

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Санкт-Петербургское отделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

УДК 537

Сапожников Б.Г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Санкт-Петербург, 2015

УДК 537.1:530.12

Электромагнитные поля постоянного тока. // Сапожников Б.Г.;
 СПб отд-е Инст-та геоэкологии РАН, – СПб, 2015. –15 с. –12 ил.
 – Библиогр.: 5 назв., рус. 3.
 Деп. в ВИНТИ РАН 29.01.2015 г., № 18 – В2015

В рамках специальной теории относительности и её постулатов анализируется формула силы Лоренца взаимодействия неподвижных и движущихся (прямолинейно и равномерно) силового и опытных электрических зарядов. Показана необходимость представления полного электрического поля силы Лоренца как векторной суммы «запаздывающего» и «корректирующего» полей, отвечающих формуле Р.Фейнмана. Рассмотрены интегральные поля зарядов, действующих в рельсотроне и постоянном магните.

UDC 537.1:530.12

Electromagnetic fields DC. // Sapozhnikov B.G.;
 St. Petersburg Division of Sergeev Institute of Environmental Geoscience
 – St. Petersburg, 2015. – 15 p. – 12 ill.
 – Bibliography.: 5 titles, rus. 3.
 Dep. in VINITI RAN 29.01.2015, №18 – В2015

Within the framework of the special theory of relativity and its postulates the Lorentz force formula for interaction of the static and moving (rectilinearly and evenly) electric power and test charges is analyzed. The charge «Q» is located at the origin, the charges «q» – on the vertical and horizontal axes. The analysis showed the necessity to provide the total electric field of the Lorentz force as the vector sum of "retarded" and "correcting" fields of charges, according to Feynman's formula. The paper deals also the integral fields of charges, operating in the railgun and a permanent magnet.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЗАРЯДЫ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ.....	4
1.1. Сила взаимодействия зарядов.....	4
1.2. Противоречие.....	6
1.3. Разрешение противоречия.....	7
1.4. Запаздывающее электрическое поле	7
1.5. Магнитное поле.....	9
1.6. Корректирующее электрическое поле	9
2. ЗАРЯДЫ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ.....	11
3. РЕЛЬСОТРОН.....	12
4. МАГНИТ.....	13
5. ДРУГИЕ СВОЙСТВА.....	14
6. ВЫВОДЫ.....	14
ЛИТЕРАТУРА.....	15

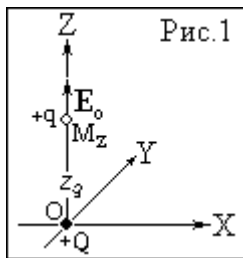
ВВЕДЕНИЕ

Постоянный электрический ток – область электродинамики, к которой относятся стационарные электромагнитные поля зарядов, движущихся со скоростью, постоянной по модулю.

Согласно специальной теории относительности (СТО) электрическое поле движущегося точечного заряда распространяется во все стороны прямолинейно с конечной скоростью света «с», одинаковой в неподвижной и движущейся системах отсчёта. В соответствии с этим электрическое поле движущегося заряда обладает в точке наблюдения рядом особенностей, одной из которых является «*запаздывающий*» характер поля, так как оно отвечает не реальному положению заряда в момент наблюдений «*t*», а предшествующему.

Ниже рассматриваются электромагнитные поля, как одиночного точечного движущегося заряда, так и интегральные поля совокупности точечных движущихся зарядов, образующих постоянный электрический ток. Используемая система единиц – СИ; среда, окружающая заряды, – вакуум.

1. ЗАРЯДЫ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ



Неподвижный силовой заряд «*+Q*» ($x=y=z=0$) действует в точке «*Mz*» на опытный заряд «*+q*» ($zq; xq=yq=0$), неподвижный или движущийся параллельно оси «*X*» с постоянной скоростью «*v*», с силой «*Fo*», определяемой вертикальным вектором напряжённости «*Eo*» электрического поля закона Кулона (рис. 1):

$$\mathbf{F}_o = q\mathbf{E}_o, \dots \dots \dots (1)$$

$$E_{ox} = E_{oy} = 0, \dots \dots \dots (2)$$

$$E_{oz} = Q/(4\pi\epsilon_0 z_q^2), \dots \dots \dots (3)$$

где « ϵ_0 » – электрическая постоянная.

1.1. Сила взаимодействия зарядов

Частными силами действия зарядов «*+Q*» и «*+q*» назовём силы « \mathbf{F}_{Qq} » и « \mathbf{F}_{qQ} », действующие со стороны одного заряда на другой, а силой *взаимодействия* зарядов – силу « \mathbf{F}_Σ », с которой заряды *отталкивают* (знак силы « $-$ ») или *притягивают* (знак силы « $+$ ») друг друга. В разных инерциальных системах отсчёта частные силы – различны, а сила взаимодействия « \mathbf{F}_Σ » – одинакова и является для электромагнитных полей *инвариантом*. Поэтому силе « \mathbf{F}_Σ » взаимодействия зарядов с модулем

$$|\mathbf{F}_\Sigma| = |\mathbf{F}_{Qq}| + |\mathbf{F}_{qQ}|, \dots \dots \dots (4)$$

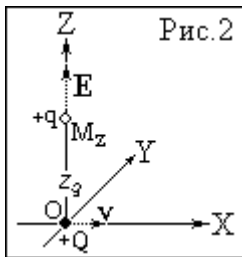
в разных системах отсчёта соответствуют **неизменные** показания динамометра, если последний можно было бы использовать для измерений.

В соответствии с законом Кулона в случае **неподвижной** пары зарядов «+Q», «+q» их частные силы действия равны по модулю и противоположны по направлению и модуль отрицательной силы « F_{Σ} » **взаимодействия** зарядов определяется удвоенным значением модулей частной силы.

В случае **неподвижного** заряда «+Q» и **движущегося** со скоростью «v» заряда «+q» модули частных сил зарядов различны, так как со стороны заряда «+q» модуль « $|F_{qQ}|$ » согласно СТО увеличен в сравнении с кулоновской силой $|F_{Qq}|$ на релятивистский множитель « γ »:

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}, \quad \beta = v/c \dots \dots \dots (5)$$

В результате модуль силы взаимодействия « F_{Σ} » для этой пары зарядов больше удвоенной частной силы пары неподвижных зарядов.



Согласно преобразованиям Лоренца для электромагнитного поля, заряд «+Q», движущийся со скоростью «v» вдоль оси «X», находясь в точке «O», действует на неподвижный заряд «+q» в точке « M_z » также, как и в предыдущем рассмотрении, вертикальным вектором «E» электрического поля, но увеличенным по модулю на множитель « γ » [1] (рис.2):

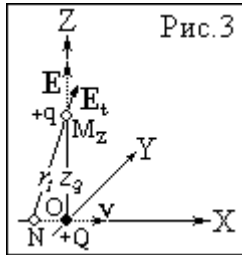
$$E = \gamma E_0 \dots \dots \dots (6)$$

В итоге на вертикальной оси «Z» модуль силы **взаимодействия** « F_{Σ} » пары зарядов «+Q», «+q», один из которых является **неподвижным**, а другой – **движущимся**, в любой инерциальной системе отсчёта сохраняется **неизменным** и **увеличенным**.

Когда **движущийся** заряд «+Q» перемещается вдоль оси «X» от $-\infty$ до $+\infty$, график зависимости поля « E_z » заряда «+Q» в точке « M_z » от координаты «x» заряда имеет симметричный вид с максимумом на **вертикальной** оси «Z» (при « $x = 0$ »). Передвижению заряда «+Q» здесь отвечает **удивительный** эффект «**мгновенного**» распространения его электрического поля «E» по вертикали: в точках наблюдения строго над **движущимся** зарядом (« $x_q = x$ », $z_q = \text{const}$) вектор «E» всё время сохраняется **вертикальным** и **неизменным** по модулю (характеристики эллипсоида поля «E» заряда «+Q» «перемещаются» синхронно с зарядом как «единое» целое).

На **движущийся** опытный заряд «+q» силовой заряд «+Q», **движущийся** по оси «X» синхронно с опытным, в дополнение к рассмотренной выше электрической напряжённости «E» действует ещё и **магнитным** полем – вектором «B» магнитной индукции.

Опытный заряд «+q» также действует своим магнитным полем на силовой заряд «+Q». Увеличенная на множитель « γ » *электрическая* сила взаимодействия зарядов компенсируется здесь действием *магнитных* сил полей «**V**». По этой причине суммарная сила взаимодействия «**F_Σ**» движущихся зарядов «Q» и «q» остаётся и в этом случае *инвариантом*, равным силе взаимодействия неподвижных зарядов «+Q» и «+q».



Согласно СТО электрическое поле заряда «+Q», *движущегося* вдоль оси «X», распространяется по всем направлениям от текущей точки заряда «+Q» со скоростью света «c». В результате в момент времени « $t_0 = 0$ », когда заряд «+Q» находится в точке «O» начала координат, в точке « M_z » должно наблюдаться «запаздывающее» поле «**E_t**» заряда «+Q» (рис.3).

В точке « M_z » вектор «**E_t**» напряжённости *запаздывающего* поля по модулю меньше *вертикального* вектора «**E**» и отклоняется от вертикали в положительную сторону оси «X» (рис.3). Действительно, пока электрическое поле «**E_t**» распространяется в интервале времени « $\Delta t = t_0 - t_N$ » вдоль расстояния « $r_t > z_q$ » (из «ретроточки» «N» заряда «+Q» в точку « M_z »), заряд «+Q» в момент времени « t_0 » успевает достичь точки «O» начала координат. Поэтому электрическое поле «**E_t**» является *запаздывающим*.

Когда движущийся заряд «+Q» перемещается вдоль оси «X» от $-\infty$ до $+\infty$, график зависимости составляющей «**E_{tz}**» в точке « M_z » оси «Z» от координаты заряда «x» в отличие от аналогичной зависимости для составляющей «**E_z**» имеет несимметричный вид с максимумом « $E_{tz} = E_{ozmax}$ », отвечающим координате « $x = \beta z$ » заряда «+Q». Для этой координаты «x» вектор поля «**E_t**» в точке « M_z » направлен по *вертикали*, что соответствует вертикальному распространению *запаздывающего* поля «**E_t**» заряда «+Q» в его новой ретроточке, отвечающей « $x_t = 0$ ».

1.2. Противоречие

С одной стороны, согласно «правилам СТО преобразования полей» вектор «**E**» поля движущегося заряда «+Q» в точке « M_z » в момент времени « t_0 » должен быть строго вертикальным и по модулю большим модуля кулоновского поля «**E₀**».

С другой стороны, согласно «положению СТО о конечной скорости «c» распространения электрического поля» вектор электрического поля *движущегося* заряда «+Q» в той же точке « M_z » и в тот же момент времени « t_0 » должен быть вектором «**E_t**» *запаз-*

дывающего электрического поля, который отклоняется от вертикали к оси «Х» и по модулю *меньше* вертикального вектора «**E**».

1.3. Разрешение противоречия

Указанное противоречие можно устранить, если известные силовые характеристики *запаздывающего* электромагнитного поля (вектор «**E_t**» и вектор «**B**» магнитного поля) дополнить вектором «**E_μ**» – представляющим напряжённость «*корректирующего*» электрического поля [2] – второй член уравнения Фейнмана [1, с.142].

Электрическое поле «**E₀**» неподвижных зарядов является электростатическим, *потенциальным* полем. Частные силы действия зарядов и сила их взаимодействия определяются здесь только одной силовой характеристикой поля – вектором электрической напряжённости «**E₀**», связанным с электрическим потенциалом поля «φ» соотношением «**E₀** = -gradφ» и определяющим силу «**F_q** = q**E₀**», действующую на заряд «q».

Электрическое поле «**E_t**» заряда, движущегося с постоянной скоростью |v|, является *запаздывающим* (изменяющимся, распространяющимся со скоростью «c»), *вихревым*. В отличие от *потенциального* поля «**E₀**» *вихревое* поле «**E_t**» обладает, по крайней мере, тремя *силовыми* характеристиками, обусловленными: 1 – вектором «**E_t**» (собственно напряжённость электрического поля), 2 – вектором «rot**E_t**» (основа выражения для магнитной индукции «**B**») и 3 – вектором «rotrot**E_t**» (основа выражения для «*корректирующего*» электрического поля «**E_μ**»).

Это положение о силовых характеристиках вихревого поля непосредственно связано с уравнениями Максвелла (7), (8) для переменного электромагнитного поля, согласно которым для каждой гармонике вихревого поля частотой «f» выполняются равенства, доказывающие связь *силовых* векторов «rot**E**» и «rotrot**E**» с *силовыми* полями «**B**» и «**E**»:

$$\text{rot}\dot{\mathbf{E}} = i\omega\dot{\mathbf{B}}, \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{rotrot}\dot{\mathbf{E}} = (\omega^2/c^2)\dot{\mathbf{E}}, \dots\dots\dots(8)$$

где *i* – мнимая единица, $\omega = 2\pi f$, **E** и **B** – комплексные амплитуды электрического и магнитного полей гармоник.

1.4. Запаздывающее электрическое поле

В основе *запаздывающего* поля «**E_t**» силового заряда «+Q», *движущегося* по оси «Х», лежит его поле «**E**», отнесённое к *ретроточке* заряда «+Q» с переменной ретрокоординатой «x_r». По этой причине для записи формулы поля «**E_t**» в точке наблюдения

« M_z » достаточно в формулах кулоновского электрического поля *движущегося* заряда [2] расстояние « r » (на рис.3 « $r = z_q$ ») от действительного положения заряда « $+Q$ » с координатой « x » (на рис.3 « $x = 0$ ») до точки наблюдения « M_z » заменить на соответствующее расстояние « r_t » от *ретроточки* « N » заряда « $+Q$ ». При этом расстояние « r_t » и интервал « $x - x_t$ » должны удовлетворять уравнению *запаздывания*:

$$r_t/c = (x - x_t)/v \dots \dots \dots (9)$$

Решения уравнения (9) относительно ретрокоординаты « x_t » и запаздывающего расстояния « r_t », выраженные через координаты « x » заряда « $+Q$ », имеют вид:

$$x_t = \gamma^2(x - \beta k_t r), \dots \dots \dots (10)$$

$$r_t = \gamma^2(k_t r - \beta x), \dots \dots \dots (11)$$

где $k_t = [1 - \beta^2(z_q/r)^2]^{1/2}$.

При координате « $x = 0$ » действительного положения заряда « $+Q$ » его *ретроточка* « N » согласно (10), (11) определяется ретрокоординатой « $x_t = -\gamma\beta z_q$ », а *запаздывающее* расстояние « $r_t = \gamma z_q$ » (рис.3).

Выражения для запаздывающей координаты « x_t » (10) и величины « $1/r_t^3$ » (11) можно упростить, используя представление их в виде рядов по степеням параметра « β » и ограничившись членами ряда с множителями « β^0 », « β^1 », « β^2 »:

$$x_t \approx (1 + \beta^2) x - \beta r, \dots \dots \dots (12)$$

$$(1/r_t^3) \approx (1/r^3) [(1 - 3\beta^2) + 3\beta(x/r) + 6\beta^2(1 - 0.75 z_q^2/r^2)] \dots \dots (13)$$

Для постоянных токов, используемых в технике, безразмерная величина « β^2 » имеет порядок 10^{-28} – 10^{-22} . Поэтому здесь и далее удержание в формулах лишь первых членов разложений функций в ряды по параметру « β » обеспечивает для технических приложений весьма высокую точность приближенных равенств, отмеченных знаком « \approx ».

Выражения (12), (13) позволяют представить в виде степенных рядов по параметру « β » компоненты *запаздывающего* поля « E_t » в точке наблюдения « M_z »:

$$E_{tx} \approx [(1 - 5\beta^2) + 3\beta(x/r) + 6\beta^2(1 - 0.75 z_q^2/r^2)] E_{ox} + \beta E_{or}, \dots (14)$$

$$E_{ty} = E_{oy} = 0, \dots \dots \dots (15)$$

$$E_{tz} \approx [(1 - 3\beta^2) + 3\beta(x/r) + 6\beta^2(1 - 0.75 z_q^2/r^2)] E_{oz}, \dots \dots \dots (16)$$

где $E_{ox} = -k_Q x/r^3$, $E_{oz} = k_Q z_q/r^3$, $E_{or} = k_Q/r^2$, $r = (x^2 + z_q^2)^{1/2}$, $k_Q = Q/4\pi\epsilon_0$.

Когда движущийся заряд « $+Q$ » находится в начале координат « $x = 0$ », его запаздывающее поле « E_t » (14)-(16) в точке « M_z » определяется выражениями:

$$E_{tx} \approx \beta E_{oz}, \dots \dots \dots (17)$$

$$E_{ty} = 0, \dots \dots \dots (18)$$

$$E_{tz} \approx [1 - (3/2) \beta^2] E_{oz}, \dots \dots \dots (19)$$

1.5. Магнитное поле

Учитывая (14)-(16), компоненты вектора «rotE_t» *запаздывающего* поля «E_t» в точке «M_z» могут быть представлены в виде:

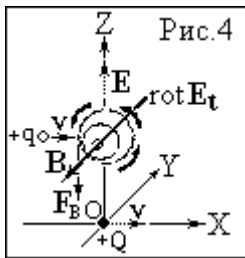
$$\text{rot}_x \mathbf{E}_t = 0, \dots \dots \dots (20)$$

$$\text{rot}_y \mathbf{E}_t = \partial \partial z (E_{tx}) - \partial \partial x (E_{tz}), \dots \dots \dots (21)$$

$$\text{rot}_z \mathbf{E}_t = 0, \dots \dots \dots (22)$$

Отсюда следует, что в плоскости «ZOX» вектор «rotE_t» (рис.4) имеет лишь «у»-составляющую (21), вычисление которой на основе (17), (19), (21) приводит к следующему результату:

$$\text{rot}_y \mathbf{E}_t \approx - (3/r) [(5/3)\beta - 2(1 - 6.5\beta^2) (x/r) - 8\beta(x^2/r^2) - 20\beta^2(x^3/r^3) - 5\beta^2(xz_q^2/r^3)] E_{oz} \dots (23)$$



Магнитное поле «B» заряда «+Q», движущегося по оси «X», в точке «M_z» имеет также только «у»-составляющую «B_y» вектора «B» (рис.4):

$$B_y = - (\mu_0/4\pi) (v/z_q^2) Q, \dots \dots \dots (24)$$

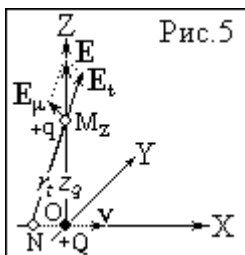
Учитывая выражения (2), (23), (24), а также выражение для магнитной постоянной «μ₀ = 1/(ε₀c²) = 4π 10⁻⁷ ЗН/М», имеем:

$$B_y = - (\beta/c) E_{oz} = k_B \text{rot}_y \mathbf{E}_t, \dots \dots \dots (25)$$

где «k_B = z/(5c)» – коэффициент пропорциональности в точке «M_z» магнитного поля «B» вектору «rotE_t».

На рис.4 показано *взаимодействие* силы Ампера «F_B = q[vB]» магнитного поля «B» (вектора «rotE_t») *движущегося* силового заряда «+Q» с *движущимся* зарядом «+q».

1.6. Корректирующее электрическое поле



Движущийся заряд «+Q» создаёт в точке наблюдения «M_z» (рис.5) два известных электрических поля: *полное* строго вертикальное поле «E» (5) и *частное* наклонное, запаздывающее поле «E_t» (8). Вполне очевидно, что для формирования *полного вертикального* поля «E» полю «E_t» необходима «поддержка» – помощь «*корректирующего*» электрического поля «E_μ»:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t + \mathbf{E}_\mu \dots \dots \dots (26)$$

Как отмечено выше (раздел 1.2), основу *корректирующего* поля « \mathbf{E}_μ » составляет свойство *запаздывающего* поля « \mathbf{E}_t » – вектор « $\text{rot rot } \mathbf{E}_t$ ».

Соотношения (20)-(22), полученные выше для вектора « $\text{rot } \mathbf{E}_t$ », позволяют представить составляющие вектора « $\text{rot rot } \mathbf{E}_t$ » в точке « M_z » в виде:

$$\text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t = -\partial \partial z (\text{rot}_y \mathbf{E}_t), \dots \dots \dots (27)$$

$$\text{rot}_y \text{rot } \mathbf{E}_t = 0, \dots \dots \dots (28)$$

$$\text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t = +\partial \partial x (\text{rot}_y \mathbf{E}_t), \dots \dots \dots (29)$$

Согласно (20)-(22) и (27)-(29) вектор « $\text{rot rot } \mathbf{E}_t$ » ортогонален вектору « $\text{rot } \mathbf{E}_t$ », что указывает на взаимную ортогональность векторов *корректирующего* электрического поля « \mathbf{E}_μ » и *магнитного* поля « \mathbf{B} ». Вычисление выражений (27), (29) приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned} \text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t \approx & - (3/r^2) [-(5/3) (1-4z_q^2/r^2)\beta + 2(1-6.5\beta^2) (x/r) + 8\beta(x^2/r^2) + 20\beta^2(x^3/r^3) - \\ & - 10(1-8\beta^2) (xz_q^2/r^3) - 48\beta(x^2z_q^2/r^4) - 140\beta^2(x^3z_q^2/r^5) - 35\beta^2(xz_q^4/r^5)] E_{or}, \dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t \approx & + (3/r^2) [2(1-6.5\beta^2) + (68/3)\beta(x/r) - 10(1-12.5\beta^2) (x^2/r^2) - 48\beta(x^3/r^3) - \\ & - 140\beta^2(x^4/r^4) - 35\beta^2(x^2z_q^2/r^4) + 5\beta^2(z_q^2/r^2)] E_{oz}, \dots \dots \dots (31) \end{aligned}$$

Для движущегося заряда «+Q» в точке « M_z » оси «Z» ($x = 0, r = z_q$) соотношения (30), (31) упрощаются:

$$\text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t \approx - (15\beta/z_q^2) E_{oz}, \dots \dots \dots (32)$$

$$\text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t \approx [6(1-4\beta^2)/z_q^2] E_{oz}, \dots \dots \dots (33)$$

На основе векторной суммы (26) и соотношений (6), (14), (16), (32), (33) в точке « M_z » может быть выполнено определение коэффициентов пропорциональности « k_{Ex} » и « k_{Ez} », связывающих составляющие « $E_{\mu x}$ » и « $E_{\mu z}$ » корректирующего электрического поля « \mathbf{E}_μ » с соответствующими составляющими « $\text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t$ » и « $\text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t$ » вектора двойного ротора поля « \mathbf{E}_t »:

$$k_{Ex} = (E_x - E_{tx}) / \text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t \approx (1/15) z_q^2, \dots \dots \dots (34)$$

$$k_{Ez} = (E_z - E_{tz}) / \text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t \approx (1/3) \beta^2 z_q^2 \dots \dots \dots (35)$$

Отсюда для *корректирующего* поля « \mathbf{E}_μ » в точке « M_z » (рис.5) имеем:

$$E_{\mu x} = k_{Ex} \text{rot}_x \text{rot } \mathbf{E}_t \approx -\beta E_{oz}, \dots \dots \dots (36)$$

$$E_{\mu z} = k_{Ez} \text{rot}_z \text{rot } \mathbf{E}_t \approx 2\beta^2 E_{oz}, \dots \dots \dots (37)$$

2. ЗАРЯДЫ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ

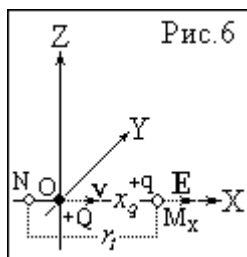


Рис. 6

При расположении точки наблюдения « M_x » с зарядом « $+q$ » ($x_q; z_q=y_q=0$) на горизонтальной оси « X », по которой перемещается заряд « $+Q$ », определения полей заряда « $+Q$ » несколько упрощаются, так как на этой оси нет роторов запаздывающего поля « E_t » и соответственно отсутствуют магнитное « B » и корректирующее « E_μ » поля (рис.6).

Заряд « $+Q$ », равномерно *движущийся* со скоростью « v » в положительном направлении оси « X », согласно СТО действует в точке « M_x » только горизонтальным вектором *полного* (запаздывающего) поля « E » (38), как на *неподвижный*, так и на *движущийся* со скоростью « v » по оси « X » заряд « $+q$ ». Причём в точке « M_x » (вместо (5) – *увеличения* модуля вектора полного поля « E » в точке « M_x ») согласно формулам преобразования Лоренца отмечается *уменьшение* модуля « E » в сравнении с модулем вектора « E_0 » кулоновского поля *неподвижного* заряда « $+Q$ »[1]:

$$E = (1 - \beta^2) E_0 \dots \dots \dots (38)$$

Здесь необходимо отметить, что координаты осей « Z » и « Y » *неподвижной* и координаты осей « Z' » и « Y' » *движущейся* (по оси « X ») систем отсчёта в обеих системах сохраняются *неизменными*. По этой причине для согласования на осях « Z' » и « Y' » наблюдаемых силовых действий электромагнитных полей с *запаздывающим* полем « E_t » природе *необходимо* введение *магнитного* поля « B » (25) и *корректирующего электрического* поля « E_μ » (36), (37).

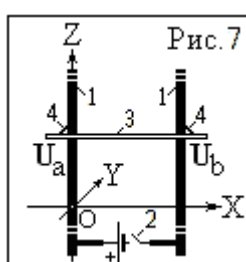
В тоже время законы изменения координат « X » и « X' » горизонтальных осей различны в *неподвижной* и *движущейся* системах отсчёта. Последнее позволяет природе *без введения* дополнительных электромагнитных полей уравнивать в точке « M_x » *наблюдаемое* (38) электрическое поле « E » *движущегося* заряда « $+Q$ » с его *запаздывающим* полем « $E = E_t$ ». В противном случае (при *неизменных* координатах оси « X » в разных системах отсчёта) полное поле « E » было бы равно:

$$E = (1 - \beta)^2 E_0 \dots \dots \dots (39)$$

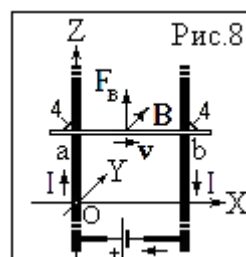
Далее, от рассмотрения электромагнитных полей одного прямолинейно и равномерно движущегося заряда « $+Q$ » перейдём к анализу примеров устройств с интегральными полями последовательностей *неподвижных* зарядов и зарядов, *движущихся*, образующих *постоянный* ток в линейных проводниках. Особенность рассмотрения состоит в учёте *корректирующего* поля « E_μ » движущихся зарядов, обеспечивающего *работоспособность* рассматриваемых устройств.

Для упрощения решений электромагнитные поля линейных токов « I » будем рассматривать как поля 2-х почти совмещённых непрерывных линейных последовательностей точечных зарядов: неподвижных **отрицательных** и движущихся (механической силой со скоростью « v ») **положительных**. Такой подход (изменение знаков зарядов и замена электрической силы – механической), ничего не меняющий по существу, позволяет упростить рассмотрение вопроса: 1) совместить **направление** скорости движущихся зарядов с **направлением** тока; 2) исключить **необходимость** учёта электростатических полей, обусловленных активными сопротивлениями линейных проводников.

3. РЕЛЬСОТРОН



Основными деталями «рельсотрона» (рис.7) являются два параллельных линейных проводника (1) – металлические шины («рельсы»), с одной стороны, замкнутые на источник постоянного тока с выключателем (2), с другой, – на «снаряд» (3) «рельсотрона» – короткую, перпендикулярную «рельсам» металлическую перемычку, способную скользить по «рельсам».

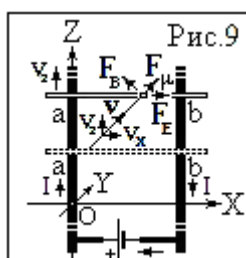


При включении тока на «снаряд» подаётся рабочее напряжение « U_{ab} » и в цепи рельсотрона идёт ток « I ».

Ток « I » в «рельсах» действуют с силой Ампера « F_B » магнитного поля « B » на движущиеся со скоростью « v » параллельно оси « X » **положительные** заряды « q » в «снаряде» рельсотрона (рис.8.).

Однако, при включённых тормозах (4) «снаряд» неподвижен, хотя и находится под **действием** силы « F_B ». Если тормоза выключить, то «снаряд», сохраняя контакт с «рельсами», начинает перемещаться вдоль «рельс» в положительном направлении оси « Z ».

Вначале «снаряд» движется с ускорением, а затем, если сила трения достаточна, перемещается равномерно с постоянной скоростью « v » вплоть до конца «рельс», где выбрасывается из устройства, действуя на «поражение».



При движении «снаряда» изменяется **траектория** (и соответственно направление скорости « v ») **движущихся** зарядов « q » – траектория движения зарядов становится **диагональной** (рис.9.). По этой причине сила « F_B » магнитного поля ориентируется перпендикулярно **новой** траектории зарядов и, следовательно, как и обычно, «уклоняется» от работы.

Работу по перемещению «снаряда» берут на себя *электрические* силы – в основном сила « \mathbf{F}_μ » *корректирующего* поля, всегда перпендикулярная силе Ампера « \mathbf{F}_B », и сила « \mathbf{F}_E » электрического поля, перемещающая заряды по цепи рельсотрона.

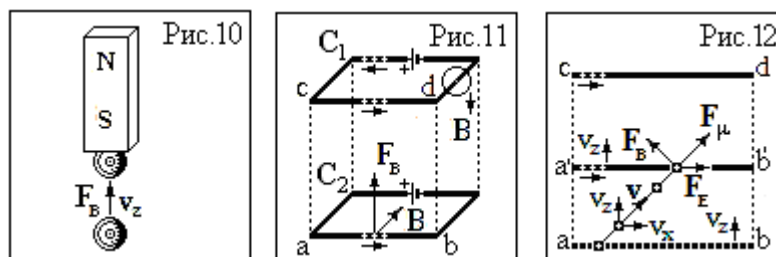
В настоящее время работу рельсотрона по перемещению «снаряда», связывают исключительно с работой силы Ампера « \mathbf{F}_B », под действием которой «...незакреплённый проводник с током перемещается в магнитном поле» [3, с.441]. Нетрудно показать, что определяемая в ссылке [3] элементарная сила Ампера « $d\mathbf{F}_B$ », действующая на малый элемент « $d\mathbf{l}$ » длины проводника («снаряда») с электрическим током « I » (рис.9), представляет собой не что иное, как «*неработоспособную*» магнитную часть силы Лоренца:

$$d\mathbf{F}_B = I [d\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}] = \tau v [d\mathbf{l} \cdot \mathbf{B}] = \tau dl [v\mathbf{B}] = dq [v\mathbf{B}], \dots (40)$$

где τ – линейная плотность электрических зарядов « q ».

Таким образом, магнитное поле « \mathbf{B} », в отличие от корректирующего поля « \mathbf{E}_μ », не имеет какого-либо отношения к работе по перемещению «снаряда» рельсотрона.

4. МАГНИТ



Неподвижный постоянный магнит поднимает стальной шарик, совершая *работу* по его перемещению в поле силы тяжести (рис.10). Кажется вполне очевидным, что работа магнита осуществляется силой « \mathbf{F}_B » магнитного поля « \mathbf{B} ». Однако и в этом случае магнитное поле « \mathbf{B} » также «уклоняется» от работы и её в основном выполняет *корректирующее* электрическое поле « \mathbf{E}_μ ».

Действительно, выделим в неподвижном магните среди контуров с элементарными токами один из контуров « C_1 », а в стальном шарике – элементарный токовый контур « C_2 » (рис.11). Условно контуры будем считать прямоугольными с плоскостями, перпендикулярными вектору магнитного поля « \mathbf{B} ». Далее, достаточно рассмотреть лишь одну пару сторон контуров – стороны « cd » и « ab ».

Контур « C_1 » и сторона « cd » – *неподвижны*. Вполне очевидно, что контур « C_2 » и его сторона « ab » перемещаются вверх силой « \mathbf{F}_μ » диагонального *корректирующего* поля « \mathbf{E}_μ » (рис.12) – также, как и в случае рельсотрона в разделе 3 (рис.9).

5. ДРУГИЕ СВОЙСТВА

Выше рассмотрены *свойства* запаздывающего электрического поля « \mathbf{E}_t » – магнитное « \mathbf{B} » и корректирующее « \mathbf{E}_μ » поля, обусловленные соответственно силовыми векторами однократного и двукратного роторов поля « \mathbf{E}_t ». Однако для общего случая *постоянного* тока цепочка силовых векторов, по-видимому, не прерывается на двукратном роторе. Об этом свидетельствует формула Фейнмана [1, с.142] для *полного* электрического поля « \mathbf{E} » произвольно движущегося заряда:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t + (r_t/c) d/dt(\mathbf{E}_t) + (r_t/c)^2 |\mathbf{E}_t| d^2/dt^2(\mathbf{e}_t), \dots \dots \dots (41)$$

где « $\mathbf{e}_t = \mathbf{r}_t/r_t$ » – единичный вектор запаздывающего электрического поля « \mathbf{E}_t », направленный от точки « N » запаздывающего положения заряда « $+Q$ » к точке « M_2 ».

При отсутствии ускорения (прямолинейное и равномерное движение заряда) полное поле « \mathbf{E} » отвечает первым двум членам формулы (41) – векторной сумме *запаздывающего* « \mathbf{E}_t » и *корректирующего* « \mathbf{E}_μ » полей. При наличии центрального или осеостремительного ускорений (равномерное движение заряда по окружности или постоянный ток в витках соленоида) в формировании электрического поля « \mathbf{E} » движущегося заряда принимает участие третий член формулы (41), связанный лишь с *изменением направления* движения заряда « $+Q$ ».

В результате вокруг соленоида с постоянным током или вокруг эквивалентного ему стержневого магнита согласно (41) вполне допустимо возникновение «*кругового*» электрического поля « \mathbf{E}_c » – «другого свойства» *запаздывающего* электрического поля « \mathbf{E}_t », дополняющего рассмотренные выше известные свойства – магнитное « \mathbf{B} » и корректирующее « \mathbf{E}_μ » поля. Действительно вокруг стержневого магнита в эксперименте Эренберга-Сидая-Аронова-Бома [2, 4, 5] зарегистрировано физическое поле (по-видимому, электрическое), действующее на движущиеся электрические заряды – электроны.

6. ВЫВОДЫ

Подводя итоги рассмотрения электрических « \mathbf{E} », « \mathbf{E}_t », « \mathbf{E}_μ » и магнитного « \mathbf{B} » полей *равномерно и прямолинейно* движущихся зарядов « $+Q$ », можно заключить:

– *запаздывающее* электрическое поле « \mathbf{E}_t » движущегося заряда « $+Q$ » является *вихревым* и соответственно вместо одной (« \mathbf{E}_0 » – для потенциального поля) имеет *три* силовых характеристики (« \mathbf{E}_t », « \mathbf{E}_μ », « \mathbf{B} »);

– в общем случае **полное** электрическое поле «**E**» движущегося заряда представлено суммой его частных полей – **запаздывающего** поля «**E_t**» и его свойства – **корректирующего** поля «**E_μ**», обусловленного вектором «**rotrotE_t**»;

– магнитное поле «**B**» также определяется **запаздывающим** полем «**E_t**», так как представлено другим его свойством – вектором «**rotE_t**»;

– для точек наблюдения «**M**» (x_q, y_q, z_q) эллипсоид полного электрического поля «**E**» заряда «**+Q**» ($x; y=z=0$), **движущегося** по горизонтальной оси «**X**», определяется: вне оси «**X**» – суммой векторов **запаздывающего** «**E_t**» и **корректирующего** «**E_μ**» полей, а на оси «**X**» – только вектором **запаздывающего** поля «**E_t**»:

$$E_x = \gamma k_Q (x_q - x) [\gamma^2 (x_q - x)^2 + y_q^2 + z_q^2]^{-3/2}, \dots (42)$$

$$E_y = \gamma k_Q y_q [\gamma^2 (x_q - x)^2 + y_q^2 + z_q^2]^{-3/2}, \dots (43)$$

$$E_z = \gamma k_Q z_q [\gamma^2 (x_q - x)^2 + y_q^2 + z_q^2]^{-3/2}; \dots (44)$$

– при скорости «**v**» движущихся зарядов «**+Q**», равной нулю, формулы (42)-(44) переходят в уравнения закона Кулона;

– примеры устройств с интегральными источниками электромагнитного поля постоянного тока подтверждают **«работоспособность»** электрических полей «**E**», «**E_t**», «**E_μ**» в противовес **«неработоспособности»** магнитного поля «**B**».

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6. Электричество и магнетизм. М.: «МИР», 1966. 340 с.

[2]. Сапожников Б. Г. Запаздывающее электрическое поле постоянного тока. // Деп. в ВИНТИ РАН 22.06.2010, № 389 – В2010, 37 с.

[3]. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. 7-е изд., исправ. М.: Наука, 1979. 949 с.

[4]. Ehrenberg W., Siday R. E. The Refractive Index in Electron Optics and the Principles of Dynamics. // Proc. Phys. Soc. London Sect. B 62, p.8 – 21 (1949).

[5]. Aharonov Y., Bohm D. Significance of electromagnetic potentials in quantum theory. // Phys. Rev. 115, p.485 – 491 (1959).