

УДК 537.8

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-4-65-72

Униполярная индукция и относительное вращение

В. Б. Тимофеев, Т. Е. Тимофеева ✉

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

✉ te.timofeeva@s-vfu.ru

Аннотация. Неудачные попытки извлечь энергию вращения Земли методами униполярной индукции, проведенные в последнее время, свидетельствуют об актуальности дальнейшего исследования униполярной индукции. Из специальной теории относительности следует, что взаимодействие электрического заряда и магнита при неускоренном движении зависит только от их относительной скорости. Электродвижущая сила униполярной индукции в замкнутой электрической цепи зависит только от относительного вращения магнита и подключенного через скользящие контакты вольтметра. Для того чтобы выяснить, является ли электрическое поле, возникающее при вращении магнита в инерциальной системе отсчета или в системе отсчета, вращающейся в магнитном поле, результатом абсолютного или относительного вращения, нужно это поле измерить. Для этой цели в работе предложен эксперимент с относительным вращением кольцевого магнита и цилиндрического конденсатора. Конденсатор постоянно подключен через скользящие контакты к электрометру. При вращении магнита или конденсатора электрометр регистрирует разность потенциалов на конденсаторе. Измерения показали, что разность потенциалов на конденсаторе не зависит от того, вращается ли конденсатор при неподвижном магните или вращается магнит при неподвижном конденсаторе. Она близка к нулю, когда конденсатор вращается вместе с магнитом. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что взаимодействие электрического заряда и магнита в нерелятивистском случае зависит от их относительной скорости вращения. Это взаимодействие описывается формулой Лоренца.

Ключевые слова: униполярная индукция, относительное вращение, совместное вращение, кольцевой магнит, цилиндрический конденсатор, разность потенциалов, электрическое поле, электрометр, формула Лоренца, электродинамика вращающихся систем отсчета.

Для цитирования: Тимофеев В. Б., Тимофеева Т. Е. Униполярная индукция и относительное вращение. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, № 4. С. 65–72. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-65-72

Unipolar induction and relative rotation

V. B. Timofeev, T. E. Timofeeva ✉

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

✉ te.timofeeva@s-vfu.ru

Abstract. The recent failure of attempts to extract the rotational energy of the Earth by unipolar induction methods suggests a need for further research on unipolar induction. It is implied by the special relativity theory that the interaction of electric charge and magnet in unaccelerated motion depends only on the relative rate. The electromotive force of unipolar induction in a complete electrical circuit depends only on the relative rotation of the magnet and the connected through slide contacts voltmeter. To ascertain if the electric field resulting from the magnet's rotation in an inertial frame of reference or in a frame of reference rotating in a magnetic field is the result of absolute or relative rotation, it is necessary to measure the field. For this purpose, the paper introduces the experiment with the relative rotation of a ring-shaped magnet and a cylindrical capacitor. The capacitor is permanently connected through sliding contacts to the electrostatic meter. The electrostatic meter detects the potential difference on the capacitor while the magnet or capacitor is being rotated. The measurements showed that the potential difference on the capacitor

is depends not on the capacitor rotating in case of a stationary magnet or a magnet rotating while the capacitor is stationary. It is close to zero when the capacitor rotates with the magnet. According to the research results, the interaction of the electric charge and magnet in the nonrelativistic case depends on the relative rotation rate. This interaction is described by the Lorentz formula.

Keywords: unipolar induction, relative rotation, corotation, ring-shaped magnet, cylindrical capacitor, potential difference, electric field, electrometer, Lorentz formula, electrodynamics of rotating reference frame.

For citation: Timofeev V. B., Timofeeva T. E. Unipolar induction and relative rotation. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 4. Pp. 65–72. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-4-65-72

Введение

В работе С. Ф. Чуба и К. Р. Нанд предложена идея извлечения энергии вращения Земли методами униполярной индукции [1]. Эксперимент по проверке этой идеи, выполненный с высокой точностью, дал нулевой результат [2]. Это свидетельствует об ошибочности теорий униполярной индукции, утверждающих, что на электрический заряд, вращающийся вместе с магнитом, действует сила Лоренца со стороны собственного магнитного поля, вызывающая электродвижущую силу [3, 4]. Взаимодействие электрического заряда и магнита в специальной теории относительности зависит только от их относительной скорости. Когда движется электрический заряд, а магнит неподвижен, на заряд действует сила Лоренца. Когда заряд неподвижен, а магнит движется с той же скоростью в противоположном направлении, возникает электрическое поле, которое действует на заряд также как сила Лоренца в первом случае [5]. При движении заряда и магнита с одинаковой постоянной скоростью, сила, действующая между ними, равна нулю (принцип относительности). Несмотря на то, что это справедливо только для инерциальных систем отсчета, явление униполярной индукции также демонстрирует зависимость электродвижущей силы (ЭДС) индукции только от относительного вращения. Если к цилиндрическому вращающемуся магниту подключить с помощью скользящих контактов вольтметр, он измерит разность потенциалов [4]. Разность потенциалов не изменится, когда магнит неподвижен, а вольтметр вращается вместе с проводниками вокруг магнита с той же угловой скоростью в противоположном направлении [6]. Относительность электродвижущей силы униполярной индукции в замкнутой электрической цепи противоречит опытам, выполненным в начале XX в. с разомкнутой электрической цепью [7].

В 1912 г. Барнетт обнаружил, что цилиндрический конденсатор, расположенный в магнитном поле соленоида или постоянных магнитов, не получает электрический заряд, когда соленоид или магниты приводятся во вращение [7]. Более того, в работе [8] показано, что цилиндрический конденсатор заряжается, когда вращается вместе с соленоидом и относительное вращение вообще отсутствует. В 1967 г. Бартлетт измерил электрический заряд вращающегося магнита и подтвердил результаты Барнетта с лучшей точностью [9].

В униполярной индукции сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, ЭДС индукции возникает только при относительном вращении ротора и статора униполярного генератора. С другой стороны, этому факту противоречат опыты с разомкнутой электрической цепью, содержащей конденсатор [7, 9]. Цель предлагаемой работы – повторение экспериментов с конденсатором. Необходимо выяснить влияние относительного вращения кольцевого магнита и цилиндрического конденсатора на величину разности потенциалов в конденсаторе. Это позволит ответить на вопрос о характере электромагнитного взаимодействия электрического заряда и магнита при их относительном вращении.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: цилиндрического алюминиевого, воздушного конденсатора, кольцевого неодимового магнита, асинхронного электродвигателя, расположенных на одной оси, а также электрометра и милливольтметра. Обкладки цилиндрического конденсатора постоянно подключены через латунные кольца, закрепленные на оси конденсатора и графитовые щетки, к электрометру (рис.).

Установка позволяет измерять изменение разности потенциалов на конденсаторе в трех экспериментах:

- 1) вращение цилиндрического конденсатора при неподвижном магните;
- 2) вращение кольцевого магнита при неподвижном конденсаторе;
- 3) вращение магнита вместе с конденсатором.

Для этого конденсатор и магнит поочередно устанавливались на ось электродвигателя. При вращении магнита вместе с конденсатором, конденсатор приклеивался к поверхности магнита через изолирующие стойки. Расстояние между поверхностью магнита и обкладками конденсатора составляло $7 \div 8$ мм во всех опытах.

Во всех трех опытах электрометр и подводящие провода оставались неподвижными. Это нарушало симметрию относительного вращения. Мы предполагаем, что неподвижность подводящих проводов незначительно скажется на результатах измерений. В этих проводах наводятся одинаковые электродвижущие силы, компенсирующие друг друга в измерительной цепи.

Цилиндрический конденсатор изготовлен из листового алюминия толщиной 0,3 мм. Диаметр внутренней обкладки конденсатора 45 мм, внешней – 72 мм. Высота обкладок 30 мм. Емкость конденсатора 6 ± 1 пФ.

Обкладки приклеены через стойки-изоляторы к стеклотекстолитовому диску, в центральное отверстие в котором вклеена трубка-изолятор. На трубке-изоляторе установлены два латунных кольца, которые соединены с обкладками конденсатора проводниками толщиной 0,1 мм (рис.). В трубку плотно вставляется ось электродвигателя при вращении конденсатора, или на ось электродвигателя устанавливается магнит при его вращении. Внешний диаметр латунных колец 10 мм, высота 2,5 мм.

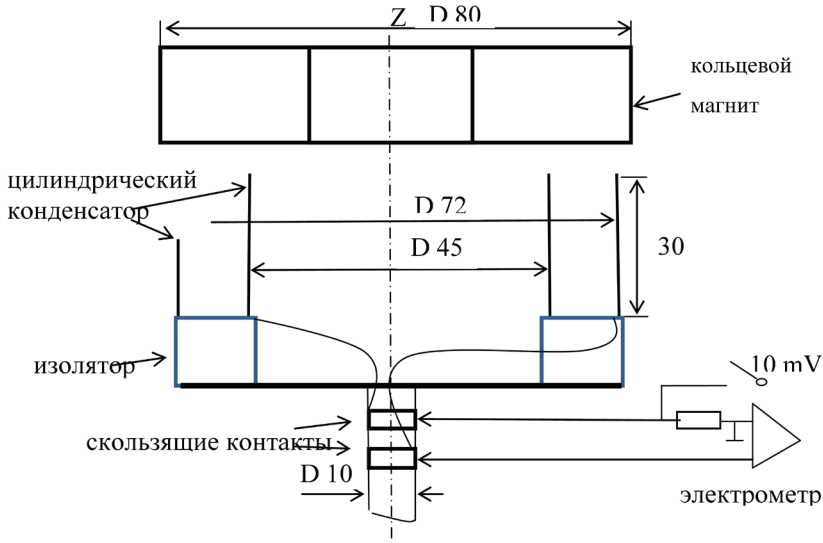


Рис. Схема экспериментальной установки
Fig. Diagram of the experimental setup

Щетки представляют собой графитовые стержни диаметром 1 мм, закрепленные на тонкой стеклотекстолитовой пластине и соединенные с электрометром проводниками толщиной 0,1 мм. Щетки упруго прижаты к латунным кольцам.

Неодимовый магнит составлен из двух кольцевых неодимовых магнитов размером $80 \times 25 \times 8$ мм и имеет магнитный момент $(65 \pm 2) \cdot 10^3$ Гс·см³. Магнит приклеен к стеклотекстолитовому диску, который крепится в центре винтами к алюминиевой втулке, устанавливаемой на ось электродвигателя. Магнит изолирован от алюминиевой втулки и оси электродвигателя. При необходимости магнит соединялся проводником с осью двигателя (заземлялся).

В работе использован асинхронный электродвигатель КД6-4, помещенный вместе с системой управления в дополнительный алюминиевый экран. На оси электродвигателя установлен оптический датчик частоты вращения, импульсы с которого подаются на электронно-счетный частотомер РЧЗ-07-0002. Частоте вращения 1500 об/мин соответствуют показания частотомера 150 Гц. Питание электродвигателя осуществляется через автотрансформатор, это позволяет изменять частоту вращения и уменьшает коммутационные помехи.

В качестве электрометра использовался прецизионный электрометрический усилитель ADA4530-1, с входным сопротивлением 10 ГОм. Сигнал с электрометра поступал на цифровой вольтметр GDM-8245, в режиме милливольтметра, максимальная чувствительность 10 мкВ. Вольтметр имеет функцию запоминания максимальных и минимальных значений измеряемого напряжения и базовую погрешность 0.03%. Одна из обкладок конденсатора соединяется с корпусом через резистор 10 Ом. На этот резистор может подаваться постоянное напряжение для градуировки измерительной цепи. В качестве электрометра применялся также дифференциальный усилитель на полевых транзисторах с каналом п-типа, допускающий симметричное включение обкладок цилиндрического конденсатора. Входная емкость ADA4530-1 составляла 70 пФ, электрометра на полевых транзисторах – 20 пФ. Погрешность измерения входной емкости ± 2 пФ.

Для измерения магнитной индукции в воздушном зазоре конденсатора применялся измеритель магнитного поля BST200H. Диапазон измерения – 0-200 мТ-2000 мТ, погрешность – 2%, 5% (выше 1000 мТ).

Измерения

Электрометр измеряет изменение разности потенциалов на конденсаторе при изменении угловой скорости вращения конденсатора, магнита или магнита с конденсатором.

Главная помеха электрометрических измерений – электризация вращающихся частей установки потоками воздуха. Это заставило некоторых современных исследователей отказаться от изучения униполярной индукции в разомкнутой электрической цепи [7], а в ранних исследованиях с разомкнутой цепью [4] заземлять внешнюю обкладку цилиндрического конденсатора.

Электризация потоками воздуха не зависит от направления вращения, поэтому применялся метод двойного отклонения [4]. Вычитая результаты измерения разности потенциалов при вращении в противоположных направлениях, можно исключить помехи, вызванные электризацией вращающихся частей установки. Однако, когда проводимость воздуха мала, разность потенциала электризации может превысить электромагнитную разность потенциалов, и измерения станут невозможными. Проводимость воздуха определяется легкими ионами и зависит от многих факторов: времени года, времени суток, солнечной активности. Для окончательной обработки выбирались те серии измерений, когда разность потенциалов при вращении в противоположных направлениях имела разный знак и примерно одинаковую величину.

Таблица 1

Результаты эксперимента с заземленным магнитом

Table 1

Experimental results using the grounded magnet

Разность потенциалов на конденсаторе (мВ) магнит заземлен		
Вращение конденсатора	Вращение магнита	Совместное вращение
1	8.2 ± 0.2	7.4 ± 0.3
2	0.5 ± 0.2	1.4 ± 0.4

Таблица 2

Результаты эксперимента с изолированным магнитом

Table 2

Experimental results with the isolated magnet

Разность потенциалов на конденсаторе (мВ) магнит изолирован		
Вращение конденсатора	Вращение магнита	Совместное вращение
1	5.7 ± 0.2	5.2 ± 0.3
2	1.0 ± 0.2	0.3 ± 0.1

На измерения влияют также помехи, связанные с параметрическим изменением емкости конденсатора из-за биения вращающихся частей установки. Изменяющаяся емкость, будучи заряженной потоками воздуха, создает значительные электрические колебания на входе электрометра. При высокой частоте вращения эти колебания обрезаются фильтром нижних частот милливольтметра, поэтому измерения проводились при изменении угловой скорости вращения от 500 до 1500 об/мин.

Электрические поля, вызываемые центробежной силой на два порядка меньше электромагнитных, и поэтому не учитывались.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений представлены в таблицах 1, 2. Пункт 1 в таблицах соответствует заземлению внутренней обкладки цилиндрического конденсатора, пункт 2 – заземлению внешней обкладки. В таблицах указана только стандартная случайная погрешность измерений.

Главное, что следует отметить, разность потенциалов слабо зависит от того, вращается ли конденсатор при неподвижном магните или вращается магнит при неподвижном конденсаторе. При совместном вращении конденсатора и магнита разность потенциалов оказывается примерно на порядок меньше и не зависит от того, какая обкладка заземлена. В случае совместного вращения, на неподвижные провода, соединяющие электрометр с конденсатором, действует электрическое поле. Это поле действует противоположно в проводах, соединяющих конденсатор. Однако электроемкости обкладок конденсатора относительно земли различны. Поэтому обкладки получают разный заряд, и на входе электрометра возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов примерно соответствует расхождению результатов при отдельных вращениях конденсатора и магнита. Когда вращается конденсатор, электродвижущая сила наводится только во вращающихся проводниках. Когда вращается магнит, ЭДС действует во всей электрической цепи, соединяющей конденсатор с электрометром.

При заземлении внешней обкладки конденсатора разность потенциалов значительно уменьшается. Это позволяет предположить, что источник электрического поля находится на боковой стороне вращающегося магнита, где текут молекулярные токи. Заземленная внешняя обкладка конденсатора экранирует источник электрического поля. В опыте Барнетта внешняя обкладка конденсатора была постоянно заземлена, и измеренная разность потенциалов на конденсаторе была равна нулю в пределах погрешности измерений [5].

Как видно из таблиц 1 и 2, заземление магнита также увеличивает разность потенциалов на конденсаторе. Это явление можно объяснить тем, что ЭДС действует в электрической цепи, содержащей три последовательно включенных электроемкости: входную емкость электрометра; емкость внешней обкладки конденсатора-магнита; емкость магнит-земля. При заземлении магнита емкость магнит-земля исключается, и разность потенциалов на входе электрометра увеличивается.

Вычисление разности потенциалов на вращающемся конденсаторе с использованием формулы Лоренца в нашем опыте представляет достаточно сложную задачу. Дело в том, что неоднородный магнитный поток пронизывает не только пространство между обкладками конденсатора, но и пространство между внешней обкладкой конденсатора и магнитом. Поэтому известная формула для расчета разности потенциалов в цилиндрическом конденсаторе, вращающемся в магнитном поле или в неподвижном конденсаторе в поле вращающегося магнита [4]:

$$U = \frac{1}{c} n \Phi \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий конденсатор параллельно его пластинам, n – число оборотов в секунду, c – скорость света, может дать только приближенное значение измеренной разности потенциалов. Среднее значение z – компоненты магнитной индукции в конденсаторе составляло (850 ± 50) Гс, $n = 16.7 \text{ с}^{-1}$. Вычисленная разность потенциалов по формуле (1) на конденсаторе (3.4 ± 0.2) мВ для расстояния между магнитом и конденсатором 8 мм. Как видно из таблиц 1 и 2, это значение меньше измеренного. Увеличивая расстояние между магнитом и конденсатором, можно уменьшить электроемкость «магнит-внешняя обкладка» и влияние радиальной компоненты магнитного потока на разность потенциалов в конденсаторе. Например, в опыте с вращающимся конденсатором, внешним диаметром 65 мм, внутренним 45 мм и расстоянием до магнита 20 мм, измеренное и теоретическое значение разности потенциалов, вычисленное по формуле (1), составили (1.6 ± 0.2) мВ и (1.4 ± 0.2) мВ соответственно. Среднее значение z – компоненты магнитной индукции в этом конденсаторе было (500 ± 50) Гс.

Справедливость формулы Лоренца для силы, действующей на электрический заряд, движущийся в магнитном поле, – экспериментальный факт. Зависимость разности потенциалов на конденсаторе только от относительного вращения конденсатора и магнита позволяет сделать вывод, что электрическое поле вращающегося магнита такое же, как и электрическое поле во вращающейся системе отсчета при неподвижном магните. Другими словами, взаимодействие электрического заряда и магнита в нерелятивистском случае зависит только от их относительной скорости вращения. Это взаимодействие описывается формулой Лоренца.

Заключение

Незначительные отличия разности потенциалов при отдельных вращениях конденсатора и магнита, выходящие за пределы случайных погрешностей, вызваны неподвижностью электрометра и подводящих проводов во всех опытах. Они не могут отменить главный результат – разность потенциалов на конденсаторе зависит только от относительного вращения конденсатора и магнита. Следовательно, взаимодействие электрического заряда и магнита зависит только от их относительной скорости вращения.

Попытки извлечь энергию вращения Земли электрической цепью [1, 2], обречены на неудачу, так как сила Лоренца, действующая на электрические заряды в цепи, неподвижной относительно магнита (Земли), равна нулю. Нулевой результат опыта Барнетта [7] можно объяснить экранирующим действием внешней заземленной обкладки цилиндрического конденсатора.

Уравнения Максвелла во вращающихся системах отсчета, получаемые применением общей теории относительности, содержат фиктивные источники электромагнитного поля [11–13]. Шифф [11] объяснял это вращением относительно звезд, современные авторы [12, 13] приписывают эти источники эффектам общей теории относительности во вращающихся системах отсчета. Полученные результаты позволяют предположить, что причина возникновения фиктивных источников —относительное вращение измерительного прибора и магнита.

Л и т е р а т у р а

1. Chyba CF, Hand KP. Electric Power Generation from Earth's Rotation through its Own Magnetic Field. *Physical Review Applied*, 2016;6(1):014017.
2. Bastiaan V, Rinke JW. Attempting to Extract Power from Earth's Rotation: An Experimental Test. *Physical Review Applied*, 2018;10(5):054023.
3. Альвен, Г. Космическая электродинамика / Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар. – [2-е изд.]. – Москва : Мир, 1967. – 260 с.
4. Тамм, И. Е. Основы теории электричества : учеб. для вузов / И. Е. Тамм. – Москва : Наука, 1976. – 616 с.
5. Пановский, В. Классическая электродинамика / В. Пановский, М. Филиппс ; Пер. с англ. В. П. Быкова ; под редакцией С. П. Капицы. – Москва : Физматгиз, 1963. – 432 с.
6. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – [2 изд.]. – Москва : Наука, 1982. – 620 с.
7. Barnett SJ. On Electromagnetic Induction and Relative Motion. *Physical Review*, 1912;35(5):323-336.
8. Pegram GB. Unipolar Induction and Electron Theory. *Physical Review*, 1917;10(6):591-600.
9. Bartlett DF, Monroy J, Reeves J. Spinning magnets and Jehle's model of the electron. *Physical Review*, 1977;16(12):3459-3463.
10. Muller FJ. Unipolar Induction Revisited: New Experiments and the "Edge Effect" Theory. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014;50(1):7000111.
11. Schiff LI. A question in general relativity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1939;25(7):391-395.
12. Irvine WM. Electrodynamics in Rotating System of Reference. *Physica*. 1964;30(6):1160-1170.
13. Speake CC, Ortolan A. Measuring Electromagnetic Fields in Rotating Frames of Reference. *Universe*, 2020;6(2):31.

R e f e r e n c e s

1. Chyba CF, Hand KP. Electric Power Generation from Earth's Rotation through its Own Magnetic Field. *Physical Review Applied*, 2016;6(1):014017 (in English).
2. Bastiaan V, Rinke JW. Attempting to Extract Power from Earth's Rotation: An Experimental Test. *Physical Review Applied*, 2018;10(5):054023 (in English).
3. Alfven G, Felthammar KG. *Cosmic Electrodynamics*. [2nd ed.] Moscow: Publishing House "Mir", 1967:260 (in Russian).
4. Tamm IE. *Fundamentals of the Theory of Electricity*. Moscow: Nauka, 1976:616 (in Russian).
5. Panovskiy V, Philips M. *Classical Electrodynamics*. In: Kapitsa SP (ed.). Transl. into Russian by Bykov VP. Moscow: Publishing House "Fizmatgiz", 1963:432 (in Russian).
6. Landau LD, Lifshitz EM. *Electrodynamics of Continuous Media*. [2nd ed.] Moscow: Nauka, 1982:620 (in Russian).

7. Barnett SJ. On Electromagnetic Induction and Relative Motion. *Physical Review*, 1912;35(5):323-336 (in English).
8. Pegram GB. Unipolar Induction and Electron Theory. *Physical Review*, 1917;10(6):591-600 (in English).
9. Bartlett DF, Monroy J, Reeves J. Spinning magnets and Jehle's model of the electron. *Physical Review*, 1977;16(12):3459-3463 (in English).
10. Muller FJ. Unipolar Induction Revisited: New Experiments and the "Edge Effect" Theory. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014;50(1):7000111 (in English).
11. Schiff LI. A question in general relativity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1939;25(7):391-395 (in English).
12. Irvine WM. Electrodynamics in Rotating System of Reference. *Physica*, 1964;30(6):1160-1170 (in English).
13. Speake CC, Ortolan A. Measuring Electromagnetic Fields in Rotating Frames of Reference. *Universe*, 2020;6(2):31 (in English).

ТИМОФЕЕВ Владимир Борисович – независимый исследователь.

E-mail: nertiv@rambler.ru

Vladimir B. TIMOFEEV – Independent Researcher.

ТИМОФЕЕВА Тамара Егоровна – к. ф.-м. н., доцент каф. радиофизики и электронных систем ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

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

Tamara E. TIMOFEEVA – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Assoc. Prof. of the Department of Radio Physics and Electronic Systems, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.