
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 53.082.72

DOI 10.25587/2222-5404-2023-20-4-23-30

Эксперимент по проверке гипотез униполярной индукции

В. Б. Тимофеев, Т. Е. Тимофеева ✉

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ te.timofeeva@s-vfu.ru

Аннотация. Явление униполярной индукции тесно связано с проблемой электродинамики вращающихся систем отсчета. Попытки применения общей теории относительности для построения электродинамики вращающихся систем пока не привели к общепризнанной теории. Разные авторы получают разные системы уравнений электродинамики во вращающихся системах отсчета и разные модели электрического поля вращающегося магнита. Эти модели можно тестировать в экспериментах с вращающимися магнитами. В работе выполнен эксперимент по проверке двух моделей электрического поля вращающегося намагниченного шара. Теоретические модели предсказывают разные значения электрического потенциала униполярной индукции на полюсе и экваторе шара относительно бесконечности. В эксперименте выполнены прямые измерения потенциала полюса и экватора вращающегося намагниченного шара относительно заземленного экрана. Результаты эксперимента противоречат квадрупольной модели и соответствуют модели электрического поля, получаемой применением преобразований Лоренца для векторов поля, как внутри шара, так и вне его.

Ключевые слова: униполярная индукция, намагниченный шар, магнитный момент, вращение, теория относительности, электрическое поле, электрический потенциал, магнитное поле, электрический квадруполь, емкостной зонд.

Для цитирования: Тимофеев В. Б., Тимофеева Т. Е. Эксперимент по проверке гипотез униполярной индукции. Вестник СВФУ. 2023, Т. 20, №4. С. 23–30. DOI:10.25587/2222-5404-2023-20-4-23-30

Unipolar induction hypothesis testing experiment

V. B. Timofeev, T. E. Timofeeva ✉

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ te.timofeeva@s-vfu.ru

Abstract. The phenomenon of unipolar induction is closely related to the problem of electrodynamics of rotating reference frames. Attempts to apply the general relativity theory to construct the electrodynamics of rotating systems have not yet led to a universally recognised theory. Various authors derive different systems of electrodynamics equations in rotating reference frames and different models of the electric field of a rotating magnet. These models can be tested in experiments with rotating magnets. In this work, an experiment is performed to test two models of the electric field of a rotating magnetised sphere. The theoretical models predict different values of the electric potential

of unipolar induction at the pole and equator of the sphere relative to infinity. In the experiment, direct measurements of the potential of the pole and equator of a rotating magnetised sphere relative to a grounded screen are performed. The experimental results contradict the quadrupole model and correspond to the electric field model obtained by applying Lorenz transformations for the field vectors both inside and outside the sphere.

Keywords: unipolar induction, magnetised sphere, magnetic moment, rotation, relativity theory, electric field, electric potential, magnetic field, electric quadrupole, capacitive probe.

For citation: Timofeev V. B., Timofeeva T. E. Unipolar induction hypothesis testing experiment. Vestnik of NEFU. 2023, Vol. 20, No. 4. Pp. 23–30. DOI: 10.25587/2222-5404-2023-20-4-23-30

Введение

Исторически проблема униполярной индукции заключалась в ответе на вопрос о месте возникновения электрического поля и соответствующей электродвижущей силы: во вращающемся магните или в неподвижных проводах, подключенных к магниту скользящими контактами. Специальная теория относительности ответила на этот вопрос в случае поступательного движения магнита. Согласно СТО движущийся магнит электрически поляризуется [1]. Это электрическое поле действует на заряды в неподвижных проводниках, создавая электродвижущую силу. Действие этого поля на заряды в движущемся магните компенсировано действием силы Лоренца, в магните электродвижущая сила не возникает. Таким образом, специальная теория относительности помещает электродвижущую силу в неподвижные провода, подключенные к движущемуся магниту. В случае вращения магнита сопутствующая система отсчета оказывается неинерциальной и применять преобразования СТО представляется некорректным. Поэтому дискуссии о методах описания униполярной индукции продолжаются до сих пор. Старая проблема униполярной индукции трансформировалась в проблему описания потенциальных электрических полей вращающихся магнитов.

В опытах начала прошлого века с вращающимися соленоидами электрическое поле в лабораторной системе отсчета обнаружено не было [2–4]. В то же время в опытах Вильсонов [5] с вращающимся магнитным диэлектриком электрическое поле в лабораторной системе отсчета обнаруживалось в полном соответствии с преобразованиями СТО. Споры по электродинамике вращающихся тел продолжились и в наше время, даже был повторен опыт с вращающимся магнитным диэлектриком [6], который подтвердил результаты опыта Вильсонов. Попытка применить общую теорию относительности к вращающейся намагниченной среде не привела пока к существенным результатам в понимании этого явления [7]. В настоящее время для описания униполярной индукции применяют преобразования электромагнитных полей в сопутствующих локальных инерциальных системах отсчета, используя специальную теорию относительности [8, 9]. Существуют две модели потенциального электрического поля вращающегося равномерно намагниченного шара в вакууме. Одна из моделей получается из применения преобразований Лоренца для электромагнитного поля внутри шара и применения уравнения Лапласа за пределами шара. Решение соответствующей краевой задачи приводит к квадрупольному электрическому полю [8, 9]. Другая модель получается путем прямого преобразования электромагнитного поля из системы отсчета, сопутствующей шару, в лабораторную систему отсчета как внутри, так и за пределами намагниченного шара. Электрическое поле, полученное вторым способом, имеет вид силы Лоренца, деленной на заряд [10]. Электрические потенциалы точек на поверхности шара

имеют определенные значения по отношению к нулевому потенциалу на бесконечности (заземленный экран). Обе эти модели дают одинаковую разность потенциалов между полюсом и экватором вращающегося намагниченного шара, но различные значения потенциала на полюсе и экваторе шара относительно бесконечности (заземленного внешнего экрана). Этот факт предоставляет возможность реализовать простой эксперимент для проверки этих моделей. Достаточно измерить разность потенциалов между полюсом шара и заземленным экраном, а также между экватором шара и заземленным экраном. Для этой цели был использован емкостной зонд, подключенный к электрометру. Предлагаемый опыт представляет собой эксперимент с разомкнутой электрической цепью. Он отличается от подобных опытов тем, что не требует высокой точности измерений для проверки теории. Известные эксперименты с разомкнутой электрической цепью можно условно разбить на две группы. Одна группа включает эксперименты, в которых электрическое поле вращающегося магнита обнаружено не было [2, 3, 4, 11]. В другой группе экспериментов, электрическое поле наблюдалось, и величина его соответствовала силе Лоренца, деленной на заряд [5, 6, 12–15]. Разные результаты экспериментов и продолжающиеся дискуссии по теории свидетельствуют об актуальности проводимого исследования.

Гипотезы униполярной индукции

Как известно, магнитное поле однородно намагниченного шара можно описать в сферической системе координат формулами [16]

$$B_r = \frac{2m}{r^3} \cos\theta, B_\theta = \frac{m}{r^3} \sin\theta, r > R, B_z = \frac{2m}{R^3}, r < R.$$

Здесь начало координат совпадает с центром шара, магнитный момент шара m направлен вдоль оси Z , R – радиус шара, r – расстояние до точки наблюдения. Таким образом, магнитное поле шара обладает аксиальной симметрией и при вращении шара вокруг оси Z остается стационарным. Магнитное поле инвариантно при переходе от сопутствующей системы отсчета к лабораторной системе отсчета, в первом приближении по v/c . $B = B'$, где штрих обозначает сопутствующую систему отсчета.

До появления специальной теории относительности предполагалось, что вращение проводящего намагниченного шара в собственном магнитном поле вокруг оси Z приводит к перераспределению свободного электрического заряда внутри шара под действием силы Лоренца [16]. Шар приобретает квадрупольный электрический момент. Потенциальное электрическое поле этого квадруполья будет существовать как в системе отсчета, совращающейся с шаром, так и в лабораторной системе отсчета.

Специальная теория относительности изменила эту картину в инерциальных системах отсчета. Во-первых, предполагается известным электромагнитное поле в системе отсчета, сопутствующей движению магнита $B' = B$, $E' = 0$ (покоящийся магнит является источником только магнитного поля). Во-вторых, оказалось, что движущийся магнит электрически поляризуется [1]

$$P = \frac{V}{c} \times M'. \quad (1)$$

Здесь V – скорость магнита, c – скорость света, $M' = M$ – намагниченность материала магнита ($v/c \ll 1$).

Учитывая соотношения между векторами электромагнитного поля и векторами поляризации и намагничивания $E = -4\pi P$, $B = 4\pi M$, получим поле электрической поляризации

$$E = -\frac{V}{c} \times B'. \quad (2)$$

Электрическое поле (2) можно получить прямым преобразованием вектора B' из сопутствующей системы отсчета в лабораторную систему отсчета. Это поле компенсирует действие силы Лоренца на заряды, движущиеся вместе с магнитом в лабораторной системе отсчета. Поэтому никакого перераспределения свободного электрического заряда в движущемся магните не происходит. Электрическое поле поляризации существует только в лабораторной системе отсчета. Это поле было экспериментально обнаружено в опытах с вращающимся магнитным диэлектриком [5, 6]. Возможно, это послужило основанием для широкого применения преобразований СТО в решении задачи с вращающимся намагниченным шаром [8, 9]. Например, электрический потенциал проводящего, однородно намагниченного шара, вращающегося в вакууме вокруг своей оси, параллельной магнитному моменту, согласно квадрупольной модели, имеет вид [8]

$$\varphi(r \leq R) = \frac{m\omega r^2}{cR^3} \sin^2 \vartheta - \frac{2m\omega}{3cR}, \quad \varphi(r \geq R) = -\frac{m\omega R^2}{3cr^3} (3\cos^2 \vartheta - 1). \quad (3)$$

Здесь ω – угловая скорость вращения шара, ($\omega R \ll c$). Решение (3) получено применением преобразования (2) внутри шара и заменой этого преобразования уравнением Лапласа вне шара с последующим решением краевой задачи. Однако магнитное поле шара существует во всем пространстве, и исключать его преобразование вне шара некорректно. Кроме этого, в инерциальных системах отсчета задача вычисления электрического поля движущегося магнита может быть решена как преобразованием источников поля, так и преобразованием полей. Оба способа решения эквивалентны. В случае вращения это не так. Преобразование (1) и последующее решение краевой задачи с уравнением Лапласа вне шара приводят к полю электрического квадруполья, а применение (2) вне шара дает электрическое поле внутри светового цилиндра в виде [10]

$$E = -(\omega \times r) \times B. \quad (4)$$

Дивергенция этого поля не равна нулю вне источников поля. Можно показать, что соответствующий этому полю электрический потенциал имеет вид

$$\varphi(r \leq R) = \frac{m\omega r^2}{cR^3} \sin^2 \vartheta, \quad \varphi(r \geq R) = \frac{m\omega}{cr} \sin^2 \vartheta. \quad (5)$$

Формулы (5) могут быть получены прямым преобразованием векторного потенциала из системы отсчета, сопутствующей шару, в лабораторную систему отсчета.

Обе теоретические модели дают одинаковую разность потенциалов между полюсом и экватором шара. Значения потенциала точек поверхности шара относительно бесконечности различны для двух моделей. Из формул (3) следует, что электрический потенциал поверхности шара меняет знак при переходе от экватора к полюсу шара и достигает на полюсе в два раза большей абсолютной величины, чем на экваторе. Из формул (5) следует, что потенциал равен нулю на полюсе, не меняет знак при переходе от полюса к экватору шара и имеет максимальное значение на экваторе.

Материалы и методы

Схема установки представлена на рис. В эксперименте был применен шаровой неодимовый магнит диаметром 30 mm, с магнитным моментом $m = (136 \pm 2) \cdot 10^2$ Гс·см³. Для измерения магнитного момента применялся Gauss meter BST200H. Шар был приклеен южным полюсом к трубке-изолятору внешним диаметром 8 мм, внутренним диаметром 5 мм и длиной 40 мм. В трубку плотно вставлялась на глубину 20 мм ось экранированного, асинхронного электродвигателя. Шар мог вращаться вокруг оси, параллельной магнитному моменту. Емкость шара, измеренная относительно внешнего экрана составляла 2 пФ. Градуировка аппаратуры осуществлялась подачей на шар потенциала (10 ± 0.2) мВ относительно заземленного экрана. Максимальная разность потенциалов между полюсом и экватором шара, измеренная с помощью графитовых

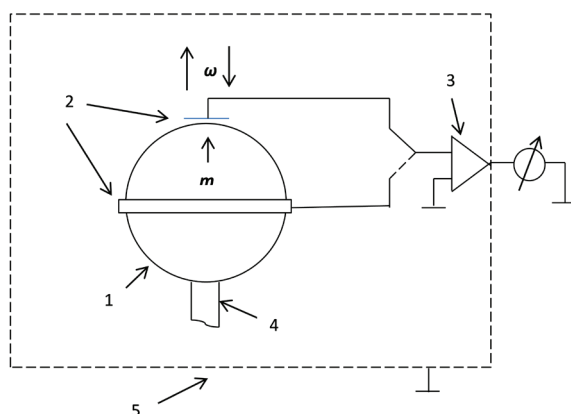


Рис. Схема установки: 1 – вращающийся намагниченный шар; 2 – емкостные зонды; 3 – входной каскад электрометра; 4 – трубка-изолятор; 5 – внешний электростатический экран

Fig. Scheme of the installation: 1 – rotating magnetised sphere; 2 – capacitive probes; 3 – electrometer input stage; 4 – insulator tube; 5 – external electrostatic screen

щеток составляла 26 mV. Скорость вращения шара измерялась стробоскопическим методом и составляла 2760 об/мин. Электрометр состоял из входного каскада и вольтметра GDM-8245. В качестве входного каскада применялся электрометрический усилитель ADA 4530-1. Попытка измерить потенциал поверхности вращающегося шара относительно заземленного экрана с помощью скользящего контакта не удалась по причине высокого уровня помех в нестационарном контакте шар-щетка. Решить проблему удалось использованием емкостных зондов на полюсе и экваторе шара (рис.). Зонд на полюсе представлял собой круг из меди или латуни диаметром 10 и 8 мм соответственно и толщиной 0,1 мм. Зонд располагался над полюсом шара на расстоянии примерно 0,5 мм от его поверхности (рис.).

Зонд на экваторе представлял собой кольцо из латуни диаметром 32 мм, шириной 3 мм и толщиной 0,1 мм (рис.). Емкостные зонды соединялись с электрометром медным проводом диаметром 0,1 мм. Таким же проводом выполнялось соединение источника напряжения 10 мВ с шаром при градуировке аппаратуры.

Недостаток емкостных зондов – усреднение потенциала участка поверхности шара по площади поверхности зонда. По этой причине разность потенциалов между полюсом и экватором шара, измеренная емкостными зондами, всегда будет меньше разности потенциалов, измеренной щетками (площадь контакта щетки значительно меньше площади емкостного зонда). Малая электроемкость зонда относительно шара дополнительно ослабляет сигнал, но исключает нестационарную контактную разность потенциалов, возникающую в щетках.

Из изложенного выше следует, что в эксперименте по проверке формул (3) и (5) достаточно лишь определить, имеет ли потенциал разный знак на полюсе и экваторе вращающегося намагниченного шара и где он больше по абсолютной величине: на полюсе или на экваторе? Потенциал поверхности шара нужно измерять относительно заземленного экрана, внутри которого вращается намагниченный шар. В электрических измерениях потенциал Земли принимается за ноль так же, как и потенциал бесконечности в теории.

Были проведены четыре серии измерений (табл.). Каждая серия состояла из 10 измерений двойного отклонения [2]. В каждом измерении вычитались показания электрометра при вращении магнита в противоположных направлениях для исключения трибоэлектрического потенциала. Полученное значение потенциала делилось на два.

Таблица

Результаты измерений потенциалов на полюсе и на экваторе вращающегося магнитного шара относительно заземленного экрана

Table

Results of measurements of potential at the pole and at the equator of the rotating magnetic sphere relative to the grounded screen

Потенциал полюса (mV)	2.4 ± 1.3	4.2 ± 2.5	6.3 ± 1.7	5.1 ± 1.1
Потенциал экватора (mV)	17.3 ± 0.7	12.8 ± 1.9	15.3 ± 2.0	18.9 ± 2.4

Результаты и обсуждение

Результаты четырех серий измерений потенциала полюса и экватора шара относительно заземленного экрана представлены в таблице.

Знаки потенциала в таблице соответствуют случаю, когда m и ω имеют одинаковое направление. В таблице указаны случайные квадратичные погрешности одного измерения. Погрешности установки зондов относительно полюса и экватора шара, а также погрешность градуировки не учитывались.

Потенциал униполярной индукции вращающегося намагниченного шара относительно заземленного экрана имеет одинаковый знак на полюсе и экваторе шара. Величина потенциала больше на экваторе. Результаты эксперимента противоречат формуле (3) и не противоречат формуле (5). Гипотеза (5) предполагает применимость преобразований Лоренца для электромагнитного поля внутри и вне шара. Гипотеза (3) предполагает применимость преобразований Лоренца только внутри шара, а вне шара применяет уравнение Лапласа.

Основную погрешность в измерение потенциала униполярной индукции емкостным зондом вносит трибоэлектрический эффект – электростатический заряд вращающегося магнита трением о воздух. Неодимовый магнит покрыт медно-никелевым сплавом и при вращении в воздухе заряжается отрицательно. Окружающий воздух заряжается, соответственно, положительно. Знак трибоэлектрического потенциала не зависит от направления вращения магнита. Знак потенциала униполярной индукции зависит от направления вращения магнита. Поэтому вычитая измеренные значения потенциала, полученные при вращении магнита в противоположных направлениях, можно выделить потенциал униполярной индукции. Величина трибоэлектрического потенциала зависит от расстояния между магнитом и зондом, скорости вращения магнита, влажности и проводимости воздуха. Ускорение магнита при его раскрутке до максимальной скорости вращения сопровождается нестационарными потоками воздуха вблизи магнита и случайными изменениями трибоэлектрического потенциала. Это означает, что процедура вычитания, описанная выше, не позволяет полностью исключить влияние трибоэлектрического потенциала на погрешность измерения потенциала униполярной индукции. Дополнительная погрешность возникает вследствие незначительных изменений расстояния между зондом и вращающимся шаром в процессе измерений и градуировки, так как изменяется емкость конденсатора шар-зонд.

Заключение

Несмотря на низкую точность измерений, результаты таблицы свидетельствуют в пользу модели, соответствующей формуле (5), и противоречат квадрупольной модели (3). Это означает, что замена преобразований электромагнитного поля вне шара уравнением Лапласа в гипотезе (3) некорректна. Преобразования векторов электромагнитного поля

в специальной теории относительности должны применяться как внутри, так и вне вращающегося магнита.

Накопление экспериментальных результатов и их обобщение дадут возможность построить непротиворечивую теорию униполярной индукции. Полученные результаты будут способствовать решению этой задачи.

Л и т е р а т у р а

1. Пановский, В. Классическая электродинамика : учебник для вузов / В. Пановский, М. Филипс ; перевод с английского. – Москва : Физматгиз, 1963. – 432 с.
2. Barnett S. J. (1912). Electromagnetic induction and relative motion. *Phys. Rev.*, 35(5), pp. 323-336.
3. Kennard E. H. (1913). The effect of dielectrics on unipolar induction. *Phys. Rev.*, 1(5), pp. 355-359.
4. Pegram G. B. (1917). Unipolar induction and electron theory. *Phys. Rev.*, 10(6), pp. 591-600.
5. Wilson M. (1912). On the electric effect of rotating a magnetic insulator in a magnetic field. *Proc. Roy. Soc.*, 89a(608), pp. 99-106.
6. Hertzberg J. B., Bickman S. R. et al. (2001). Measurement of the Relativistic Potential Difference across a Rotating Magnetic Dielectric Cylinder. *American Journal of Physics*, 69 (6), pp. 648-654
7. Pellegrini G. N. (1995). Maxwell's equations in a rotating medium: Is there a problem? *American Journal of Physics*, 63(8), pp. 694-705.
8. McDonald K. T. (2012). Unipolar Induction via a Rotating Magnetized Sphere [online] Princeton University. Available at: <http://kirkmcd.princeton.edu/examples/> [Accessed 13 Nov. 2012].
9. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред : учебник для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – [6-е издание, стереотипное]. – Москва : Наука, 1982. – 620 с.
10. Djuric J. (1975). Spinning magnetic fields. *J. Appl. Phys.*, 46(2), pp. 679 -688.
11. Bartlett D. F., Monroy J. et al. (1977). Spinning magnets and Jehle's model of the electron. *Phys. Rev. D*, 16(12), pp. 3459-3463.
12. Тимофеев, В. Б. Эксперимент по измерению постоянного электрического поля вращающегося магнита / В. Б. Тимофеев, Т. Е. Тимофеева. *Препринт ИКФИА*, 99(1), 1999. – С. 35.
13. Тимофеев, В. Б. Некоторые свойства электрического поля магнитного ротатора / В. Б. Тимофеев, Т. Е. Тимофеева // Вестник СВФУ. – 2012. – 3(9). – С. 39-42.
14. Timofeev V. B., Timofeeva T.E. (2014). Experimental Research of the Electric Field Potential of a Rotating Magnetized Sphere. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. [Online], Volume 45. pp. 19-24. Available from: <https://www.jpier.org/issues/volume.html?paper=13102108> [Accessed 12 Febr. 2014].
15. Мисюченко, И. (2014) Экспериментальное исследование электрического поля, вращающегося вокруг оси намагниченности кольцевого магнита. [online]. Available from: [Accessed 14 September 2014].
16. Альвен, Г. Космическая электродинамика / Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар. – [2-е издание, стереотипное]. – Москва : Мир, 1967. – 260 с.

References

1. Panovsky, V. (1963). *Classical electrodynamics: a textbook for universities* Translated from English by M. Phillips. Moscow: Fizmatgiz, 432 p
2. Barnett, S.J. (1912). *Electromagnetic induction and relative motion*. Physical Review, 35(5), pp. 323-336.
3. Kennard, E.H. (1913). *The effect of dielectrics on unipolar induction*. Physical Review, 1(5), pp. 355-359.
4. Pegram, G.B. (1917). *Unipolar induction and electron theory*. Physical Review, 10(6), pp. 591-600.
5. Wilson, M. (1912). *On the electric effect of rotating a magnetic insulator in a magnetic field*. Proceedings of the Royal Society, 89a(608), pp. 99-106.
6. Hertzberg, J.B., Bickman, S.R. et al. (2001). *Measurement of the Relativistic Potential Difference across a Rotating Magnetic Dielectric Cylinder*. American Journal of Physics, 69 (6), pp. 648-654.
7. Pellegrini, G.N. (1995). *Maxwell's equations in a rotating medium: Is there a problem?* American Journal of Physics, 63(8), pp. 694-705.

8. McDonald, K.T. (2012). *Unipolar Induction via a Rotating Magnetized Sphere*. [online]. Princeton University. Available at: <http://kirkmcd.princeton.edu/examples/> (Accessed 13 November 2012).
9. Landau, L.D. (1982). *Electrodynamics of continuous media: textbook for universities*. 6th ed. Moscow: Nauka, 620 p.
10. Djuric, J. (1975). *Spinning magnetic fields*. Journal of Applied Physics, 46(2), pp. 679–688.
11. Bartlett, D.F., Monroy, J. et al. (1977). *Spinning magnets and Jehle's model of the electron*. Physical Review D, 16(12), pp. 3459–3463.
12. Timofeev, V.B. (1999) *Experiment on measuring the constant electric field of a rotating magnet*. ShICRA preprint, 99(1), 35 p.
13. Timofeev, V.B. (2012). *Some properties of electric field of a magnetic rotator*. Vestnik of NEFU, 3(9), pp. 39–42.
14. Timofeev, V.B., Timofeeva, T.E. (2014). *Experimental Research of the Electric Field Potential of a Rotating Magnetized Sphere. Progress in Electromagnetics Research Letters*. [online], 45. pp. 19–24. Available from: <https://www.jpier.org/issues/volume.html?paper=13102108> (Accessed 12 February 2014).
15. Misyuchenko, I. (2014). *Experimental study of the electric field of a ring magnet rotating around the magnetisation axis*. [online]. Available from: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1699510973&tld=en&lang=en&lang=en&name=elektricheskoe-pole-vraschayuschegosya-kolcevogo-magnita.pdf> (Accessed 14 September 2014).
16. Alven, G. (1967). *Cosmic electrodynamics*. 2nd ed. Moscow: Mir. 260 p.

ТИМОФЕЕВА Тамара Егоровна – к. ф.-м. н., доцент каф. радиофизики и электронных систем ФТИ, СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: te.timofeeva@s-vfu.ru

TIMOFEEVA Tamara Egorovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Physics and Electronic Systems, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ТИМОФЕЕВ Владимир Борисович – независимый исследователь, г. Якутск.

E-mail: nertiv@rambler.ru

TIMOFEEV Vladimir Borisovich – Independent Researcher, Yakutsk.