

Научная статья

УДК 621.315.175

DOI: 10.24412/2658-4255-2023-1-05-12



EDN: AKGJSD

Для цитирования:

Кротков Е.А., Безменова Н.В., Щобак А.А. Определение тока профилактического подогрева грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем на ВЛ 110-220 кВ для предотвращения образования гололёдно-изморозевых отложений // Российская Арктика. 2023. Том 5(1). С. 05–12
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-05-12>

Получена: 13.02.2023
Принята: 09.03.2023
Опубликована: 15.03.2023

For citation:

Krotkov E.A., Besmenova N.V., Shchobak A.A. Determination of the preventive heating current of a lightning protection cable with a built-in optical cable on a 110-220 kV overhead line to prevent the formation of ice-frost deposits // Russian Arctic, 2023; Vol 5(1): p.p. 05-12. (In Russ.)
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-05-12>



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА С ВСТРОЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЕМ НА ВЛ 110-220 кВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЁДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Е.А. Кротков* , Н.В. Безменова, А.А. Щобак

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Российская Федерация

E-mail: *krotkov.e.a@gmail.com

Аннотация

Изменения климата в мире, происходящие в последнее время, расширяют список регионов Российской Федерации, для которых необходимость предотвращения гололёдно-изморозевых отложений на проводах и грозозащитных тросах ВЛ 110-220 кВ становится основной проблемой для сетевых компаний в осенне-зимний период. Большинство ВЛ 110-220 кВ оснащены грозозащитным тросом с встроенным оптическим кабелем, предназначенным для защиты ВЛ от прямых ударов молнии, а также выполняющим функцию волоконно-оптической линии связи. В осенне-зимний период на ВЛ 110-220 кВ возможно возникновение следующих аварийных ситуаций: механический обрыв грозозащитного троса, который происходит под тяжестью гололёдно-изморозевых отложений и действием ветра; перегрев грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем во время плавки гололёдно-изморозевых отложений выше допустимого значения температуры +80°C...+85°C приводящей к повреждению оптического кабеля.


Альтернативой плавке гололёдно-изморозевых отложений является профилактический подогрев участка грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем до положительной температуры индукционным способом от электромагнитных полей проводов двухцепной ВЛ 110-220 кВ в рабочем режиме. Применение в эксплуатации профилактического подогрева участка грозозащитного троса ВЛ 110-220 кВ требует уточнения математической модели для оценки необходимой величины тока.

Рассмотрена математическая модель для определения величины тока, необходимой для создания на поверхности грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем температуры +(1-2)°C, при которой гололёдно-изморозевые отложения не образуются. В основе математической модели используется уравнение теплового баланса проводника ВЛ в установившемся режиме, принятое в стандарте МЭК 61597.

В расчетном примере построены области допустимых значений температуры воздуха и скорости ветра для применения индукционного способа подогрева участка грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем на двухцепной ВЛ 220 кВ. Применение на двухцепной ВЛ 220 кВ индукционного способа профилактического подогрева участка грозозащитного троса марки ОКГТ, имеющего сечение алюминиевой части не менее 70 мм², эффективно при значении наведенного тока не менее 150А для метеорологических условий образования гололеда и мокрого снега.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, грозозащитный трос с встроенным оптическим кабелем, гололёдно-изморозевые отложения, профилактический подогрев

DETERMINATION OF THE PREVENTIVE HEATING CURRENT OF A LIGHTNING PROTECTION CABLE WITH A BUILT-IN OPTICAL CABLE ON A 110-220 kV OVERHEAD LINE TO PREVENT THE FORMATION OF ICE-FROST DEPOSITS

E.A. Krotkov* , N.V. Besmenova, A.A. Shchobak

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: *krotkov.e.a@gmail.com;

Abstract

Last climate changes in the world are expanding the list of region of the Russian Federation. For this region the need to prevent icy-frost deposits on wires and ground wires of 110-220 kV is becoming the main problem for grid companies in the autumn-winter period. Most of 110-220 kV overhead lines are equipped with an overhead ground-wire cable with incorporated optical cable designed to protect overhead lines from direct lightning strikes. Also this incorporated optical cable serves a function of an optical fiber link. In the autumn-winter period on the 110-220 kV overhead lines may the following accidental situations may occur: mechanical breakage of the overhead ground-wire cable which arise due to the weight of icy-frost deposits and the action of wind; overheating of the overhead ground-wire cable with incorporated optical cable during melting of icy-frost deposits above the permissible temperature of $+80^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ resulting in damage to the optical cable.

Preventive heating of part the overhead to the positive temperature by induction method from electromagnetic fields of a double-chain 110-220 kV overhead lines is the alternative of ice melting. The use of preventive heating of a part of overhead ground-wire cable 110-220 kV on the job requires the refinement of a mathematical model to estimate the required current value.

A mathematical model is considered to determine the required current value to create a ground-wire cable with incorporated optical cable at a temperature of $+(1-2)^{\circ}\text{C}$, at which ice-frost deposits are not formed. The mathematical model is based on the equation of the thermal balance of the overhead line conductor in steady state, adopted in the IEC 61597 standard.

In the calculated example the ranges of permissible values of air temperature and wind speed are constructed for the use of an induction method for heating a part of a ground-wire cable with incorporated optical cable on a 220 kV double-chain overhead line. The use of an induction method for preventive heating of a part of a ground wires of the OKGT brand on a 220 kV double-chain overhead line having a cross section of an aluminum part of at least 70 mm^2 is effective at a value of induced current of at least 150A for meteorological conditions of ice and sleet formation.

Keywords: overhead power line, lightning protection wire with built-in optical cable, ice-frost deposits, preventive heating

Введение

Изменения климата в мире, происходящие в последнее время, расширяют список регионов Российской Федерации, для которых необходимость предотвращения гололёдно-изморозевых отложений (далее ГИО) на проводах и грозозащитных тросах ВЛ 110-220 кВ становится основной проблемой для сетевых компаний в осенне-зимний период. Отмечается рост количества ГИО на 38%, которые явились причиной технологических нарушений в электрических сетях напряжением 110-220 кВ, доля которых составила 47% от общего числа нарушений¹.

¹ Всероссийское совещание «Об итогах прохождения субъектами электроэнергетики и объектами жилищно-коммунального хозяйства отопительного сезона 2021-2022 годов, актуальных вопросах функционирования электроэнергетической отрасли» (Москва, 27.04.2022) – Текст: электронный//Минэнерго России: официальный сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/21366> (дата обращения: 13.01.2023).

Образованию ГИО на проводах и грозозащитных тросах наиболее подвержены ВЛ 110-220 кВ ряда регионов Российской Федерации: Приморский край, Северный Кавказ, Северо-Запад, Поволжье². Во многих случаях ГИО образуется на ограниченном участке ВЛ, который в горных условиях может составлять всего несколько пролетов [1-3]. Образование ГИО приводит к увеличению механических нагрузок, которые представляют опасность для обрыва грозозащитного троса и последующему аварийному отключению ВЛ 110-220 кВ. Поэтому поиск технических решений проблемы предотвращения развития ГИО на грозозащитных тросах ВЛ 110-220 кВ является актуальным.

Материалы и методы

Гололёдно-изморозевые отложения включают различные виды обледенения, приведенные в таблице 1 [4]: гололёд образуется преимущественно (70%) при температуре от 0 до -2°C ; при таких же температурах наиболее часто (78%) наблюдается отложение мокрого снега; зернистая изморозь почти в равном числе случаев (примерно по 40%) образуется при температуре воздуха от 0 до -4°C и от -4 до -8°C ; кристаллическая изморозь чаще всего (45%) отмечается при температуре от -12 до -16°C ; сложное отложение в 72% случаев – при температуре от 0 до -4°C . Температурный диапазон для образования гололеда и мокрого снега строго ограничен, однако указанные виды обледенения образуются чаще других видов, могут продолжительно сохраняться на проводах и грозозащитных тросах ВЛ 110-220 кВ и являются наиболее опасными [5, 6].

Таблица 1

Метеорологические условия гололедообразования

Атмосферные явления	Вид обледенения	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	Скорости ветра, м/с	
			средняя	максимальная
Морось, дождь, туман	гололёд	0...-4	0-15	40
Мокрый налипающий снег	мокрый снег	+1...-2	0-10	20-30
Туман, морось	зернистая изморозь	-3...-20	0-15	40
Туман, дымка	кристаллическая изморозь	-5...-30	0-3	5-7
Морось, дождь, туман, мокрый снег	сложное отложение	0...-20	1-15	30-40

Расчетную температуру воздуха при ГИО в высокогорных районах (с отметками выше 1000 м), а также на территории, лежащей к востоку от Енисея (за исключением береговой полосы океанов и морей) и к северу от 60-й параллели, рекомендуется принимать равной -10°C , для всей остальной территории России -5°C и считать её расчетной температурой не только для времени образования ГИО, но и для всего времени его существования [1, 7].

Применяемые на практике схемы плавки гололёда на грозозащитных тросах ВЛ основаны на использовании специального источника электроэнергии и имеют технические ограничения³. Грозозащитные тросы ВЛ 110-220 кВ изолированы от земли и имеют класс изоляции более низкий, чем провода ВЛ. Поэтому при подключении источника электроэнергии к грозозащитному тросу ВЛ приходится ограничивать длину участков плавки, так как повышение напряжения источника электроэнергии требует усиления изоляции грозозащитного троса, вызывающего необходимость увеличения пробивных напряжений искровых промежутков, защищающих эту изоляцию.

Большинство ВЛ 110-220 кВ оснащены грозозащитным тросом с встроенным оптическим кабелем (далее ГЗТ-ОК), предназначенным для защиты ВЛ от прямых ударов молнии, а также выполняющим функцию волоконно-оптической линии связи. ГЗТ-ОК располагается над проводами фаз и имеет изолированное крепление на

² СТО 56947007 - 29.240.01.189-2014. Методические указания по применению альбомов карт климатического районирования территории по субъектам РФ. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Приказ ОАО «ФСК ЕЭС» от 03.10.2014 № 444. 95 с.

³ ГОСТ Р 59965-2021 "Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети. Системы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи. Выбор и обоснование принципиальных технических решений" утвержден приказом Росстандарта от 23 декабря 2021 года N 1837-ст.

каждой опоре ВЛ. В эксплуатации ВЛ 110-220 кВ на ГЗТ-ОК возможно возникновение следующих аварийных ситуаций: механический обрыв ГЗТ-ОК, который может произойти под тяжестью ГИО и действием ветра; перегрев ГЗТ-ОК как при прохождении тока короткого замыкания [8], так и во время плавки ГИО выше допустимой температуры +80°C...+85°C, приводящей к повреждению оптического кабеля. Как показывает опыт эксплуатации⁴, чтобы успешно провести плавку гололеда с высокой плотностью 0,9 г/см³ за время 40-60 минут, не превышая допустимое значение температуры нагрева участков ГЗТ-ОК без гололеда, необходимо плавить гололед при толщине стенки гололедной муфты не более 10 мм. Также в случае плавки гололеда переменным током возможно локальное разрушение (обрыв) ГЗТ-ОК в результате термического воздействия тока плавки, величина которого превышает максимально допустимое значение тока плавки. Причиной такого превышения может служить замыкание ГЗТ-ОК на землю в случае разрушения изолированного крепления ГЗТ-ОК, а также вследствие нарушений при строительстве или ремонтах ГЗТ-ОК.

Альтернативой плавке ГИО является профилактический подогрев ГЗТ-ОК до температуры +(1-2)°C, при которой ГИО не образуются на его поверхности [7, 9]. В работах [10-13] приведен обзор индукционных способов подогрева участка грозозащитного троса ВЛ 110-500 кВ. В работе [13] рассмотрена математическая модель для оценки величины тока, индуктированного (наведенного) в контуре «грозозащитный трос – дополнительный проводник» магнитными полями токов двухцепной ВЛ 220 кВ в рабочем режиме. Для повышения величины наведенного тока в цепь замкнутого контура «грозозащитный трос – дополнительный проводник» включается конденсаторная установка, величина емкости которой определяется из условия создания резонанса напряжения.

Для определения величины тока профилактического подогрева ГЗТ-ОК используется математическая модель, в основе которой используется уравнение теплового баланса проводника ВЛ в установившемся режиме. В математической модели проводник (в рассматриваемом случае это грозозащитный трос с встроенным оптическим кабелем) конструктивно представлен упрощенно в виде полнотелого прямолинейного цилиндра [14].

Уравнение теплового баланса грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем ВЛ в установившемся режиме без ГИО имеет вид⁵:

$$I_{\text{доп}}^2 R_T + Q_{\text{сол}} = \sigma \pi d \varepsilon (T_H^4 - T_B^4) + \lambda_B \pi N u (T_H - T_B); \quad (1)$$

Левая часть уравнения (1) представляет собой активную мощность, выделяемую в ГЗТ-ОК (без процесса образования ГИО) вследствие нагрева электрическим током, правая – потери мощности на теплоотдачу в окружающую среду, где первое слагаемое определяет мощность излучения с поверхности ГЗТ-ОК, а второе – мощность конвективного теплообмена.

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:

$I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока, А;

R_T – электрическое сопротивление ГЗТ-ОК при температуре $T_{\text{доп}}$, Ом/км;

T_H – температура нагрева ГЗТ-ОК, К;

Сопротивление R_T при температуре t_H , отличной от номинальной (+20°C), рассчитывается с учетом температурного коэффициента электрического сопротивления α по выражению:

$$R_T = R_{T20} [1 + \alpha(t_H - 20)]; \quad (2)$$

где:

R_{T20} – сопротивление ГЗТ-ОК постоянному току при температуре +20°C, Ом/км;

α – температурный коэффициент электрического сопротивления, °C⁻¹.

$Q_{\text{сол}}$ – нагрев ГЗТ-ОК от солнечного излучения, Вт/м; (в период образования ГИО характерно полное отсутствие солнечного излучения, поэтому величиной $Q_{\text{сол}}$ пренебрегают);

4 СТО 56947007-29.060.50.122-2012. Руководство по расчету режимов плавки гололеда на грозозащитном тросе со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) и применению распределенного контроля температуры ОКГТ в режиме плавки. Москва, 2012. – 119 с.

5 МЭК 61597, 1995-05. Провода электрические для воздушных линий электропередач. Методы расчета для скрученных голых проводов.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана;
 d – диаметр ГЗТ-ОК, м;
 ε – коэффициент излучения поверхности ГЗТ-ОК по отношению к абсолютно черному телу; (значение коэффициента излучения принимается в диапазоне от 0,2 до 0,9 в зависимости от цвета оксида алюминия на поверхности ГЗТ-ОК);
 $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;
 $T_{\text{в}}$ – температура воздуха, К;

Nu, Re – числа Нуссельта и Рейнольдса, определяемые по выражениям [14]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,65 Re^{0,2} + 0,23 Re^{0,61}; \\ Re &= 1,644 \cdot 10^9 \nu d [(T_{\text{н}} + 0,5 (T_{\text{н}} - T_{\text{в}}))]^{-1,78}; \end{aligned} \quad (3)$$

где:

ν – скорость ветра, м/с;
 $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

Расчетные значения коэффициента теплопроводности воздуха $\lambda_{\text{в}}$ определяются в зависимости от температуры воздуха $t_{\text{в}}$ в зоне расположения ВЛ 110-220 кВ [15]:

$$\lambda_{\text{в}} = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} t_{\text{в}} - 4,407 \cdot 10^{-9} t_{\text{в}}^2; \quad (4)$$

В режиме профилактического подогрева ГЗТ-ОК до температуры $T_{\text{н}}$ равной +(1-2)°С, при которой ГИО не образуются на его поверхности, уравнение теплового баланса описывается выражением [7]:

$$I_{\text{по}}^2 R_T = \sigma \pi d \varepsilon (T_{\text{н}}^4 - T_{\text{в}}^4) + \lambda_{\text{в}} \pi Nu (T_{\text{н}} - T_{\text{в}}) + c_{\text{вд}} m' (T_{\text{н}} - T_{\text{в}}); \quad (5)$$

В этом уравнении последнее слагаемое учитывает часть активной мощности, расходуемой на нагрев частиц переохлажденной воды с удельной теплоемкостью $c_{\text{вд}} = 4,18$ Вт·с/(г·°С) и температурой $T_{\text{в}}$, оседающей на поверхности ГЗТ-ОК длиной 1 метр со скоростью m' , г/(м·с), определяемой по выражению [7]:

$$m' = G_{\text{л}} / (24 \cdot 60 \cdot 60) = 715 / 86,4 \cdot 10^3 = 8,28 \cdot 10^{-3} \text{ г} / (\text{м} \cdot \text{с}); \quad (6)$$

где:

$G_{\text{л}} = 715$ г/м, масса гололёдной муфты, которая образуется в течение 24 часов на поверхности ГЗТ-ОК длиной 1 метр, с толщиной стенки 10 мм.

Необходимая величина наведённого тока $I_{\text{по}}$ для профилактического подогрева участка грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем на ВЛ 110-220 кВ определяется по выражению:

$$I_{\text{по}} = [(\sigma \pi d \varepsilon (T_{\text{н}}^4 - T_{\text{в}}^4) + \lambda_{\text{в}} \pi Nu (T_{\text{н}} - T_{\text{в}}) + c_{\text{вд}} m' (T_{\text{н}} - T_{\text{в}})) / R_T]^{0,5}; \quad (7)$$

Результаты

Рассмотрим пример расчета величины тока профилактического подогрева грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем на двухцепной ВЛ 220 кВ при следующих данных метеопараметров: температура воздуха $t_{\text{в}} = -2$ °С; скорость ветра $\nu = 2$ м/с; направление ветра перпендикулярно оси трассы ВЛ 220 кВ; масса гололёдной муфты $G_{\text{л}} = 715$ г/м с толщиной стенки 10 мм, которая образуется в течение 24 часов на поверхности ГЗТ-ОК длиной 1 метр. Основные характеристики грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем марки ОКГТ⁶ приведены в таблице 2, а его сечение приведено на рис. 1.

6 Кабель ОКГТ-с. – Текст: электронный//ООО «САРАНСКАКАБЕЛЬ-ОПТИКА»: официальный сайт. – URL: <https://sarko.ru/okgt-s-cable.html> (дата обращения: 06.02.2023).

Основные характеристики ОКГТ

Диаметр провода, d , мм;	13,35
Сечение алюминий/сталь, мм ²	68,71/31,6
Электрическое сопротивление постоянному току при температуре +20°C, R_{T20} , Ом/км	0,416
Температурный коэффициент электрического сопротивления, α , °C ⁻¹	0,0036

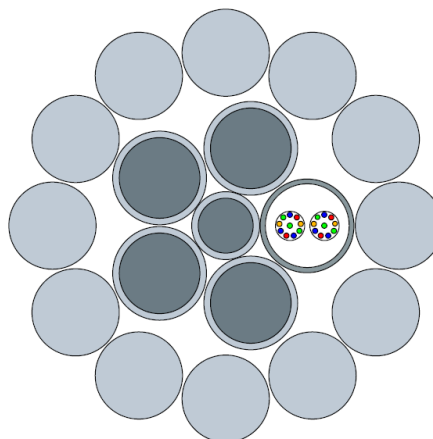


Рисунок 1. Сечение грозозащитного троса марки ОКГТ (внешний повив из алюминиевых проволок)

Теплофизические данные: удельная теплоемкость воды $c_{\text{вд}} = 4,18 \text{ Вт} \cdot \text{с}/(\text{г} \cdot \text{°C})$;
коэффициент излучения поверхности ГЗТ-ОК $\varepsilon = 0,6$;
Рассчитывается активное сопротивление ГЗТ-ОК при его температуре нагрева +2°C:

$$R_T = R_{T20} [1 + \alpha(t-20)] = 0,416 [1 + 0,0036 (2 - 20)] = 0,389 \text{ Ом/км};$$

Вычисляется число Рейнольдса для температуры воздуха $t_B = -2^\circ\text{C}$:

$$T = t_B + 273 = -2 + 273 = 271 \text{ K};$$

$$T_H^p = t_H^p + 273 = 2 + 273 = 275 \text{ K};$$

$$Re = 1,644 \cdot 10^9 \nu d [(T_B + 0,5(T_H - T_B))]^{-1,78} \\ = 1,644 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 0,01335 [271 + 0,5(275-271)]^{-1,78} = 2045$$

Вычисляется число Нуссельта:

$$Nu = 0,65Re^{0,2} + 0,23 Re^{0,61} = 2,98 + 24,06 = 27,04;$$

Рассчитывается значение коэффициента теплопроводности воздуха λ_B для температуры воздуха $t_B = -2^\circ\text{C}$:

$$\lambda_B = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} t_B - 4,407 \cdot 10^{-9} t_B^2 \\ = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} \cdot (-2) - 4,407 \cdot 10^{-9} \cdot (-2)^2 \\ = 0,02422 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K});$$

Далее рассчитывается величина тока $I_{\text{по}}$ профилактического подогрева участка ГЗТ-ОК:

$$I_{\text{по}} = \sqrt{\frac{\sigma \pi d \varepsilon (T_H^4 - T_B^4) + \lambda_B \pi Nu (T_H - T_B) + c_{\text{вд}} m' (T_H - T_B)}{R_T}} = \\ = \sqrt{\frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot 0,01335 \cdot 0,6(275^4 - 271^4) + 0,02422 \cdot \pi \cdot 27,04 \cdot 4 + 4,18 \cdot 8,28 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{0,389 \cdot 10^{-3}}} \\ = 150,7 \text{ А};$$

Для значения наведённого тока 150А построена область эффективного применения профилактического подогрева участка грозозащитного троса марки ОКГТ на двухцепной ВЛ 220 кВ в зависимости от значений температуры воздуха и силы ветра (рис. 2).

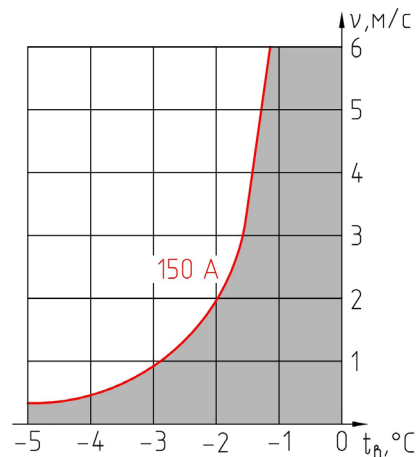


Рисунок 2. Область (тёмный фон) эффективного применения профилактического подогрева участка грозозащитного троса марки ОКГТ

Результаты расчета области допустимых значений метеопараметров указывают на эффективность применения индукционного способа профилактического подогрева участка грозозащитного троса марки ОКГТ, имеющего сечение алюминиевой части не менее 70 мм² [7]. Увеличение области эффективного применения профилактического подогрева может быть достигнуто включением в цепь контура «грозозащитный трос - дополнительный проводник» дополнительного источника постоянного тока.

Выводы

Разработана методика определения величины тока профилактического подогрева участка грозозащитного троса с встроенным оптическим кабелем на ВЛ 110-220 кВ для предотвращения образования ГИО.

Применение на двухцепной ВЛ 220 кВ индукционного способа профилактического подогрева участка грозозащитного троса марки ОКГТ, имеющего сечение алюминиевой части не менее 70 мм², эффективно для метеорологических условий образования гололёда и мокрого снега при значении наведённого тока не менее 150А.

Список литературы:

1. Методические указания по расчету климатических нагрузок на ВЛ и построение региональных карт с повторяемостью 1 раз в 25 лет. М., 1990.
2. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. // Бучинский В.Е.: под ред. Заморского А.Д.. 2-е изд. доп. Л.. 1966. 116 с.
3. Подрезов О.А. Опасные скорости ветра и гололедные отложения в горных районах. // Л., 1990. 223 с.
4. Глухов В.Г. Метеорологические условия образования гололеда. // Тр. ГГО, 1972. Вып. 311.
5. Никифоров Е.П. Повышение эффективности удаления гололедообразования с проводов ВЛ. // Электрические станции. 2004. №4.
6. Басов В.С. Защита высоковольтных линий электропередачи от налипания мокрого снега на проводах. // Электрические станции. 1962. № 12. С. 58-62.
7. Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учеб. пособие. Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. 494 с.
8. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В., Трунов М.Д. Моделирование температуры и плотности тока в грозозащитном тросе с оптическим кабелем связи при прохождении тока короткого замыкания // Энергия единой сети. 2014. № 5. С. 16–23.
9. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Science Business Media B.V. 2008. ISBN: 978-1-4020-8530-7. 388 p.

10. Балыбердин Л.Л., Галанов В.И., Крайчик Ю.С., Краснова Б.П., Лозинова Н.Г., Мазуров М.И. Индукционная плавка гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи. Электрические станции. 2002. № 1. С. 31-37.
11. Шовкопьяс С.С. Способ предотвращения гололедообразования на грозозащитных тросах воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения наведенными токами без вывода ее из работы // Энергетик. 2018. № 8. С. 13–20.
12. Засыпкин А.С., Засыпкин А.С. (мл.). Профилактический обогрев грозозащитных тросов воздушных линий наведенным током. // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Том 61. № 2. С. 99–106.
13. Кротков Е.А., Безменова Н.В., Щобак А.А. Учёт провисания проводов в пролете ВЛ 220 кВ при определении тока, наведенного в грозозащитном тросе магнитными полями токов фаз. Вестник СамГТУ, Серия Технические науки. Том 30. №1. С. 106-117.
14. Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М., 1998. С.368
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. М. 1972. С.721.

References:

1. Metodicheskie ukazaniya po raschetu klimaticheskikh nagruzok na VL i postroenie regional'nykh kart s povtoryaemost'yu 1 raz v 25 let. Moscow, 1990. (In Russ.)
2. Buchinskij V. E. Atlas obledeneniya provodov. // Buchinskij V.E.: pod red. Zamorskogo A.D. 2-e izd. dop. - L, 1966. 116 p. (In Russ.)
3. Podrezov O.A. Opasnye skorosti vetra i gololednye otlozheniya v gornyh rajonah. // L. 1990. 223 p. (In Russ.)
4. Gluhov V.G. Meteorologicheskie usloviya obrazovaniya gololeda. // Tr. GGO, 1972, no. 311. (In Russ.)
5. Nikiforov E.P. Povyshenie effektivnosti udaleniya gololedoobrazovaniya s provodov VL. // Elektricheskie stancii, 2004, vol.4. (In Russ.)
6. Basov V.S. Zashchita vysokovol'tnykh linij elektroperedachi ot nalipaniya mokrogo snega na provodah. // Elektricheskie stancii, 1962. no. 12. Pp. 58-62. (In Russ.)
7. Levchenko I.I., Zasyupkin A.S., Alliluev A.A., Sacuk E.I. Diagnostika, rekonstrukciya i ek-spluataciya vozдушnykh lini elektroperedachi v gololednykh rajonah. Novoчеркассk, 2006, 494 p. (In Russ.).
8. Gurevich L.M., Danenko V.F., Pronichev D.V., Trunov M.D. Modelirovanie temperatury i plotnosti toka v grozozashchitnom trose s opticheskim kabelem svyazi pri prohozhdenii toka korotkogo замыканиya // Energiya edinoj seti. 2014, no 5, pp. 16–23. (In Russ.).
9. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks. Springer Science Business Media B.V. 2008. ISBN: 978-1-4020-8530-7. 388 p.
10. Balyberdin L.L., Galanov V.I., Krajchik YU.S., Krasnova B.P., Lozinova N.G., Mazurov M.I. Indukcionnaya plavka gololeda na grozozashchitnykh trosah vozдушnykh linij elektroperedachi. Elektricheskie stancii. 2002, no 1, pp. 31-37. (In Russ.).
11. SHovkoplyas S. S. Sposob predotvrashcheniya gololedoobrazovaniya na grozozashchitnykh trosah vozдушnoj linii elektroperedachi sverhвысокого napryazheniya navedennymi tokami bez vyvoda ee iz raboty // Energetik. 2018, no 8, pp. 13–20. (In Russ.).
12. Zasyupkin A.S., Zasyupkin A.S. (jr.). Profilakticheskij obogrev grozozashchitnykh trosov vozдушnykh linij navedyonnym tokom. // Izv. vuzov. Elektromekhanika. 2018. Vol 61, no 2, pp. 99–106. (In Russ.).
13. Krotkov E.A., Bezменова N.V., SHCHobak A.A. Uchet provisaniya provodov v prolete VL 220 kV pri opredelenii toka, navedennogo v grozozashchitnom trose magnitnymi polyami tokov faz. Vestnik SamGTU, Seriya Tekhnicheskie nauki. Vol 30, no1, pp. 106-117. (In Russ.).
14. Polyanin A.D., Vyaz'min A.V., ZHurov A.I., Kazenin D.A. Spravochnik po tochnym resh-eniyam uravnenij teplo- i massoperenosa. Moscow, 1998. 368 p. (In Russ.).
15. Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej. M., 1972, 721 p. (In Russ.).