

УДК 621.315

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.05

А.Г. Щербинин, Р.П. ЛукояновПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ КАБЕЛЕЙ
С БУМАЖНО-ПЛАСТИКОВОЙ ПРОПИТАННОЙ
ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 20 КВ**

Применение бумажно-пластиковой пропитанной (БПП) изоляции в силовых кабелях на низкое и среднее напряжение повышает эксплуатационные характеристики кабелей по сравнению с обычной бумажно-пропитанной (БП) изоляцией, что позволяет им конкурировать с аналогичными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена. **Цель исследования:** сравнение конструкции силовых кабелей на напряжение 20 кВ с БПП-изоляцией с секторными токопроводящими жилами, имеющими отдельный экран по фазной изоляции с кабелями той же формы, но с общим экраном по поясной изоляции; определение максимальных значений тангенциальных составляющих электрического поля и их местоположения в толще изоляции. **Методы и результаты исследований:** предлагается математическая модель по определению электрического поля в поперечном сечении изоляции кабеля. Дифференциальное уравнение Лапласа, описывающее распределение электрического потенциала в двумерной постановке в декартовой системе координат, решается методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS MAXWELL. Исследования проведены для кабелей на напряжение 20 кВ с токопроводящими жилами (ТПЖ) круглой и секторной форм сечением 300 мм² с БПП-изоляцией. Определено изменение максимальной напряженности электрического поля в зависимости от безразмерного времени в кабелях с экраном по поясной изоляции как для круглой, так и для секторной токопроводящей жилы. Найдены значения фазных напряжений для кабелей с секторными жилами, при которых наблюдаются максимальные значения нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля. Определены местоположения в изоляции, в которых тангенциальные составляющие напряженности электрического поля достигают наибольших значений. Получено, что для кабелей с экраном по поясной изоляции с токопроводящими жилами как секторной, так и круглой формы максимальные значения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля в разы превышают допустимое значение тангенциальной электрической прочности. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при построении новых конструкций силовых кабелей с бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией на среднее напряжение.

Ключевые слова: силовой кабель; секторные токопроводящие жилы; бумажно-пластиковая пропитанная изоляция; напряженность электрического поля; нормальные и тангенциальные составляющие; математическое моделирование.

A.G. Shcherbinin, R.P. Lukojanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ELECTRIC FIELD OF CABLES WITH PAPER-IMPREGNATED INSULATION AT A VOLTAGE OF 20 kV

The use of paper-plastic impregnated (BPP) insulation in power cables for low and medium voltage increases the operational characteristics of cables compared to conventional paper-impregnated (BP) insulation, which allows them to compete with similar cables with cross-linked polyethylene insulation. **The purpose of the study:** to compare the design of power cables at a voltage of 20 kV with BPP insulation with sector conductive cores having a separate screen for phase insulation with cables of the same shape, but with a common screen for belt insulation; determination of the maximum values of the tangential components of the electric field and their location in the insulation thickness. **Methods and results of research:** a mathematical model for determining the electric field in the cross-section of cable insulation is proposed. The Laplace differential equation describing the distribution of the electric potential in a two-dimensional formulation in a Cartesian coordinate system is solved by the finite element method in the ANSYS MAXWELL software package. The studies were carried out for cables with a voltage of 20 kV with conductive cores (TPJ) of round and sector shapes with a cross section of 300 mm² with BPP insulation. The change in the maximum electric field strength depending on the dimensionless time in cables with a shield along the belt insulation, both for round and for sector conductive cores, is determined. The values of phase voltages for cables with sector cores are found, at which the maximum values of the normal and tangential components of the electric field are observed. The locations in isolation in which the tangential components of the electric field strength reach the highest values are determined. It is found that for cables with a belt insulation shield with conductive cores of both sector and round shapes, the maximum values of the tangential component of the electric field strength are several times higher than the permissible value of the tangential electrical strength. **Practical significance:** the research results can be used in the construction of new designs of power cables with paper-plastic impregnated insulation for medium voltage.

Keywords: power cable; sector conductive cores; paper-impregnated insulation; electric field strength; normal and tangential components; mathematical modeling.

Введение

Бумажно-пропитанная изоляция для силовых кабелей активно использовалась в промышленности до появления материалов из сшитого полиэтилена (СПЭ), который начал вытеснять бумажную изоляцию в связи с более высокими эксплуатационными характеристиками. Однако в последнее время ряд предприятий кабельной промышленности начал осваивать производство силовых кабелей на низкое и среднее напряжение с бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией, имеющей более высокие рабочую температуру и электрическую прочность по сравнению с обычной бумажно-пропитанной изоляцией, что позволяет им конкурировать с кабелями с изоляцией СПЭ. В статье [1] описаны характеристики данного типа изоляции. Поэтому исследования силовых кабелей с бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией стали актуальными.

Конструкция силовых кабелей с БП и БПП изоляцией на напряжение 20 кВ во многом определяется распределением вектора напряженности электрического поля по толщине изоляции. Тангенциальные составляющие электрического поля, способствующие возникновению скользящих разрядов, могут привести к электрическому пробое изоляции. Поэтому необходимо их учитывать. Ранее в статьях [2, 3] уже была рассмотрена методика определения тангенциальных составляющих электрического поля в кабелях с секторными ТПЖ с БП и БПП изоляцией на напряжение 20 кВ, где рассматривалось электрическое поле одной изолированной ТПЖ, имеющей отдельный экран по фазной изоляции. Местоположения пиковых значений уже известны в данной конструкции кабеля и находятся на расстоянии, равном одной трети толщины фазной изоляции. Также были получены допустимые значения радиуса закругления сектора и толщины изоляции для силовых кабелей секторной формы сечением 300, 400 и 500 мм². В статье [4] рассматривалась слоистая структура БПП изоляции, (так как данная изоляция состоит из слоев ламинированных бумажных лент) силового кабеля с секторной формой ТПЖ.

Постановка задачи

Исследования электрического поля проведены для кабелей с тремя секторными токопроводящими жилами (ТПЖ): с экраном по фазной изоляции (вариант конструкции 1) и без экрана по фазной изоляции, но с общим экраном по поясной изоляции, функцию которого выполняет алюминиевая или свинцовая оболочка (вариант конструкции 2). В кабелях с экраном по фазной изоляции, рассматривается поле одной секторной жилы (рис. 1), а в кабелях с экраном по поясной изоляции – всех трех ТПЖ (рис. 2).

Для проведения сравнительного анализа исследовались аналогичные конструкции кабелей с круглыми токопроводящими жилами.

Электрическая прочность БП- и БПП-изоляции вдоль лент, примерно, в десять раз меньше электрической прочности поперек лент. Поэтому в кабелях с БП- и БПП-изоляцией на напряжение 20 кВ необходимо учитывать тангенциальную составляющую напряженности электрического поля. Необходимо отметить, что слоистая структура БПП-изоляции не влияет на значения тангенциальных составляющих электрического поля, поэтому примем, что диэлектрическая проницаемость ϵ постоянна.

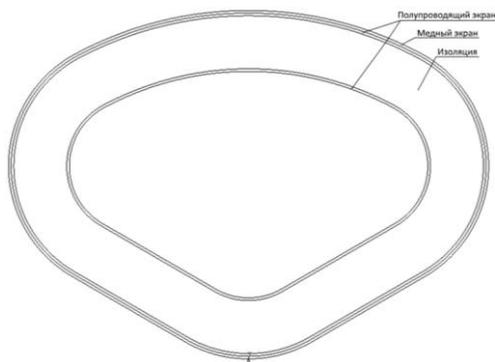


Рис. 1. Сечение изолированной жилы с экраном по фазной изоляции (вариант конструкции 1)

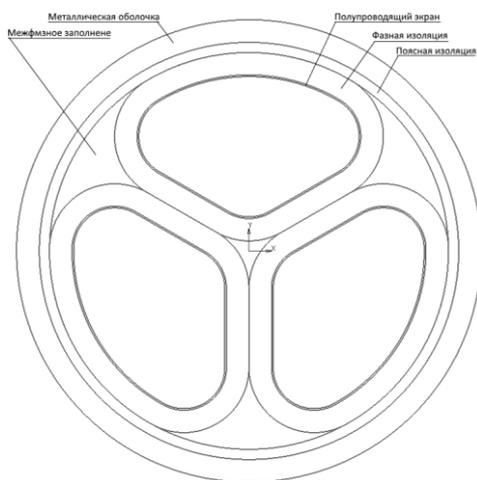


Рис. 2. Сечение трехжильного кабеля с экраном по поясной изоляции (вариант конструкции 2)

Тогда дифференциальное уравнение Лапласа в декартовой системе координат с учетом того, что градиент электрического потенциала вдоль кабеля равен нулю, запишется [5–10]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где φ – электрический потенциал.

Максимальная напряженность электрического поля в изоляции кабелей с отдельно экранированными жилами будет иметь место при амплитудном значении фазного напряжения 16 330 В, которое прикладывается к ТПЖ. При этом потенциал экрана равен 0 В.

В кабелях с экраном по поясной изоляции необходимо учитывать трехфазное напряжение на токопроводящих жилах.

Метод решения

Задача решается методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS MAXWELL. Результатом решения является поле электрического потенциала в поперечном сечении изоляции, по которому вычисляется распределение вектора напряженности [11–21] по формуле:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi . \quad (2)$$

Исследования проведены для кабелей с секторными и круглыми токопроводящими жилами сечением 300 мм². Радиус закругления секторных ТПЖ равен 5 мм. Толщина фазной изоляции кабелей с отдельно экранированными жилами – 4 мм. Толщина фазной изоляции кабелей с экраном по поясной изоляции составляет 2,75 мм, а поясной – 1,25 мм [22]. Для кабеля с вариантом конструкции 2 расчет электрического поля выполнен при следующих значениях потенциала на токопроводящих жилах: $\varphi_1 = 2836$ В; $\varphi_2 = 12509$ В; $\varphi_3 = -15345$ В (рис. 5). Нормальная составляющая напряженности электрического поля в БПП изоляции определяется поперек слоев бумажных лент, а тангенциальная – вдоль бумажных лент [23–25]. Направления намотки лент для фазной и поясной изоляции будут отличаться.

Результаты

В табл. 1 приведены максимальные значения нормальных и тангенциальных составляющих напряженности электрического поля в изоляции кабелей с секторными и круглыми токопроводящими жилами рассматриваемых вариантов конструкций кабелей.

Таблица 1

Максимальные значения нормальных и тангенциальных составляющих напряженности электрического поля в изоляции кабелей

Форма ТПЖ	С экраном по фазной изоляции		С экраном по поясной изоляции	
	E_t , кВ/мм	E_n , кВ/мм	E_t , кВ/мм	E_n , кВ/мм
Секторная	0,44	5,50	2,00	5,80
Круглая	0,00	4,80	1,40	5,60

Из таблицы видно, что как нормальная, так и тангенциальная составляющая напряженности электрического поля больше в кабелях

с экраном по поясной изоляции (вариант конструкции 2) независимо от формы ТПЖ. Необходимо отметить, что у кабелей с экраном по поясной изоляции полученные максимальные значения тангенциальной составляющей электрического поля превышают допустимое значение, равное 0,32 кВ/мм бумажно-пропитанной изоляции и 0,49 кВ/мм – бумажно-пластиковой пропитанной изоляции, в несколько раз.

На рис. 3 и 4 показано изменение максимального модуля вектора напряженности электрического поля в зависимости от безразмерного времени (ωt) в кабелях с экраном по поясной изоляции.

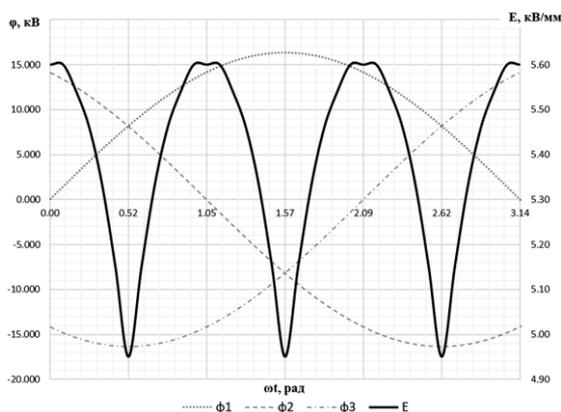


Рис. 3. Зависимости напряженности электрического поля и трехфазного напряжения от фазы в кабелях с *круглой* ТПЖ

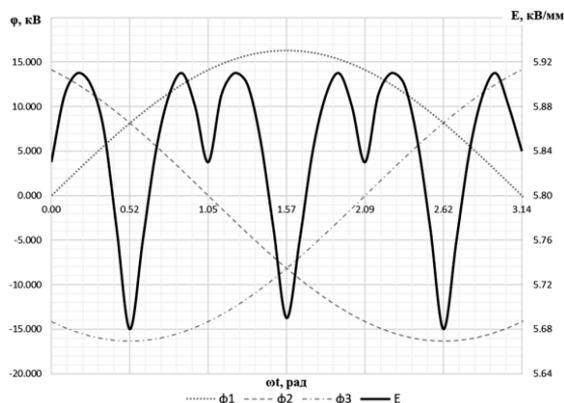


Рис. 4. Зависимости напряженности электрического поля и трехфазного напряжения от фазы в кабелях с *секторной* ТПЖ

На этих рисунках график напряженности электрического поля изображен сплошной линией, а изменения потенциалов на фазных ТПЖ – пунктирными. Видно, что в кабелях с секторными токопрово-

дующими жилами по сравнению с кабелями с круглыми ТПЖ максимальная напряженность электрического поля больше на 0,3 кВ/мм.

На рис. 5 показано распределение модуля вектора напряженности электрического поля в кабеле с экраном по поясной изоляции (вариант конструкции 2). При указанных значениях потенциалов получаются максимальные значения тангенциальных составляющих напряженности.

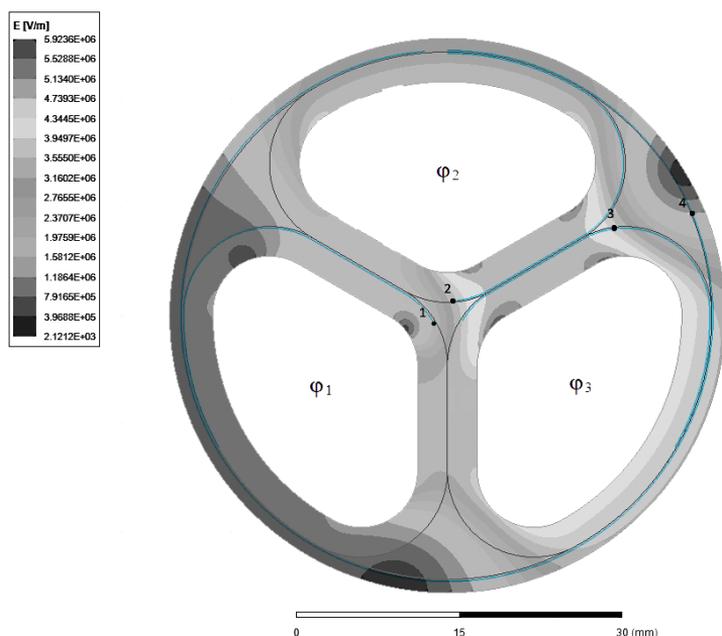


Рис. 5. Электрическое поле кабеля на напряжение 20 кВ с сечением ТПЖ 300 мм²

На рис. 5 цифрами 1, 2, 3, 4 указаны местоположения пиковых величин тангенциальных составляющих электрического поля, значения которых приведены в табл. 2. При этом в точке 1 значение тангенциальной составляющей будет наибольшим.

Таблица 2

Значения тангенциальных составляющих электрического поля

Точки на рис. 5	1	2	3	4
E_t , кВ/мм	2,0	1,1	1,0	0,35

Следует отметить, что максимальные значения тангенциальных составляющих наблюдаются ближе к поверхности фазной изоляции, как показано на рис. 6–7.

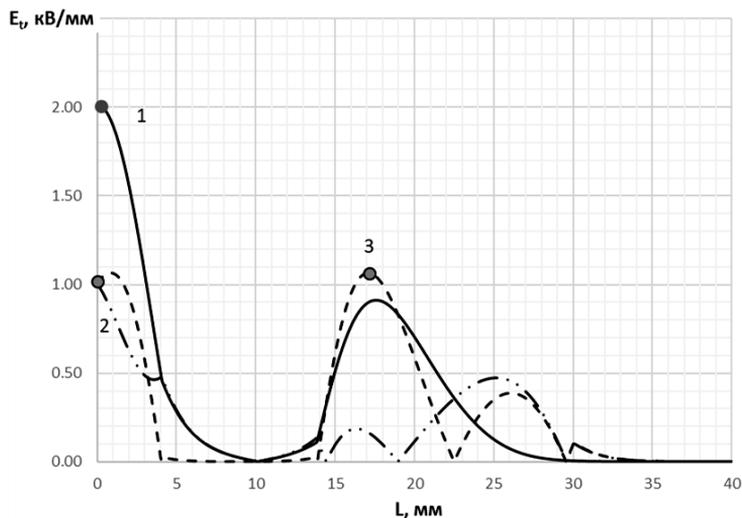


Рис. 6. Распределение тангенциальных составляющих напряженности электрического поля вдоль внешнего контура фазной изоляции

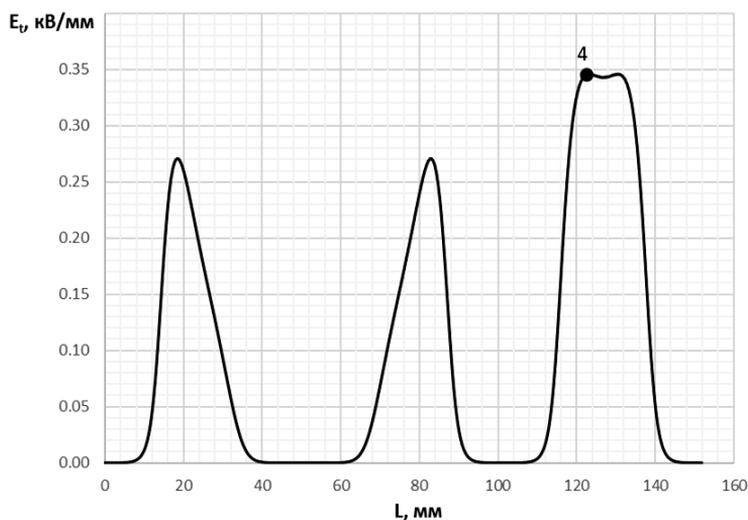


Рис. 7. Распределение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля вдоль внутреннего контура поясной изоляции

Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Определены значения потенциалов фаз, при которых наблюдаются максимальные напряженности электрического поля в кабелях с поясной изоляцией (вариант конструкции 2).

2. Получено, что в кабелях на напряжение 20 кВ с экраном по поясной изоляции (вариант конструкции 2) максимальное значение тангенциальной составляющей электрического поля в разы превышает допустимое значение. Это свидетельствует о том, что подобная конструкция кабелей с БПП-изоляцией не может быть применена на данное напряжение и выше.

3. Использование экрана по каждой фазе (вариант конструкции 1) позволяет снизить тангенциальную составляющую электрического поля до допустимых величин.

Таким образом, результаты исследований могут быть использованы при построении новых конструкций силовых кабелей с бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией на среднее напряжение.

Библиографический список

1. Савченко В.Г. Парма – передовые технологии в классическом исполнении // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № 6 (57). – С. 76–77.

2. Щербинин А.Г., Лукоянов Р.П. Численные исследования электрического поля силового кабеля с секторными жилами с пропитанной бумажно-пластиковой изоляцией на напряжение 20 Кв // Электротехника. – 2020. – № 12. – С. 78–83.

3. Щербинин А.Г., Лукоянов Р.П. Оценка нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля кабеля с секторными токопроводящими жилами на напряжение 20 кв // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – Т. 2. – С. 63–68.

4. Щербинин А.Г., Лукоянов Р.П. Численные исследования нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля в пропитанной бумажно-пластиковой изоляции кабелей с секторными жилами на напряжение 20 КВ [Электронный ресурс] // InnoTech-2020: интернет-журнал. – 2020. – URL: <https://innotech.pstu.ru/files/articles/section3/pdf/ЛукояновРП387.pdf> (дата обращения: 15.09.2020).

5. Белоруссов Н.И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции). – М.: Энергия, 1971. – 512 с.

6. Щербинин А.Г., Кабирова А.И. Математическое моделирование электрического поля кабеля с жилами секторной формы // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 178–180.

7. Щербинин А.Г., Черепок В.С. Исследование электрической емкости силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 7. – С. 163–165.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. – М.: Юрайт, 2016. – 317 с.

9. Основы кабельной техники / под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Академия, 2006. – 432 с.

10. Ковригин Л.А. Основы кабельной техники: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.

11. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3 т. Т. 1. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.

12. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 896 с.

13. Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г., Коровкин Н.В. Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты // Кабели и провода. – 2013. – №4 (341). – С. 9–14.

14. Chen Y.H., Shen J.T. Beam length dynamic stiffness // Computational Methods of Applied Mechanics in Engineering. – 1996. – Vol. 129. – P. 311–318.

15. Hallauer W.L., Liu R.Y.L. Beam bending torsion dynamics stiffness method for calculation of exact vibration modes // Journal of Sound and Vibration. – 1982. – Vol. 85. – P. 83–113.

16. Kolousek V. Dynamics in engineering structures. – London, Butterworth, 1973.

17. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. – 1022 с.

18. Терлыч А.Е., Аликина И.И., Расчет электрической емкости силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 147–150.

19. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 493 с.

20. Finite Elements – An Introduction / J. Tinsley Oden [et al.]. – Prentice Hall, 1981.

21. Concepts and Applications of Finite Element Analysis / Robert Cook [et al.]. – John Wiley & Sons, 1989.

22. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. – 2011. – № 3 (328). – С. 14–17.

23. Разыграев С.Н. Особенности устройства и поведения бумажной пропитанной изоляции кабелей в электрических полях среднего напряжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6. – С. 516–516.

24. Ветлугаев С.С. Выбор допустимых напряженностей и электрический расчет переходной муфты // Кабели и провода. – 2009. – № 3(316). – С. 16–20.

25. Кранихфельд Л.И., Рязанов И.Б. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов: учебник для техникумов. – М.: Высшая школа, 1972. – 384 с.

References

1. Savchenko V.G. Parma - peredovye tekhnologii v klassicheskom ispolnenii [Parma-advanced technologies in a classic design]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2019, no. 6 (57), pp. 76-77.

2. Shcherbinin A.G., Lukoianov R.P. Chislennye issledovaniia elektricheskogo polia silovogo kabelia s sektornymi zhilami s propitannoi bumazhno-plastikovoii izoliatsiei na napriazhenie 20 kV [Numerical studies of the electric field of a power cable with sector cores with impregnated paper-plastic insulation at a voltage of 20 kV]. *Elektrotehnika*, 2020, no. 12, pp. 78-83.

3. Shcherbinin A.G., Lukoianov R.P. Otsenka normal'nykh i tangentsial'nykh sostavliaiushchikh elektricheskogo polia kabelia s sektornymi tokoprovodiashchimi zhilami na napriazhenie 20 kV [Evaluation of the normal and tangential components of the electric field of a cable with sector conducting cores at a voltage of 20 kV]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2020, vol. 2, pp. 63-68.

4. Shcherbinin A.G., Lukoianov R.P. Chislennye issledovaniia normal'nykh i tangentsial'nykh sostavliaiushchikh elektricheskogo polia v propitannoi bumazhno-plastikovoii izoliatsii kabelei s sektornymi zhilami na napriazhenie 20 KV [Numerical studies of the normal and tangential components of the electric field in the impregnated paper-plastic insulation of cables with sector cores at a voltage of 20 kV]. *InnoTech-2020: internet-*

zhurnal, 2020, available at: <https://innotech.pstu.ru/files/articles/section3/pdf/ЛукояновРП387.pdf> (accessed 15 September 2020).

5. Belorussov N.I. *Elektricheskie kabeli i provoda (teoreticheskie osnovy kabelei i provodov, ikh raschet i konstruktsii)* [Electrical cables and wires (theoretical foundations of cables and wires, their calculation and design)]. Moscow: Energiia, 1971, 512 p.

6. Shcherbinin A.G., Kabirova A.I. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskogo polia kabelia s zhilami sektornoj formy* [Mathematical modeling of the electric field of a cable with sector-shaped cores]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2017, no. 5, pp. 178-180.

7. Shcherbinin A.G., Cherepok V.S. *Issledovanie elektricheskoi emkosti silovykh kabelei s sektornymi tokoprovodiashchimi zhilami* [Investigation of the electrical capacity of power cables with sector conducting cores]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2018, no. 7, pp. 163-165.

8. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. The electromagnetic field]. Moscow: Iurait, 2016, 317 p.

9. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Ed. I.B. Peshkov. Moscow: Akademiia, 2006, 432 p.

10. Kovrigin L.A. *Osnovy kabel'noi tekhniki* [Basics of cable technology]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2006, 94 p.

11. Demirchian K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Saint Petersburg: Piter, 2003, vol. 1, 463 p.

12. Soloveichik Iu.G., Roiak M.E., Persova M.G. *Metod konechnykh elementov dlia resheniia skaliarnykh i vektornykh zadach* [Finite element method for solving scalar and vector problems]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007, 896 p.

13. Greshniakov G.V., Kovalev G.G., Korovkin N.V. *Chislennoe modelirovanie elektricheskogo polia v usilivaiushchei izoliatsii kabel'noi mufty* [Numerical simulation of the electric field in the reinforcing insulation of a cable coupling]. *Kabeli i provoda*, 2013, no. 4 (341), pp. 9-14.

14. Chen Y.H., Shen J.T. Beam length dynamic stiffness. *Computational Methods of Applied Mechanics in Engineering*, 1996, vol. 129, pp. 311-318.

15. Hallauer W.L., Liu R.Y.L. Beam bending torsion dynamics stiffness method for calculation of exact vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, 1982, vol. 85, pp. 83-113.

16. Kolousek V. Dynamics in engineering structures. London, Butterworth, 1973.

17. Bate K.Iu. Metody konechnykh elementov [Finite element methods]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 1022 p.

18. Terlych A.E., Alikina I.I., Raschet elektricheskoi emkosti silovykh kabelei s sektornymi tokoprovodiashchimi zhilami [Calculation of the electrical capacity of power cables with sector conductive cores]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2016, no. 5, pp. 147-150.

19. Govorkov V.A. Elektricheskie i magnitnye polia [Electric and magnetic fields]. Moscow: Gosenergoizdat, 1960, 493 p.

20. Oden J. Tinsley et al. Finite Elements - An Introduction. Prentice Hall, 1981.

21. Cook Robert et al. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, 1989.

22. Savchenko V.G., Trufanova N.M., Shcherbinin A.G. Raschet sektornoj zhily [Calculation of the sector core]. *Kabeli i provoda*, 2011, no. 3 (328), pp. 14-17.

23. Razygraev S.N. Osobennosti ustroystva i povedeniia bumazhnoi propitannoi izoliatsii kabelei v elektricheskikh poliakh srednego napriazheniia [Features of the device and behavior of paper impregnated cable insulation in medium voltage electric fields]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, no. 6, pp. 516-516.

24. Vetlugaev S.S. Vybor dopustimykh napriazhennostei i elektricheskii raschet perekhodnoi mufty [Selection of permissible voltages and electrical calculation of the transition coupling]. *Kabeli i provoda*, 2009, no. 3(316), pp. 16-20.

25. Kranikhfel'd L.I., Riazanov I.B. Teoriia, raschet i konstruirovaniye kabelei i provodov: uchebnyk dlia tekhnikumov [Theory, calculation and design of cables and wires]. Moscow: Vysshaya shkola, 1972, 384 p.

Сведения об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: agshch@mail.ru).

Лукоянов Руслан Павлович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kkk.korol@yandex.ru).

About the authors

Alexey G. Shcherbinin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: agshch@mail.ru).

Ruslan P. Lukoyanov (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kkk.korol@yandex.ru).

Получено 31.08.2021