



ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Петрова Р.М., Абдуллин Л.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
1998renata@mail.ru

Резюме: В данной работе представлена методика расчета тепловых режимов кабельных линий (КЛ) напряжением 10 кВ для различных видов изоляции и условий эксплуатации, а также проведен анализ с использованием функций аппроксимации полученных результатов. Разработаны регрессионные модели зависимостей расчетного срока службы (T_{cl}) изоляции КЛ от коэффициента загрузки (k_{32}) в различных условиях эксплуатации КЛ со следующими типами изоляции: бумажно-пропитанная (БПИ), изоляция из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ) и изоляция из полиэтилена (ПЭ). Результаты исследования могут быть использованы для уточнения параметров КЛ при выборе их сечений. Применение разработанной методики для оценки температурных параметров и регулирования режимов эксплуатации КЛ позволит снизить число аварийных ситуаций, связанных с тепловыми пробоями. **ЦЕЛЬ.** Провести исследование, анализ и расчеты температурных параметров КЛ 10 кВ для различных k_{32} и способов прокладки в климатических условиях Республики Татарстан. **МЕТОДЫ.** Используются методы расчета тепловых параметров КЛ 10 кВ в различных режимах и их срока службы, методы статистической обработки данных в программном комплексе Excel и методы аппроксимации функций. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате исследований получены температурные параметры КЛ 10 кВ с различными типами изоляции для различных условий эксплуатации, построены регрессионные модели зависимостей расчетного T_{cl} изоляции от k_{32} , позволяющие оценивать тепловые характеристики КЛ. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований и расчетов могут быть рекомендованы для оценки и выбора параметров эксплуатационных режимов КЛ 10 кВ на этапах эксплуатации и проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: тепловые режимы; кабельные линии; функция аппроксимации; коэффициент загрузки; срок службы.

Для цитирования: Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Петрова Р.М., Абдуллин Л.И. Оценка параметров тепловых режимов кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 55-68. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68.

EVALUATION OF HEAT MODE PARAMETERS OF 10 kV CABLE LINES IN DIFFERENT OPERATION CONDITIONS

Tsitson I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Petrova R.M., Abdullin L.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
1998renata@mail.ru

Abstract: This paper presents a methodology for calculating thermal modes of 10 kV cable lines (CL) for different types of insulation and operating conditions, and analyzes using approximation functions of the obtained results. Regression models of dependences of estimated service life (T_{sl}) of CL insulation on loading factor (k_{32}) in different operating conditions of CL with the following types of insulation: paper-impregnated insulation (PI), insulation made of polyvinyl chloride plasticate (PVC) and insulation made of polyethylene (PE) have been developed. The results of the study can be used to clarify the parameters of CLs when selecting their cross sections. Application

of the developed methodology for estimation of temperature parameters and regulation of CL operation modes will allow to reduce the number of emergency situations connected with thermal breakdowns. **OBJECTIVE.** To carry out research, analysis and calculations of temperature parameters of 10 kV CLs for different k_{zg} and methods of laying in climatic conditions of the Republic of Tatarstan. **METHODS.** Methods of calculation of thermal parameters of 10 kV CLs in different modes and their service life, methods of statistical data processing in the Excel program complex and methods of function approximation are used. **RESULTS.** As a result of researches the temperature parameters of 10 kV CLs with different types of insulation for different operating conditions have been obtained, regression models of dependences of the calculated T_{sl} of insulation on k_{zg} have been constructed, allowing to estimate the thermal characteristics of CLs. **CONCLUSION.** The results of the conducted researches and calculations can be recommended for estimation and selection of parameters of operating modes of 10 kV CL at the stages of operation and design of power supply systems.

Keywords: thermal modes; cable lines; approximation function; load factor; service life.

For citation: Tsitson I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Petrova R.M., Abdullin L.I. Evaluation of heat mode parameters of 10 kV cable lines in different operation conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 55-68. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68.

Введение (Introduction)

В настоящее время в нашей стране наблюдается развитие практически всех отраслей экономики. Вводятся в строй новые объекты энергетики и промышленности, административные и жилые здания. При этом одновременно развиваются системы электроснабжения, усложняется их структура.

Как известно, КЛ являются основными элементами электрооборудования для передачи электроэнергии. При этом, в условиях эксплуатации, в ряде случаев расчетный $T_{сл}$ оказывается существенно ниже заявленного в паспорте [8]. Одной из причин этого является тепловой пробой изоляции, который возникает вследствие аварийного режима работы КЛ [13]. В предлагаемой работе предлагается методика расчета температурных параметров КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации для различных типов изоляции кабелей.

Целью исследования является исследование и оценка температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах их прокладки и различных $k_{зг}$ для климатических условий Республики Татарстан.

Научной и практической значимостью исследования является повышение эффективности эксплуатации КЛ-10 кВ с помощью применения регрессионных моделей для оценки и контроля параметров тепловых режимов. Разработанные модели могут быть рекомендованы для уточнения характеристик КЛ при выборе их сечения с учетом тепловых режимов эксплуатации.

Ниже представлен анализ некоторых работ российских и зарубежных ученых, проводящих исследования в данной области.

Так, авторами Грачевой Е.И. и Муравьевым Г.Г. в [2] исследованы тепловые режимы работы и параметры КЛ. В работе определены зависимости влияния технических характеристик и $k_{зг}$ кабеля на температуру и потери мощности, которые возникают вследствие нагрева жил.

Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. в [3] исследовали эквивалентные сопротивления схем цеховых сетей с учетом влияния фактора нагрева проводников.

Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. в [4] исследовали различные методы определения потерь электроэнергии по графикам нагрузок за расчетный промежуток времени, а также оценили погрешности расчетов и выявили причины их появления.

В [5] Грачевой Е.И. разработаны регрессионные модели для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии.

Грачевой Е.И., Наумовым О.В., Горловым А.Н. в [6] исследована зависимость сопротивления проводника от его температуры, а также определена зависимость эквивалентного сопротивления цеховых сетей от основных влияющих факторов.

Грачевой Е.И. и Горловым А.Н. в [7] принят метод графического интегрирования в качестве эталонного при определении погрешностей некоторых методов расчета потерь электроэнергии. Анализ различных методов расчета потерь электроэнергии показал, что

целесообразность выбора метода должна быть обусловлена соответствием методических и информационных погрешностей.

Коржов А.В., Сидоров А.И. в [8] исследовали методы и модели оценки состояния изоляции КЛ 6(10) кВ.

Липидус А.А., Соловьева С.Н., Перфильев А.П. в [9] представили методику расчета температурных параметров кабелей. В исследовании учтены факторы температуры окружающей среды и токораспределения в параллельных ветвях.

Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. в [10] исследовали тепловое поле кабеля с учетом тепловых потерь в экранах. В результате исследований смоделировано температурное поле с учетом температуры окружающей среды и коэффициента загрузки кабелей. При этом выделены кабели, которые находятся в худших условиях охлаждения. А в [11] Труфановой Н.М., Казаковым А.В. и Кухарчуком И.Б. исследованы зависимости и разработаны параметрические модели зависимости температуры КЛ в канале от загрузки кабелей с учетом температуры внешней среды. В работе представлена двухэтапная методика анализа тепловых процессов в изоляции и жилах КЛ в зависимости от различных способов прокладки: на воздухе, в земле, в земле в трубе с учетом температуры окружающей среды.

Бирюлиным В.И., Куделиной Д.В., Горловым А.Н. в [12] исследован процесс нагрева изоляции КЛ и выделены основные факторы, влияющие на процесс нагрева. Предложен метод, позволяющий учитывать при расчете температуры кабеля тепловое воздействие от других КЛ, проложенных рядом в одной траншее с учетом потерь тепла, вызванных протеканием блуждающих токов в металлической оболочке брони.

Зализным Д.И., Прохоренко С.Н. в [13] разработана математическая модель тепловых процессов одножильного кабеля. На основе расчетов разработана тепловая схема замещения кабеля, которая учитывает температуру внутренней и внешней окружающей среды. Внутренняя окружающая среда представлена в качестве полого цилиндра, границы которого совпадают с поверхностью кабеля, а внешняя окружающая среда характеризуется температурой воздуха за пределами внутренней области. Адекватность полученной модели подтверждается экспериментальными данными.

Schmidt H.P. в [14] разработал модели тепловых и электрических характеристик промышленных КЛ. В работе показана модель, описывающая влияние температуры окружающей среды на тепловой режим работы КЛ, построена схема замещения в соответствии с результатами расчетов.

Ученым из Саудовской Аравии, Mamdooh A-S., в [15] исследовано влияние параметров теплового контура на подземный кабель с помощью программы Anfis. Автор определил основные факторы, влияющие на тепловой режим КЛ, такие как температура окружающей среды, удельное сопротивление грунта и величина токов, протекающих через проводник. Также разработаны модели распределения тепла внутри КЛ с учетом теплового сопротивления почвы, температуры окружающей среды, глубины прокладки и расстояния между КЛ.

Millar R. J. в [16] предлагает порядок мониторинга и расчета параметров переходных процессов в КЛ в режиме реального времени.

Голландскими учеными R. Jongen; E. Gulskey; J. Smith в [17] исследованы температурные режимы КЛ.

Baazzim M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. в [18] проведена оценка силы тока (токонесущей способности) подземной силовой кабельной системы аналитическими и численными методами для различных условий, таких как глубина залегания кабеля, расстояние между фазами, удельное тепловое сопротивление грунта, температура окружающей среды, скорость ветра. Используемый аналитический или традиционный метод основан на методе термического анализа, разработанном Neher-McGrath.

Как показывает практика, исследования, связанные с анализом тепловых режимов КЛ 10 кВ, являются актуальными.

Отличие представленной работы от других исследований, проводимых советскими, российскими и зарубежными учеными, заключается в получении расчетных данных для КЛ-10 кВ с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией и разработке регрессионных моделей, с помощью которых можно рассчитать реальный $T_{сл}$ КЛ при прокладке в земле в трубе, который зависит от $k_{зг}$ и температуры окружающей среды.

Так, например, согласно главе 1.3 ПУЭ [1] допустимая кратковременная перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ представлена на рисунке 1.

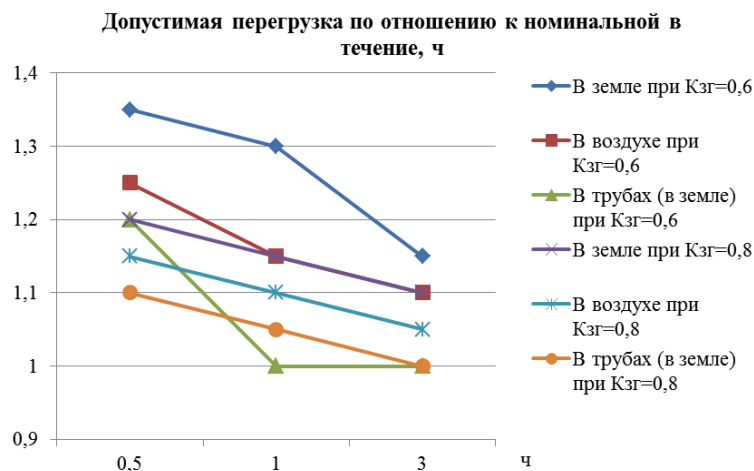


Рис. 1. Допустимая кратковременная перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ, несущих нагрузки меньше номинальных, может допускаться кратковременная перегрузка, указанная на рисунке 1. На рисунке 1 видно, что при $K_{зг} = 0,6$ допускается длительная перегрузка (до 1,35), в отличие от $K_{зг} = 0,8$ (до 1,2).

На период ликвидации послеаварийного режима для кабелей с ПЭ изоляцией допускается перегрузка до 10% свыше значений, приведенных на рисунке 1, а для кабелей с ПВХ изоляцией до 15% номинальной на время максимумов нагрузки продолжительностью не более 6 часов в сутки в течение 5 суток, при условии, что нагрузка в остальные периоды времени суток не превышает номинальной.

Допустимая на период ликвидации послеаварийного режима перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ приведена на рисунке 2.

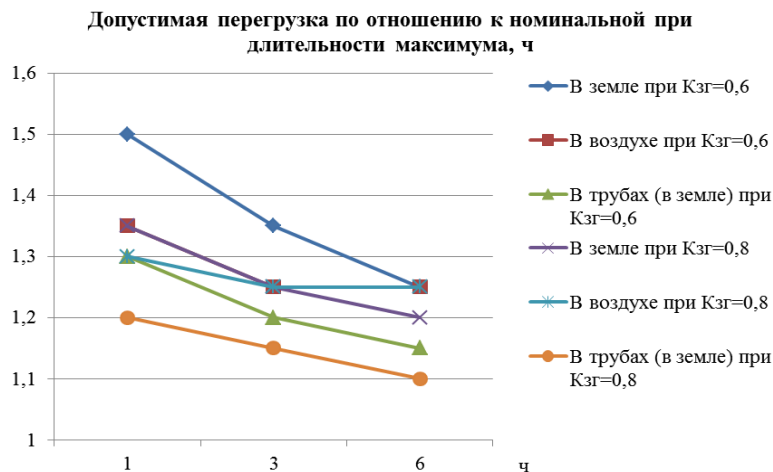


Рис. 2. Допустимая на период ликвидации послеаварийного режима перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На период ликвидации послеаварийного режима для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ изоляцией допускаются перегрузки в течение 5 суток в пределах, указанных на рисунке 2.

Для кабельных линий с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией, находящихся в эксплуатации более 15 лет, допустимая перегрузка должна быть понижена на 10%.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методика расчета температурных параметров КЛ 10 кВ

Для проведения расчетов параметров тепловых режимов КЛ при различных условиях эксплуатации используется методика по определению тепловых сопротивлений на каждом из участков кабеля от токопроводящей жилы к окружающей среде в зависимости от способа

прокладки – в трубе, в земле, в земле в трубе. Для проведения исследования рассматриваются трехжильные КЛ 10 кВ с расчетным током $I_p = 120$ А и параметрами, указанными в таблице 1. Среднемесячная летняя температура по Республике Татарстан составляет 20°C согласно климатическим и метеорологическим данным.

Для проведения расчетов приняты следующие средние значения $k_{зг}$ в зависимости от материала токопроводящих жил КЛ 10 кВ:

- для алюминиевых жил $k_{зг} = 0,88$,
- для медных жил $k_{зг} = 0,7$.

Значения $k_{зг}$ приняты на основании данных ГОСТ по силовым кабелям, а именно ГОСТ 16442-80, ГОСТ 18410-73 и ГОСТ Р 55025-2012.

В таблице 1 представлены данные вида изоляции, материала жил и марки кабелей.

Таблица 1

Table 1

Марка, вид изоляции и материал жил КЛ <i>Brand, type of insulation and material of the cores</i>			
Марка КЛ	Изоляция	Материал жилы	Наличие брони
ВВГ 3х70-10	ПВХ изоляция	Медь	Отсутствует
АВВГ 3х70-10		Алюминий	
ААШв 3х70-10	БПИ	Алюминий	Отсутствует
ППГ 3х70-10	Изоляция из полиэтилена	Медь	Отсутствует
АППГ 3х70-10		Алюминий	

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 представлена типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ с обозначением термических сопротивлений при переходе от жилы кабеля к окружающей среде.

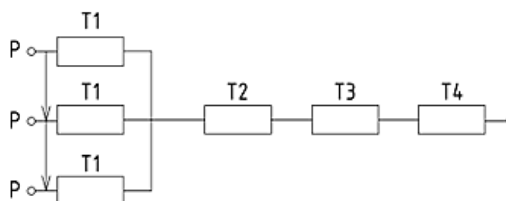


Рис. 3. Типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ 10кВ

Fig. 3. Typical thermal equivalent circuit of a three-core cable 10kV

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Описание элементов схемы замещения (рис. 3):

- P – потери активной мощности в жилах КЛ;
- T_1 – тепловое сопротивление между жилой и оболочкой КЛ;
- T_2 – тепловое сопротивление между оболочкой и броней;
- T_3 – тепловое сопротивление наружного защитного покрытия;
- T_4 – тепловое сопротивление среды, окружающей КЛ.

В качестве примера представим расчет температурных параметров КЛ 10 кВ марки ААШв-3х-70 с БПИ изоляцией, длиной 1000 м.

Расчет включает определение тепловых сопротивлений представленной на рисунке 3 типовой тепловой схемы замещения.

$$T_1 = \frac{\rho_r}{2\pi} 3F_2 \ln\left[\frac{d_a}{2r_1}\right] \quad (1)$$

где:

- r_1 – радиус окружности, описанной вокруг жил КЛ, мм;
- d_a – наружный диаметр оболочки КЛ, мм;
- ρ_r – удельное тепловое сопротивление материала оболочки КЛ, К·м/Вт;
- F_2 – геометрический коэффициент, определяемый по формуле (2)

$$F_2 = \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t} \quad (2)$$

где:

d_x – диаметр круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и степенью уплотнения, что и фасонная жила, мм;

t – толщина изоляции между жилами КЛ, мм;

$T_2=0$, так как отсутствует броня.

При наличии брони T_2 определяется по формуле (3)

$$T_2 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_2}{d_a}\right] \quad (3)$$

где:

t_2 – толщина подушки под броней КЛ, мм.

$$T_3 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_3}{d_a}\right] \quad (4)$$

где:

t_3 – толщина наружного защитного покрова КЛ, мм.

Для определения T_4 используются выражения в зависимости от способа прокладки КЛ.

При прокладке КЛ в воздухе – по формуле (5)

$$T_4 = \frac{1}{\pi d_a 10^{-3} \left(\frac{Z}{d_a^g} + E\right) \sqrt{\Delta t_n}} \quad (5)$$

где:

Δt_n – разность температур поверхности КЛ и окружающей среды, К;

Z , E , g – константы, определяющиеся конфигурацией геометрического расположения КЛ при прокладке в воздухе.

При прокладке в траншее – по формуле (6)

$$T_4 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[4 \frac{L}{d_a}\right] \quad (6)$$

где:

ρ_r – удельное тепловое сопротивление грунта, К·м/Вт;

L – глубина прокладки КЛ, мм.

При прокладке КЛ в трубе (канале) – по уравнению (7)

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (7)$$

где:

T_4' – тепловое сопротивление между КЛ и каналом (трубой), в которых проложена КЛ, К·м/Вт;

T_4'' – тепловое сопротивление стенки канала (трубы), К·м/Вт;

T_4''' – внешнее тепловое сопротивление канала (трубы), К·м/Вт.

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y)D_a} \quad (8)$$

где:

U , V , Y – константы, зависящие от типа канала (трубы),

$$T_4'' = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (9)$$

где:

D_0 – наружный диаметр канала (трубы), мм;

D_d – внутренний диаметр канала (трубы), мм;

T_4''' определяем аналогично по формуле (6).

Для трехжильной КЛ температура жил выражается в °С и определяется по формуле (10)

$$t_{ж} = P_{ж} T_1 + 3P_{ж} (T_2 + T_3 + T_4) + t_{окр.} \quad (10)$$

где:

$t_{окр.1.}$ – температура окружающей среды, °С.

Потери активной мощности в жилах КЛ определяем по формуле (11)

$$P_{ж} = 3I_l^2 \frac{\rho_l}{S} \quad (11)$$

где:

l – длина КЛ, м;

S – площадь поперечного сечения жил КЛ, мм²;

ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящей жилы КЛ, Ом×мм²/м.

В таблице 2 представлены результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах прокладки, с $k_{зг} = 0,88$ для алюминиевых жил, $k_{зг} = 0,7$ для медных жил.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах прокладки,

с $k_{зг} = 0,88$ для алюминиевых жил, $k_{зг} = 0,7$ – медных жил

The results of calculations of temperature parameters of cable 10 kV for various laying methods,

with $k_{зг} = 0.88$ for aluminum cores, $k_{зг} = 0.7$ for copper cores

Марка КЛ	Способ прокладки	T_1 К·м/Вт	T_2 К·м/Вт	T_3 К·м/Вт	T_4 К·м/Вт	$T_{каб}$ при $t_{окр} = 20$ °C
ВББШв 3х70-10	Земля	0,076	0,028	0,05	0,84	49,6 °C
	Земля+труба	0,076	0,028	0,05	1,03	55,6 °C
АВББШв 3х70-10	Земля	0,076	0,028	0,05	0,84	68,8 °C
	Земля+труба	0,076	0,028	0,05	1,03	78,8 °C
ААШв 3х70-10	Земля	0,05	0	0,064	0,88	65,6 °C
	Земля+труба	0,05	0	0,064	1,03	77,5 °C
	Воздух	0,05	0	0,064	0,8	69,7 °C
ВВГ 3х70-10	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	47,3 °C
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	54,5 °C
АВВГ 3х70-10	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	65,2 °C
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	77,1 °C
ППГ 3х70-10	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	46,2 °C
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	55,5 °C
АППГ 3х70-10	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	63,2 °C
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	78,5 °C

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Полученные результаты подтверждают, что основными факторами, влияющими на нагрев жил являются величина протекающего тока ($k_{зг}$) и температура окружающей среды. Способ прокладки и тип изоляции в меньшей мере влияют на нагрев.

Проведем оценку скорости старения изоляции, используя полученные результаты. Для расчета скорости старения изоляции используем закон Аррениуса. Уравнение зависимости скорости термической реакции от температуры КЛ по закону Аррениуса определяется соотношением (12)

$$t_{p1} e^{\frac{-W_a}{kT_1}} = t_{p2} e^{\frac{-W_a}{kT_2}}, \quad (12)$$

где:

t_{p1} и t_{p2} – $T_{сл}$ для КЛ при значениях температур T_1 и T_2 соответственно;

W_a – энергия активации в расчете на одну молекулу;

k – постоянная Больцмана ($1,381649 \times 10^{-23}$ Дж/К);

T_1 и T_2 – значения абсолютных температур исследуемых КЛ соответственно.

Нормативный $T_{сл}$ для КЛ составляет 30 лет или 262800 часов по паспортным данным, поэтому определение расчетного срока службы изоляции для КЛ 10 кВ определяется относительно данного значения.

Составление функций аппроксимации

Построим график зависимости $T_{сл}$ для КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ и аппроксимируем полученную функцию. В качестве уравнений регрессии рассмотрим линейную зависимость, полиномиальную и экспоненциальную после чего рассчитаем среднюю ошибку аппроксимации и найдем наиболее достоверную функцию, которая описывает данную зависимость.

Исследуем линейную зависимость и проведем расчеты параметров функции (рис. 4).

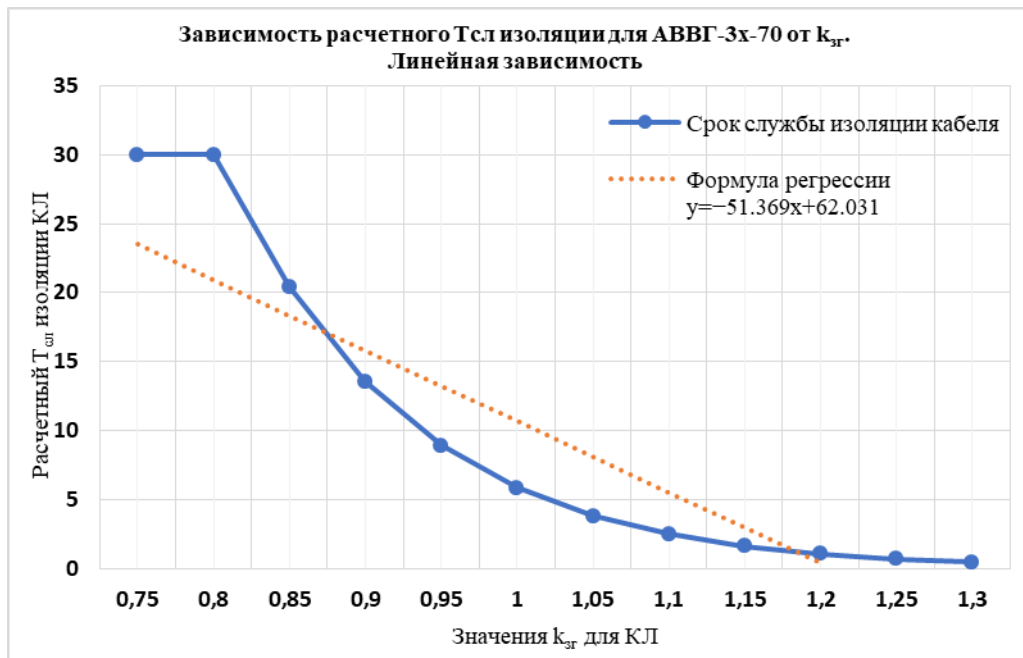


Рис. 4. График зависимости расчетного Тсл АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ (линейная зависимость) Fig. 4. Graph of the dependence of the calculated Tsl AVVG-3x-70 10 kV when laid in the ground in a pipe on $k_{зг}$ (linear dependence)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Определим уравнение линейной регрессии, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации.

Уравнение линейной регрессии в общем виде

$$\bar{y} = ax + b; \quad (13)$$

где:

a, b – коэффициенты регрессии.

Коэффициент регрессии a

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}; \quad (14)$$

где:

x_i – расчетное значение $k_{зг}$;

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

Коэффициент регрессии b

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}; \quad (15)$$

Коэффициент линейной парной корреляции r_{xy}

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}}; \quad (16)$$

где:

n – число наблюдений.

Коэффициент детерминации

$$R^2 = r_{xy}^2; \quad (17)$$

где:

r_{xy} – коэффициент линейной парной корреляции.

Значение средней ошибки аппроксимации

$$A = \frac{1}{n} \sum \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \times 100\%; \quad (18)$$

где:

n – число наблюдений;

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

$\bar{y}_i$ – теоретическое значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

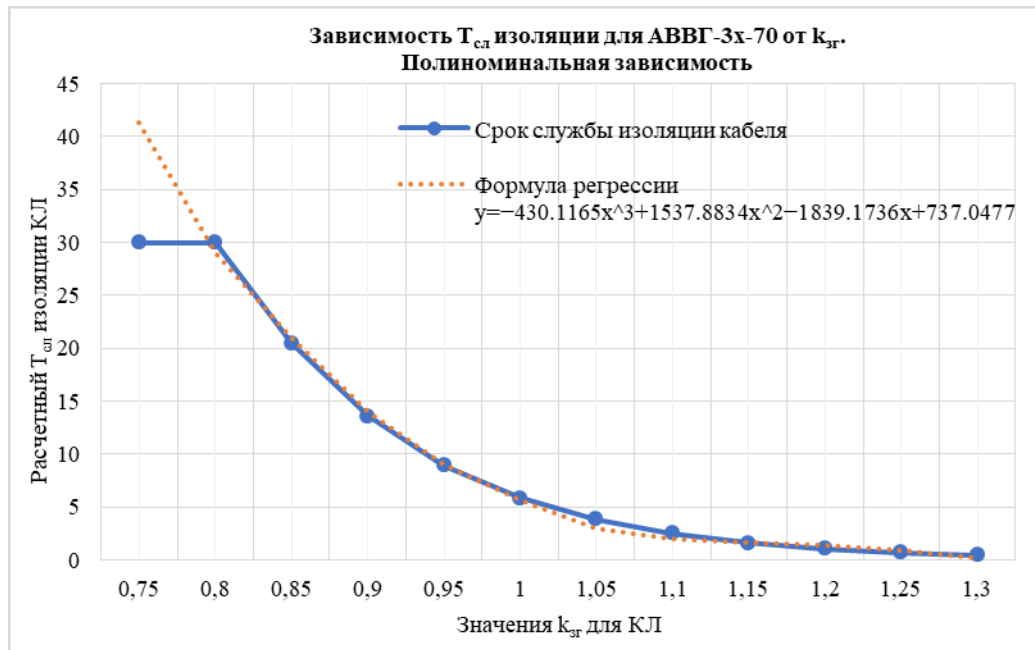


Рис. 5. График зависимости расчетного $T_{сл}$ КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ КЛ (полиномиальная зависимость) Fig. 5. Graph of the dependence of the calculated T_{sl} of the AVVG-3x-70 10 kV cable line when laid in the ground in a pipe on the k_{zg} cable line (polynomial dependence)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Определим уравнение регрессии полиномиальной (кубической) зависимости (рис. 5), коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации.

Уравнение регрессии в общем виде

$$y^- = ax^3 + bx^2 + cx + d; \quad (19)$$

где:

a, b, c – коэффициенты регрессии.

Система уравнений для нахождения коэффициентов a, b и c:

$$\begin{aligned} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd &= \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i &= \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 &= \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 &= \sum x_i^3 y_i; \end{aligned} \quad (20)$$

Коэффициент детерминации

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - y^-)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (21)$$

где:

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

y^- – теоретическое значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

$\bar{y}$ – среднее расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

Значение средней ошибки аппроксимации находим по формуле 19.

Результаты расчетов показаны в таблице 3.

Определим уравнение регрессии для экспоненциальной зависимости (рис. 6).

Определим уравнение регрессии экспоненциальной функции, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации:

Уравнение регрессии экспоненциальной функции в общем виде

$$y^- = e^{a+bx}; \quad (22)$$

где:

a, b – коэффициенты регрессии.

Коэффициент регрессии a

$$a = \frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum x_i; \quad (23)$$

где:

n – число наблюдений.

Коэффициент регрессии b

$$b = \frac{n \sum x_i \ln y_i - \sum x_i \times \sum \ln y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2},$$

(24)

где:
 x_i – расчетное значение $k_{зг}$;
 y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

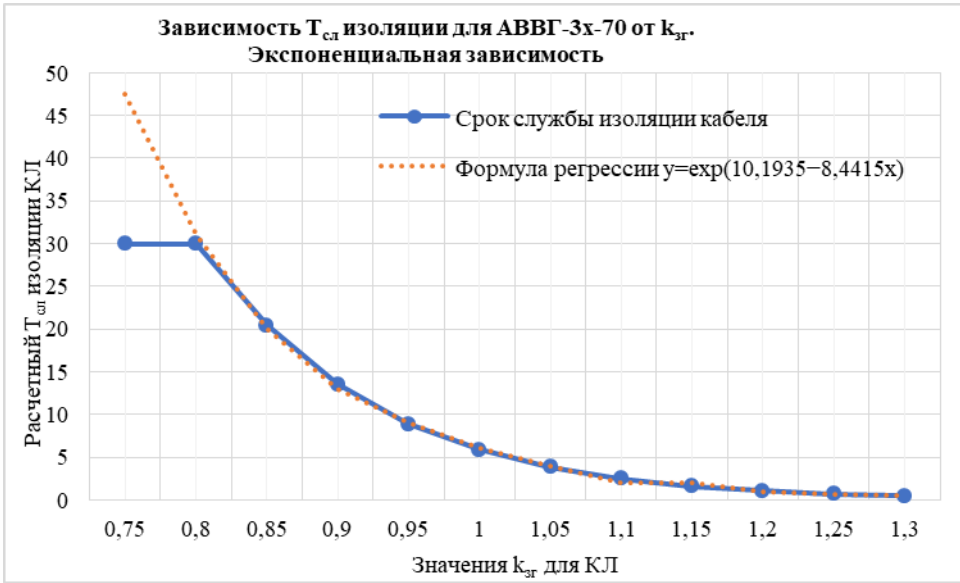


Рис. 6. График зависимости расчетного $T_{сл}$ КЛ АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ КЛ (экспоненциальная зависимость)

Fig. 6. Graph of the dependence of the calculated T_{sl} of the AVVG-3x-70 10 kV cable line when laid in the ground in a pipe on the k_{zg} cable line (exponential dependence)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Проведем аналогичные расчеты и определим уравнения аппроксимации для КЛ 10 кВ с ПЭ и БПИ изоляцией. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты вычислений коэффициентов функций аппроксимации

Results of calculations of coefficients of approximation functions

Тип изоляции КЛ 10кВ	Уравнение аппроксимации	Вид аппроксимирующей функции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
ПВХ	$y = -430,1165x^3 + 1537,8834x^2 - 1839,1736x + 737,0477$	Полином 3-ей степени (кубическая)	0,9973	13,9
	$y = -51,369x + 62,031$	Линейная	0,7855	193,8
	$y = \exp(10,1935 - 8,4415x)$	Экспоненциальная	0,9984	1,5
БПИ	$y = \exp(9,4081 - 8,3726x)$	Экспоненциальная	0,9795	4,6
ПЭ	$y = \exp(9,7698 - 8,1386x)$	Экспоненциальная	0,9284	7,6

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как показали исследования, наиболее достоверной регрессионной моделью, описывающей зависимость $T_{сл}$ КЛ 10 кВ от $k_{зг}$ является экспоненциальная функция, так как значение средней ошибки аппроксимации для данной зависимости составляет наименьшее значение, а коэффициент детерминации близок к единице. Таким образом, зависимость $T_{сл}$ изоляции КЛ 10 кВ с ПВХ изоляцией от $k_{зг}$ наиболее достоверно можно описать уравнением

$$t = \exp(10,1935 - 8,4415k);$$

(25)

где:
 t – расчетный $T_{сл}$ изоляции КЛ при паспортном $T_{сл}$ в 30 лет;
 k – $k_{зг}$ для КЛ.

В результате проведенных исследований построены регрессионные модели зависимости расчетного $T_{\text{сл}}$ изоляции от $k_{\text{зг}}$ для КЛ 10 кВ, проложенных в земле в трубе с ПЭ, БПИ и ПВХ изоляцией. Установлено, что наиболее достоверной функцией является экспоненциальная зависимость. С помощью полученных в результате исследования уравнений возможно определять реальный $T_{\text{сл}}$ для КЛ 10 кВ с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией при прокладке в земле в трубе, зная величину $k_{\text{зг}}$. Это позволяет определять сечение КЛ на этапе проектирования и прогнозировать расчетный $T_{\text{сл}}$ для КЛ, которые находятся в эксплуатации.

Обсуждение результатов (Results and discussions)

В результате проведенных исследований рассчитаны температурные параметры КЛ 10 кВ при различных способах прокладки и для различных типов изоляции. Определены функции аппроксимации зависимости расчетного срока службы изоляции КЛ от их загрузки и выбраны наиболее точные из них при помощи расчета средней ошибки аппроксимации и анализа результатов. По экспоненциальным уравнениям можно определить реальный $T_{\text{сл}}$ КЛ 10 кВ с ПЭ, ПВХ или БПИ изоляцией при прокладке в земле в трубе. Данная зависимость имеет наибольший коэффициент детерминации, равный 0,9984 и среднюю ошибку аппроксимации в 1,5%, что позволит рекомендовать полученные модели для уточнения сечений КЛ-10 кВ на этапе проектирования, а также прогнозировать расчетный $T_{\text{сл}}$ для КЛ, которые находятся в эксплуатации.

Установлено, что КЛ, проложенные в земле в трубе, испытывают наибольший нагрев, так как затрудняется теплообмен с окружающей средой.

Выводы (Conclusions)

1. Рассчитаны температурные параметры КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации и с различными типами изоляции, с учетом климатических условий Республики Татарстан.

2. Проведен анализ полученных температурных параметров КЛ 10 кВ, в результате которого установлено, что при прокладке в земле в трубе, КЛ испытывают наибольшую тепловую нагрузку из-за затрудненного теплообмена, вследствие чего их реальный $T_{\text{сл}}$ снижается.

3. Разработаны регрессионные модели зависимости расчетного $T_{\text{сл}}$ от $k_{\text{зг}}$ КЛ 10 кВ с различными типами изоляции. Уравнения аппроксимации позволяют рассчитать реальный $T_{\text{сл}}$ для кабелей при их прокладке в земле в трубе с ПЭ, БПИ и ПВХ изоляцией, в зависимости от величины $k_{\text{зг}}$. При этом, с помощью полученных данных, возможно регулировать режимы работы КЛ и снижать число потенциальных аварийных ситуаций, вызванных тепловым пробоем вследствие длительной перегрузки.

Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ. 7-е изд. – Раздел 1, глава 1.3 (Утв. Приказом Минэнерго России от 20.05.2003 № 187).
2. Грачева Е.И., Муравьев Г.Г. Исследование температурных режимов и параметров кабельных линий электрооборудования электрических станций // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. 2020. Т.4. С. 151-154.
3. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В. Эквивалентное сопротивление промышленных электрических сетей – как одна из основных характеристик в расчетах потерь электроэнергии // ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТОПЛИВНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. 2022. С. 540-544.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
5. Грачева Е.И. Разработка регрессионных моделей для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии в низковольтных сетях / Е.И. Грачева, Т.А. Серпионова // Вестник КГЭУ. 2015. № 2(26). С. 45-51.
6. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н. Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения // Вестник КГЭУ. 2019. №3 (43).
7. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Оценка потерь электроэнергии во внутривоздушных электрических сетях // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 4 (13). С. 38-50.
8. Коржов, А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6(10) кВ городских электрических сетей: моногр. /А.В. Коржов, А.И. Сидоров. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. С. 252.

9. Лapidус А.А., Соловьева С.Н., Перфильев А.П. Расчет температуры нагрева кабелей электродвигателей собственных нужд с учетом токораспределения в параллельных ветвях // ИЗВЕСТИЯ НТЦ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. 2023. С. 114-126.

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

11. Труфанова Н.М., Казакова А.В., Кухарчук И.Б. Подходы к представлению зависимости температур кабельных линий в канале от их загрузки в виде параметрической модели // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника информационные технологии, системы управления. 2021. №40. С. 61-75.

12. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Расчет температуры нагрева изоляции кабеля с учетом влияния рядом проложенных кабелей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2 (42). С. 56-64.

13. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля/Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко// Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. 2012. № 5. С. 25-34.

14. Schmidt, H-P. Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables / H-P Schmidt // Modelling and simulation. June, 2008. P. 523-532.

15. Mamdooh, S. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Thermal Field Evaluation of Underground Cable System / S. Mamdooh // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. № 6. P. 1642-1650.

16. Millar, R. J. Real-Time Transient Temperature Computation of Power Cables Including Moisture Migration Modelling / R. J. Millar, M. Lehtonen // PSCC, Session 39. Liege. 2005. P. 4.

17. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghihi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling // Scientia Iranica D. 2012. № 19(3). P. 707-720.

18. 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. P. 484-489.

Авторы публикации

Цицонь Иван Иванович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. honey.roditel@mail.ru

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru

Петрова Рената Маратовна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru

Абдуллин Линар Ильфатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. abdullin.linar@mail.ru

References

1. Rules for Electrical Installations (PUE. 7th ed. – Section 1, Chapter 1.3 (approved by Order of the Ministry of Energy of Russia № 187 of 20.05.2003).

2. Gracheva, E.I.; Muravyev, G.G. Investigation of the temperature modes and parameters of the cable lines of the electrical equipment of the electrical stations (in Russian) // Science. TECHNOLOGIES. INNOVATIONS. 2020. Vol. 4. Pp. 151-154.

3. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Tabachnikova T.V. Equivalent resistance of industrial electrical networks - as one of the main characteristics in the calculations of electricity losses // Instrumentation and AUTOMATIZED ELECTRICITY DIRECTION in the fuel and energy complex and housing and communal services. 2022. Pp. 540-544.
4. Gracheva, E.I.; Shakurova, Z.M.; Abdullazyanov, R.E. Comparative analysis of the most widespread deterministic methods of the electric power losses determination in the shop floor networks (in Russian) // Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniye. Problems of power engineering. 2019. № 5. Pp.87-96.
5. Gracheva, E.I. Development of regression models for the analysis and forecasting of power losses in low-voltage networks / E.I. Gracheva, T.A. Serpionova // Vestnik of KSEU. 2015. № 2(26). Pp. 45-51.
6. Gracheva, E.I.; Naumov, O.V.; Gorlov, A.N. Problems of research of the equivalent resistance of the electrical shop networks of low voltage // Vestnik of KSEU. 2019. №3 (43).
7. Gracheva, E.I.; Gorlov, A.N.; Shakurova, Z.M. Estimation of electric power losses in the in-plant electric networks // Vestnik of PITTU named after academician M. Osimi. 2019. № 4 (13). Pp. 38-50.
8. Korzhov A.V., Korzhov A.V., Sidorov A.I. Methods and models of the insulation state and electrical safety assessment of the 6(10) kV cable lines of the city electric networks: monograph. – Chelyabinsk: Publishing center of SUSU, 2009. P. 252.
9. Lapidus, A.A.; Solovyova, S.N.; Perfiliev, A.P. Calculation of the heating temperature of the cables of the auxiliary electric motors taking into account the current distribution in the parallel branches (in Russian) // Izvestiya STC UNITED ENERGY SYSTEM.2023. Pp.114-126.
10. Trufanova, N.M.; Kukharchuk, I.B.; Feofilova, N.V. Calculation of the thermal field of the cable channel taking into account the losses in the cable screens (in Russian) // Vestnik of Perm National Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2018. № 28. Pp. 179-193.
11. Trufanova, N.M.; Kazakova, A.V.; Kukharchuk, I.B. Approaches to the representation of the cable lines temperature dependence in the channel from their loading in the form of a parametric model (in Russian) // Bulletin of Perm National Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2021. №40. Pp. 61-75.
12. Biriulin, V.I.; Kudelina, D.V.; Gorlov, A.N. Calculation of the cable insulation heating temperature taking into account the influence of the side-by-side laid cables (in Russian) // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2019. T. 11. № 2 (42). Pp. 56-64.
13. Zalizny, D. I. Mathematical model of thermal processes of a single-core power cable // I. I. Zalizny, S. N. Prokhorenko // Izvestia vysshekh. ucheb. uchebnykh uchebnykh i energeticheskikh ob-nye CIS. Energetics. 2012. № 5. Pp. 25-34.
14. Schmidt, H-P. Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables / H-P Schmidt // Modelling and simulation. June, 2008. Pp. 523-532.
15. Mamdooh, S. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Thermal Field Evaluation of Underground Cable System / S. Mamdooh // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. № 6. Pp. 1642-1650.
16. Millar, R. J. Real-Time Transient Temperature Computation of Power Cables Including Moisture Migration Modelling / R. J. Millar, M. Lehtonen // PSCC, Session 39. Liege. 2005. P. 4.
17. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghihi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling // Scientia Iranica D. 2012. № 19(3). Pp. 707-720.
18. 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. Pp. 484-489.

Authors of the publication

Ivan I. Tsitson – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. honey.roditel@mail.ru

Edward Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Renata M. Petrova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru

Linar I. Abdullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
abdullin.linar@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **09.09.2024 г.**

Отредактировано **16.10.2024 г.**

Принято **18.10.2024 г.**