

Р4-2010-79

А. В. Гусев

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НАМАГНИЧЕННОГО ШАРА
И УНИПОЛЯРНАЯ ИНДУКЦИЯ

Электрическое поле намагниченного шара и униполярная индукция

В работе рассматривается явление униполярной индукции.

При вращении шара, намагниченного вдоль оси вращения, проходящей через его центр, образованное шаром магнитное поле не изменяется во времени ни по величине, ни по направлению. Можно ли в этом случае говорить, что поле вращается вместе с магнитом? Как решить видимое противоречие между наблюдением ЭДС униполярного генератора и законом электромагнитной индукции Фарадея, который говорит, что $\text{ЭДС} = -d\Phi/dt = 0$ при $\Phi = \text{const}$?

На основе классической теории Максвелла выведены уравнения силовых линий электрического поля, которое образуется при вращении такого шара, и построена их картина. Критикуется мнение некоторых специалистов, что магнитное поле такого шара вращается вместе с ним и создает вне шара электрическое поле с особыми свойствами, противоречащими классической теории Максвелла.

Electrical Field of Magnetized Sphere and Unipolar Induction

This article discusses the phenomenon of unipolar induction.

At rotation of a ball, magnetized lengthwise axis of rotation passing through its center, a magnetic field produced by this ball does not change in time neither in value, nor in a direction. Is it possible in this case to speak that the field is rotated together with the magnet? How should one resolve a visible inconsistency between observation of EMF in a unipolar generator and the Faraday induction law, which suggests that $\text{EMF} = -d\Phi/dt = 0$, when $\Phi = \text{const}$?

On the basis of the classic Maxwell theory, equations of lines of force of an electrical field, derived at rotation of such a ball, are deduced and their picture is built. The opinion of some specialists is criticized that the magnetic field of such a ball is rotated together with a ball and creates outside of it an electrical field with the special properties contradicting the classic Maxwell theory.

ВВЕДЕНИЕ

Явление униполярной индукции обычно не входит в программу по физике не только в гуманитарных, но и в технических вузах. Тому есть 2 причины: 1) в настоящее время оно не используется в технике при проектировании генераторов, так как найдены более эффективные технические решения; 2) его теоретическое объяснение встречается у преподавателей некоторые методические трудности, обсуждаемые ниже. Это иногда приводит к тому, что специалисты, столкнувшись с этим явлением, придумывают гипотезы, противоречащие классической электродинамике, и предлагают поставить дорогостоящие эксперименты для их подтверждения. Поэтому рассмотрение этой темы в курсе электродинамики имеет важное теоретическое значение.

УНИПОЛЯРНАЯ ИНДУКЦИЯ

Кратко напомним, в чем состоит явление униполярной индукции, которое более подробно рассмотрено в классических учебниках [1, 2, 3] и др. Равномерно намагнитим проводящий цилиндр вдоль его геометрической оси. При вращении цилиндра вокруг этой оси мы можем зарегистрировать явление электрического поля. Для этого подсоединим вольтметр с помощью щеток к оси цилиндра и к его боковой поверхности. Он покажет постоянную разность потенциалов, зависящую от скорости вращения и величины намагничивания цилиндра. Вместо вольтметра можно подсоединить нагрузочное сопротивление, по которому потечет электрический ток. Мы получили генератор постоянного тока, который по историческим причинам получил название униполярного генератора.

В настоящее время генераторы на этом принципе не строятся, так как величина напряжения у него получается низкая — милливольты.

Обычно при объяснении принципа работы генератора специалисты используют формулу (1), известную как закон электромагнитной индукции Фарадея:

$$\mathcal{E} = -d\Phi/dt. \quad (1)$$

Электродвижущая сила (ЭДС) равна производной по времени t от магнитного потока Φ через контур.

В случае униполярного генератора при вращении цилиндра вектор магнитной индукции \mathbf{B} в любой точке окружающего пространства не изменяется ни по величине, ни по направлению. Магнитный поток через контур, содержащий вольтметр, тоже постоянный. Кроме того, контур можно расположить вдоль силовых линий так, что поток Φ через него будет равен 0. Равна 0 и его производная, а следовательно, ЭДС = 0.

Специалист в недоумении начинает сомневаться в теории Максвелла.

Загадка решается, если напомнить о том, о чем часто забывают сказать в учебниках и на лекциях.

Закон Фарадея в виде (1) не является базовым законом теории электромагнетизма, а может быть выведен из определения ЭДС, формулы для силы Лоренца, теоремы Стокса и уравнения Максвелла $\text{rot } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$. Формула (1) не является универсальной. Под контуром в этой формуле следует понимать достаточно тонкий проводник. В идеале — это математическая линия.

В данном случае цилиндр как часть электрической цепи со скользящим контактом невозможно рассматривать как тонкую линию контура и, следовательно, говорить про поток и ЭДС контура. Внутри цилиндра можно произвольно провести линию контура. Но заряды не будут двигаться только вдоль этой линии. И контур получится непривычный: его часть внутри цилиндра имеет скорость, а его площадь не изменяется. В теореме Стокса такие контуры не рассматриваются. В ней контур — фиксированная в пространстве математическая линия.

В нашем случае нужно использовать общую формулу для ЭДС:

$$\text{ЭДС} = \int (\mathbf{F} \cdot d\mathbf{l})/q. \quad (2)$$

ЭДС равна контурному интегралу, взятому по замкнутому контуру электрической цепи, от скалярного произведения силы \mathbf{F} (действующей на заряд q) на элемент контура $d\mathbf{l}$.

В нашем случае на заряд действует сила Лоренца \mathbf{F}_1 и механическая сила реакции \mathbf{F}_2 , которая удерживает заряд от тангенциальных перемещений относительно магнита: $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$. Разложим \mathbf{F}_1 на радиальную \mathbf{F}_r и тангенциальную \mathbf{F}_t составляющие: $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_r + \mathbf{F}_t$. Сила реакции \mathbf{F}_2 уравновешивает \mathbf{F}_t : $\mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_t$.

А равнодействующая $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \mathbf{F}_r$.

Сила Лоренца равна

$$\mathbf{F}_1 = q(\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]). \quad (3)$$

В этой формуле \mathbf{E} — напряженность электрического поля; \mathbf{B} — индукция магнитного поля; \mathbf{V} — скорость заряда q . \mathbf{E} , в свою очередь, равна

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi - d\mathbf{A}/dt, \quad (4)$$

где ϕ — электростатический потенциал; \mathbf{A} — векторный потенциал.

Подставив (4) в (3), получим 3 слагаемых для силы Лоренца:

$$\mathbf{F}_1 = q(-\text{grad } \phi - d\mathbf{A}/dt + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]). \quad (5)$$

Интересующая нас ее радиальная составляющая равна

$$\mathbf{F}_r = q(\mathbf{E} + [\mathbf{V}_t \times \mathbf{B}]). \quad (6)$$

Теперь для вычисления ЭДС нужно силу \mathbf{F}_r разделить на заряд электрона и проинтегрировать по пути, по которому движется заряд. Получаются три слагаемых: первое — от градиента потенциального поля — равно нулю. Векторный потенциал $\mathbf{A} = \text{const}$ для постоянного магнитного поля, поэтому второе $\mathcal{E}_2 = d\mathbf{A}/dt = 0$. Третье слагаемое дает нужную нам ЭДС:

$$\mathcal{E}_{\text{ДС}} = \mathcal{E}_3 = \int_0^R [\mathbf{V}_t \times \mathbf{B}] dl. \quad (7)$$

Интеграл можно брать не по всему контуру, а только внутри магнита, где \mathbf{V}_t не равно 0, а равно $\mathbf{V}_t = \omega r$.

При вращении диска с постоянной угловой скоростью ω получим

$$\mathcal{E}_{\text{ДС}} = \omega \int_0^R B_z(r) r dr. \quad (8)$$

Если $B_z(r) = \text{const} = B$, то формулу (8) можно упростить, введя поток через сечение магнита (а не через весь контур!): $\Phi = BS = B\pi R^2$, $\omega = 2\pi n$ (n — число оборотов). Из (8) получим очень простую формулу:

$$\mathcal{E}_{\text{ДС}} = \Phi n. \quad (9)$$

Получилось, что в данном случае ЭДС зависит не от производной потока индукции через весь контур, а от самого потока индукции через сечение цилиндра (а не всего контура).

Не следует забывать, что эта формула получена при условии равномерного распределения магнитной индукции по сечению магнита.

Некоторые авторы делали попытки защитить универсальность формулы (1) для случая униполярного генератора, рассматривая за время dt вообразимое ими увеличение площади контура dS , и получали правильную формулу для ЭДС. Но в этом случае $\mathbf{B} = \text{const}$, $e = \text{const}$, \mathbf{B} параллельно \mathbf{S} и из (1) следует

$$d(BS)/dt = e > 0, \quad dS/dt = e/B, \quad dS = \int (e/B)dt, \quad S = S_0 + (e/B)t.$$

И остается только попросить такого автора показать на чертеже, где находится контур с током, площадь которого S все время увеличивается.

Итак, при вращении магнита вокруг оси симметрии в нем или в металлическом диске внутри него возникает ЭДС, которая создает электрическое поле как внутри, так и вне магнита.

Далее мы рассмотрим конфигурацию электрического поля при вращении намагниченного шара.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НАМАГНИЧЕННОГО ШАРА

Зная распределение потенциала на поверхности и внутри вращающегося магнита, можно вычислить электрическое поле, которое создает такое распределение, и построить силовые линии этого поля. К сожалению, для цилиндра эта задача приводит к интегралам, которые не выражаются через элементарные функции. Зато для намагниченного шара она может быть точно решена.

Дело в том, что шар можно равномерно намагнитить, а в цилиндре равномерное распределение элементарных магнитных моментов приводит к неравномерному магнитному полю, которое тоже не описывается элементарными функциями.

Для намагниченного шара задача о распределении электрического потенциала при вращении шара решена, например, у И. Е. Тамма [1, с. 553, 621].

В сферической системе координат с началом в центре шара радиуса a , равномерно намагниченного вдоль оси Z с индукцией B_0 , при вращении его вокруг оси Z с угловой скоростью ω потенциал внутри u_1 и вне шара u_2 в точке $A(\theta, \phi, r)$ определяется формулами

$$u_1 = -k(0,5(3 \cos^2 \theta - 1)r^2 + a^2 - r^2), \quad r \leq a, \\ u_2 = -k(0,5(3 \cos^2 \theta - 1)a^5/r^3), \quad r \geq a,$$

где $k = \omega B_0 / (3c)$, c — скорость света.

Для построения эквипотенциалей $u_2 = \text{const} = c_1$ и силовых линий электрического поля \mathbf{E} перейдем в декартову систему координат.

Поскольку потенциал обладает цилиндрической симметрией (он не зависит от φ), мы можем ограничиться рассмотрением картины в плоскости ZOX :

$$u_2 = -0,5ka^2(2z^2 - x^2)/r^5 = c_1, \quad (2z^2 - x^2) = c_2 \cdot r^5, \quad r^5 = (z^2 + x^2)^{5/2}, \\ (2z^2 - x^2) = c_2(z^2 + x^2)^{5/2}. \text{ Получили уравнения линий равного потенциала для плоскости } ZOX.$$

Дифференциальное уравнение для силовых линий поля **E**

$$\frac{E_x}{dx} = \frac{E_z}{dz} \quad \text{или} \quad \frac{E_z}{E_x} = z'_x, \quad \text{где} \quad E_x = (u_2)'_x, \quad E_z = (u_2)'_z.$$

При вычислении E_x и E_z нам потребуется вычислить

$$(r^{-5})'_x = ((z^2 + x^2)^{-5/2})'_x = (-5/2)(z^2 + x^2)^{-7/2}2x = -5xr^{-7}.$$

Аналогично производной по x вычисляем производную по z :

$$(r^{-5})'_z = -5zr^{-7}.$$

На основе предыдущих формул вычисляем:

$$E_x = u_2'_x = 2xr^{-5} - 5xr^{-7}(x^2 - 2z^2) = \frac{x}{r^7}(2x^2 + 2z^2 - 5x^2 + 10z^2) = \\ = \frac{x}{r^7}(12z^2 - 3x^2),$$

$$u_2'_x = \frac{3x}{r^7}(4z^2 - x^2) = E_x,$$

$$E_z = u_2'_z = -4zr^{-5} - 5zr^{-7}(x^2 - 2z^2) = \frac{z}{r^7}(-4r^2 - 5(x^2 - 2z^2)) = \\ = \frac{z}{r^7}(-4x^2 - 4z^2 - 5x^2 + 10z^2) = \frac{z}{r^7}(6z^2 - 9x^2),$$

$$u_2'_z = \frac{3z}{r^7}(2z^2 - 3x^2) = E_z.$$

Таким образом, мы получили дифференциальное уравнение силовых линий **E**: $z'_x = \frac{E_z}{E_x} = \frac{(2z^2 - 3x^2)z}{(4z^2 - x^2)x}$.

Для его решения сделаем замену переменной:

$$Z = ux, \quad u = z/x, \quad z'_x = (ux)'_x = u'_x x + u.$$

$$\text{Получим } u'_x x + u = \frac{u(2u^2 - 3)}{4u^2 - 1}.$$

Преобразуем его к виду $g(u)du = \frac{dx}{x}$:

$$u'_x = \left(\frac{u(2u^2 - 3)}{4u^2 - 1} - u \right) \frac{1}{x} = \left(\frac{-2u(u^2 + 1)}{4u^2 - 1} \right) \frac{1}{x} = \frac{du}{dx},$$

$$\frac{-(4u^2 - 1)}{2u(u^2 + 1)} du = \frac{dx}{x},$$

$$g(u) = -\frac{(4u^2 - 1)}{2u(u^2 + 1)} = \frac{1}{2u(u^2 + 1)} - \frac{2u}{u^2 + 1}$$

и проинтегрируем $\int g(u)du = \int (1/x)dx$:

$$\frac{1}{2} \int \frac{du}{u(u^2 + 1)} - 2 \int \frac{udu}{u^2 + 1} = \ln x + C,$$

$$\frac{1}{2 \cdot 2} \ln \frac{u^2}{u^2 + 1} - 2 \frac{1}{2} \ln(u^2 + 1) = \ln x + C,$$

$$\ln \frac{u^2}{u^2 + 1} - 4 \ln(u^2 + 1) = 4 \ln x + C,$$

$$\ln \left(\left(\frac{u^2}{u^2 + 1} \right) / (u^2 + 1)^4 \right) = \ln(Cx^4),$$

$$u^2(u^2 + 1)^{-5} = Cx^4, \quad u = \frac{z}{x},$$

$$\frac{z^2}{x^2} \left(\frac{x^2}{z^2 + x^2} \right)^5 = Cx^4, \quad \frac{z^2 x^4}{(z^2 + x^2)^5} = C.$$

Окончательно получаем уравнение семейства силовых линий:

$$z^2 x^4 - C(z^2 + x^2)^5 = 0.$$

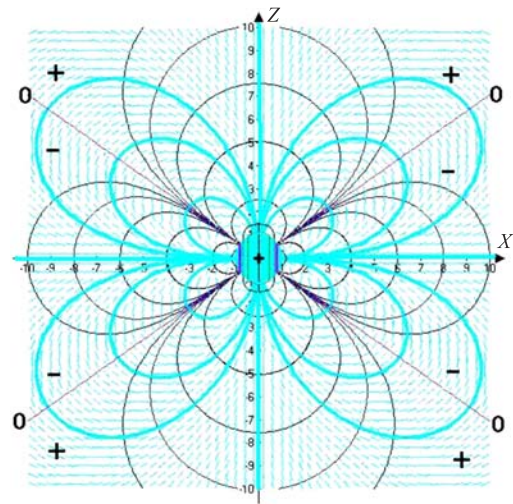
Для их построения полезно представить это уравнение в полярных координатах на плоскости XOZ :

$$r^3 = C(3 \cos^2 \varphi - 1).$$

Для построения графиков используем программу Advanced Grapher [6]. Графики приведены на рис. 1.

Линии нулевого потенциала отмечены 0. Их наклон к оси X близок к 35° . Полярность областей и линий потенциала зависит от направления вращения шара и его намагничивания. Например, два положительных полюса сверху и снизу и одно отрицательное кольцо посередине. Возможна и обратная полярность. По аналогии с диполем эту конфигурацию можно назвать «триполь». Видно, что силовые линии перпендикулярны линиям потенциала.

Вращение намагниченного шара вокруг оси Z



Эквипотенциали (тонкие) и силовые линии (толстые) электрического поля

Рис. 1.

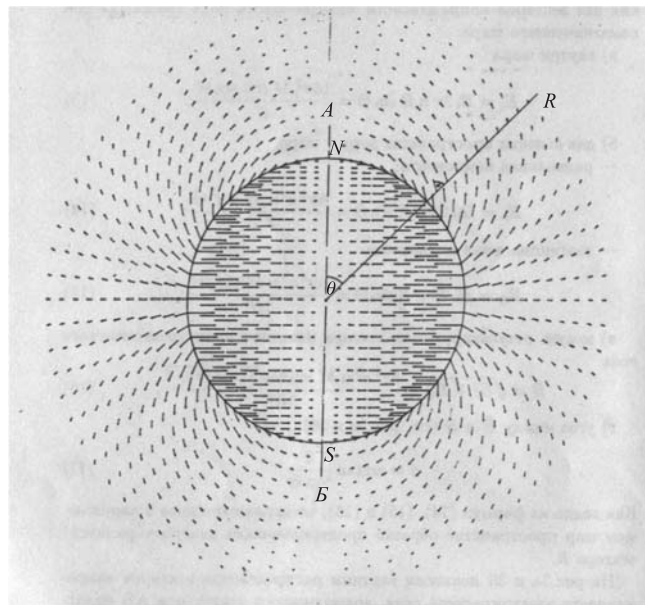


Рис. 2.

Они начинаются на положительных зарядах поверхности шара и кончаются на отрицательных зарядах его поверхности.

Внутри шара эквипотенциали — цилиндры, оси которых совпадают с осью вращения шара. Радиус цилиндра с нулевым потенциалом равен $a\sqrt{2/3}$. Силовые линии \mathbf{E} внутри шара — лучи, которые начинаются на оси вращения шара и перпендикулярны ей.

Величина \mathbf{E} растет линейно по радиусу. Поэтому плотность заряда внутри шара $\rho = \operatorname{div}(\mathbf{E}) = \text{const}$. Заряды на поверхности увеличиваются к экватору. Рассмотренную конфигурацию зарядов можно создать не только вращением шара. Если заряды зафиксировать там, где они оказались при вращении, то шар можно остановить.

Похожая картина поля получится и в случае, если на положительный шарик надеть отрицательное кольцо или если в модели Бора атома водорода считать, что плотность электрона, в среднем, равномерно распределена по его орбите.

КРИТИКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РАБОТ И ТЕОРИЙ

Наибольшее число возражений вызывает работа сторонника модели движущихся силовых линий (ДСЛ) Богача [4].

На с. 3 Богач пишет, что «с высокой вероятностью можно ожидать возникновения электрического поля при вращении симметричного магнитного. И эта возможность должна быть экспериментально проверена». Но ведь сам факт существования униполярного генератора доказывает существование электрического поля в полном соответствии с электродинамикой и теорией относительности, и нет оснований искать некое особое поле, противоречащее уравнениям Максвелла.

На с. 7 он пишет: «Если физически справедлива формула, данная Ландау и др. в [3, с.390]... то магнитные силовые линии будут вращаться и должно возникнуть электрическое поле, обусловленное этим вращением. Тогда должна получиться картина, изображенная на рис. 2».

Далее он приводит картину поля (см. рис. 2). Видно, что силовые линии выходят из шара, но не входят в него. Это означает, что незаряженный шар благодаря вращению стал заряженным, что противоречит принципу сохранения заряда. Формула Ландау, конечно, справедлива, но из нее никак *не следует* картина поля из рис. 2 и *не следует*, что силовые линии вращаются.

На с. 19 (рис. 6) мы видим еще одну картину электрического поля для цилиндра. Опять, если применить к этому рисунку теорему Гаусса о потоке вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} , то видно, что внутри и шара, и цилиндра при вращении появился электрический заряд, которого в них не было до вращения. Это противоречит принципу сохранения заряда. Экспериментальные факты для построения именно таких картин полностью отсутствуют.

На с. 21 сказано: «Исходя из изложенного, можно сделать вывод о том, что возникающее при вращении намагниченного шара электрическое поле обладает не описанными ранее в электродинамике свойствами, отличается от общепринятых вихревого и потенциального видов полей, и поэтому появляется необходимость разработки его адекватного математического описания».

Каковы же основания для столь далеко идущих выводов автора? На с. 22 читаем: «Единственный эксперимент, в котором фактически было измерено искомое электростатическое поле, выполненный И. Заевым и В. Докучаевым [5], полностью соответствует описанным выше свойствам, что подтверждает справедливость гипотезы» (Богача).

На самом деле И. Заев и В. Докучаев своим экспериментом еще раз подтвердили *наличие* электростатического поля внутри магнитной системы, которое и должно появиться в соответствии с уравнениями Максвелла и известной формулой для силы Лоренца. Это поле — основа работы униполярного генератора, который был известен ранее.

Вне магнитной системы они измерения не проводили. Об экзотических свойствах внешнего поля ни эксперимент, ни авторы не говорят ничего.

На с. 32 Богач предложил для обнаружения электрического поля поставить эксперимент, похожий на эксперимент И. Заева и В. Докучаева, но уже с магнитопроводом метрового диаметра, с применением вакуумной камеры и «современных материалов и технологий». В этом эксперименте он предлагает искать электрическое поле внутри магнитной системы. Но и без эксперимента ясно, что внутри магнитной системы образуется электрическое поле, свойства которого соответствуют законам электродинамики. Как видно из данной работы, вместо этого следовало бы искать *вне магнитной системы* отличие электрического поля от «движущихся силовых линий (ДСЛ)», спадающего как $\sim 1/r^2$, от поля, предсказанного классической теорией, которое спадает как $\sim 1/r^4$.

Теоретическое обоснование гипотезы Богача пытается дать Леус в работе [7]. В ней Леус вычисляет дивергенцию электрического поля вне шара и находит, что она не равна 0 [7, с. 134, 136]. Покажем, что для правильно вычисленного поля это не так. А именно, что вне шара $\operatorname{div}\mathbf{E} = 0$.

Выше мы видели, что потенциал электрического поля вне шара равен

$$u = k \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^3}, \quad \text{где } k = a^5 \omega B_0 / (6c).$$

Вычислим вектор \mathbf{E} поля в сферических координатах:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \operatorname{grad} u = E_r e_r + E_\theta e_\theta + E_\varphi e_\varphi, \\ E_r &= \frac{\partial u}{\partial r} = 3k \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^4}, \end{aligned}$$

$$E_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{-2 \cdot 3 \cos \theta \sin \theta k}{r^3} \frac{k}{r} = \frac{-3k \sin 2\theta}{r^4},$$

$$E_\varphi = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = 0.$$

Теперь вычислим $\operatorname{div} \mathbf{E}$ и покажем, что $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 E_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(E_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} = (S1) + (S2) + 0,$$

$$(S1) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 E_r)}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \left(-3k \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{r^2} \right)'_r = -3k \frac{-2(3 \cos^2 \theta - 1)}{r^5},$$

$$(S2) = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(E_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{r \sin \theta} \left(-3k \frac{2 \cos \theta \sin^2 \theta}{r^4} \right)'_\theta =$$

$$= \frac{-3k \cdot 2 - \sin^3 \theta + 2 \sin \theta \cos^2 \theta}{r \sin \theta r^4} =$$

$$= \frac{-3k}{r \sin \theta} \frac{2 \sin \theta}{r^4} (-\sin^2 \theta + 2 \cos^2 \theta) = -3k \frac{2(3 \cos^2 \theta - 1)}{r^5},$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = (S1) + (S2) = 0.$$

Следует еще обратить внимание сторонников модели ДСЛ на отсутствие последовательности в их рассуждениях. Они утверждают, что из движения магнитного поля (и его силовых линий) элементарных магнетиков, из которых состоит магнит, следует, что их суперпозиция — поле цилиндрически симметричного магнита — тоже движется. Применим их рассуждение к движущимся зарядам. Очевидно, что их магнитное поле (и его силовые линии) движется вместе с зарядами. Но если много таких зарядов движется по прямой, это называется электрический ток. Тогда сторонники ДСЛ должны прийти к выводу, что силовые линии неподвижного проводника с током движутся. По этой же причине движутся силовые линии неподвижного соленоида, по которому течет ток. Известно, что магнитное поле соленоида не отличается от поля цилиндрического магнита. Значит, силовые линии неподвижного магнита движутся!

Этот казус получается от непонимания того факта, что поле, образованное путем суперпозиции, не обязательно обладает всеми свойствами его составляющих полей. Оно может приобретать новое свойство, которое у составляющих полей отсутствует.

Еще одна логическая нестыковка у сторонников ДСЛ возникает с формулой для силы Лоренца. Во всех учебниках написано, что скорость \mathbf{V} , которая фигурирует в формуле для силы Лоренца (3), означает скорость того заряда,

на который действует сила. Они же, вопреки учебникам, вне магнита подставляют в качестве \mathbf{V} скорость движения источника поля. Указав, что для вращающегося магнита $\mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$, они подставляют в формулу Лоренца ω магнита, вместо того чтобы подставить 0 для неподвижной вне магнита точки, в которой измеряется поле.

В таком случае они должны признать, что на неподвижный и на вращающийся с угловой скоростью ω пробные заряды действуют одинаковые силы. То, что это противоречит и общепринятой теории, и опыту, они не замечают.

За силовыми линиями нет никакой физической реальности. Это наша модель, которая помогает нам лучше представить невидимое магнитное поле. Если эта модель помогает понять, почему таковы формулы Максвелла и Лоренца и как работает электродвигатель, то это — полезный модельный инструмент. Но если на основании такой модели искажаются формулы Максвелла и Лоренца, то нужно, как минимум, предъявить эксперимент, где доказывается ошибочность общепринятых формул.

Поиски особого, не максвелловского электрического поля встречаются не только у Богача и Леуса, но и в солидных журналах [8].

Три американских профессора из отдела физики и астрофизики Университета штата Колорадо описывают весьма дорогостоящий опыт, который они провели, исходя из своих представлений об униполярной индукции [8]. Они пытались обнаружить электрическое поле вида $\mathbf{E} = k[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$, которое, по их мнению, должно создавать движение силовых линий при вращении источника магнитного поля.

Работа [8] показывает, что идея Богача обнаружить электрическое поле вида $\mathbf{E} = k[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ не является оригинальной. Она была предложена еще до Бартлета и проверялась в опытах Бартлета и др. в более общем случае: $\mathbf{E} = k[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$.

Вот цитата из аннотации к работе [8]: «Согласно теории вращения силовых линий униполярной индукции вращающееся магнитное поле генерирует электрическое поле $\mathbf{E} = -(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$ в области, окружающей магнит... Мы напрасно искали такой эффект и заключаем, что, если магнитные силовые линии вращаются вместе с магнитом, коэффициент увлечения меньше чем $1,4 \cdot 10^{-4}$. Этот результат приблизительно в 100 раз более точный, чем измерение Кеннарда в 1912 году».

Таким образом, Богач предложил «свою» гипотезу, зная, что она ранее была уже опровергнута в опытах Бартлета и др.

Существенным недостатком всех подобных работ является то, что авторы, исходя из ДСЛ-представлений, делают опыты и выводы, не пытаясь сравнить их с расчетами по классической теории электромагнетизма, которые, как видно из этой работы, не вызывают затруднений.

Эксперимент, который подтверждает отсутствие увлечения магнитного поля при вращении симметричного магнита, описан в [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе классической теории Максвелла выведены уравнения силовых линий электрического поля, которое образуется при вращении намагниченного шара, и построена их картина. Критикуется мнение некоторых специалистов, что магнитное поле такого шара вращается вместе с ним и создает вне шара электрическое поле с особыми свойствами, противоречащими классической теории Максвелла. Показано, что представление о вращении магнитного поля при вращении осесимметричного намагниченного источника внутренне противоречиво, закон электромагнитной индукции Фарадея в форме $\mathcal{E} = -d\Phi/dt$ и не является универсальным (т. е. в отдельных случаях он не выполняется), теория Максвелла позволяет объяснить работу униполярного генератора и рассчитать его ЭДС.

Хотя работа силы Лоренца всегда равна 0, при наличии других сил эту работу может совершать одна из составляющих силы Лоренца (ее проекция).

Благодарю за полезные обсуждения А. П. Бакулева, Д. И. Казакова, Б. С. Неганова, В. Б. Приезжева.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. М.: Наука, 1966.
2. *Фейнман Р. и др.* Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. Т. 5, 6.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1992.
4. *Богач В. А.* Гипотеза о существовании статического электромагнитного поля и его свойствах. Препринт ОИЯИ Р13-96-463. Дубна, 1996.
5. *Заев Н. Е., Докучаев В. И.* О поведении линий поля вращающегося магнита. Электротехника. 1964. № 11. С. 64.
6. <http://softsearch.ru/programs/56-860-advanced-grapher-download.shtml>
<http://www.alentum.com/agrapher/>
7. *Леус В. А.* Некоторые открытые вопросы в теоретических основах электротехники // Сб. «Поиск математических закономерностей». Новосибирск: ИМ, 1999.
8. *Bartlett D. F., Monroy J., Reeves J.* Spinning Magnets and Jehle's Model of the Electron // Phys. Rev. D. 1977. V. 16, No. 12. P. 3459.
9. *Гусев А. В., Никитин В. А., Сафонов А. Н.* Экспериментальное исследование магнитного поля при вращении цилиндрически-симметричного магнита. Препринт ОИЯИ Р13-2009-159. Дубна, 2009.

Получено 30 июня 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 13.10.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 350 экз. Заказ № 57118.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/