s}. \quad (2.8)$$

Аналогично можно получить выражение напряжённости электрокинетического поля. Однако, в этом случае при нахождении градиента следует учитывать, что теперь аксиальная координата зависит от времени, $s=s(z,t)$ и поэтому частную производную $\partial \varphi_k / \partial s$ в выражении градиента следует представлять как производную сложной функции: $\partial \varphi_k / \partial s = (\partial \varphi_k / \partial t)(\partial t / \partial s)$. В результате, с учётом зависимости (2.5), получим, что

$$\mathbf{E}_k = -grad \varphi_k = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi_c}{\partial r} \mathbf{1}_r + \frac{\partial \varphi_c}{r \partial \theta} \mathbf{1}_\theta - \frac{\partial \varphi_c}{\partial s} \mathbf{1}_z \right) \frac{v^2}{c^2}. \quad (2.9)$$

Отсюда следует, что проекции напряжённости электрокинетического поля выражаются зависимостями (2.10). (2.11):

$$E_{kr} = \frac{1}{2} E_{cr} \frac{v^2}{c^2}, \quad (2.10)$$

$$E_{kz} = -\frac{1}{2} E_{cz} \frac{v^2}{c^2}. \quad (2.11)$$

На рисунке 2 приведено векторное представление напряжённости E_c электростатического поля и напряжённости E_k электрокинетического поля, создаваемого при движении носителя заряда.

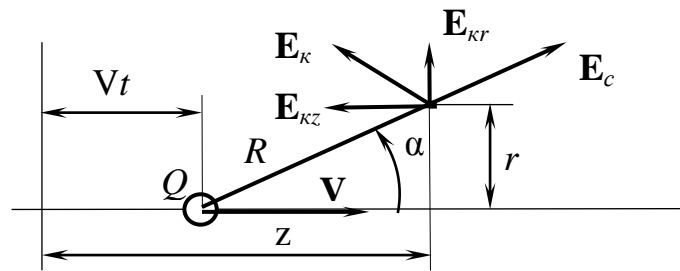


Рисунок 2

Из приведённого анализа следует, что в поперечном (относительно скорости движения носителя заряда) направлении в результате суперпозиции электростатического и электрокинетического полей возникает электродинамическое поле, напряжённость которого определяется суммой (2.12),

$$E_{\perp} = E_{cr} + E_{kr} = E_{cr} + \frac{1}{2} E_{cr} \frac{v^2}{c^2} = E_{cr} \left(1 + 0,5 \frac{v^2}{c^2} \right), \quad (2.12)$$

а в продольном – суммой (2.13):

$$E_{\parallel} = E_{cz} + E_{kz} = E_{cz} - \frac{1}{2} E_{cz} \frac{v^2}{c^2} = E_{cz} \left(1 - 0,5 \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (2.13)$$

Следует отметить, что зависимости (2.12) и (2.13) впервые были получены как решения уравнения Максвелла для электрического поля движущегося носителя заряда и опубликованы в статье [1]. В этой статье также продемонстрировано применение зависимостей для объяснения

силового взаимодействия, как движущихся точечных носителей заряда, так и проводников с током. В несколько переработанном виде статья была представлена в STL <http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9017.html>.

3 ЭДС в проводнике при его движении в магнитном поле

Рассмотрение проведём с использованием классической конструкции в виде рамки с подвижной перемычкой (рисунок 3), которая помещена в магнитное поле прямолинейного проводника с током $I = \lambda V_2$, где λ – линейная плотность свободных носителей заряда, V_2 – скорость движения этих носителей.

Движение перемычки со скоростью V_1 относительно проводника равносильно движению проводника в направлении «от перемычки» со скоростью $(-V_1)$, а свободные носители заряда в нем движутся относительно перемычки со скоростью $V = V_2 - V_1$. Расчётная схема, которая получается при этом, изображена на рисунке 4.

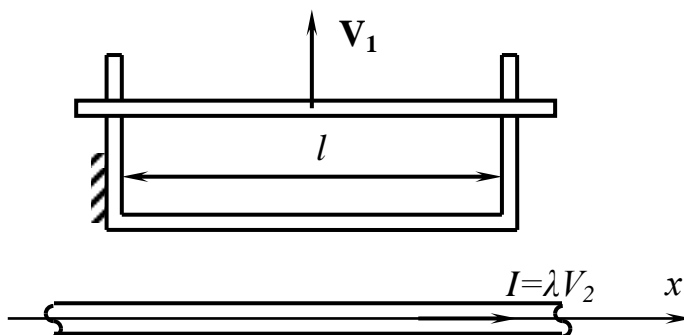


Рисунок 3

В соответствии с принятыми в электротехнике правилами будем считать, что ток создаётся носителями положительного заряда.

Выделим в проводнике участок длиной Δx и найдём величину напряжённости электрического поля ΔE , создаваемого свободными носителями этого элементарного отрезка в некоторой произвольно выбранной точке A , принадлежащей перемычке,

$$\Delta E_{\perp} = \Delta E_r \left(1 + 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) = \Delta E \left(1 + 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) \cos(\alpha - \beta), \quad (3.4)$$

$$\Delta E_{\parallel} = \Delta E_z \left(1 - 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) = \Delta E \left(1 - 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) \sin(\alpha - \beta). \quad (3.5)$$

Осталось найти проекции векторов $\Delta \mathbf{E}_{\perp}$ и $\Delta \mathbf{E}_{\parallel}$ на направление оси x системы координат (x, y) , т.е. на направление, совпадающее с продольной осью перемычки;

$$\Delta E_{x\perp} = \Delta E \left(1 + 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) \cos(\alpha - \beta) \cos(\beta) \quad (3.6)$$

$$\Delta E_{x\parallel} = \Delta E \left(1 - 0,5 \frac{V^2}{c^2} \right) \sin(\alpha - \beta) \sin(\beta) \quad (3.7)$$

Алгебраическая сумма проекций (3.6) и (3.7) является продольной составляющей напряжённости электрического поля в точке A перемычки, которая вызвана движением носителей заряда в элементарном отрезке проводника с током Δx ,

$$\Delta E_x = \Delta E \left[\cos \alpha + 0,5 \frac{V^2}{c^2} (\cos \alpha \cos 2\beta + \sin \alpha \sin 2\beta) \right]. \quad (3.8)$$

В этой формуле угол β при заданных скоростях V_1 и V_2 является некоторой постоянной величиной, $\beta = \arctg(V_2/V_1)$, а тригонометрические функции угла α выражаются через длины соответствующих отрезков,

$$\cos \alpha = \frac{x}{(h^2 + x^2)^{1/2}}, \quad \sin \alpha = \frac{h}{(h^2 + x^2)^{1/2}}. \quad (3.9)$$

После подстановки в формулу (3.8) зависимостей (3.1), (3.9) и перехода к бесконечно малым получаем:

$$\begin{aligned} dE_x = & \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{x dx}{(h^2 + x^2)^{3/2}} \left(1 + 0,5 \frac{V^2}{c^2} \cos 2\beta \right) \right] + \\ & + \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \left[0,5 \frac{V^2 h}{c^2} \frac{dx}{(h^2 + x^2)^{3/2}} \sin 2\beta \right]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Напряжённость электродинамического поля в точке A перемычки, созданная всей длиной проводника с током, найдём интегрированием по x от

– ∞ до $+\infty$. Интеграл от первого слагаемого выражения (3.10) даёт нулевой вклад, от второго – получаем

$$E_x = \frac{\lambda V_2}{2\pi\epsilon_0 h} \frac{V_1}{c^2} = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 h c^2} V_1. \quad (3.11)$$

Как известно, индукция магнитного поля проводника с током на расстоянии h выражается формулой

$$B = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 h c^2}, \quad (3.12)$$

отсюда получаем что зависимость (3.11) является произведением индукции B магнитного поля на скорость движения перемычки,

$$E_x = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 h c^2} V_1 = B V_1. \quad (3.13)$$

Напряжённость поля E_x приводит к появлению силы, действующей на свободные носители заряда в перемычке, т.е. к появлению электродвижущей силы \mathcal{E} , абсолютное значение которой определяется произведением напряжённости на длину перемычки l . Знак ЭДС в соответствии с принятым в теории электричества правилом знаков должен быть отрицательным,

$$\mathcal{E} = -E_x l = -B V_1 l. \quad (3.14)$$

Полученная формула полностью совпадает с классическим результатом, что говорит о правильности, как исходных посылок, так и выполненного на их основе анализа.

4 Выводы

Таким образом, можно считать установленным тот факт, что сила Лоренца никакого участия в возникновение ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле, не принимает.

Причиной возникновения ЭДС является электродинамическое поле, созданное движением носителей заряда в проводнике с током и только оно.

Следует отметить, что приведённое объяснение механизма возникновения ЭДС не потребовало даже упоминания о магнитном поле. Магнитное поле ни в этом механизме, ни в описании других электрических

явлений не имеет никакого самостоятельного значения. С философской точки зрения магнитное поле – суть явление, электрическое поле – сущность, формой проявления которой в движении как раз и является магнитное поле. Беды теории электричества произрастают во многом из-за непонимания и даже враждебного отношения к этому тезису.

Литература

1 Колонутов М.Г. Электрическое поле равномерно движущихся носителей заряда [Текст] // Вестник новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого . 2005. №30. С. 18-25.