

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.215.2

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СРОКА СЛУЖБЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Цицонь И.И.¹, Абдуллазянов Э.Ю.¹, Грачева Е.И.¹, Немировский А.Е.², Valtchev S.³

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Вологодский Государственный Университет, г. Вологда, Россия

³Universidade NOVA of Lisbon, Portugal

honey.roditel@mail.ru¹

Резюме: В работе представлена методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий (КЛ) напряжением 10 кВ для различных видов изоляции и условий эксплуатации. Разработаны зависимости, рекомендуемые для уточнения параметров КЛ с учетом различных эксплуатационных режимов. Результаты исследования могут быть использованы для практического применения и будут способствовать уменьшению числа аварий, возникающих вследствие тепловых пробоев КЛ из-за неверного выбора параметров КЛ. **ЦЕЛЬ.** Исследовать температурные параметры КЛ 10 кВ с учетом различных способов их прокладки и коэффициентов загрузки для климатических условий Республики Татарстан. **МЕТОДЫ.** Используются методы расчета температурных параметров КЛ и их срока службы, методы статистической обработки данных, методы аппроксимации функций. Применяется программный комплекс «ELCUT» для осуществления визуализации полученных результатов при проведении расчетов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Представлены результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ), изоляцией из поливинилхлоридного пластика (ПВХ) и изоляцией из полиэтилена (ПЭ) при их прокладке в воздухе, в земле, в земле в трубе с учетом коэффициентов загрузки кабельных линий. Показаны результаты расчетов сроков службы КЛ. Определены значения оптимальных коэффициентов загрузки КЛ для снижения скорости теплового старения изоляции при различных условиях эксплуатации. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований и выполненных расчетов могут быть использованы для оценки и выбора оптимальной загрузки КЛ 10 кВ на этапах эксплуатации и проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: кабельные линии; температурные параметры; старение изоляции; срок службы; визуализация температурных процессов; коэффициент загрузки.

Для цитирования: Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Немировский А.Е., Valtchev S. Методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74.

METHOD OF CALCULATION OF TEMPERATURE PARAMETERS AND SERVICE LIFE OF CABLE LINES WITH A VOLTAGE OF 10 kV

Tsitson I.I.¹, Abdullazyanov E.Yu.¹, Gracheva E.I.¹, Nemirovsky A.E.², Valtchev S.³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Vologda State University, Vologda, Russia

³Universidade NOVA of Lisbon, Portugal

honey.roditel@mail.ru¹

Abstract: *RELEVANCE.* The paper presents a method for calculating the temperature parameters and service life of cable lines (CL) with a voltage of 10 kV for various types of insulation and operating conditions. Dependencies have been developed that are recommended for clarifying the parameters of the CL, taking into account different operating modes. The results of the study can be used for practical application and will contribute to reducing the number of accidents resulting from thermal breakdowns of CL due to incorrect selection of CL parameters. *PURPOSE.* To investigate the temperature parameters of 10 kV CL, taking into account various methods of laying them and load factors for the climatic conditions of the Republic of Tatarstan. *METHODS.* Methods for calculating the temperature parameters of CL and their service life, methods of statistical data processing, and methods for approximating functions are used. The ELCUT software package is used to visualize the results obtained during calculations. *results.* The results of calculations of the temperature parameters of 10 kV CL with paper-impregnated insulation (BPI), polyvinyl chloride plastic (PVC) insulation and polyethylene (PE) insulation during their laying in air, in the ground, in the ground in a pipe, taking into account the load coefficients of cable lines, are presented. The results of calculations of the service life of the CL are shown. The values of the optimal load coefficients of the CL are determined to reduce the rate of thermal aging of insulation under various operating conditions. *conclusion.* The results of the conducted research and calculations can be used to evaluate and select the optimal load of 10 kV CL at the stages of operation and design of power supply systems.

Keywords: cable lines; calculation of temperature parameters; insulation aging; service life of cable lines; visualization of temperature processes; loading factor.

For citation: Tsitsion I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Nemirovsky A.E., Valtchev S. Method of calculation of temperature parameters and service life of cable lines with a voltage of 10 kV. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (4): 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74.

Введение (Introduction)

Современная инфраструктура электротехнических комплексов развивается в ускоренном режиме, что приводит к увеличению мощности нагрузок на промышленных предприятиях. КЛ, как известно, являются одними из основных видов электрооборудования, предназначенным для передачи электроэнергии. Правильный выбор таких характеристик, как, тип изоляции, способы прокладки и сечения для конкретных условий эксплуатации является одной из важных задач при проектировании систем электроснабжения. Однако, в ряде случаев КЛ выходят из строя до истечения паспортного срока службы ($T_{\text{сл}}$), который заявлен производителем. В предлагаемой статье представлена методика расчета температурных параметров КЛ, а также определения скорости старения изоляции, определяющей расчетный $T_{\text{сл}}$ для КЛ.

Целью исследования является проведение расчетов температурных параметров и анализ технических характеристик КЛ 10 кВ с различными типами изоляции, материалами жилы, способами прокладки и $k_{\text{зг}}$, а также определение расчетных $T_{\text{сл}}$ исследуемых КЛ и расчет их оптимальной загрузки.

Научной значимостью исследования является проведение расчетов с помощью специализированного программного комплекса ELCUT и получение результатов в виде температурных диаграмм и графиков, а также анализ полученных зависимостей с помощью аппроксимации.

Практической значимостью исследования является получение в результате расчетов итоговых $k_{\text{зг}}$, которые позволят наиболее точно выбирать режим загрузки КЛ 10 кВ, что позволит избежать нежелательного перегрева при эксплуатации сетей и предотвратить снижение $T_{\text{сл}}$. Полученные в результате расчетов коэффициенты являются новыми полученными результатами, числовые значения которых отсутствуют в учебных пособиях и технической литературе.

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

Так, авторами Грачевой Е.И. и Муравьевым Г.Г. в [1] исследованы температурные режимы и параметры КЛ. В работе выявлены зависимости влияния технических характеристик и $k_{\text{зг}}$ кабеля на температуру и потери вследствие нагрева.

Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. в [2] провели оценку потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения с учетом нагрева проводов и

КЛ. Приведены расчеты температуры жилы КЛ с учетом температуры окружающей среды. Полученные результаты позволяют установить, как влияет температура окружающей среды на тепловые потери в КЛ в различных эксплуатационных режимах. А в [3] выявлены возможные погрешности при расчете потерь на нагрев в КЛ при учете таких параметров, как сопротивление линии и температура окружающей среды. Показана зависимость потерь мощности от нагревания проводников, вследствие токов нагрузки различной величины.

Грачевой Е.И. и Гиззатуллиной Е.Е. в [4] представлены разработанные модели для оценки надежности элементов системы электроснабжения.

Титковым В.В. в [5] дан анализ и оценка теплового режима работы трехфазной КЛ, а также исследовано влияние токов экранов на тепловой режим. Предложена математическая модель расчета температурного поля КЛ при различных сочетаниях токов нагрузок в жилах КЛ с учетом взаимообратной магнитной связи. Данная модель позволяет визуально оценить температурное поле вокруг КЛ, а ученым Ковригиным Л.А. в [6] исследованы параметры теплового состояния КЛ 10кВ при оценке температурных полей и токовых нагрузок в программном комплексе ANSYS. С помощью данной программы автор смоделировал рассеивание температурных полей в КЛ при различных токовых нагрузках, условиях прокладки и температуры окружающей среды.

Гладышева М.М., Сухачева Е.К., Хатюшина Т.В. в [7] исследовали технические характеристики КЛ, а также возможные математические модели для выбора параметров КЛ, расчета удельного сопротивления материала кабеля с учетом температуры окружающей среды и потерь напряжения.

Грачевой Е.И., Горловым А.Н., Шакуровой З.М., Табачниковой Т.В. в [8] показан алгоритм оценки эквивалентного сопротивления схем цеховых сетей с учетом нагрева проводников и предложена методика расчета температуры жил проводников с учетом температуры окружающей среды.

Коржов А.В., Сидоров А.И., Томашева Е.В. в [9] исследовали магнитное поле в КЛ, обусловленное различными токовыми нагрузками и физическими процессами при различных температурах окружающей среды и оценили степень разрушающего воздействия негативных факторов, в том числе тепловых, на изоляцию КЛ.

Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. в [10] предложили методику расчета температуры нагрева изоляции КЛ с учетом влияния рядом проложенных КЛ при использовании поправочных коэффициентов и Ильичевым Н.Б. и Вермаховским А.Н. в также [11] проведено исследование температуры изоляции жил КЛ по разработанной авторами методике.

Лебедев Д.В., Зайцев Е.С. в [12] предложили математический алгоритм расчета температуры жилы высоковольтного однофазного кабеля с изоляцией из СПЭ в режиме реального времени на основе данных о распределенной температуре экрана и токовой нагрузке в жиле, а Зализный Д.И. и Широков О.Г. в [13] разработали математическую модель тепловых процессов трехжильных силовых КЛ, позволяющую в реальном времени рассчитывать температуры жил на основе известных значений температуры его поверхности и температуры окружающей среды. Для подтверждения достоверности полученных результатов авторами проведены лабораторные и экспериментальные испытания.

R. Gono, S. Rusek, M. Kratky и Z. Leonowicz в [14] исследуют параметры надежности элементов распределительных систем, а также возможности оптимизации технического обслуживания систем электроснабжения, в том числе КЛ.

K. Chen, Y. Yue, Y. Tang в [15] предлагают метод оценки температуры жил КЛ 10 кВ с помощью специальных датчиков на примере железнодорожных линий электропередач. Представлены и проанализированы также различные методы определения температуры жил и выявлено влияние негативных факторов, которые приводят к снижению $T_{\text{сн}}$ изоляции.

R. Jongen; E. Gulski; J. Smit в [16] исследовали и установили, как температура окружающей среды влияет на неисправности соединений КЛ среднего напряжения, а также на нагрев изоляции жил КЛ, разработки по данной тематике представили в [17] R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smit; A.L.J. Janssen.

Итальянскими авторами T.Bragatto; A.Cerretti; L.D'Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Maccioni в [18] проведено исследование процессов нагрева КЛ токами короткого замыкания, протекающими через экраны кабеля. Предложена тепловая модель, применяемая для оценки эффектов CR при нагреве КЛ и соединений во время отказов.

Как показывает практика, исследования, связанные с анализом температурных параметров КЛ среднего напряжения, являются актуальными.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых советскими, российскими и зарубежными учеными, заключается в разработанной методике расчета параметров нагрева элементов конструкции КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации и использовании программного обеспечения для оценки температурных характеристик.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методика расчета температурных параметров кабельных линий

Для исследования температурных параметров КЛ при различных условиях эксплуатации и способах прокладки- в воздухе, в траншее или в земле в трубе, рассмотрим трехжильные КЛ сечением 70 мм² с расчетным током I_р=120 А. Среднемесячная летняя температура по республике Татарстан составляет 20°С согласно климатическим и метеорологическим данным за 2023 год.

Марка, вид изоляции и материал жил КЛ представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

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

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

Для проведения расчетов приняты следующие $k_{\text{ж}}$ в зависимости от материала токопроводящих жил КЛ с постоянной нагрузкой:

- для алюминиевых жил $k_{\text{ж}}= 0,88$,
- для медных жил $k_{\text{ж}}= 0,7$.

Значения $k_{\text{ж}}$ приняты на основании данных ПУЭ.

На рисунке 1 представлена типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ с обозначением термических сопротивлений. Для исследования приняты трехжильные КЛ сечением 70мм².

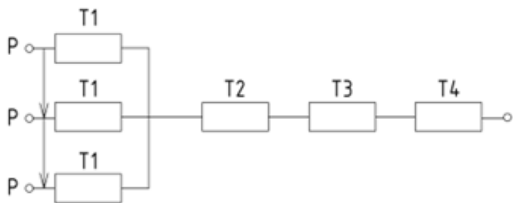


Рис. 1. Типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ
Fig. 1. Typical thermal equivalent circuit of a three-core cable

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

Описание элементов схемы замещения:

- Р-потери в жилах КЛ;
- T₁- тепловое сопротивление между жилой и оболочкой КЛ;
- T₂- тепловое сопротивление между оболочкой и броней;
- T₃- тепловое сопротивление наружного защитного покрытия;
- T₄- тепловое сопротивление среды, окружающей КЛ.

Расчет проводится на основании действующего на территории РФ ГОСТ Р МЭК 60287-2-1-2009, в котором представлена методика с соответствующими формулами для определения тепловых сопротивлений КЛ 10кВ и температур жил для различных способов прокладки, с различными типами изоляции и для различной температуры окружающей среды.

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

The results of calculations of temperature parameters of cable 10 kV for various laying methods, with
 $c_{pu}=0.88$ for aluminum cores, $c_{pu}=0.7$ 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 $t_{окр}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$
ААШв	Земля	0,05	0	0,064	0,88	65,7 $^{\circ}\text{C}$
	Земля+труба	0,05	0	0,064	1,03	77,6 $^{\circ}\text{C}$
	Воздух	0,05	0	0,064	0,8	69,8 $^{\circ}\text{C}$
ВВГ	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	47,4 $^{\circ}\text{C}$
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	54,6 $^{\circ}\text{C}$
АВВГ	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	65,1 $^{\circ}\text{C}$
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	77,0 $^{\circ}\text{C}$
ППг	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	46,3 $^{\circ}\text{C}$
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	55,4 $^{\circ}\text{C}$
АППг	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	63,3 $^{\circ}\text{C}$
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	78,4 $^{\circ}\text{C}$

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

Таким образом установлено, что температура жил КЛ зависит от $k_{зг}$, способа прокладки и температуры окружающей среды. КЛ с алюминиевыми жилами, работающими с $k_{зг}=0,88$ и проложенными в земле в трубе имеют наибольший нагрев из-за условий прокладки и нарушения теплообмена с окружающей средой, что приводит к ускоренному старению изоляции.

Проведение расчетов в программном комплексе ELCUT

Для визуализации расчетов и определения теплового распределения внутри КЛ 10 кВ использован программный комплекс ELCUT. Данное программное обеспечение позволяет визуально оценить распределение температуры внутри конструкции КЛ на основании расчетных данных и оценить степень нагрева оболочки изоляции. Для проведения расчетов в качестве примера рассмотрим КЛ марки АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{зг1}=0,7$ и $k_{зг2}=0,88$ с температурой окружающей среды 20°C , чтобы оценить влияние этого параметра на нагрев жил КЛ.

В результате исследования получены температурные диаграммы рассеивания тепла внутри конструкции КЛ с цветовым эффектом ранжирования температур. Структура диаграммы представлена для трехжильной КЛ с многослойной оболочкой и различной степенью нагрева каждого из слоев.

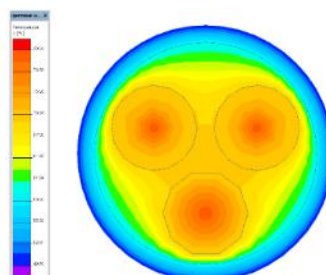


Рис. 2. Диаграмма термических процессов внутри КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг1}=0,7$ при прокладке в земле в трубе

Fig. 2. Diagram of thermal processes inside the cable АВВГ-3х-70 10 kV with $k_{зг1}=0.7$ when laying in the ground in a pipe

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

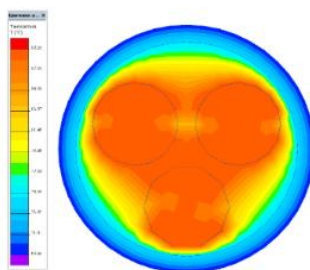


Рис. 3. Диаграмма термических процессов внутри КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг2}=0,88$ при прокладке в земле в трубе

Fig. 3. Diagram of thermal processes inside the cable АВВГ-3х-70 10 kV with $k_{зг2}=0.88$ when laying in the ground in a pipe

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

Для контроля и ранжирования температур по цвету используется шкала соответствия, представленная на рисунке 4. Красная зона соответствует температуре выше 80°C, оранжевая зона соответствует температурному диапазону 56-80°C, желтая зона соответствует температурному диапазону 42-56°C, зеленая зона соответствует температурному диапазону 35-42°C и голубая зона соответствует температурному диапазону ниже 35°C.

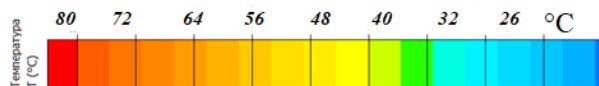


Рис. 4. Шкала соответствия ранжирования температур по цветам Fig. 4. Correspondence scale for ranking temperatures by colors

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

В результате исследований тепловых параметров КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{з1}=0,7$, $k_{з2}=0,88$ с помощью программы Elcut получены температурные диаграммы с указанием температур каждого слоя исследуемой КЛ. При этом показано, что наибольший нагрев имеет токопроводящая жила и ее оболочка- при $k_{з2}=0,88$ это значение варьируется в диапазоне 77-79°C (вблизи красной зоны), для $k_{з1}=0,7$ это значение составляет 57-59°C (вблизи желто-оранжевой зоны). С переходом от внутреннего к внешнему слою температура жил КЛ снижается, что показывает шкала соответствия (рис.4). При этом точное значение изменения температуры при переходе от слоя к слою оценить сложно, так как существуют погрешности при проведении расчетов.

Результаты исследований с помощью температурных диаграмм показали, что КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{з2}=0,88$ при прокладке в земле в трубе нагревается сильнее КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{з1}=0,7$ на 19-21 °C с учетом погрешности применяемого программного комплекса, равной 2-3°C.

Расчет скорости старения изоляции КЛ

При проведении исследования установлено, что распределение тепла от токопроводящей жилы к оболочке происходит быстрее при прокладке КЛ в воздухе, так как в данном случае не нарушен теплообмен с окружающей средой. Проведем расчет скорости старения и расчетного $T_{сл}$ изоляции для АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{з1}=0,82$ и $k_{з2}=0,88$ при прокладке в земле в трубе, так как при таком режиме эксплуатации КЛ испытывает наибольший нагрев. При $k_{з1}=0,82$ температура нагрева жил исследуемой КЛ составляет 70°C, что является длительно допустимой температурой жилы в нормальном режиме для ПВХ изоляции по справочным данным.

Для расчета скорости старения изоляции используем закон Аррениуса. Уравнение зависимости скорости термической реакции от температуры КЛ по закону Аррениуса определяется соотношением (1)

$$t_{p1} e^{\frac{-W_a}{kT_1}} = t_{p2} e^{\frac{-W_a}{kT_2}} \quad (1),$$

где

t_{p1} и t_{p2} – расчетный $T_{сл}$ 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.

Исследуем динамику старения изоляции для КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{з1}=0,82$ (что соответствует нормальной температуре эксплуатации 70°C для данного типа изоляции) и $k_{з2}=0,88$ (что соответствует расчетному значению температуры =77°C при эксплуатации КЛ в земле в трубе).

$$\frac{t_{p(70)}}{t_{p(77)}} = e^{\frac{62450}{8,31} \left(\frac{1}{273+70} - \frac{1}{273+77} \right)} = 1,55 \quad (2)$$

Таким образом, в течение длительной работы КЛ (более 3 часов непрерывной работы в сутки) при $k_{з2}=0,88$ и соответствующей температуре= 77°C - реакция термической деструкции в ПВХ-изоляции протекает в 1,55 раз быстрее, чем при аналогичных условиях и температуре жил КЛ= 70°C с $k_{з1}=0,82$.

Паспортный $T_{сл}$ для КЛ составляет 30 лет или 262800 часов. Учитывая, что при перегрузке на 9% относительно допустимого $k_{з1}=0,82$, изоляция из ПВХ подвергается

воздействию повышенной температуры $=77^{\circ}\text{C}$, при этом паспортный $T_{\text{сл}}$ снижается на 27-30% и составляет, примерно, 19-20 лет с учетом погрешности 5%.

Построим график зависимости расчетного $T_{\text{сл}}$ для АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{\text{зг}}$ и аппроксимируем полученную функцию. В качестве примера покажем график функции для экспоненциальной зависимости на основании проведенных расчетов.

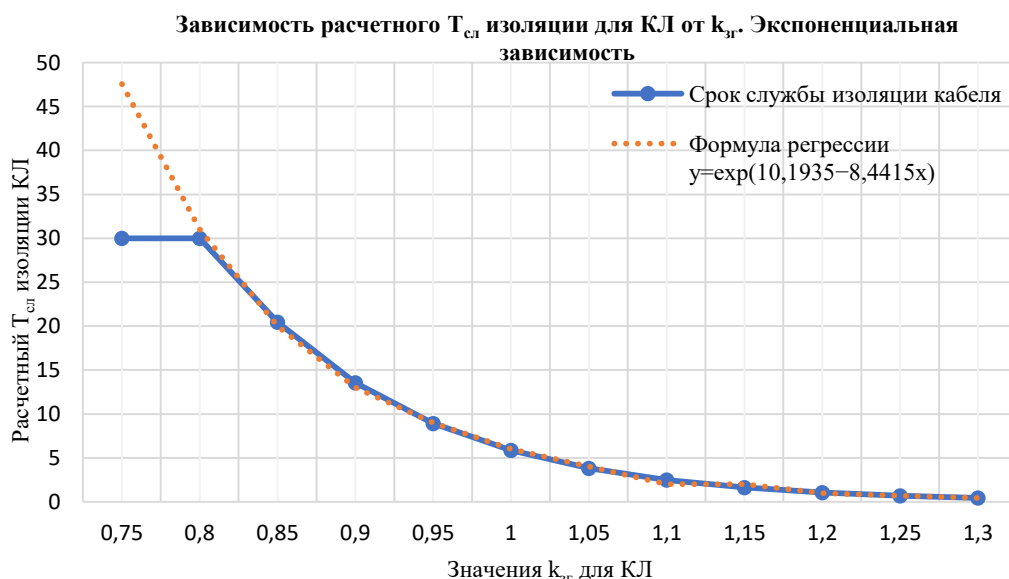


Рис. 5. График зависимости расчетного $T_{\text{сл}}$ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{\text{зг}}$, выраженной экспоненциальной зависимостью

Fig. 5. Dependence of the service life of the AVVG-3x-70 10kV cable when laying in the ground in a pipe on the load factor of the cable line, expressed as an exponential dependence

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

В таблице 3 приведены результаты вычислений параметров рассматриваемых аппроксимирующих функций.

Таблица 3
Table 3

Аппроксимирующие функции
Approximating functions

Марка КЛ	Уравнение аппроксимации	Вид аппроксимирующей функции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
АВВГ-3х-70	$y = -430,1165x^3 + 1537,8834x^2 - 1839,1736x + 737,0477$	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
ААШВ-3х-70	$y = \exp(9,4081 - 8,3726x)$	Экспоненциальная	0,9795	4,6
АППГ-3х-70	$y = \exp(9,7698 - 8,1386x)$	Экспоненциальная	0,9284	7,6

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

Проведенные расчеты и полученные результаты показывают, что наиболее достоверной функцией, описывающей зависимость расчетного $T_{\text{сл}}$ КЛ 10кВ от $k_{\text{зг}}$ является экспоненциальная, так как значение средней ошибки аппроксимации для данной зависимости составляет наименьшее значение, а коэффициент детерминации близок к единице. Таким образом, зависимость расчетного $T_{\text{сл}}$ изоляции КЛ от $k_{\text{зг}}$ наиболее достоверно можно описать уравнением

$$t = \exp(10,1935 - 8,4415k) \quad (3),$$

где

t – расчетный $T_{\text{сл}}$ при принятом паспортном $T_{\text{сл}} = 30$ лет;

k – $k_{\text{зг}}$ для КЛ.

На основании полученного в процессе исследования экспоненциального уравнения были проведены соответствующие расчеты для определения расчетного $T_{сл}$ изоляции КЛ 10кВ в зависимости от $k_{зг}$ для различных типов изоляции, а именно ПВХ изоляции, ПЭ изоляции и БПИ изоляции.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе оптимальными $k_{зг}$ с точки зрения технического состояния изоляции, соответствующими паспортному $T_{сл}$, равному 30 лет, для КЛ, в зависимости от типа изоляции являются:

- 0,797-0,822 для КЛ с ПВХ-изоляцией;
- 0,788-0,812 для КЛ с ПЭ изоляцией;
- 0,709-0,731 для КЛ с БПИ изоляцией.

При значениях $k_{зг}$, меньших, полученных в данном исследовании, КЛ 10кВ при прокладке в земле в трубе не будут испытывать чрезмерного перегрева в процессе эксплуатации. Полученные значения $k_{зг}$ позволяют наиболее точно выбрать режим работы и сечение КЛ на этапе проектирования.

Обсуждение (Discussions)

В результате проведенных исследований установлены оптимальные значения коэффициентов загрузки для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе для различных типов изоляции-ПВХ, БПИ и ПЭ, что позволяет регулировать режимы работы КЛ в процессе эксплуатации и уточнять параметры на этапе проектирования.

Выводы (Conclusions)

1. Представлен анализ и дополнение методики расчета температурных параметров КЛ 10кВ при различных способах прокладки и с различными типами изоляции с учетом климатических условий Республики Татарстан.

2. Получены результаты расчета температурных параметров КЛ по предлагаемой методике.

3. Проведены расчеты в программном комплексе ELCUT и представлены результаты температурного распределения внутри кабельных оболочек, показаны степени нагрева с учетом теплового рассеивания.

4. Предложена методика вычисления расчетного $T_{сл}$ для КЛ 10 кВ в зависимости от их $k_{зг}$ и получены аппроксимирующие функции.

5. Получены оптимальные значения $k_{зг}$ для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе для регулирования режимов эксплуатации.

Литература

1. 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.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019.Т. 11. №4(44). С. 22-29.
3. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92.
4. Грачева Е.И., Гиззатуллина Е.Е. Анализ надежности цеховых сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. №5-6.
5. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // КАБЕЛЬ-News. 2018. №10. С. 3-10.
6. Ковригин Л. А. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS // КАБЕЛЬ-News. 2009. № 4. С. 2-6.
7. Гладышева М.М., Сухачева Е.К., Хатюшина Т.В. Математическая модель программного обеспечения автоматизированной системы для выбора кабельных линий промышленных предприятий // СибАК. 2015. №12(48). С. 20-23.
8. 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
9. Коржов А.В., Сидоров А.И., Томашева Е.В. Влияние магнитного поля кабелей 6-10кВ на их изоляцию // Электричество. 2009. С. 46-53.

10. 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.

11. Ильичев Н.Б., Вермаховский А.Н. Расчет температуры жил кабелей при проектировании распределительных сетей // Эффективные технологии проектирования систем электроснабжения и автоматики. Решения группы компаний CSoft. ЗАО «СиСофт Иваново», ЗАО «СиСофт». Иваново-Москва, 2012. С. 22-28.

12. Лебедев Д.В., Зайцев Е.С. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 11-16.

13. Зализный Д.И., Широков О.Г. Адаптивная математическая модель тепловых процессов трехжильного силового кабеля // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2014. № 2 (57). С. 51-63.

14. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, Reliability analysis of electric distribution system, 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

15. K. Chen, Y. Yue, Y. Tang, Research on Temperature Monitoring Method of Cable on 10 kV Railway Power Transmission Lines Based on Distributed Temperature Sensor, Energies 2021, 14(12), 3705; <https://doi.org/10.3390/en14123705>

16. R. Jongen; E. Gulski; J. Smit, Failures of medium voltage cable joints in relation to the ambient temperature, CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution; DOI: 10.1049/cp.2009.0832

17. R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smit; A.L.J. Janssen, Influence of ambient temperature on the failure behavior of cable joints, 2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; DOI: 10.1109/CEIDP.2007.4451520

18. T.Bragatto; A.Cerretti; L.D’Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Maccioni, Thermal Effects of Ground Faults on MV Joints and Cables; Energies 2019, 12(18), 3496; <https://doi.org/10.3390/en12183496>

Авторы публикации

Цицонь Иван Иванович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского Государственного Энергетического Университета.

Грачева Елена Ивановна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета.

Немировский Александр Емельянович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Вологодского Государственного Университета.

Valtchev S – профессор Университета NOVA в Лиссабоне, Португалия.

References

1. Gracheva E.I., Muravyov G.G. Investigation of temperature regimes and parameters of cable lines of electrical equipment of power plants // NAUKA. technologies. INNOVATIONS. 2020.T.4,pp.151-154.

2. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Research and assessment of electricity losses in in-house power supply systems // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2019.T. 11. No.4(44). pp. 22-29.

3. Gracheva E.I., Alimova A.N. Possible errors in the calculation of electricity losses in shop industrial networks // Izvestia of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2018. Vol. 20. No. 11-12. pp. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92

4. Gracheva E.I., Gizzatullina E.E. Reliability analysis of workshop networks // News of universities. Energy problems. 2003. No.5-6.

5. Titkov V.V. On the issue of introducing a thermal regime of a three-phase LNG cable line // CABLE-News. 2018. No.10. pp. 3-10.

6. Kovrigin L. A. Calculation of temperature fields and current load in ANSYS // CABLE-News. 2009. No. 4. pp. 2-6.

7. Gladysheva M.M., Sukhacheva E.K., Khatyushina T.V. Mathematical model of software for an automated system for selecting cable lines of industrial enterprises // SibAK. 2015. No. 12(48). pp. 20-23.
8. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Tabachnikova T.V. Equivalent resistance of industrial electric networks as one of the main characteristics in calculations of electricity losses // INSTRUMENTATION AND AUTOMATED ELECTRIC DRIVE IN THE FUEL AND ENERGY COMPLEX AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES. 2022. pp. 540-544
9. Korzhov A.V., Sidorov A.I., Tomasheva E.V. The influence of the magnetic field of cables 6-10 kV on their insulation // Electricity. 2009. pp. 46-53.
10. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Calculation of the heating temperature of cable insulation taking into account the influence of nearby laid cables // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2019. Vol. 11. No. 2 (42). pp. 56-64.
11. Ilyichev N.B., Vermakhovsky A.N. Calculation of the temperature of cable cores in the design of distribution networks // Effective technologies for designing power supply and automation systems. Reorganization of the CSoft Group of companies. CJSC "SiSoft Ivanovo", CJSC "SiSoft". Ivanovo-Moscow, 2012. pp. 22-28.
12. Lebedev D.V., Zaitsev E.S. Calculation of the core temperature of a single-phase high-voltage cable with cross-linked polyethylene insulation in real time // Bulletin of the Ivanovo State Energy University. 2015. No. 4. pp. 11-16.
13. Zalizny D.I., Shirokov O.G. Adaptive mathematical model of thermal processes of a three-core power cable // Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2014. No. 2 (57). pp. 51-63.
14. R. Gono, S. Rusek, M. And Kratki Z. Leonovich, Reliability analysis of the electric power distribution system, 2011. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi identifier: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
15. K. Chen, Yu. Yue, Yu. Tang, Investigation of the method of cabin temperature control on 10 kV railway power lines based on a distributed temperature sensor, Energy 2021, 14 (12), 3705; <https://doi.org/10.3390/en14123705>
16. R. Jongen; E. Gulskey; J. Smith, Failures of medium voltage cable connections depending on ambient temperature, CIRED 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Power Distribution; doi number: 10.1049/WED.2009.0832
17. R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smith; A.L.J. Janssen, The influence of ambient temperature on the behavior of cable connections during failure, Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena for 2007; doi identifier: 10.1109/CEIDP.2007.4451520
18. T.Bragatto; A.Cerretti; L.D'Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Macchioni, Thermal effects of earth faults on high-voltage connections and cables; energy, 2019, 12(18), 3496; <https://doi.org/10.3390/en12183496>

Authors of the publication

Ivan I. Tsitson – Kazan State Power Engineering University.

Edward Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Alexander Ye. Nemirovsky – Vologda State University.

Valtchev S. – Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено 03.03.2024 г.

Отредактировано 31.03.2024 г.

Принято 02.04.2024 г.