

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.09

УДК 621.315

М.Д. Наумов, А.Г. ЩербининПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ
ЛИНИЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ**

В настоящее время при производстве высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на поверхности экранов, как правило, монтируют оптоволоконные температурные датчики, которые используются для мониторинга кабельных линий в режиме реального времени в процессе их эксплуатации. При этом определение теплового состояния кабельной линии по температуре оптического волокна возможно только с использованием математической модели нестационарной теплопроводности в условиях изменяющейся токовой нагрузки. **Цель исследования:** создание математической модели для расчета и прогнозирования температуры жил кабельных линий на основе данных о параметрах окружающей среды, конструкции кабельной линии, а также температуре в экранах, полученной путем измерения. **Результаты:** исследования проводятся на примере трехфазной высоковольтной кабельной линии, проложенной в земле и состоящей из трех одножильных кабелей с медными токопроводящими жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена. Рассматриваются три способа прокладки кабельной линии: в горизонтальной плоскости на расстоянии в свету, равном диаметру кабеля; в горизонтальной плоскости вплотную; треугольником. Предлагается двумерная математическая модель нестационарной теплопроводности, численная реализация которой осуществляется в программном комплексе Ansys Fluent. Вначале в результате решения задачи стационарной теплопроводности по величине длительно допустимой температуры для изоляции из сшитого полиэтилена определяется номинальная токовая нагрузка. В качестве начального условия при решении задачи нестационарной теплопроводности используется температурное поле, полученное при токе, равном 70 % от номинального. Далее ток в кабельной линии изменяется ступенчато в диапазоне от 150 % от номинального до 70 % и обратно. В процессе численных исследований оценивается время достижения максимальной температуры до заданных уровней и определяется изменение перепада температур между токопроводящей жилой и экраном. **Практическая значимость:** данная математическая модель может быть использована для оценки температурных режимов высоковольтных кабельных линий, имеющих оптоволоконные температурные датчики.

Ключевые слова: математическая модель, силовой высоковольтный кабель, тепловое поле, кабельная линия, нестационарная задача теплопроводности

M.D. Naumov, A.G. Shcherbinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF THE NONSTATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY OF CABLE LINES LAID IN THE GROUND

At present, in the production of high-voltage cables with cross-linked polyethylene (XLPE) insulation on the surface of screens, as a rule, fiber-optic temperature sensors are mounted that are used to monitor cable lines in real time during their operation. In this case, the determination of the thermal state of the cable line by the temperature of the optical fiber is possible only using a mathematical model of non-stationary thermal conduction under conditions of changing current load. **Research objective:** to create a mathematical model for calculating and predicting the temperature of cable strand veins based on data on the environmental parameters, cable line design, and also the temperature in the screens obtained by measurement. **Results:** research is carried out on the example of a three-phase high-voltage cable line laid in the ground and consisting of three single-core cables with copper conductive conductors with XLPE insulation. Three ways of laying the cable line are considered: in the horizontal plane at a distance in the light equal to the diameter of the cable; in the horizontal plane close; triangle. A two-dimensional mathematical model of non-stationary thermal conductivity is proposed, the numerical implementation of which is carried out in the Ansys Fluent software package. Initially, as a result of solving the problem of stationary thermal conductivity, the nominal current load is determined by the value of the long-term allowable temperature for insulation from cross-linked polyethylene. As an initial condition for solving the problem of non-stationary thermal conduction, the temperature field obtained at a current of 70 % of the nominal value is used. Further, the current in the cable line changes stepwise in the range from 150 % of the nominal to 70 % and vice versa. In the process of numerical studies, the time to reach the maximum temperature to the specified levels is estimated and the change in the temperature difference between the conductive core and the screen is determined. **Practical relevance:** this mathematical model can be used to assess the temperature conditions of high-voltage cable lines with fiber-optic temperature sensors.

Keywords: mathematical model, high voltage power cable, thermal field, cable lines, non-stationary problem, methods of heat conduction.

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) находят широкое применение в электрических сетях на территории Российской Федерации. Это обусловлено целым рядом преимуществ, а именно: возможностью прокладки кабелей на трассах с большими перепадами высот; повышенными температурами работы в условиях номинальных токовых нагрузок, в режимах перегрузки и короткого замыкания. Сшитый полиэтилен обладает также высокой электрической прочностью, низкими диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь.

Долговечность кабельных линий во многом зависит от температурных режимов их эксплуатации, поэтому мониторинг теплового состояния кабелей в режиме реального времени является актуальной за-

дачей, для решения которой применяют оптические волокна, которые, как правило, монтируются на поверхности экранов высоковольтных кабелей при их производстве. Оптические волокна здесь используются в качестве распределенных температурных датчиков. Технологии измерения температуры с помощью оптоволоконных датчиков высоковольтных кабелей в режиме реального времени посвящено достаточно большое количество работ [1–8].

При этом между токопроводящей жилой (ТПЖ), имеющей максимальную температуру, и экраном имеет место достаточно большой перепад температур, величина которого может изменяться при изменении токовых нагрузок. Поэтому оценка температурного состояния кабеля в целом с учетом температуры оптического волокна возможна только с помощью математического моделирования нестационарных тепловых процессов в условиях изменяющейся токовой нагрузки. Многие исследовательские работы отечественных и зарубежных учёных [9–21] направлены на рассмотрение проблем, связанных с тепловыми режимами работы, пропускной способностью и надёжностью кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Процессы нестационарной теплопроводности рассматриваются на примере трехфазной кабельной линии, проложенной в земле и состоящей из трех одножильных кабелей марки ПвП 1×1200/185 на напряжение 220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с медной токопроводящей жилой.

Необходимые для расчета параметры кабеля приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные конструктивные элементы и размеры кабеля

Элемент конструкции кабеля	Сечение, мм ²	Внешний диаметр, мм	Материал
ТПЖ	1200	42,8	Медь
Изоляция	–	93,8	СПЭ
Экран	185	97,8	Медь
Внешняя оболочка	–	111,8	Полиэтилен

При решении температурной задачи для кабельной линии используются следующие допущения: градиент температуры вдоль кабельной линии равен нулю; теплофизические свойства материалов постоянны; плотность тока по сечению токопроводящих жил распределена равномерно.

С учетом сделанных допущений дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_v, \quad (1)$$

где x и y – декартовы координаты; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; t – температура; q_v – удельная мощность внутреннего источника тепла, которая вычисляется по формуле

$$q_v = \frac{I^2 R}{S_{\text{ТПЖ}}}, \quad (2)$$

где I – ток; R – сопротивление на единицу длины; $S_{\text{ТПЖ}}$ – сечение ТПЖ.

Глубина прокладки кабельной линии составляет 2 м. Температура поверхности земли равна 15 °С. На нижней границе массива земли заданы адиабатические условия теплообмена. На границах раздела материалов задается граничное условие четвертого рода. Ток в экране принимается равным нулю. Теплофизические свойства материалов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства

Материалы	c , Дж/(кг·°С)	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)
Земля	1250	1600	1
Медь	384	8800	400
Полиэтилен	2350	930	0,235

Рассматриваются три способа прокладки кабельной линии в земле: в горизонтальной плоскости на расстоянии в свету, равном диаметру кабеля (вариант № 1); в горизонтальной плоскости вплотную (вариант № 2); треугольником (вариант № 3).

Поставленная задача решается методом конечных объемов в программном комплексе Ansys Fluent.

На первом этапе из решения задачи стационарной теплопроводности итерационным способом подбирается номинальный ток I_H , при котором максимальная температура токопроводящей жилы равняется длительно допустимой 90 °С.

В табл. 3 приведены значения номинальных токов I_H для рассматриваемых способов прокладки.

Таблица 3

Номинальные токи

Способ прокладки	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Ток I_H , А	1394	1336	1334

На рис. 1 приведено температурное поле в массиве земли и кабельной линии, полученное при прокладке кабелей на расстоянии в свету, равном диаметру кабеля. Радиус R на рис. 1 равняется 12 м.

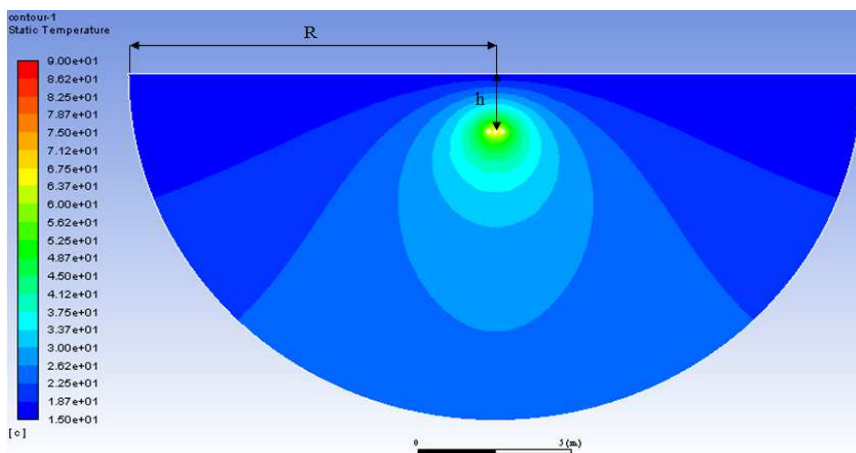


Рис. 1. Температурное поле в массиве земли и кабельной линии

На рис. 2–4 построены температурные поля в кабельных линиях для рассматриваемых условий прокладки. Из табл. 3 и рис. 1–4 видно, что наибольшее значение номинального тока при прочих одинаковых условиях реализуется для первого способа прокладки. Превышение тока составляет 4 % по сравнению с вариантами № 2 и 3.

На рис. 5 построены зависимости максимальной температуры от величины токовой нагрузки кабельных линий, которые изменяются от $0,3I_H$ до $1,5I_H$. Из рисунка видно, что для указанного диапазона изменения тока максимальная температура в кабельной линии увеличивается с 22 до 184 °С. Необходимо отметить, что для изоляции СПЭ длительно допустимая температура составляет 90 °С, а в режиме перегрузки равняется 130 °С.

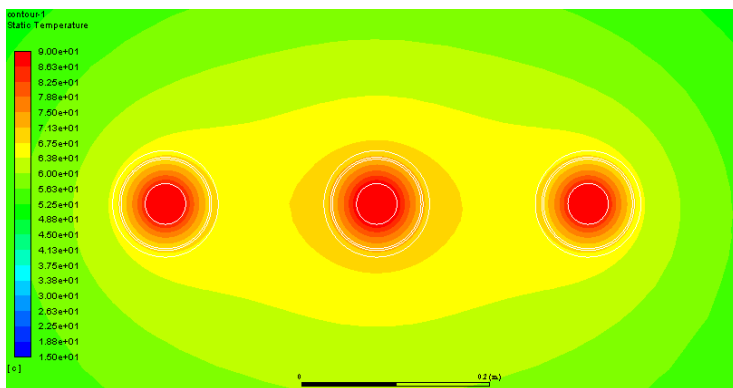


Рис. 2. Температурное поле в кабельной линии при прокладке в горизонтальной плоскости на расстоянии в свету, равном диаметру кабеля

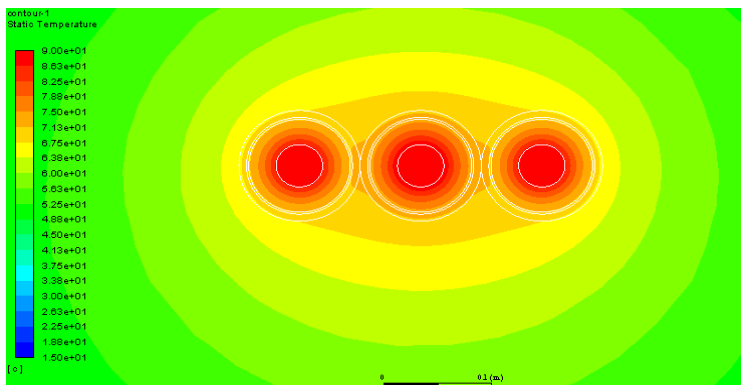


Рис. 3. Температурное поле в кабельной линии при прокладке в горизонтальной плоскости вплотную

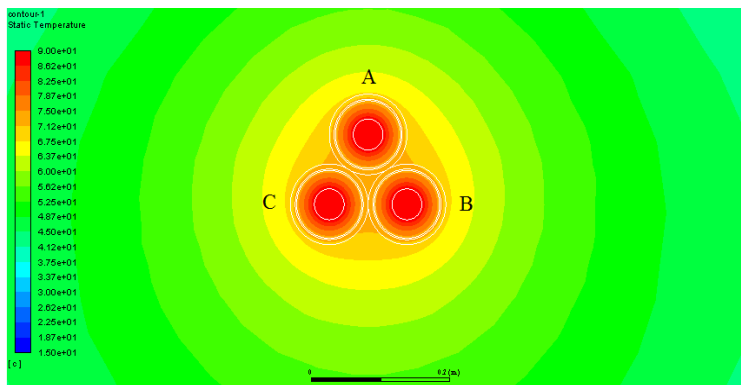


Рис. 4. Температурное поле в кабельной линии при прокладке треугольником

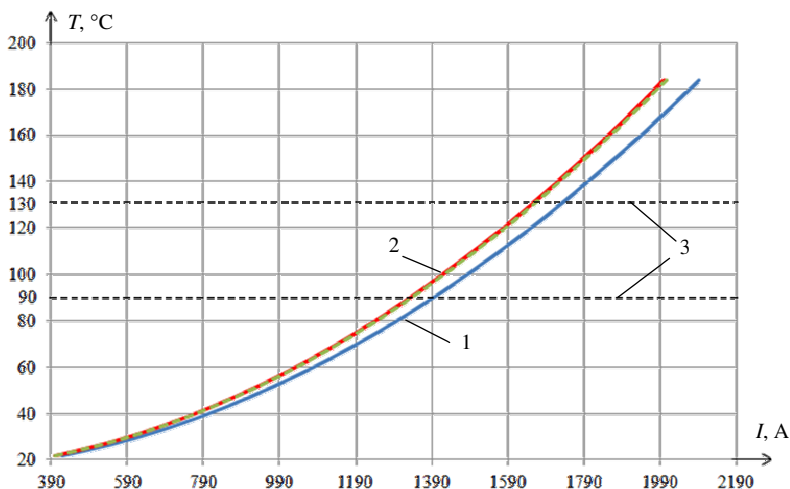


Рис. 5. Зависимости максимальной температуры от тока:
 1 – с расстоянием 1D; 2 – треугольником; 3 – вплотную

На втором этапе решается нестационарная задача теплопроводности. В качестве начального условия задается температурное поле, полученное при токе, равном $0,7I_H$. Далее токовая нагрузка ступенчато увеличивается до $1,5I_H$. После этого процесс изменения температурного поля продолжается до тех пор, пока максимальная температура не достигнет $130\text{ }^\circ\text{C}$. После чего ток ступенчато падает до величины, равной $0,7I_H$. Процесс нестационарной теплопроводности при этом продолжается до снижения максимальной температуры до величины $70\text{ }^\circ\text{C}$. Далее ток снова растет до $1,5I_H$ и т.д.

На рис. 6 для варианта № 1 приведены графики изменения температуры токопроводящей жилы среднего кабеля (красная кривая) и температуры на поверхности экрана (белая кривая) от времени. Пунктирной линией на рис. 6 показано изменение токовой нагрузки кабельной линии. Из рис. 6 видно, что для разогрева кабеля до температуры $130\text{ }^\circ\text{C}$ при токе $1,5I_H$ необходимо $334\ 800\text{ с}$ (93 ч), а для охлаждения до $70\text{ }^\circ\text{C}$ при токе $0,7I_H$ необходимо $82\ 800\text{ с}$ (23 ч). При повторном нагреве до температуры $130\text{ }^\circ\text{C}$ время сокращается до $129\ 600\text{ с}$ (36 ч), что почти более чем в два раза быстрее, чем при первоначальном нагреве. Это обусловлено тем, что после первого цикла нагрева температура в других элементах конструкции кабелей и вокруг него выросла.

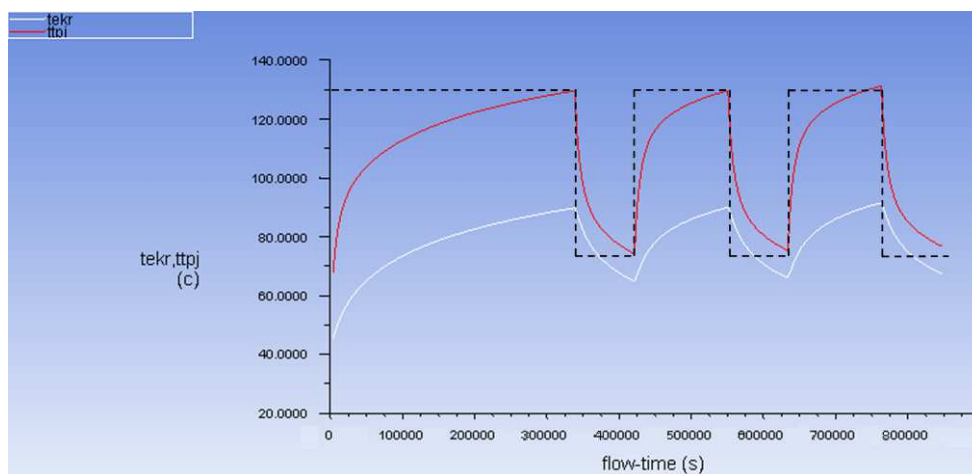


Рис. 6. Зависимости температуры экрана и жилы от времени

Необходимо также отметить, что после решения задачи стационарной теплопроводности перепад температуры между ТПЖ и экраном составлял $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. После нагрева кабелей до температуры $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ перепад вырос до величины $39,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а после охлаждения до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – снизился до величины $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Видно что, перепад температур между ТПЖ и экраном зависит не только от токовой нагрузки кабельной линии, но также существенно изменяется в случае нестационарного режима работы.

Выводы. С помощью предложенной математической модели нестационарной теплопроводности выполнено исследование температурных режимов работы высоковольтных кабельных линий, проложенных в земле. По величине номинальных токовых нагрузок проведено сравнение между различными способами прокладки кабелей. Получены температурные поля в условиях изменяющейся токовой нагрузки. Разработанная математическая модель может быть использована для оценки температурных режимов высоковольтных кабельных линий, имеющих оптоволоконные температурные датчики.

Библиографический список

1. Якунин А.В. Мониторинг теплового режима эксплуатации кабельных линий 110–500 кВ // Линии электропередачи 2010: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы IV Рос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. – Новосибирск, 2010. – С. 306–310.

2. Мокански В. Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем // Кабели и провода. – 2009. – № 2. – С. 14–17.

3. Ларин Ю.Т., Смирнов Ю.В., Гринштейн М.Л. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля // Кабель-news. – 2009. – № 8. – С. 48–53.

4. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев, Н.В. Кривошеев, В.К. Маршнер // Электро. – 2008. – № 5. – С. 38–40.

5. Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы // Кабель-news. – 2013. – № 3. – С. 32–37.

6. Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook / G.J. Anders, J.-M. Braun, A. Downes John, N. Fujimoto, M.-H. Luton, S. Rizzetto // 6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03). – Paris, 2003.

7. Лавров Ю.А. Кабели высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Требования экономичности, надежности, экологичности // Новости электротехники. – 2008. – № 2.

8. Лавров Ю.А. Системный подход к проектированию воздушных и кабельных линий электропередачи среднего и высокого напряжения // Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III Рос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. – Новосибирск, 2008. – С. 17–27.

9. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Савченко В.Г. Определение токовых нагрузок кабелей // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 61–64.

10. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале / А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, В.Г. Савченко // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 16–19.

11. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // Кабель-news. – 2009. – № 10. – С. 47–51.

12. Холодный С.Д. Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле // Электричество. – 1964. – № 6. – С. 35–40.

13. Кожевников А.Г. Системы кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена – оптимальное решение надежного электроснабжения промышленных и социальных объектов современного города // *Кабель info.* – 2006. – № 9. – С. 25–27.

14. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – С. 221–225.

15. Buller F.H. Thermal Transient on Buried Cables // *AIEE Transactions.* – 1951. – Vol. 70. – P. 45–55.

16. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности // *Новости электротехники.* – 2006. – № 6.

17. Осика Л.К. Способы учёта измерения температуры по трассам линий электропередачи для уточнения их математических моделей // *Электро.* – 2006. – № 6. – С. 27–29.

18. Удовиченко О.В. Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III Рос. науч.-практ. конф. с междунар. участ.* – Новосибирск, 2008. – С. 301–304.

19. Neher J.H., McGrath M.H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems // *AIEE Transactions.* – 1957. – Vol. 76. – Part 3. – P. 755–772.

20. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 2010. – 343 с.

21. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

References

1. Iakunin A.V. Monitoring teplovogo rezhima ekspluatatsii kabel'nykh linii 110-500 kV [Monitoring of the thermal regime of exploitation of cable lines 110-500 kV]. *Linii elektroperedachi 2010: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress. Materialy IV Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Novosibirsk, 2010, pp. 306-310.

2. Mokanski V. Silovoi kabel' vysokogo napriazheniia so vstroennym volokonno-opticheskim modulem [Power cable high voltage with integrated fiber optic module]. *Kabeli i provoda*, 2009, no. 2, pp. 14-17.

3. Larin Iu.T., Smirnov Iu.V., Grinshtein M.L. Primenenie sistemy temperaturnogo monitoringa s pomoshch'iu opticheskogo kabelia dlia kontroliia raspredeleniia temperatury vdol' elektricheskogo silovogo kabelia [Application of the temperature monitoring system using an optical cable to control the temperature distribution along the electric power cable]. *Kabel'-news*, 2009, no. 8, pp. 48-53.

4. Beliakov V.V., Malyshev A.V., Krivosheev N.V., Marshner V.K. Monitoring silovykh kabel'nykh linii s adaptatsiei k usloviiam okruzhaiushchei sredy v rezhime real'nogo vremeni [Monitoring of power cable lines with adaptation to environmental conditions in real time]. *Elektro*, 2008, no. 5, pp. 38-40.

5. Greshniakov G.V., Kovalev G.G. Chislenniye metod analiza nagruzochnoi sposobnosti vysokovol'tnoi kabel'noi sistemy [Numerical method for analysis of load carrying capacity of HV cable systems]. *Kabel'-news*, 2013, no. 3, pp. 32-37.

6. Anders G.J., Braun J.-M., John A. Downes, Fujimoto N., Luton M.-H., Rizzetto S. Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook. *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.

7. Lavrov Iu.A. Kabeli vysokogo napriazheniia s izoliatsiei iz sshitogo polietilena. Trebovaniia ekonomichnosti, nadezhnosti, ekologichnosti [High voltage Cables with XLPE insulation. Requirements of efficiency, reliability, environmental friendliness]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no. 2.

8. Lavrov Iu.A. Sistemnyi podkhod k proektirovaniu vozdukhnykh i kabel'nykh linii elektroperedachi srednego i vysokogo napriazheniia [System approach to the design of overhead and cable power lines of medium and high voltage]. *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress. Materialy III Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2008, pp. 17-27.

9. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Savchenko V.G. Opredelenie tokovykh nagruzk kabelei [Determination of current loads of cables]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 6, pp. 61-64.

10. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu., Savchenko V.G. Opredelenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kabelei, prolozhennykh v kabel'nom kanale [Determination of operational characteristics of cables laid in the cable channel]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 11, pp. 16-19.

11. Titkov V.V. K otsenke teplovogo rezhima trekhfaznoi linii iz SPE-kabelia [To the assessment of the thermal regime of three-phase lines from the EIT-cable]. *Kabel'-news*, 2009, no. 10, pp. 47-51.

12. Kholodnyi S.D. Nagrevanie i okhlazhdenie kabelia, prolozhennogo v zemle [Heating and cooling of the cable laid in the ground]. *Elektrichestvo*, 1964, no. 6, pp. 35-40.

13. Kozhevnikov A.G. Sistemy kabel'nykh linii s izoliatsiei iz sshitogo polietilena - optimal'noe reshenie nadezhnogo elektrosnabzheniia promyshlennykh i sotsial'nykh ob"ektov sovremennogo goroda [Systems of cable lines with insulation of cross-linked polyethylene - the optimal solution for reliable power supply of industrial and social facilities of the modern city]. *Kabel' info*, 2006, no. 9, pp. 25-27.

14. Shneerson E.M. Tsifrovaia releinaia zashchita [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, pp. 221-225.

15. Buller F.H. Thermal Transient on Buried Cables. *AIEE Transactions*, 1951, vol. 70, pp. 45-55.

16. Lavrov Iu.A. Kabeli 6-35 kV s plastmassovoi izoliatsiei. Faktory ekspluatatsionnoi nadezhnosti [Cables 6-35 kV with plastic insulation. Factors of operational reliability]. *Novosti elektrotekhniki*, 2006, no. 6.

17. Osika L.K. Sposoby ucheta izmereniia temperatury po trassam linii elektroperedachi dlia utochneniia ikh matematicheskikh modelei [Methods of accounting for temperature measurement along the routes of power lines to clarify their mathematical model]. *Elektro*, 2006, no. 6, pp. 27-29.

18. Udovichenko O.V. Temperaturnyi monitoring kabel'nykh linii vysokogo napriazheniia na osnove kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena [Temperature monitoring of high-voltage cable lines based on cables with cross-linked polyethylene insulation]. *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress. Materialy III Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2008, pp. 301-304.

19. Neher J.H., McGrath M.H. Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems. *AIEE Transactions*, 1957, vol. 76, part 3, pp. 755-772.

20. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiia, 2010. 343 p.

21. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat Transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981. 416 p.

Сведения об авторах

Наумов Михаил Дмитриевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: naumoff.mikh@yandex.ru).

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).

About the authors

Naumov Mikhail Dmitrievich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: naumoff.mikh@yandex.ru).

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

Получено 27.01.2020