

УДК 621.315

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НОМИНАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПРОКЛАДКИ КАБЕЛЕЙ

Будаян В.А., Труфанова Н.М., Смышляева Т.В.

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ktei@pstu.ru*

Данная работа посвящена решению задачи сложного тепломассопереноса при различных способах прокладки силовых кабелей с целью определения номинальной токовой нагрузки и рационального режима работы кабельных линий. Величина токовой нагрузки силовых кабелей напрямую зависит от температурного поля в месте его прокладки, на которое, в свою очередь, влияют следующие факторы: условия теплообмена, теплофизические характеристики используемых материалов и многие другие. Предложенная математическая модель процессов сложного тепломассопереноса основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Поставленная задача тепломассопереноса в условиях естественной конвекции решалась численно методом конечных элементов в инженерном программном пакете Ansys Fluent. В результате численного решения получены мощности тепловых потерь в металлических элементах конструкции силового кабеля, поля температур при различных способах прокладки силовых кабелей. Определены допустимые токовые нагрузки и условия прокладки, обеспечивающие безопасность работы кабельных линий.

Ключевые слова: прокладка силовых кабелей, тепломассоперенос, максимальная температура силового кабеля, температурное поле

NUMERICAL ANALYSIS OF RATED CURRENT LOAD AT VARIOUS WAYS OF LAYING OF CABLES

Budayan V.A., Trufanova N.M., Smyshlyayeva T.V.

State National Research Polytechnical University of Perm, Perm, e-mail: ktei@pstu.ru

This work is devoted to solving the problem convective complex heat and mass transfer at various ways of laying of power cables in order to determine the nominal current load and rational mode of operation of cable lines. The magnitude of the current load power cables depends on the temperature field in a place of its laying, which in turn influenced by the following factors: the conditions of heat transfer, thermal characteristics of the materials used and many others. The mathematical model of the processes of complex heat and mass transfer based on the laws of conservation of mass, momentum and energy. The problem is solved numerically under conditions of natural convection of the finite element method in engineering software package Ansys Fluent. As a result, the numerical solution of obtained power of heat loss in metal structural elements of the power cable, temperature fields at various ways of laying of power cables. The permissible current loading and installation conditions to ensure the safety of the cable lines.

Keywords: Laying of power cables, heat and mass transfer, the maximum temperature of the power cable, temperature field

Поскольку величина номинальной токовой нагрузки кабелей с пластмассовой изоляцией однозначно связана с температурным режимом работы кабельной линии и ограничена значением рабочей температуры, то при выборе способов прокладки кабельных линий в зданиях и сооружениях и при внутренней прокладке электропроводок необходимо учитывать теплофизические свойства материалов и условия теплообмена. Наиболее часто используется открытая прокладка кабелей по перекрытиям, стенам и скрытая прокладка под слоем штукатурки (в штробе) или в каналах внутри стен. Прокладка кабелей по перекрытиям, стенам из негорючих материалов производится без использования каких-либо дополнительных элементов. Прокладка по поверхностям из горючих материалов производится с использованием полос из негорючих материалов (металла).

На рис. 1 приведены исследуемые различные способы-схемы прокладки кабеля.

Прокладка кабелей в подвальных помещениях чаще всего производится под потолком (полом первого этажа) (рис. 1, в).

Скрытая прокладка кабелей производится в каналах внутри стен из бетона (рис. 1, г) или под слоем штукатурки на стенах из кирпича (в штробе) (рис. 1, д).

Целью работы является математическое моделирование процесса теплопереноса в кабельной линии и окружающей среде и определение величины токовой нагрузки и необходимых условий эксплуатации кабелей с пластмассовой изоляцией в каждом конкретном случае прокладки. Аналогичные исследования проводились для кабельных линий в подземных кабельных каналах [1–3], где конвективная составляющая в процессе теплопереноса играла незначительную роль. В работах [4–7] рассмотрены

процессы теплопереноса для кабельных линий, проложенных в земле. Исследованию теплового режима кабеля, проложенного в стене, посвящена работа [8], где не рассматривалось пространство вокруг стены.

Объектом численного моделирования в данной статье являются силовые кабели, проложенные различными способами, схематичное изображение которых представлено на рис. 2, 3.

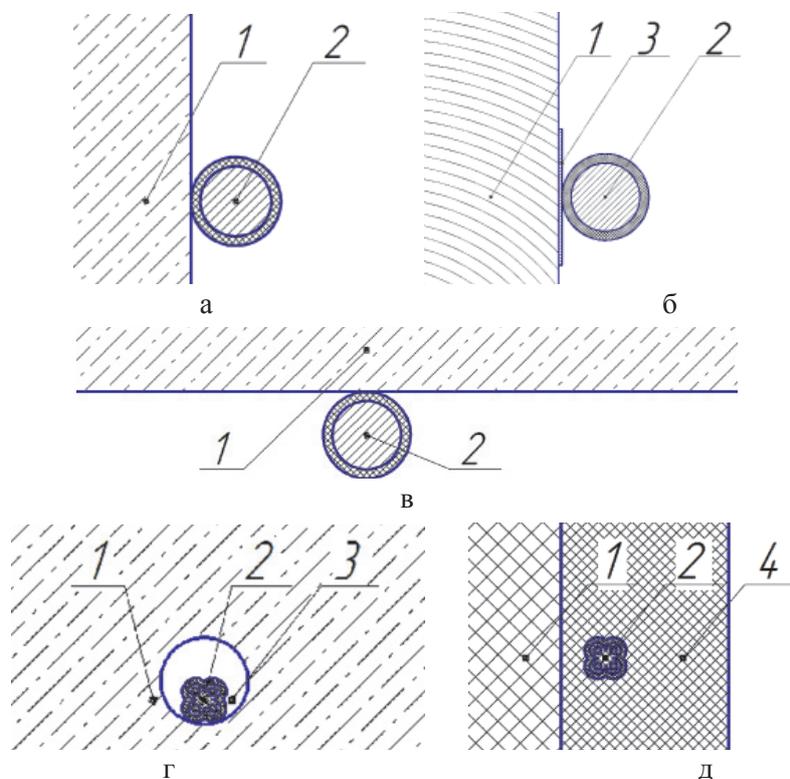


Рис. 1. Прокладка кабеля:
а, б – на стене; в – под потолком; г – в закрытом канале; д – под слоем штукатурки;
1 – стена или перекрытие; 2 – кабель;
3б – металлическая полоса; 3г – канал; 4 – слой штукатурки

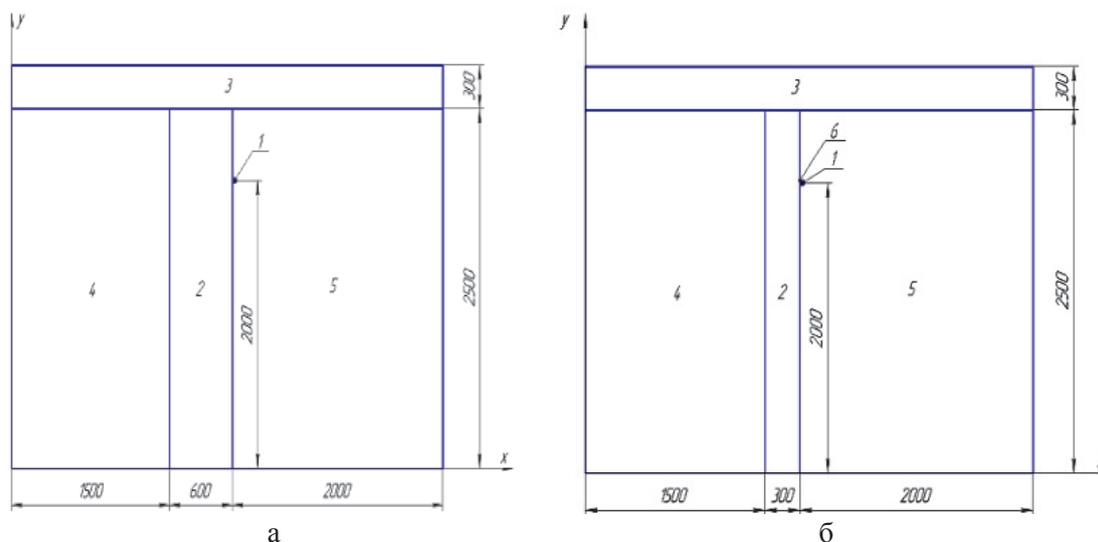


Рис. 2. Открытая прокладка кабеля по стене:
а – 1 – кабель; 2 – стена из кирпича; 3 – железобетонное перекрытие; 4, 5 – помещения;
б – 1 – кабель; 2 – стена из горючего материала; 3 – перекрытие из горючего материала;
4, 5 – помещения; 6 – металлическая полоса

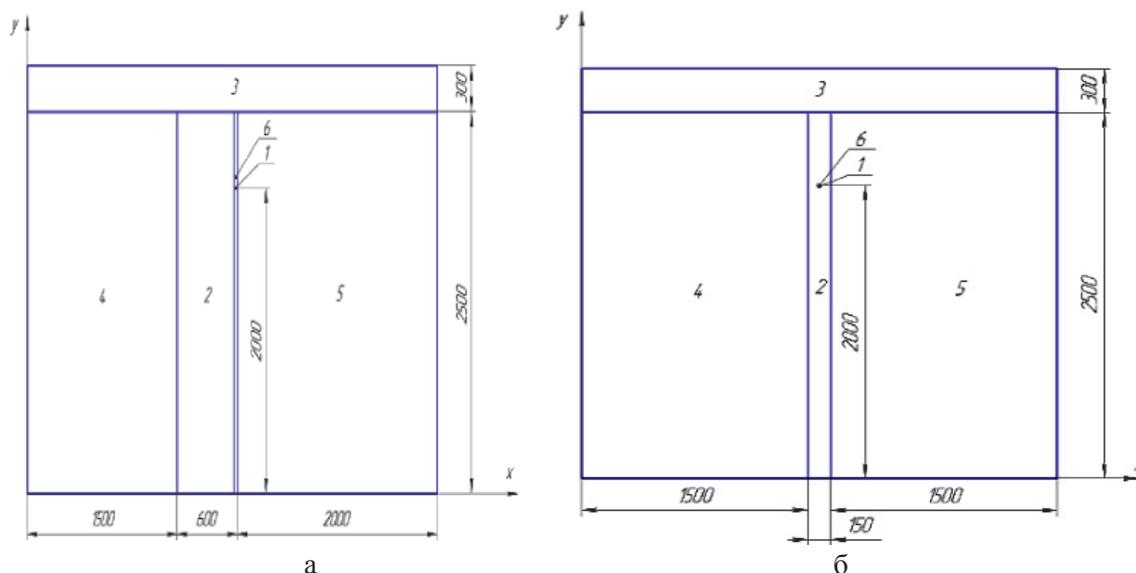


Рис. 3. Скрытая прокладка кабеля:
 а – под слоем штукатурки: 1 – кабель; 2 – стена из кирпича;
 3 – железобетонное перекрытие; 4, 5 – помещения; 6 – штукатурка;
 б – прокладка кабеля в канале: 1 – кабель; 2 – стена из железобетона;
 3 – железобетонное перекрытие; 4, 5 – помещения; 6 – канал

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов

№ п/п	Наименование	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
1	Медь	8978	381	387,6
2	Алюминий	2719	871	202,4
3	ПВХ кабельный изоляционный	1500	1170	0,11
4	ПВХ кабельный для оболочек	1310	1260	0,16
5	Стена кирпичная	1900	870	0,67
6	Железобетон	2500	840	1,70
7	Древесина (сосна)	700	2310	0,173
8	Сталь	8030	502	16,27

В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов прокладки и элементов конструкции кабеля.

Математическая модель движения и теплопереноса в кабельной линии и окружающем пространстве основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии. При создании математической модели сделаны следующие допущения:

процесс стационарный; задача плоская; теплофизические свойства твердых материалов постоянны; течение воздушных масс ламинарное; сложная конструкция изоляции, оболочки и других конструктивных элементов кабеля заменена однородным монолитом с усредненными характеристиками [9, 10].

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} \right); \quad (1)$$

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + g\beta(T - T_0); \quad (2)$$

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

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial t}{\partial y}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_k \frac{\partial}{\partial y} \right) + q_v = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial}{\partial y} \right) = 0; \quad (6)$$

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (7)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости воздуха; t – температура, °С; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; ρ, μ, λ – теплопроводность, плотность и вязкость воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$; q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха $1/^\circ\text{C}$; λ_k, λ_i – теплопроводность изоляции кабеля и материалов заделки.

Граничные условия: для скоростей на твердых поверхностях выполнялось условие – непроникновения и прилипания; на границах расчетной области заданы адиабатические условия теплообмена; на границах контакта разнородных сред задаются граничные условия четвертого рода и условия сопряжения температур.

Мощность внутреннего источника тепла в токопроводящей жиле определяется согласно закону Джоуля – Ленца по формуле

$$q_{v1} = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_5} dS, \quad (8)$$

где I_1 – номинальный ток жилы силового кабеля (A); σ_5^1 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы силового кабеля (см/м).

Для реализации математической модели (1)–(8) использован метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS. Исследуемые объекты – кабель ВВГнг 4×1,5 и способ прокладки, представленные с помощью ICEM CFD.

Для решения задачи полученная геометрия разбивается на конечные элемен-

ты. Исследование сходимости задачи позволило определить необходимое число конечных элементов и итераций. Достаточным оказалось 200000 элементов и 150 итераций.

В результате решения задачи тепломассопереноса были получены температурные поля: при прокладке кабеля на поверхности стены и под потолком (рис. 4) при скрытой прокладке и проходке кабеля через стены или перекрытия (рис. 5).

При открытой прокладке кабеля с ПВХ изоляцией на поверхности кирпичной стены максимально допустимая температура 70°C (343 K) достигается при протекании по ТПЖ тока составляющего 96% от длительно допустимого [11]. При этом воздушные массы в непосредственной близости с кабелем нагреваются до $36\text{--}39^\circ\text{C}$, в верхней части помещения воздух нагрет до $34\text{--}36^\circ\text{C}$, а поверхность стены вблизи от кабеля – до $39\text{--}43^\circ\text{C}$. В соседнем помещении стена, на которой проложен кабель, нагревается до $27\text{--}30^\circ\text{C}$ на уровне выше 1,7 метра. При прокладке по деревянной стене в силу малой теплопроводности материала (дерево) условия работы кабеля ухудшаются, что приводит к более высоким температурам окружающего пространства и изоляции кабеля на 7–10% и снижению токовой нагрузки до 90% от длительно допустимой.

В результате произведенных расчетов были определены токовые нагрузки, при которых температура кабеля не превышает максимально допустимую для всех способов прокладки, рассмотренных в работе. В табл. 2 представлены доли от длительно допустимых токов (в соответствии с ГОСТ) для различных способов прокладки, при которых температура изоляции кабеля не превышает максимально допустимую температуру.

Таблица 2
Сравнение способов прокладки по токовой нагрузке

№ п/п	Способ прокладки	Соотношение токов
1	На стене из дерева	0,9
2	На стене из кирпича	0,96
3	Под потолком	1,01
4	Под штукатуркой	1,05
5	В канале	1,10

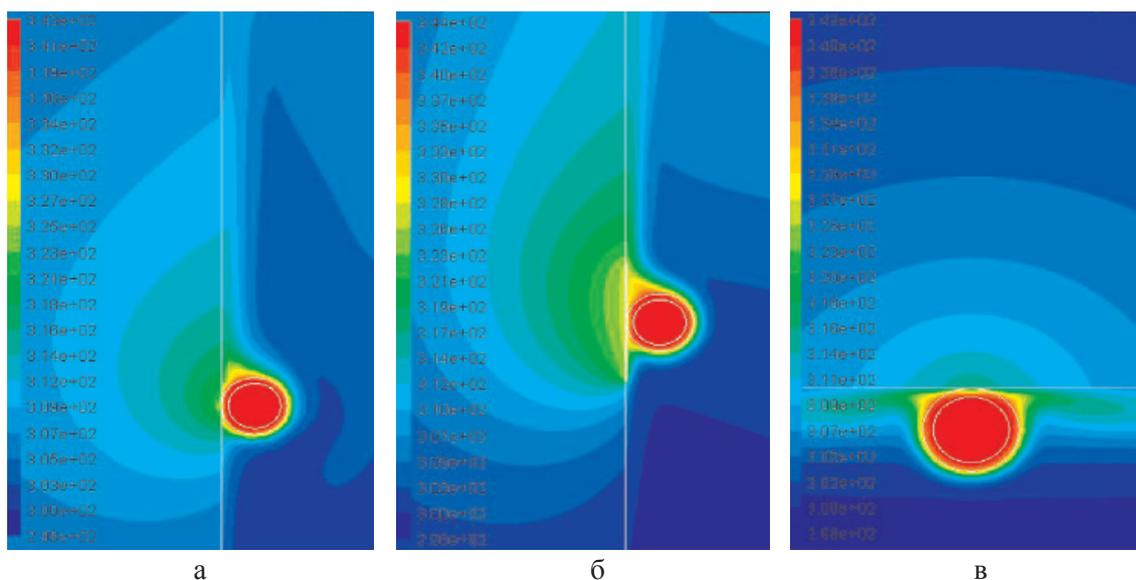


Рис. 4. Температурные поля при прокладке кабеля:
 а – на стене из кирпича; б – на стене из дерева; в – под потолком

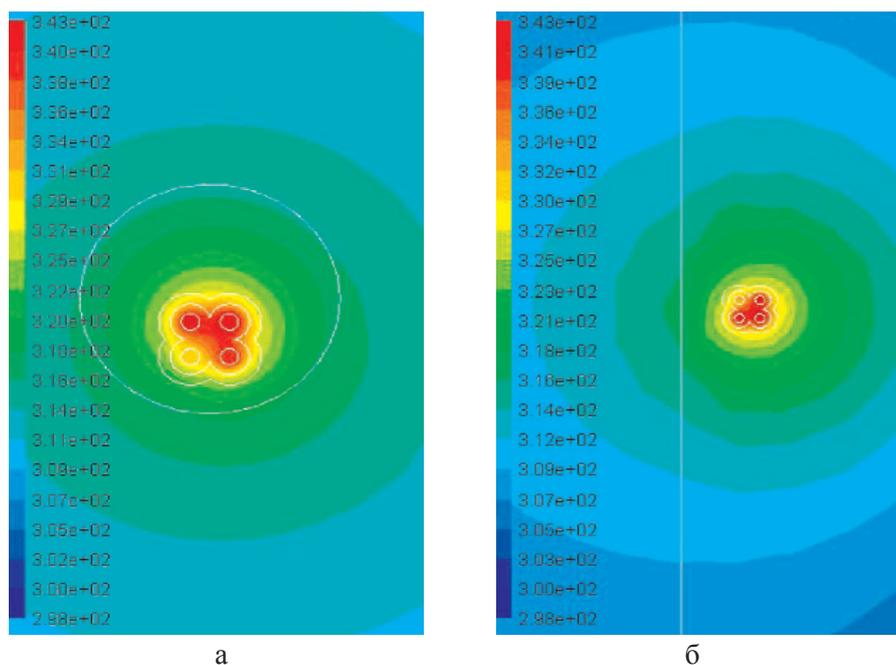


Рис. 5. Температурные поля при скрытой прокладке кабеля:
 а – в канале; б – под слоем штукатурки

При сравнении рассмотренных способов прокладки кабелей можно сделать вывод: прокладка кабелей по стенам из дерева характеризуется худшими условиями охлаждения. Нагрев кабеля до максимальной длительно допустимой температуры происходит при меньшей токовой нагрузке. При аналогичном способе прокладки по стене из негорючего материала охлаж-

дение кабеля происходит более эффективно. Из рассмотренных открытых способов прокладки электропроводок предпочтение необходимо отдать прокладке по потолку. Прокладка в каналах и под слоем штукатурки обеспечивает наиболее благоприятные условия охлаждения, механическую защиту кабелей от повреждений и является предпочтительной.

Список литературы

1. ГОСТ Р 53769-2010 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ.
2. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Численное моделирование температурных полей кабельных линий в условиях электрической перегрузки // Современная техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 174–175.
3. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Математическое моделирование и управление пропускной способностью кабельных линий в подземном канале // Электротехника. – 2012. – № 11. – С. 11–14.
4. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.
5. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements // Electric Power Systems Research. – 2000. – Vol. 54. – P. 75–81.
6. E. Leonardi, J. S. Reizes. Natural convection heat transfer for variable property fluids using the Boussinesq approximation // Numerical Methods in Thermal Problems. – 1981. – Vol. 2. – P. 978–989.
7. Liu Y., Phan-Thien R., Kemp R. Coupled conduction-convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. – 2000. – Vol. 1. – № 2. – P. 187–206.
8. Lin S., Hau X. Analytical method of calculating the transient and steady-state temperature rises for cable-bundle in tray and ladder // IEEE Trans. Power Delivery – 1998. – Vol. 13. – № 3. – P. 691–698.
9. Nahman J., Tanaskovic M. Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method // Electric Power Systems Research. – 2002. – Vol. 61. – P. 109–117.
10. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31. – P. 772–778.

References

1. GOST R 53769-2010 Kabeli silovye s plastmassovoj izoljaciej na nominalnoe naprjazhenie 0,66; 1 i 3 kV.
2. Grigoreva M.M., Kuznecov G.V. Chislennoe modelirovanie temperaturnyh polej kabelnyh linij v uslovijah jelek-

tricheskoj peregruzki // Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Sovremennye tehnika i tehnologii». Tomsk: Izd. TPU. 2010. pp. 174–175.

3. Trufanova N.M., Navalihina E.Ju. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie propusknostju kabelnyh linij v podzemnom kanale // Jelektrotehnika. 2012. no. 11. pp. 11–14.

4. Trufanova N.M., Navalihina E.Ju. Upravlenie tokovoj nagruzkoj linij v kabelnom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 14. no. 4(5). pp. 1318–1321

5. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements // Electric Power Systems Research. 2000. Vol. 54. pp. 75–81.

6. Leonardi E., Reizes J.S. Natural convection heat transfer for variable property fluids using the Boussinesq approximation // Numerical Methods in Thermal Problems. 1981. Vol. 2. pp. 978–989.

7. Liu Y., Phan-Thien R., Kemp R. Coupled conduction-convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. 2000. Vol. 1. no. 2. pp. 187–206.

8. Lin S., Hau X. Analytical method of calculating the transient and steady-state temperature rises for cable-bundle in tray and ladder // IEEE Trans. Power Delivery 1998. Vol. 13. no. 3. pp. 691–698.

9. Nahman J., Tanaskovic M. Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method // Electric Power Systems Research. 2002. Vol. 61. pp. 109–117.

10. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31. pp. 772–778.

Рецензенты:

Щербинин А.Г., д.т.н., профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Бочкарев С.В., д.т.н., профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.