

УДК 621.315.232

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.04

Н.М. Труфанова, А.В. Казаков, И.Б. КухарчукПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ПОДХОДЫ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕМПЕРАТУР КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ В КАНАЛЕ ОТ ИХ
ЗАГРУЗКИ В ВИДЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Используемые для питания электротехнических установок кабельные линии отличаются конструкциями, условиями эксплуатации и размещением. В процессе эксплуатации кабельных сооружений возникают определенные сложности в контроле теплового состояния элементов их конструкций. Своевременное определение значений максимальных температур внутри кабеля и участков возможных перегревов необходимо для поддержания работоспособности систем электроснабжения. Поэтому сегодня актуальной задачей является разработка методик быстрого и малозатратного определения теплового состояния элементов кабеля. **Объект исследования:** четыре кабельные линии, размещенные в подземном кабельном канале, с заданными диапазонами рабочих токовых нагрузок. **Цель исследования:** разработка методики оперативного прогнозирования технологических параметров эксплуатации кабельных линий для различных нагрузочных режимов. **Задачи:** разработка математической модели, заменяющей натурные эксперименты; проведение серии экспериментов и набор статистических данных; разработка параметрической модели на основе полученных данных. **Моделирование и экспериментальная часть:** на первом этапе исследования реальный кабельный канал был заменен его эквивалентной математической моделью, основанной на базовых уравнениях сохранения. Численная реализация модели была осуществлена с помощью комплекса Ansys. На следующем этапе с использованием этой модели были набраны экспериментальные данные, позволившие перейти к полиномиальной параметрической модели, отражающей зависимость нагрева элементов кабельной линии от токовых нагрузок. Модель учитывает взаимовлияние линий в канале и условия окружающей среды. Далее была проведена оценка соответствия результатов, полученных с применением параметрической модели, экспериментальным данным, показавшая работоспособность предлагаемой методики. **Значимость полученных результатов:** разработанная двухэтапная методика исследования применима для исследования похожих объектов при анализе тепловых процессов.

Ключевые слова: параметрическая модель, полином, кабельный канал.

N.M. Trufanova, A.V. Kazakov, I.B. Kukharchuk

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**APPROACHES TO THE REPRESENTATION
OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF CABLE
LINES IN THE CHANNEL ON THEIR LOADING
IN THE FORM OF A PARAMETRIC MODEL**

The cable lines used to power electrical installations differ in designs, operating conditions and placement. During the operation of cable structures, certain difficulties arise in monitoring the thermal condition of structural elements of cable lines. Timely determination of the maximum temperatures inside the cable and areas of possible overheating is necessary to maintain the operability of power supply systems. Therefore, today an urgent task is to develop methods for fast and low-cost determination of the thermal state of cable elements. **Object of research:** four cable lines located in an underground cable channel with specified ranges of operating current loads. **The purpose of the study:** to develop a methodology for operational forecasting of technological parameters of cable lines operation for various load conditions. **Tasks:** development of a mathematical model replacing field experiments; conducting a series of experiments and a set of statistical data; development of a parametric model based on the data obtained. **Modeling and experimental part:** at the first stage of the study, the real cable channel was replaced by its equivalent mathematical model based on basic conservation equations. The numerical implementation of the model was carried out using the Ansys complex. At the next stage, statistical data were collected using this model, which made it possible to switch to a polynomial parametric model reflecting the dependence of heating of cable line elements on current loads. The model takes into account the mutual influence of lines in the channel and environmental conditions. An assessment of the compliance of the results obtained using the parametric model with experimental data was carried out, which showed the operability of the proposed technique. **Significance of the results obtained:** the developed two-stage research methodology is applicable to the study of similar objects in the analysis of thermal processes.

Keywords: parametric model, polynomial, cable channel.

Эксплуатация современного оборудования подразумевает наличие обширной инфраструктурной сети энергоснабжения. При этом целесообразным становится агрегирование систем питания различного оборудования и отдельных независимых объектов в общие коммутационные линии. Одним из возможных способов организации подобных линий является кабельный канал – совокупность отделенных друг от друга кабельных систем, расположенных на заданном расстоянии друг от друга, зачастую в замкнутом объеме воздушного (или засыпного) пространства [1]. Как правило, в подобных каналах предусмотрена возможность обслуживания и замены отдельных элементов. При передаче электрической энергии ее часть безвозвратно теряется, рассеивается в конечном итоге в виде тепла. Это тепло нагревает как элементы самой кабельной системы, так и окружающие конструкционные эле-

менты и соседние кабельные линии. Максимальная температура кабельной линии обычно ограничена допустимыми температурами эксплуатации ее отдельных элементов. Зачастую наименее стойкой к нагреву элементов конструкции кабеля является его изоляция, представляющая для современных кабелей полимерный материал [2, 3]. При этом в силу ненулевого теплового сопротивления материала изоляции наибольшая температура обычно наблюдается у поверхности токопроводящей жилы, являющейся основным источником нагрева для всего кабеля в целом. В процессе эксплуатации линии измерить данный перегрев затруднительно без нарушения целостности конструкции кабеля, поэтому ограничиваются замером температуры внешней оболочки всего кабеля [4, 5].

Повышение температуры окружающей среду ухудшает теплоотвод с кабельной линии, поэтому для недопущения ее перегрева необходимо снижать токовую нагрузку. Поскольку в канале может быть расположено несколько кабельных линий, появляются возможности регулирования внутриканальной температуры путем варьирования токовых нагрузок отдельных потребителей, если такое допускается условиями энергоснабжения [6].

Оценка перегревов внутри конструкции кабельной линии – весьма нетривиальная задача, так как необходимо учесть довольно широкий ряд влияющих на процесс факторов [7–10]. К тому же, как было показано ранее, искомый фактор ограничения нагрузочной способности линии не поддается непосредственному наблюдению в процессе эксплуатации, а может быть оценен только косвенно. Однако при наличии большого количества источников тепла внутри кабельного канала измеряемая температура поверхности кабеля уже не так достоверно описывает состояние его внутренних элементов [11–13].

Для решения вышеописанной задачи может быть предложена методика, заключающаяся в комбинировании двух разноуровневых математических моделей рассматриваемого процесса. Модель первого уровня с достаточной степенью достоверности и детализации описывает конструкцию всех линий, расположенных в кабельном канале, их взаимное расположение, физические и реологические свойства конструкционных материалов и воздуха внутри канала, а также свойства грунта (или иной среды), в котором проложен кабельный канал. Помимо теплофизической составляющей такая модель должна описывать

и некоторые электромагнитные явления [14], так как в зависимости от тока линии тепловые потери, вызываемые наводимым электромагнитным полем, будут меняться.

Модель первого уровня достаточно громоздка, однако позволяет с необходимой для инженерного расчета степенью точности сымитировать конструкцию реального кабельного канала [15]. Эта модель является базой для проведения серии численных экспериментов, необходимых для детерминации параметров второй более простой модели канала.

Имитационная модель второго уровня представляет собой уже абстрагированную от геометрии, свойств, конструкции и прочих параметров реального кабельного канала систему. Это необходимо для возможности быстрой оперативной симуляции такой модели. Подобные параметрические модели часто применяются в системах автоматического и автоматизированного управления разнообразными технологическими процессами и признаны достаточно эффективными [16, 17]. Помимо всего прочего они позволяют быстро решать оптимизационные задачи, разграничивая в режиме реального времени приоритеты загрузки линий, диапазон возможного регулирования нагрузок и многие другие параметры. На основе решений, полученных по этим же моделям, возможна выработка априорных превентивных решений для различных вероятных ситуаций, возникающих на линиях при их реальной эксплуатации [18, 19]. Это позволяет разработчикам таких линий заранее проработать возможные нештатные ситуации и ещё на этапе проектирования устранить или минимизировать их последствия.

Существенным недостатком предлагаемого подхода является достаточно жёсткая привязка второй параметрической модели к конкретному кабельному каналу, так как любая модернизация (замена кабеля в линии на другой, добавление новых линий и т.п.) приведет к необходимости построения или доработки модели первого уровня и проведения новой серии экспериментов. Параметры модели второго уровня при этом изменятся, но общий подход к решению всей задачи останется.

Для проверки вышеописанной методики был рассмотрен кабельный канал, конструкция которого схематично представлена на рис. 1.

Канал содержит четыре кабельные линии, расположенные в полиэтиленовых трубах, размещенных в бетонном монолите. Каждая линия состоит из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и алюминиевой жилой с площадью сечения 150 мм^2 .

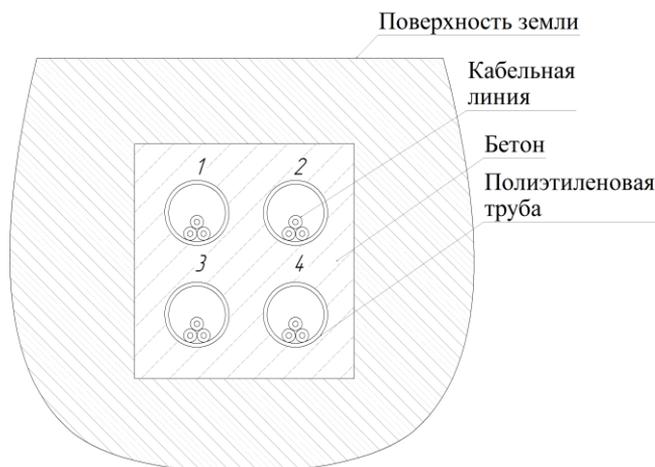


Рис. 1. Конструкция подземного кабельного канала

Температурное состояние всех элементов канала определяется путем совместного решения задач электромагнетизма и тепломассопереноса. Полная постановка задачи описана в [20]. Задача может быть решена различными методами, в том числе методом конечных объемов, реализуемым пакетом Ansys [21]. В результате численной реализации задачи была получена совокупность данных, включающая температуры, скорости и другие физико-реологические параметры. Были определены точки максимального нагрева элементов конструкции кабельных линий. Дополнительно были проведены исследования для определения достаточного количества элементов модели и счетных итераций [22]. Для определения параметров второй модели необходимо спланировать и провести ряд экспериментов для различных токовых нагрузок.

Параметрическая модель второго уровня для данного объекта представляет собой совокупность 4 систем уравнений, связывающих максимальную температуру в изоляции линии с собственной нагрузкой и нагрузкой 3 остальных кабельных линий. При этом в силу особенностей модели первого уровня, автоматически будут учтены все дополнительные источники тепла, граничные условия, а также свойства материалов. Каждый набор уравнений дополняется допустимым диапазоном изменения тока в конкретной линии.

В параметрическом виде максимальная температура изоляции для первой линии запишется так:

$$T_1 = T_0 + \Delta T_{11}(I_1) + \Delta T_{12}(I_2) + \Delta T_{13}(I_3) + \Delta T_{14}(I_4),$$

где T_0 – начальная температура линии (293,15 К); T_1 – температура в самой нагретой точке изоляции первой линии; ΔT_{11} – приращение температуры, вызываемое протеканием тока по данной линии; $\Delta T_{12} \dots \Delta T_{14}$ – приращения температур, вызываемые влиянием остальных трех линий на первую; I_1 – I_4 – рабочие токи 1–4 линий (параметры модели).

Для трех оставшихся линий можно сформулировать аналогичные выражения.

Таким образом, полную модель второго уровня, отражающую зависимость максимальных температур изоляции кабельных линий, для рассматриваемой структуры канала можно представить системой параметрических уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = T_0 + \Delta T_{11}(I_1) + \Delta T_{12}(I_2) + \Delta T_{13}(I_3) + \Delta T_{14}(I_4), \\ T_2 = T_0 + \Delta T_{21}(I_1) + \Delta T_{22}(I_2) + \Delta T_{23}(I_3) + \Delta T_{24}(I_4), \\ T_3 = T_0 + \Delta T_{31}(I_1) + \Delta T_{32}(I_2) + \Delta T_{33}(I_3) + \Delta T_{34}(I_4), \\ T_4 = T_0 + \Delta T_{41}(I_1) + \Delta T_{42}(I_2) + \Delta T_{43}(I_3) + \Delta T_{44}(I_4). \end{cases}$$

Для практического применения данного метода необходимо дополнить систему ограничивающим параметром. Для рассматриваемого процесса таким параметром будет выступать температура на изоляции T_i , для которой необходимо сформулировать ограничения $T_i < T_i^{\max}$, где T_i^{\max} – предельно допустимая рабочая температура изоляции.

Систему в общем виде с учётом ограничений можно представить следующим образом:

$$T_i|_{T_i^{\max}} = T_0 + \sum_{j=1}^N \Delta T_{ij}(I_j),$$

где i – номер кабельной линии, температура которой определяется; j – номер линии, влияние которой учитывается этим слагаемым; N – общее количество линий.

Каждое из ΔT_{ij} представляет собой полином второй степени, сформированный по результатам решения модели первого уровня. Так, для линии 1 полином для ΔT_{11} был построен по результатам серии численных экспериментов с изменяющимся I_1 от нуля до допустимого тока линии с некоторым запасом, необходимым для более точной аппроксимации полиномом. При этом токи остальных линий нулевые.

Аналогичным образом были проведены эксперименты и определены приращения температуры первой линии от остальных линий $\Delta T_{12}(I_2) \dots \Delta T_{14}(I_4)$.

В табл. 1 указаны экспериментальные значения приращений температуры первой линии, рассчитанные для различных вариантов загрузки кабельного канала. Начальная температура линий принималась равной 293,15 К.

Таблица 1

Значения приращений температур линии номер 1, К

Номер влияющей линии	Рабочий ток, А						
	50	100	150	200	250	300	350
1	2,49	9,63	21,06	36,71	55,21	77,64	103,76
2	0,76	2,9	7,39	12,88	19,39	27,23	36,04
3	0,78	3,52	7,7	13,43	20,15	28,3	37,88
4	0,65	3,02	6,6	11,52	17,29	24,27	32,49

Аналогичные результаты были получены для остальных линий канала.

Для формализации аналитической зависимости температуры от тока был выбран полином вида $y = a + bx^2$, где y – приращение температуры, x – ток линии, a и b – коэффициенты, вычисленные по экспериментальным данным. Таким образом, приращение температуры в общем виде будет определяться выражением:

$$\Delta T_{ij} = a + b \cdot I_j^2.$$

Для рассматриваемой задачи расчетные величины коэффициентов, полученные по экспериментальным данным, представлены в табл. 2.

При реализации параметрической модели второго уровня были получены числовые значения температур изоляции кабельных линий. Для этой модели время счета и требования к вычислительным ресурсам гораздо меньше, чем у модели первого уровня.

Для верификации модели второго уровня было проведено сравнение $T_1 - T_4$, рассчитанных для различных токовых нагрузок, с тепловым распределением, полученным из модели первого уровня при тех же условиях.

Таблица 2

Значения коэффициентов полинома

Приращение температуры		Коэффициент полинома	
		a	$b \cdot 10^3$
Линия 1	ΔT_{11}	1,255	0,847
	ΔT_{12}	-0,142	0,305
	ΔT_{13}	0,433	0,309
	ΔT_{14}	0,367	0,265
Линия 2	ΔT_{21}	-0,142	0,305
	ΔT_{22}	1,255	0,847
	ΔT_{23}	0,367	0,265
	ΔT_{24}	0,433	0,309
Линия 3	ΔT_{31}	0,468	0,301
	ΔT_{32}	0,051	0,261
	ΔT_{33}	1,342	0,880
	ΔT_{34}	-0,142	0,305
Линия 4	ΔT_{41}	0,051	0,261
	ΔT_{42}	0,468	0,301
	ΔT_{43}	-0,142	0,305
	ΔT_{44}	1,342	0,880

На рис. 2 представлено тепловое распределение в сечении канала для токовых нагрузок $I_1 = 50$ А, $I_2 = 100$ А, $I_3 = 150$ А, $I_4 = 200$ А, построенное по результатам расчета модели первого уровня.

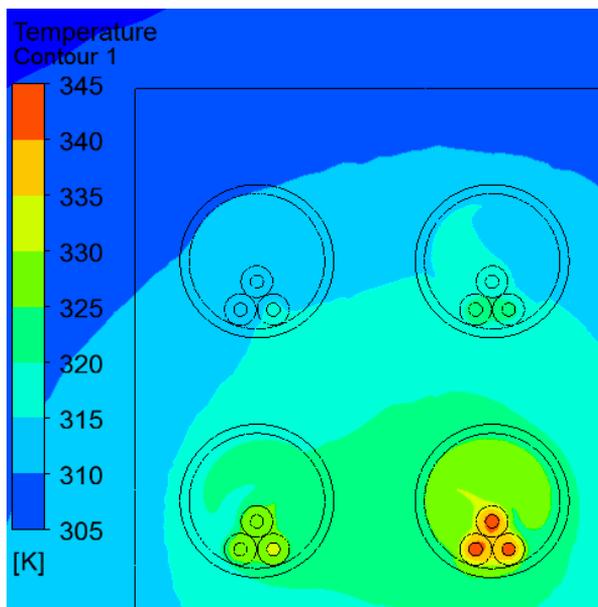


Рис. 2. Тепловое распределение в сечении канала

Для тех же токов был проведен расчет с применением модели второго уровня. Результаты расчетов двух моделей с оценкой отклонения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сравнения моделей

Максимальная температура изоляции	T_1	T_2	T_3	T_4
Рассчитанная по первой модели, К	317,280	322,086	330,482	341,309
Рассчитанная по второй модели, К	317,134	321,977	329,853	340,217
Абсолютная погрешность Δ , К	0,146	0,109	0,629	1,092

Максимальное отклонение не превышает 1,1 К, что достаточно для инженерных расчетов.

Заключение

Предлагаемая двухуровневая реализация задачи не только упрощает расчёт, делая возможным оперативное решение параметрической модели без привлечения больших вычислительных ресурсов, например на микроконтроллере, но и позволяет решать оптимизационные задачи организации пропускной способности конкретного канала с учетом динамически меняющихся условий.

Подобный подход и предлагаемые модели могут с успехом применяться не только для подземных кабельных линий, но и для иных задач схожего класса, например, для коллективных трубопроводных шахт, каналов сплит-систем кондиционирования и т.п.

Библиографический список

1. Халитов В. Кабели со СПЭ-изоляцией. Расчет блочной каналлизации // Новости электротехники. – 2017. – № 5(107)–6(108). – С. 72–78.
2. Багаутдинов И.З., Кувшинов Н.Е. Преимущества применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Инновационная наука. – 2016. – № 3–3. – С. 51–53.
3. Щебенюк Л.А., Антонец Т.Ю. Исследования потерь в изоляции высоковольтных силовых кабелей с полимерной изоляцией // Электротехника и электромеханика. – 2016. – № 4. – С. 58–62.
4. 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.

5. 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.

6. Кухарчук И.Б., Труфанова Н.М. Управление распределением электрической энергии в кабельном канале // Электротехника. – 2019. – № 11. – С. 2–7. DOI: 10.3103/S1068371219110099

7. Программа моделирования температуры провода и потерь мощности на основе учета режимных и атмосферных факторов / А.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов, М.П. Байрамов [и др.] // Программные продукты и системы. – 2018. – Т. 31. – № 2. – С. 396–402. DOI: 10.15827/0236-235X.031.2.396-402

8. Короткевич М.А., Азаров С.Н. Оценка воздействия кабельных линий электропередачи на окружающую среду // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 422–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-5-422-432

9. Зализный Д.И., Широков О.Г. Адаптивная математическая модель тепловых процессов трехжильного силового кабеля // Вестник Гомель. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. Электротехника и энергетика. – 2014. – № 2. – С. 51–63.

10. 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.

11. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Расчет температуры нагрева изоляции кабеля с учетом влияния рядом проложенных кабелей // Вестник Казан. гос. энергетич. ун-та. – 2019. – № 2 (42). – С. 56–64.

12. Лебедев В.Д., Зайцев Е.С. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 11–16. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.011-016

13. Математическое моделирование магнитодинамических процессов при определении потерь в металлических экранах силовых кабелей / А.Г. Щербинин, Е.А. Бородина, Е.В. Субботин [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 12. – С. 246–248.

14. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов при определении допустимых токовых нагрузок кабельных линий // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 82–90.

15. Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б. Оценка работоспособности кабельного канала на основе численного моделирования процессов термодинамики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – С. 30–42. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.02

16. Казаков А.В. Численное моделирование охлаждающей системы радиоэлектронного устройства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. – С. 128–144.

17. Terlych A.E., Shcherbinin A.G. Controlling polymer-insulation extrusion process in production of cables // Russian Electrical Engineering. – 2013. – 84 (11). – P. 617–621.

18. Мониторинг температуры СПЭ изоляции кабельных линий для определения остаточного ресурса / В.Н. Пугач, Д.А. Поляков, К.И. Никитин [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 84–92. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-84-92

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

20. 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.

21. Коржов А.В. Оценка теплового режима работы изоляции в 2D-модели звена «кабель 6(10) кВ – грунт» в Ansys с учетом подвижек грунта и уставок устройств релейной защиты // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 39–45.

22. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.

References

1. 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.

2. Bagautdinov I.Z., Kuvshinov N.E. Preimushchestva primeneniia kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena [Advantages of using cables with cross-linked polyethylene insulation]. *Innovatsionnaia nauka*, 2016, no. 3-3, pp. 51-53.

3. Shchebeniuk L.A., Antonets T.Iu. Issledovaniia poter' v izoliatsii vysokovol'tnykh silovykh kabelei s polimernoii izoliatsiei [Studies of losses in the insulation of high-voltage power cables with polymer insulation]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2016, no. 4, pp. 58-62.

4. 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.

5. Anders G.J., Braun J.-M., Downes John A., 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.

6. Kukharchuk I.B., Trufanova N.M. Upravlenie raspredeleniem elektricheskoi energii v kabel'nom kanale [Control of electrical energy distribution in a cable channel]. *Elektrotehnika*, 2019, no. 11, pp. 2-7. DOI: 10.3103/S1068371219110099

7. Balametov A.B., Khalilov E.D., Bairamov M.P. et al. Programma modelirovaniia temperatury provoda i poter' moshchnosti na osnove ucheta rezhimnykh i atmosferynykh faktorov [A program of modeling wire temperature and power losses based on operation and atmospheric factors]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2018, vol. 31, no. 2, pp. 396-402. DOI: 10.15827/0236-235X.031.2.396-402

8. Korotkevich M.A., Azarov S.N. Otsenka vozdeistviia kabel'nykh linii elektroperedachi na okruzhaiushchuiu sredu [The evaluation of impact of cable power lines on the environment]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 422-432. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-5-422-432

9. Zaliznyi D.I., Shirokov O.G. Adaptivnaia matematicheskaia model' teplovykh protsessov trekhzhil'nogo silovogo kabelia [Adaptive mathematical model of thermal processes of a three-core power cable]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo. Elektrotehnika i energetika*, 2014, no. 2. pp. 51-63.

10. 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.

11. Biriulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Raschet temperatury nagreva izoliatsii kabelia s uchetom vliianiia riadom prolozhennykh kabelei [Calculation of the heating temperature of the cable insulation, taking into account the influence of nearby laid cables]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, no. 2 (42), pp. 56-64.

12. Lebedev V.D., Zaitsev E.S. Raschet temperatury zhily odnofaznogo vysokovol'nogo kabelia s izoliatsiei iz sshitogo polietilena v rezhime real'nogo vremeni [Calculation of core temperature of single-phase high-voltage cables with XLPE insulation in real time]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 11-16. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.011-016

13. Shcherbinin A.G., Borodina E.A., Subbotin E.V. et al. Matematicheskoe modelirovanie magnitodinamicheskikh protsessov pri opredelenii poter' v metallicheskih ekranakh silovykh kabelei [Mathematical modeling of magnetodynamic processes in determining losses in metal screens of power cables]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2020, no. 12, pp. 246-248.

14. Navalikhina E.Iu., Trufanova N.M. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh i elektromagnitnykh protsessov pri opredelenii dopustimyykh tokovykh nagruzok kabel'nykh linii [Mathematical modeling of thermal and electromagnetic processes in determining the permissible current loads of cable lines]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 82-90.

15. Trufanova N.M., Kukharchuk I.B. Otsenka rabotosposobnosti kabel'nogo kanala na osnove chislennogo modelirovaniia protsessov termodinamiki [Evaluation of cable channel performance based on numerical simulation of thermodynamics processes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 35, pp. 30-42. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.02

16. Kazakov A.V. Chislennoe modelirovanie okhlazhdaiushchei sistemy radioelektronного устройства [Numerical simulation of the cooling system of an electronic device]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 34, pp. 128-144.

17. Terlych A.E., Shcherbinin A.G. Controlling polymer-insulation extrusion process in production of cables. *Russian Electrical Engineering*, 2013, 84 (11), pp. 617-621.

18. Pugach V.N., Poliakov D.A., Nikitin K.I. et al. Monitoring temperature SPE izoliatsii kabel'nykh linii dlia opredeleniia ostatochnogo resursa [Temperature monitoring of cross-linked polyethylene insulation of cable lines to determine the residual life]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 84-92. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-84-92

19. Kucherov Iu.N. Problemy obespecheniia bezopasnosti potrebiteli i ob'ektov elektroenergetiki pri narusheniakh 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.

20. 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.

21. Korzhov A.V. Otsenka teplovogo rezhima raboty izoliatsii v 2D-modeli zvena "kabel' 6(10) kV - grunt" v Ansys s uchetom podvizhek grunta i ustavok ustroistv releinoi zashchity [Estimation of thermal conditions of insulation in the Ansys 2D model of link "cable line 6(10) kV - soil" with consideration for movements of soil and relay protection set values]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 39-45.

22. Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu. Upravlenie tokovoi nagruzkoj linii v kabel'nom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena [Control of lines current loading in the cable channel taking into account the complex heat exchange]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1318-1321.

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).

Казаков Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «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) – старший преподаватель 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

Nataliya M. Trufanova (Perm, Russian Federation) – 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).

Alexey V. Kazakov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Design and Technology in Electrical Engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Irina B. Kukharchuk (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer 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 20.10.2021