

УДК 05.13.18

Н.М. Труфанова, К.В. Бородулина, И.Я. ДятловПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДАХ
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ**

На основе метода конечных элементов была разработана двумерная математическая модель электрического поля проводов воздушной высоковольтной линии электропередачи. На основе предложенной модели были получены картины распределения электрического поля линии электропередачи, проведено исследование напряженности электрического поля вокруг фазы при прокладке воздушной линии электропередачи на 500 кВ, также была получена зависимость величины напряженности от диаметра расщепления фазы и количества проводов при фиксированном сечении фазы. Решалась двумерная задача электростатического поля, основанная на дифференциальном уравнении Пуассона.

В исследовании рассматривалась одна фаза, расщепленная на три, четыре и пять проводников.

Для оценки влияния диаметра расщепления на напряженность электрического поля были рассмотрены фаза, расщепленная на 5 проводов. Сечение и количество проводов в фазе были фиксированы, изменялось расстояние между проводниками в расщеплении. Расчет проведен для расстояний между проводниками, равных 460, 565 и 770 мм.

Зависимость напряженности электрического поля проводов от их сечения и количества в расщеплении находилась для общих фиксированных сечений фазы. Рассматривались площади сечения фазы, равные 1000, 2000 и 3000 мм². Эти сечения составлялись из стандартных размеров проводов.

Произведена оценка влияния рассматриваемых параметров расщепления на показатели величины напряженности электрического поля. Представлены графические зависимости напряженности от различных параметров расщепления.

Численный анализ производился с использованием метода конечных элементов в программной среде Ansoft Maxwell.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, высоковольтная воздушная линия, расщепление фазы, математическое моделирование.

N.M. Trufanova, K.V. Borodulina, I.Ya. Djatlov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MATH MODELING OF ELECTRIC FIELD STRENGTH DEPENDENCE ON AIR LINE WIRES FROM SPLIT PARAMETERS

In this paper, based on the finite element method, a two-dimensional mathematical model of the electric field of wires of an air high-voltage transmission line was developed. On the basis of the proposed model, electric field distribution patterns were obtained, the electric field strength around the phase was studied during the laying of an overhead transmission line of 500 kV, and the dependence of the strength value on the phase splitting diameter and the number of wires for a fixed phase section was obtained. The two-dimensional problem of the electrostatic field, based on the differential Poisson equation, was solved.

The study considered a single phase, split into three, four and five conductors.

To evaluate the effect of the splitting diameter on the electric field strength, we considered a phase split into 5 wires. The cross-section and the number of wires in the phase were fixed, the distance between the conductors in the splitting varied. The calculation was carried out for distances between conductors equal to 460, 565 and 770 mm.

The dependence of the electric field strength of the wires on their cross section and the amount in the splitting was for the total fixed cross sections of the phase. The cross-sectional areas of the phase were equal to 1000, 2000 and 3000 mm². These cross sections were made up of standard wire sizes.

A percentage evaluation of the influence of the considered splitting parameters on the indices of the electric field strength was made. Graphical dependences of the intensity on different splitting parameters are presented.

Numerical analysis was performed using the finite element method in the software environment of Ansoft Maxwell.

Keywords: electric field strength, high-voltage air line, phase splitting, mathematical modeling.

На сегодняшний день вопросам моделирования электрических полей проводников посвящено достаточно большое количество работ.

Моделирование заряда методом кусочно-линейной функции применяется для анализа электрического поля на фазных проводниках и проводах заземления при воздействии тока молнии [1]. Рассматриваются различные факторы (рабочее напряжение, пиковый ток, и т.д.), влияющие на электрическое поле.

Математическая модель электрического поля высоковольтной линии электропередачи приводится в работе [2–5]. Модель применима как для нормального режима работы линии, так и для случая обрыва фазового проводника. Расчетные данные сравниваются с фактическими измерениями на линии электропередачи на 400 кВ.

В исследовании [6] проводится решение двумерной задачи определения напряженности электростатического поля линии электропередачи напряжением 35 кВ. Результаты численного исследования сравнивались с фактическими замерами напряженности.

В работе [7–9] рассмотрены численные методы расчета электрического поля установок высокого напряжения. Проведены их анализ и сравнение. Численные методы расчета потенциала электрического поля рассматриваются в [10]. Задача решается двумя способами, результаты которых затем сравниваются. Эти способы основаны на функциях, реализованных в программе MathCAD.

Задача расчета электрического поля линии электропередач со сближенными фазами рассматривается в исследовании [11]. Потенциал проводов определяется системой уравнений для напряжения с учетом их сдвига. Получены картины распределения электрического поля проводов в многопроводной линии при различных углах сдвига фаз.

В источниках [12–14] приведена разработка методики построения распределения напряженности электрического поля вдоль высоковольтных линий электропередачи с одновременным учетом рельефа местности, температуры окружающей среды и погодных условий. Решение по представленной методике предлагается производить с помощью метода конечных элементов в программном пакете Ansys.

Работа [15–18] посвящена анализу воздействия использования электромагнитной энергии на человека и окружающую среду. Приводится пример расчета потенциала и напряженности электрического поля высоковольтной воздушной линии. Рассчитанные данные позволят спрогнозировать значения напряженности электрического поля линий высокого напряжения и влияние этого поля на электрооборудование и живые существа.

В рассмотренных литературных источниках не проводились исследования зависимости напряженности электрического поля проводов ЛЭП от параметров расщепления.

Объектом исследования являлись провода типа АС [19], расположенные на опоре ВЛ 500 кВ (рис. 1), как в работе [20].

Предметом исследования является электрическое поле фазы воздушной линии.

Цель работы – исследование зависимости напряженности электрического поля от различных параметров.

Для исследования зависимости напряженности электрического поля ВЛ от параметров расщепления решалось дифференциальное уравнение Пуассона в двухмерной постановке аналогично работе [20].

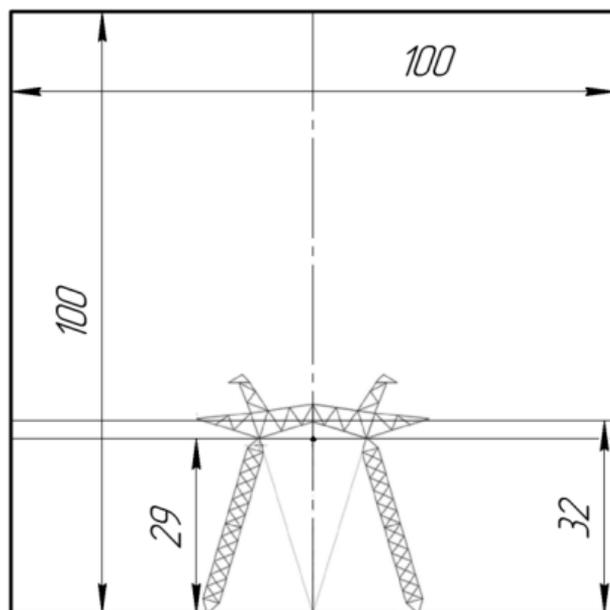


Рис. 1. Схематичное изображение области исследования

При решении задачи были сделаны следующие допущения:

- 1) электрические и физические свойства материалов постоянны;
- 2) рассматривается неравномерность поверхности последнего повива провода;
- 3) исследуется одна фаза ВЛ;
- 4) не учитывается влияние опоры и оснастки ВЛ.

Принимались следующие условия однозначности: на поверхности проводов задавалась величина потенциала 500 кВ, на поверхности земли задавался нулевой потенциал, на границе области исследования в бесконечном удалении задавался нулевой потенциал

Для оценки влияния диаметра распорки на напряженность электрического поля была рассмотрена одна фаза, распорченная на 5 проводов АС 400(54). Число и сечение проводов оставались постоянными, изменялось расстояние между ними. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Как видно из результатов (см. рис. 2), напряженность с изменением диаметра распорки меняется незначительно. С увеличением диаметра от 460 до 565 мм напряженность изменилась на 0,6 %, а с увеличением диаметра от 460 до 770 мм напряженность снизилась на 1,2 %. Следовательно, изменять напряженность варьированием диаметра распорки нецелесообразно.

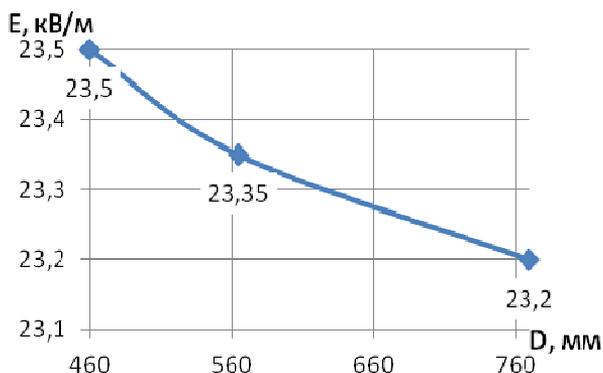


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля от диаметра расщепления

Далее рассмотрим зависимость напряженности электрического поля от числа проводов при фиксированных сечениях фазы (таблица).

Наборы исследуемых проводов и напряженность электрического поля в зависимости от сечения фазы

Сечение, мм ²	Тип провода	Набор проводов	E_{\max} , кВ/м
1000	АС 330(43)	3×330	36,88
	АС 240(32)	4×240	33,5
	АС 200(11)	5×200	32,39
2000	АС 650(79)	3×650	28,64
	АС 500(64)	4×500	26,36
	АС 400(51)	5×400	23,84
3000	АС 1000(43)	3×1000	24,26
	АС 750(51)	4×750	22,57
	АС 600(72)	5×600	20,16

Для этого рассмотрим площади фазы 1000, 2000 и 3000 мм². Данные сечения составлены из стандартных размеров проводов. Были рассчитаны значения максимальной напряженности для рассматриваемого набора проводов, формирующего определенное сечение фазы (см. таблицу).

По полученным результатам (рис. 3, б) можно увидеть, что изменение сечения проводника значительно влияет на напряженность.

Если сравнить сечение 1000 и 2000 мм², то величина напряженности уменьшилась в среднем на 22 %, а при увеличении сечения с 1000 до 3000 мм² напряженность упала на 35 %. Следовательно, наибольший эффект снижения напряженности дает увеличение площади сечения проводов фазы с 1000 до 2000 мм².

В случае разбиения фазы фиксированного сечения на 3, 4 и 5 проводов (рис. 3, а), напряженность уменьшилась на 8 % при увеличении числа проводов с 3 до 4, при изменении количества проводов в фазе с 3 до 5 напряженность снизилась на 15 %.

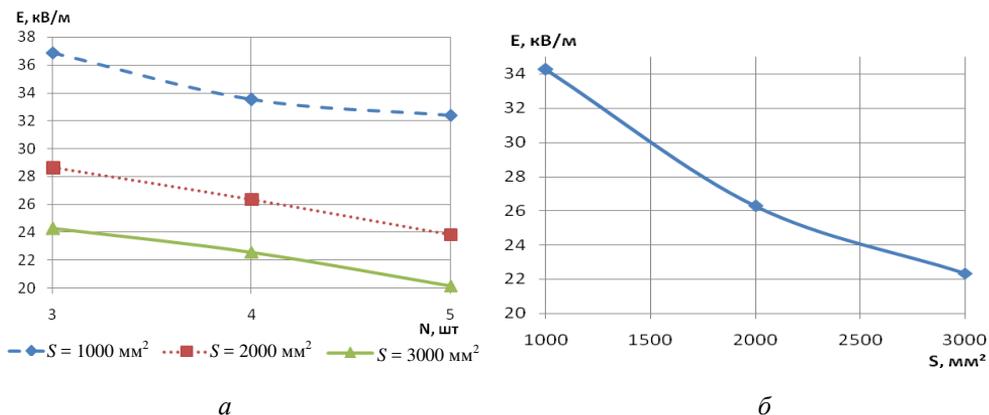


Рис. 3. Зависимость напряженности электрического поля от: количества проводов (а), сечения фазы (б)

Выводы:

1. Изменение диаметра распорки расщепления в целях снижения напряженности неэффективно.
2. Изменение напряженности от числа проводов расщепления носит линейный характер. При увеличении числа проводов в расщеплении на 1 шт. напряженность снижается в среднем на 8 %.
3. Зависимость напряженности от площади сечения проводов в фазе носит нелинейный характер. Наибольший эффект снижения напряженности дает увеличение площади сечения проводов фазы с 1000 до 2000 мм².

Библиографический список

1. Calculation of surface electric field on UHV transmission lines under lightning stroke / Zhanqing Yu, Qian Li, Rong Zeng, Jinliang He, Yong Zhang, Zhizhao Li Chijie Zhuang, Yongli Liao // Electric Power Systems Research. – 2013. – № 94. – P. 79–85.
2. Nermin Suljanović, Aljo Mujčić, Matej Zajc. Communication Characteristics of Faulted Overhead High Voltage Power Lines at Low Radio Frequencies // Energies. – 2017. – № 10. – P. 1–24.

3. Ramūnas Deltuva, Robertas Lukočius. Electric and magnetic field of different transpositions of overhead power line // Archives of electrical engineering. – 2017. – № 3. – P. 595–605.

4. Байдин Г.В., Куропатенко В.Ф., Лупанов И.В. Математическое моделирование электрических полей в электрофизических установках // Вестник ЮУГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 18–25.

5. Быковская Л.В., Чурикова Е.В. Моделирование электрического и магнитного полей воздушной линии электропередачи // Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2016. – № 5. – С. 80–85.

6. Grbić Maja, Pavlović Aleksandar, Vulević Branislav. Interlaboratory comparison of measuring and calculation results of electric field strength near 35 kV overhead power line // Zbornik Radova: Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla". – 2013. – № 23. – P. 165–176.

7. Шевченко С.Ю., Окунь А.А. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 59–62.

8. Макенова Н.А. Моделирование электрического поля стержневого заземлителя // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 84–88.

9. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами / А.М. Болотов, Н.П. Глазов, В.Д. Киселев, В.З. Хисаметдинов // Вестник Башкир. ун-та. – 2006. – № 2. – С. 17–21.

10. Красная Е.Г. Расчет распределения потенциала в межэлектродном пространстве электрогидродинамических устройств численными методами // Известия Пензен. гос. пед. ун-та им. В.Г. Белинского. – 2011. – № 26. – С. 550–555.

11. Расчет электрического поля и параметров линии управляемых самокомпенсирующихся высоковольтных линий 110 кВ методом конечных объемов / В.И. Пацук, В.П. Берзан, Г.М. Рыбакова, В.К. Анисимов // Problemele Energeticii Regionale. – 2013. – № 23. – С. 32–39.

12. Сидоров А. И, Таваров С. Ш. Построение карты напряженности электрического поля с учетом рельефа местности и температуры воздуха // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 52–55.

13. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитной обстановки на трассах многофазных линий электропередачи // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2016. – № 4(52). – С. 209–218.

14. Струман В.И. Картографирование электромагнитных полей промышленного диапазона частот в городе Петрозаводске // *Принципы экологии.* – 2017. – № 4. – С. 73–81.

15. Сивяков Б.К., Аврясова О.С. Математическое моделирование электромагнитного поля электроустановок // *Вестник Саратов. гос. техн. ун-та.* – 2010. – №. 4. – С. 74–76.

16. Музаев И.А., Музаева Л.В. Экологический мониторинг электромагнитного загрязнения территорий г. Каспийска в зоне линий электропередач // *Известия Дагестан. гос. пед. ун-та. Сер. Естественные и точные науки.* – 2016. – Т. 10, № 3. – С. 73–78.

17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи // *Вестник ИрГТУ.* – 2016. – № 1. – С. 75–84.

18. Бакулевский В.А. Исследование влияния климатических факторов на потери электроэнергии в воздушных линиях электропередачи // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2016. – № 5. – С. 23–29.

19. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

20. Труфанова Н.М., Бородулина К.В., Дятлов И.Я. Исследование напряженности электрического поля проводов воздушной линии 500 кВ // *Электротехника.* – 2017. – № 11. – С. 11–13.

References

1. Zhanqing Yu, Qian Li, Rong Zeng, Jinliang He, Yong Zhang, Zhizhao Li Chijie Zhuang, Yongli Liao. Calculation of surface electric field on UHV transmission lines under lightning stroke. *Electric Power Systems Research*, 2013, no. 94, pp. 79-85.

2. Nermin Suljanović, Aljo Mujčić, Matej Zajc. Communication Characteristics of Faulted Overhead High Voltage Power Lines at Low Radio Frequencies. *Energies*, 2017, no. 10, pp. 1-24.

3. Ramūnas Deltuva, Robertas Lukočius. Electric and magnetic field of different transpositions of overhead power line. *Archives of electrical engineering*, 2017, no. 3, pp. 595-605.

4. Baidin G.V., Kuropatenko V.F., Lupanov I.V. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh polei v elektrofizicheskikh ustanovkakh [Mathematical modeling of electric fields in electrophysical installations]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 18-25.

5. Bykovskaia L.V., Churikova E.V. Modelirovanie elektricheskogo i magnitnogo polei vozduzhnoi linii elektroperedachi [Modeling of the electric and magnetic fields of the overhead power line]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 80-85.

6. Grbić Maja, Pavlović Aleksandar, Vulević Branislav. Interlaboratory comparison of measuring and calculation results of electric field strength near 35 kV overhead power line. *Zbornik Radova: Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla"*, 2013, no. 23, pp. 165-176.

7. Shevchenko S.Iu., Okun' A.A. Analiz metodov rascheta elektricheskikh polei ustanovok vysokikh napriazhenii [Analysis of methods for calculating the electric fields of high voltage Installations]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2010, no. 4, pp. 59-62.

8. Makenova N.A. Modelirovanie elektricheskogo polia sterzhnevoogo zazemlitelia [Simulation of the electric field of the rod earthing]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 84-88.

9. Bolotov A.M., Glazov N.P., Kiselev V.D., Khisametdinov V.Z. Matematicheskoe modelirovanie i chislennoe issledovanie elektricheskikh polei v sistemakh s protiazhennymi elektrodami [Mathematical modeling and numerical study of electric fields in systems with extended electrodes]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2006, no. 2, pp. 17-21.

10. Krasnaia E.G. Raschet raspredeleniia potentsiala v mezhelektroдном prostranstve elektrogidrodinamicheskikh ustroystv chislennymi metodami [The distribution of potential and strength in the interelectrode space numerical methods]. *Izvestiia Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo. Universiteta imeni V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 550-555.

11. Patsuk V.I., Berzan V.P., Rybakova G.M., Anisimov V.K. Raschet elektricheskogo polia i parametrov linii upravliaemykh samokompensiruiushchikhsia vysokovol'tnykh linii 110 kV metodom konechnykh

ob"mov [Calculation of the Electric Field and of the Parameters of Controlled Self Compensating Power Lines 110 kV Line Using the Finite Volume Method]. *Problemele Energeticii Regionale*, 2013, no. 23, pp. 32-39.

12. Sidorov A. I., Tavarov S. Sh. Postroenie karty napriazhennosti elektricheskogo polia s uchetom rel'efa mestnosti i temperatury vozdukha [Construction of a map of electric field strength taking into account the relief and air temperature]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 52-55.

13. Zakariukin V.P., Kriukov A.V., Le Van Tkhaio. Modelirovanie elektromagnitnoi obstanovki na trassakh mnogofaznykh linii elektroperedachi [Electromagnetic situation modeling on routes of multi-phase power lines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2016, no. 4(52), pp. 209-218.

14. Struman V.I. Kartografirovanie elektromagnitnykh polei promyshlennogo diapazona chastot v gorode Petrozavodske [Mapping of electromagnetic fields in the industrial frequency range in Petrozavodsk]. *Printsipy ekologii*, 2017, no. 4, pp. 73-81.

15. Siviakov B.K., Avriasova O.S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnogo polia elektroustanovok [Mathematical modeling of electromagnetic field electric]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 74-76.

16. Muzaev I.A., Muzaeva L.V. Ekologicheskii monitoring elektromagnitnogo zagriazneniia territorii goroda Kaspiiska v zone linii elektroperedach [The ecological monitoring of the electromagnetic contamination of Kaspiysk areas in the power-line zones]. *Izvestiia Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 73-78.

17. Zakariukin V.P., Kriukov A.V. Opredelenie elektromagnitnykh polei, sozdavaemykh vozduzhnymi liniiami elektroperedachi [Determination of electromagnetic fields created by overhead transmission lines]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 75-84.

18. Bakulevskii V.A. Issledovanie vliianiia klimaticheskikh faktorov na poteri elektroenergii v vozduzhnykh liniakh elektroperedachi [Investigation of the influence of climatic factors on electric power losses in overhead transmission lines]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2016, no. 5, pp. 23-29.

19. GOST 839-80. Provoda neizolirovannye dlia vozdushnykh linii elektropredachi [Wires electricity transmissions, uninsulated for air-lines]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

20. Trufanova N.M., Borodulina K.V., Diatlov I.Ia. Issledovanie napriazhennosti elektricheskogo polia provodov vozdushnoi linii 500 kV [Numerical analysis of electric field strength 500 kV aerial line wires]. *Elektrotehnika*, 2017, no. 11, pp. 11-13.

Сведения об авторах

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trufanova@pstu.ru).

Бородулина Ксения Владиславовна (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kseniya_borodulina@mail.ru).

Дятлов Илья Яковлевич (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: d.i.994@yandex.ru).

About the authors

Trufanova Nataliya Mikhailovna (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor head of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: trufanova@pstu.ru).

Borodulina Ksenia Vladislavovna (Perm, Russian Federation) is a Master Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kseniya_borodulina@mail.ru).

Dyatlov Ilya Yakovlevich (Perm, Russian Federation) is a Master Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: d.i.994@yandex.ru).

Получено 09.07.2018