

УДК 621.315.232

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.02

Н.М. Труфанова, И.Б. КухарчукПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНОГО КАНАЛА
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССОВ ТЕРМОДИНАМИКИ**

Определение допустимых рабочих токов в условиях изменения количества линий кабельного канала, в аварийных режимах сопровождается определенными трудностями ввиду большого количества оказывающих влияние факторов. Является актуальным вопрос использования численного моделирования при эксплуатации и проектировании кабельных сооружений сложной конструкции. **Цель исследования:** разработка системы управления процессом распределения электрической энергии в кабельном канале для повышения эффективности использования и обеспечения безопасной эксплуатации силовых кабелей. **Результаты:** построена структурная схема системы управления токовой нагрузкой кабельного канала с использованием математической модели с целью проверки допустимости перспективных нагрузочных режимов. Исследовалась задача оценки тепловых режимов работы кабельного канала в условиях изменяющихся нагрузок. Построена математическая модель процессов термодинамики в подземном кабельном канале, включающем в себя несколько кабельных линий, расположенных в трубах и нагруженных неравномерно. Получено температурное поле канала в условиях исходного рабочего режима. Исследован перспективный режим работы канала в условиях прокладки дополнительной двухцепной кабельной линии в резервных трубах. Получены температурные поля в канале с дополнительными линиями. Исследованы аварийные режимы работы кабельного канала, которые могут привести к существенному разогреву кабельных линий. Получены температурные поля канала в условиях аварийных режимов работы. Оценены изменения температуры наиболее разогретых в исходном режиме кабельных линий с целью контроля не превышения предельно допустимых значений. **Практическая значимость:** разработанная система управления с использованием математической модели может быть использована при проектировании, а также эксплуатации кабельных сооружений сложной формы.

Ключевые слова: численная модель, кабельный канал, температурное поле.

N.M. Trufanova, I.B. Kukharchuk

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EVALUATION OF CABLE CHANNEL PERFORMANCE BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF THERMODYNAMICS PROCESSES

Determination of permissible operating currents in conditions of non-stationary loads and changes in the number of cable channel lines, as well as in emergency modes, is accompanied by certain difficulties due to the large number of influencing factors. The issue of using numerical modeling in the operation and design of cable structures of complex construction is relevant. **Purpose:** development of a control system for the distribution of electrical energy in the cable channel to improve the efficiency of use and ensure safe operation of power cables. **Results:** a block diagram of the cable channel current loading control system using a mathematical model is constructed to check the validity of prospective load conditions. The problem of evaluating the thermal modes of cable channel operation under changing loads was studied. A mathematical model of thermodynamic processes in an underground cable channel that includes several cable lines located in pipes and loaded unevenly is constructed. The temperature field of the channel in the initial operating mode is obtained. The perspective mode of operation of the channel in the conditions of laying an additional two-chain line in the backup pipes has been studied. Temperature fields in the channel with additional lines are obtained. Emergency modes of operation of the cable channel that can lead to significant heating of cable lines are investigated. Temperature fields of the channel under emergency operating conditions were obtained. Changes in the temperature of the most heated cable lines in the initial mode were evaluated in order to control not exceeding the maximum permissible values. **Practical relevance:** the developed control system using a mathematical model can be used in the design and operation of complex cable structures.

Keywords: numerical model, cable channel, temperature field.

Введение. Рациональное распределение электрической энергии в пределах крупных городов с многоэтажной застройкой становится все более сложной задачей. В результате уплотнения застройки, реконструкции городских объектов нагрузка эксплуатируемых кабельных линий постоянно меняется [1]. Все большее разнообразие в способах прокладки кабельных линий в условиях разветвленного мегаполиса усложняет процесс определения значений длительно допустимых токов с использованием нормативных документов, таких как ПУЭ и ГОСТ Р МЭК [2].

Работоспособность кабельных линий напрямую зависит от определения достоверных рабочих режимов. В условиях меняющейся нагрузки важной составляющей обеспечения безаварийной работы системы распределения электрической энергии становятся контроль и прогнозирование температурных полей в кабельных каналах и, как следствие, распределение нагрузки по кабельным линиям [3]. Точное

определение рабочей температуры кабельной линии позволяет снизить количество отказов кабеля вследствие перегрева и ускоренного старения изоляции [4]. Непосредственное измерение температуры с помощью встроенных датчиков, как правило оптических, позволяет оценить температурный режим работы системы в настоящем времени [5–8]. Исследование температурных полей в перспективных, в том числе аварийных режимах, возможно с помощью численного моделирования.

Численное моделирование процессов теплообмена учитывает все условия, оказывающие влияние на распределение температуры в кабельном канале и за его пределами. Оценить адекватность полученных с помощью расчетов значений, а также контролировать возможные изменения внешних воздействий, позволяют встроенные датчики температуры. Внедрение цифровых технологий в сферу распределения электроэнергии помогает обеспечивать стабильную и безаварийную работу систем энергоснабжения.

Роль численной модели в процессе управления нагрузкой кабельного канала. В процессе эксплуатации кабельного канала оператор диспетчерской службы контролирует соответствие существующего режима заданным параметрам, таким как нагрузка на кабельных линиях, рабочая температура кабелей. При изменении загрузки линий вследствие аварийных режимов или по запросу потребителей диспетчер оценивает работоспособность системы и выбирает оперативные воздействия. Использование математической модели процессов теплообмена в кабельном канале с целью анализа температурного состояния канала, установившегося в результате изменения загрузки линий, позволяет более точно оценить точки возможных превышений критических температур. На рис. 1 представлена структурная схема системы управления токовой нагрузкой кабельного канала с использованием математической модели.

При получении новых значений рабочих токов в виде запроса $I^{\text{запр}}$ оператор вводит данные в математическую модель $I^{\text{пров}}$ с целью оценки температурного состояния системы в условиях измененных нагрузок. При анализе рассчитанных температурных полей $T^{\text{расч}}$ проверяется условие неперевышения критических температур. При выполнении данного условия значения новых предельных нагрузок передаются потребителям $I^{\text{рез}}$, которые устанавливают возможные реальные значения нагрузок на технологическом объекте управления (ТОУ) $I^{\text{реал}}$, не пре-

вышающие вновь заданные. Оператор контролирует фактические нагрузки в системе с помощью датчиков $I^{\text{факт}}$. Подробно алгоритм работы оператора с математической моделью, определение оптимальных токовых нагрузок описаны в [9].

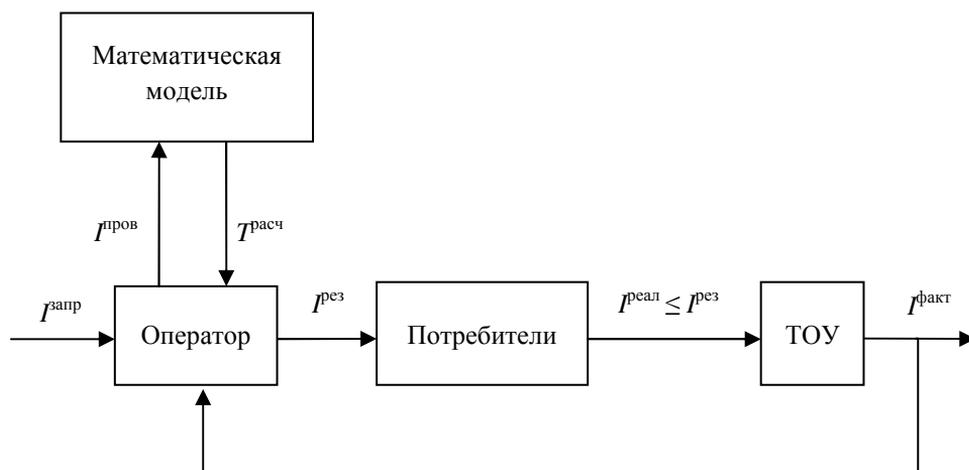


Рис. 1. Структурная схема системы управления токовой загрузкой кабельного канала

Математическая модель процессов теплообмена в кабельном канале. Реализацию математической модели сложных процессов теплообмена целесообразно производить с использованием специализированных инженерных пакетов, позволяющих учесть максимальное количество оказывающих влияние факторов [10–17]. Численное моделирование дает возможность исследовать влияние внешних условий, например, таких как снежный покров, толщина и плотность которого могут существенно изменить температурное поле кабельного сооружения [18].

Предложена двухмерная математическая модель процессов теплообмена в подземном кабельном канале, нагруженном неравномерно, имеющем резервные трубы для дополнительной прокладки линий. Кабельный канал представляет собой бетонный монолит с восемнадцатью полиэтиленовыми трубами и проложенными в них кабельными линиями. Используются кабели на напряжение 6 и 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и одной алюминиевой токоведущей жилой. Ниже приведены основные геометрические параметры объекта.

Геометрические параметры кабельного канала

Глубина залегания канала, м	0,9
Высота бетонного монолита, м	0,955
Ширина бетонного монолита, м	1,480
Диаметр трубы с кабелем на напряжение 6 кВ, м	0,16
Диаметр трубы с кабелем на напряжение 35 кВ, м	0,225
Площадь сечения токопроводящей жилы, мм ²	150

Система, описывающая процессы тепломассообмена при протекании электрического тока в кабельных линиях, проложенных в трубах с воздухом, в двумерной задаче включает в себя следующие уравнения (1)–(5):

– уравнение движения для воздуха:

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \right) + g\beta(t - t_0), \quad (1)$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (2)$$

– уравнение неразрывности:

$$U_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + U_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = -\rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \right), \quad (3)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_v = 0, \quad (4)$$

– уравнение для мощности внутреннего источника тепла в жиле и экране кабеля:

$$q_v = \iint_S \frac{I^2}{\sigma} dS, \quad (5)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости воздуха; t – температура; P – отклонения давления воздуха от гидростатического; g – ускорение свободного падения; ρ, μ, λ – плотность, вязкость и теплопроводность материалов; t_0 – температура,

равная 20 °С; β – температурный коэффициент плотности воздуха; q_v – мощность внутреннего источника тепла; I – номинальный ток токопроводящей жилы кабеля; σ – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы кабеля; S – площадь сечения жилы.

Полная постановка задачи с допущениями и граничными условиями описана в [19]. Полученная задача решалась с помощью инженерного пакета ANSYS.

На рис. 2 представлено распределение температуры в поперечном сечении кабельного канала в рабочем режиме. Ниже указана токовая нагрузка линий в рабочем режиме.

Токовая нагрузка линий в рабочем режиме

Номер линии	1	2	6	7	8	12	13	14	15	16	17	18
Рабочий ток, А	160	139	139	124	88	139	140	89	125	108	108	140

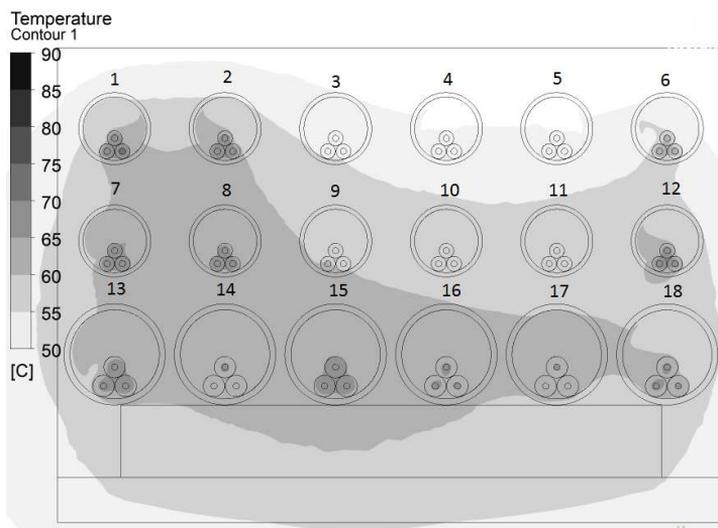


Рис. 2. Температурное поле кабельного канала

В данном режиме наиболее нагретыми являются линии номер 1, 7, 13, 15. Температура токопроводящих жил этих линий составляет 70 °С.

В данный кабельный канал предполагается добавить двухцепную линию с суммарной токовой нагрузкой 280 А, в рабочем режиме распределенной между двумя линиями. Необходимо определить оптимальное расположение линий, а также оценить возможные аварийные режимы, в которых вся нагрузка будет передаваться по одной линии [20].

Для прокладки вновь вводимых линий были выбраны трубы номер 4 и 5, которые находятся в наилучших температурных условиях. Рассмотрены рабочий режим и аварийный режим отключения линии номер 4 при передаче всей нагрузки по линии 5. Также рассмотрен аварийный режим соседней двухцепной линии при отключении линии номер 12 и передаче всей нагрузки по линии номер 6. На рис. 3 представлены температурные поля участка кабельного канала, соответствующие описанным режимам. Для рассматриваемых кабелей значение рабочей температуры составляет 90 °С на поверхности жилы.

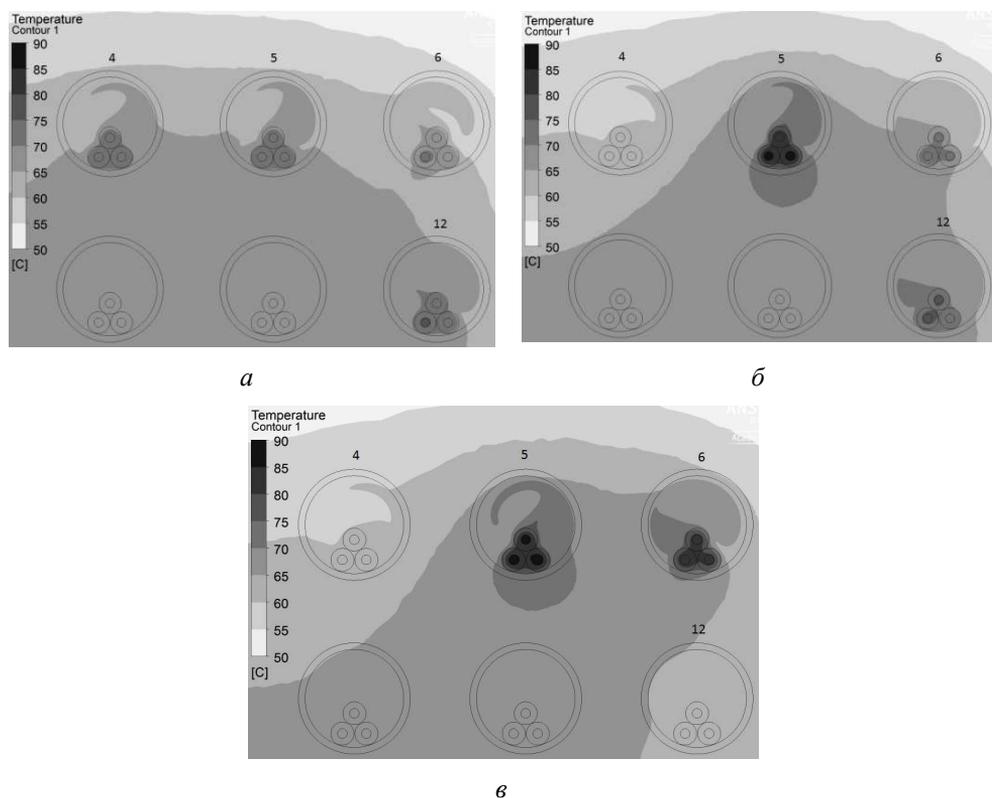


Рис. 3. Температурные поля участка канала: *а* – рабочий режим; *б* – аварийный режим отключения линии 4; *в* – аварийный режим отключения линии 4 и 12

Максимальная температура токопроводящих жил в рассмотренных условиях не превысила 86 °С. Температура поверхности жил наиболее разогретых кабельных линий номер 1, 7 и 13 увеличилась на 3 °С, кабельной линии номер 15 – на 6,3 °С. Как показало исследование перспективных режимов работы канала, расположение дополни-

тельной двухцепной линии в трубах 4 и 5 не приводит к превышению рабочих температур жил кабелей сверх допустимых значений.

Выводы. Многочисленные исследования численных моделей процессов, протекающих в кабельных каналах, сравнения с натурными экспериментами показывают адекватность получаемых результатов. Использование моделирования процессов тепломассопереноса в кабельных сооружениях помогает обеспечивать допустимые эксплуатационные условия, определять оптимальные нагрузочные режимы, контролировать влияние изменений перетоков. Модели нестационарных режимов позволяют оценить время нагрева кабельных линий в условиях меняющейся нагрузки, в том числе и в аварийных режимах. Численные модели становятся неотъемлемой частью этапов проектирования и эксплуатации кабельных сооружений.

Библиографический список

1. Кучеров Ю.Н. Проблемы обеспечения безопасности потребителей и объектов электроэнергетики при нарушениях работы энергосистемы // Энергетик. – 2007. – № 8. – С. 8–12.

2. Полещук С.И. О теплотехнических расчетах кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 1: Допустимые токовые нагрузки // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 2. – С. 60–70.

3. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 34–38.

4. Полуянович Н.К., Дубяго М.Н. Прогнозирование ресурса изоляционных материалов кабельных линий с использованием метода искусственных нейронных сетей // Математические методы в технике и технологиях. – 2020. – Т. 1. – С. 118–122.

5. 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.

6. Ларин Ю.Т. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля // Кабель-news. – 2009. – № 8. – С. 48–53.

7. 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.

8. 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.

9. Kukharchuk I.B., Trufanova N.M. Control of Electrical Energy Distribution in a Cable Channel // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90. – No. 11. – P. 703–708. DOI: 10.3103/S1068371219110099

10. Дмитриев М.В. Система поправочных коэффициентов при выборе кабелей // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 4. – С. 84–90.

11. Tsui Y.T. On heat transfer between cable and its surrounding pipe or duct wall // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102. – Iss. 5. – P. 1249–1252. DOI: 10.1109/TPAS.1983.318070

12. Халитов В. Кабели со СПЭ-изоляцией. Расчет блочной канализации // Новости электротехники. – 2017. – № 5(107)–6(108). – С. 72–78.

13. Зализный Д.И., Прохоренко С.Н. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 5. – С. 25–34.

14. Карагодин В.В., Рыжий Н.В., Смирнов С.В. Оценка влияния тепловых процессов на потери электроэнергии в кабельных линиях систем электроснабжения специальных объектов // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. – 2019. – № 669. – С. 254–265.

15. Baazzim M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. Comparison of Finite-Element and IEC Methods for Cable Thermal Analysis under Various Operating Environments // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 8. – № 3. – P. 484–489.

16. Echavarren F.M., Rouco L., Gonzalez A. Dynamic Thermal Modeling of Isolated Cables // 17th Power Systems Computation Conference. – Stockholm. – Sweden, 2011. – Vol. 1. – P. 611–617.

17. Петровский А.А., Стрижиченко А.В. Применение изоляционных труб «Протексофлекс» для прокладки силовых кабельных линий // Материалы науч.-практ. конф., посв. 60-лет. пуска первого гидроагрегата Волжской КЭС: сб. докл. – 2019. – С. 22–25.

18. Полещук С.И. О теплотехнических расчетах кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. III: Особенности расчетов зимних режимов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 4. – С. 92–103.

19. Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. Расчет теплового поля кабельного канала с учетом тепловых потерь в экранах кабелей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 179–193.

20. Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N. Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation // International Journal of Energy. – 2015. – № 9. – P. 12–19.

References

1. Kucherov Iu.N. Problemy obespecheniia bezopasnosti potrebitelei i ob"ektov elektroenergetiki pri narusheniikh raboty energosistemy [Problems of ensuring the safety of consumers and electric power facilities in case of power system failures]. *Energetik*, 2007, no. 8, pp. 8-12.

2. Poleshchuk S.I. O teplotekhnicheskikh raschetakh kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena. Chast' 1. Dopustimye tokovye nagruzki [About thermal engineering calculations of cables with cross-linked polyethylene insulation. Part 1. Permissible current loads]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2017, no. 2, pp. 60-70.

3. Grigor'eva M.M., Kuznetsov G.V. Teplomassoperenos v usloviikh elektricheskoi peregruzki kabel'nykh linii [Heat and mass transfer in conditions of electrical overload of cable lines]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 34-38.

4. Poluianovich N.K., Dubiago M.N. Prognozirovanie resursa izoliatsionnykh materialov kabel'nykh linii s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neironnykh setei [Forecasting the resource of insulation materials of cable lines using the method of artificial neural networks]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh*, 2020, vol. 1, pp. 118-122.

5. 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.

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

7. 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.

8. 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.

9. Kukharchuk I.B., Trufanova N.M. Control of Electrical Energy Distribution in a Cable Channel. *Russian Electrical Engineering*. 2019, vol. 90, no. 11, pp. 703-708. DOI: 10.3103/S1068371219110099

10. Dmitriev M.V. Sistema popravochnykh koeffitsientov pri vybore kabelei [The system of correction factors when choosing cables]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2017, no. 4, pp. 84-90.

11. Tsui Y.T. On heat transfer between cable and its surrounding pipe or duct wall. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, vol. PAS-102, iss. 5, pp. 1249-1252. DOI: 10.1109/TPAS.1983.318070

12. Khalitov V. Kabeli so SPE-izoliatsiei. Raschet blochnoi kanalizatsii [Cables with cross-linked polyethylene insulation. Calculation of block sewers]. *Novosti elektrotekhniki*, 2017, no. 5(107)–6(108), pp. 72-78.

13. Zaliznyi D.I., Prokhorenko S.N. Matematicheskaiia model' teplovykh protsessov odnozhil'nogo silovogo kabelia [Mathematical model

of thermal processes of a single-core power cable]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2012, no. 5, pp. 25-34.

14. Karagodin V.V., Ryzhii N.V., Smirnov S.V. Otsenka vliianiia teplovykh protsessov na poteri elektroenergii v kabel'nykh liniakh sistem elektrosnabzheniia spetsial'nykh ob"ektov [Assessment of the influence of thermal processes on power losses in cable lines of power supply systems of special facilities]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 254-265.

15. Baazzim M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. Comparison of Finite-Element and IEC Methods for Cable Thermal Analysis under Various Operating Environments. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 484-489.

16. Echavarren F.M., Rouco L., Gonzalez A. Dynamic Thermal Modeling of Isolated Cables. *17th Power Systems Computation Conference*. Stockholm, Sweden, 2011, vol. 1, pp. 611-617.

17. Petrovskii A.A., Strizhichenko A.V. Primenenie izoliatsionnykh trub "Proteksorefleks" dlia prokladki silovykh kabel'nykh linii [The use of insulating pipes "Processorless" for laying of power cable lines]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 60-letiiu paska pervogo gidroagregata Volzhskoi KES: sbornik dokladov*, 2019, pp. 22-25.

18. Poleshchuk S.I. O teplotekhnicheskikh raschetakh kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena. Chast' III. Osobennosti raschetov zimnikh rezhimov [About thermal engineering calculations of cables with cross-linked polyethylene insulation. Part III. Features of winter mode calculations]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*, 2017, no. 4, pp. 92-103.

19. Trufanova N.M., Kukharchuk I.B., Feofilova N.V. Raschet teplovogo polia kabel'nogo kanala s uchetom teplovykh poter' v ekranakh kabelei [Calculation of the cable channel thermal field taking into account thermal losses in the shield of cables]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp.179-193.

20. Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N. Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation. *International Journal of Energy*, 2015, no. 9, pp. 12-19.

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: ktei@pstu.ru).

Кухарчук Ирина Борисовна (Пермь, Россия) – аспирантка кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kuharchuk_ib@mail.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: ktei@pstu.ru).

Kukharchuk Irina Borisovna (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kuharchuk_ib@mail.ru).

Получено 17.08.2020