# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА С ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЕМ СВЯЗИ

АВТОРЫ:

ГУРЕВИЧ Л.М.,
ДАНЕНКО В.Ф.,
ПРОНИЧЕВ Д.В.,
ТРУНОВ М.Д.,
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВЛАСОВ А.К.,
ООО «ЭНЕРГОСЕРВИС»

**Оптические кабели связи могут прокладываться под землей, под водой, а также подвешиваться на опорах ЛЭП. При этом оптический кабель заключен внутри обязательного элемента ЛЭП – заземленного металлического грозозащитного троса.**

***Ключевые слова:*** грозозащитный трос, оптический кабель связи, цинковое покрытие, алюминиевое покрытие, стрела провеса, напряжения, температура, ток короткого замыкания, моделирование.

Начиная с 1980-х годов ОКГТ стал широко использоваться для линий телекоммуникационных передач



## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) широкое применение получил грозозащитный трос с оптическим кабелем (ОКГТ), представляющий собой трос из стальных проволок с различными покрытиями, с модулем из алюминиевого сплава или нержавеющей стали, в котором в полужидком гидрофобном геле располагаются оптические волокна (ОВ) [1, 2]. ОКГТ является продуктом двойного назначения, обеспечивая функции защиты линии электропередачи от ударов молнии и организации волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Требования к конструкции и свойствам ОКГТ определяются рядом европейских стандартов [1, 2], ГОСТ 52266-2004 [3] и стандартом организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-33.180.10.174-2014 [4].

По СТО 56947007-33.180.10.174-2014 элементы конструкции ОКГТ должны служить для защиты ОВ от внешних воздействующих факторов, таких как раздавливание, изгиб, кручение, растяжение, длительное и кратковременное термическое воздействие, влага, а также выдерживать эолову вибрацию и пляску. ОКГТ должны иметь силовые несущие элементы в виде металлических проволок, которые могут иметь круглое, трапецеидальное и зетобразное сечение (допускаются и иные профили сечения проволок по согласованию с ОАО «ФСК ЕЭС»). Силовые элементы ОКГТ должны быть изготовлены из одного из следующих материалов или их сочетания: стальной проволоки, плакированной алюминием; проволоки из алюминиевого сплава; проволоки стальной оцинкованной для особо жестких условий (ОЖ). В отличие от стандарта IEEE 1138-2009 [1], не рекомендующего для зон с высокой коррозионной агрессивностью сочетание трубок оптического модуля из нержавеющей стали с алюминиевыми проволоками или стальными проволоками, плакированными алюминием, СТО 56947007-33.180.10.174-2014 допускает любое сочетание стальных проволок, плакированных алюминием, проволок из алюминиевого сплава и содержащих ОВ элементов ОКГТ, изготовленных из алюминиевого сплава и нержавеющей стали. В то же время СТО 56947007-33.180.10.174-2014 без объяснения ограничил сочетание стальной оцинкованной проволоки с элементами ОКГТ, изготовленными из нержавеющей стали.

ОКГТ должны быть термически устойчивы к воздействию допустимого односекундного тока короткого замыкания (КЗ), возникающего в процессе эксплуатации ОКГТ при однофазных и двухфазных замыканиях на землю. Максимально допустимая температура нагрева ОКГТ при термическом воздействии тока КЗ не должна превышать 200 °С при начальной температуре термического воздействия не ниже 25 °С.

ОКГТ должны быть стойкими к воздействию повышенной и пониженной рабочих температур среды, величины которых определяются районом подвески кабеля и должны быть соответственно не ниже плюс 70 °С и не выше минус 60 °С.

В соответствии со стандартом «Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ОАО "Россети"» [5] на 01.09.2014 к применению на объектах ОАО «Россети» допущены только три вида ОКГТ: производства A.O. Prysmian Spain, S.A. (Испания), компания NKT Cables GmbH (Германия) и филиала «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ», входящего в состав ОАО «Северсталь–Метиз» (по СТО 71915393-ТУ 113-2013). Широкую номенклатуру волоконно-оптических кабелей, встроенных в грозозащитный трос для подвеса на опорах линий элек-

ИНФОРМАЦИЯ

### ГРОЗОЗАЩИТНЫЙ ТРОС С ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЕМ (ОКГТ)

Грозозащитный трос с оптическим кабелем (ОКГТ) (или, в терминологии IEEE, optical fiber composite overhead ground wire – OPGW) в настоящее время широко используется в высоковольтных и распределительных линиях электропередач.

Впервые ОКГТ был запатентован компанией British Insulated Callender's Cables в 1977 году, и начиная с 1980-х годов, стал широко использоваться в современной практике телекоммуникаций. Уже в 2000 году более 60 000 км ОКГТ было в эксплуатации во всем мире. Азия, и особенно Китай, стала крупнейшим рынком использования ОКГТ для линий телекоммуникационных передач.

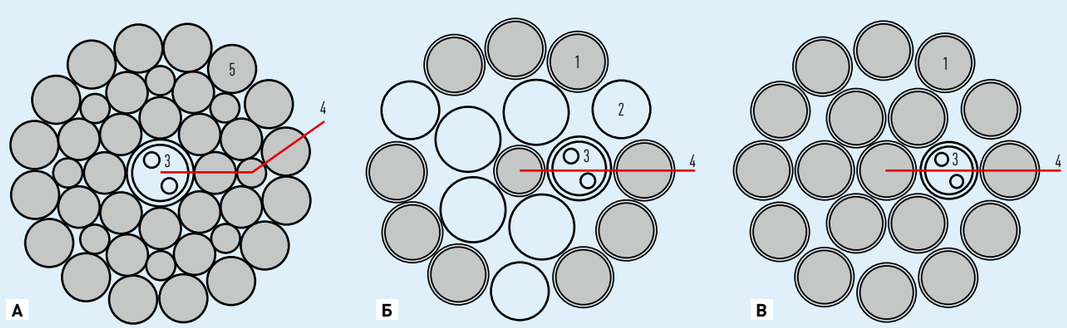
В России пионером в данной области является АО «Ростелеком», который ввел в эксплуатацию Транс-Сибирскую волокон-оптическую линию связи длинной более 4000 км, построенную по опорам ВЛ напряжением 220 кВ с использованием оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКГТ

| | Наименование | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ОКГТ ТУ 113-12,5 | ОКГТ-с-1-24-13,1/75 | ОКГТ-с-1-24-14/133 | ОКГТ-с-1-24-19,2/232 |
| Сечение Al, мм$^2$ | 0 | 54,092 | 36,3 | 66,94 |
| Сечение стали, мм$^2$ | 102,61 | 41,218 | 74,53 | 140,56 |
| R при 20 °С, Ом/км | 1,9 | 0,533 | 0,78 | 0,423 |
| Масса, кг/км | 860 | 0,78 | 752 | 1428 |
| Диаметр, мм | 12,5 | 13,1 | 14 | 19,2 |
| Разрывное усилие, кгс | 17535,5 | 7600,0 | 13331,79 | 23259,51 |
| Модуль, Е×10$^{-3}$ при 20 °С, daH/мм$^2$ | 18,0 | 11,024 | 15,5 | 15,5 |
| КЛТР при 20 °С α×10$^6$, град$^{-1}$ | 12,0 | 15,34 | 12,98 | 12,99 |

Таблица 1

## СХЕМЫ ОКГТ: (А) ОКГТ ТУ 113-12,5; (Б) ОКГТ-С-1-24-13,1/75; (В) ОКГТ-С-1-24-14/133 И ОКГТ-С-1-24-19,2/232:




1 – плакированная алюминием стальная проволока; 2 – алюминиевая проволока; 3 – оптический модуль; 4 – директория, распределение температуры вдоль которой показано на рис. 4; 5 – оцинкованная стальная проволока

Рис. 1



## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И СТРЕЛ ПРОВЕСА ПРИ ПОСТОЯННЫХ ЗНАЧЕНИЯХ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КЛТР

| Показатель | Единица | Значение |
|---|---|---|
| Низшая температура, $t_-$ | °С | -50 |
| Температура при гололеде, $t_г$ | °С | -5 |
| Температура, при которой рассчитывается расстояние от проводов до тросов и опор, для определения грозовых перенапряжений, $t_{гр}$ | °С | 15 |
| Среднегодовая температура эксплуатации, $t_э$ | °С | 0 |
| Максимальная температура эксплуатации, $t_{max}$ | °С | 50 |
| Ветровое давление, W | daH/мм$^2$ | 65 |
| Нормативная толщина стенки гололеда, $b_э$ | мм | 25 |
| Максимальный весовой пролет, $L_{вес}$ | м | 313,23 |

Таблица 2

тропередач марок ОКГТ-с (содержащих центральный силовой элемент из стальной или алюминиевой проволоки, вокруг которого скручены стальные и/или алюминиевые проволоки и оптические модули) и ОКГТ-ц (с сердечником в виде центрального оптического модуля), выпускает ООО «Саранскккабель–Оптика». Сравнение прочностных характеристик и стойкости к токам КЗ ОКГТ различных производителей в научно-технической литературе практически отсутствует.

Целью настоящей статьи является сравнительный расчет стрел провеса, механических напряжений и кинетики нагрева токами КЗ четырех марок ОКГТ производства филиала «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ» и ООО «Саранскккабель–Оптика».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении стандартных расчетов стрел провеса проводов и грозотросов на ВЛ принято использовать постоянные значения модуля упругости Е и коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) при температуре 20 °С. Данное допущение приблизительно справедливо до температур 70–90 °С, но с ростом температуры значения модуля Е падают, а значения КЛТР растут. Разница значений при температурах, близких к 200 °С, может достигать 20–30%, что необходимо учитывать при расчетах стрел провеса высокотемпературных проводов и грозозащитных тросов при нагреве токами КЗ.

Существенное влияние на суммарные значения величин модуля Е и КЛТР оказывает неоднородность конструкции проводов и грозозащитных тросов, в которых токопроводящая часть выполнена из алюминия, а силовая – из стали. В этом случае необходимо использовать эффективные значения модуля Е и КЛТР, определенные из условия равенства относительных удлинений стальной и алюминиевой частей, а также провода в целом по известным из литературы формулам пересчета.

Проведем сравнительный расчет стрел провеса и механических напряжений для ВЛ 220 кВ ПС «Литейная» – ПС «Петров Вал» ОКГТ четырех типоразмеров производства филиала «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ» (ОКГТ-12,5 СТО 71915393-ТУ 113-2013) и ООО «Саранскка-бель–Оптика» (ОКГТ-с-1-24-13,1/75; ОКГТ-с-1-24-14/133; ОКГТ-с-1-24-19,2/232; ТУ 3587-006-51154035-2005) при разных соотношениях алюминия и стали (табл. 1). ОКГТ ТУ 113-12,5 свивается из оцинкованной стальной проволоки, ОКГТ-с-1-24-13,1/75 – из плакированной алюминием стальной проволоки с добавкой алюминиевых проволок для повышения допустимой величины тока КЗ; ОКГТ-с-1-24-14/133 и ОКГТ-с-1-24-19,2/232 – из плакированной алюминием стальной проволоки. Схемы конструкций моделируемых ОКГТ приведены на рис. 1.

Количество алюминия в ОКГТ-с производства ООО «Саранскккабель–Оптика» определено исходя из известной величины среднего значения удельного электрического сопротивления алюминия, равного 0,0283 Ом×мм$^2$/м. Значения максимально допустимой растягивающей

## РЕЖИМЫ С РАЗЛИЧНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕНИЙ И СТРЕЛ ПРОВЕСА

| Номер режима | Температура, °С | Скоростной напор | Толщина стенки гололеда, мм | Удельная нагрузка, [6] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | –5,0 | 0,25 W | 25 | $\gamma_7$ |
| 2 | –5,0 | 0 | 25 | $\gamma_3$ |
| 3 | –5,0 | W | 0 | $\gamma_6$ |
| 4 | 0 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 5 | 15 | 0,06 W | 0 | $\gamma_9$ |
| 6 | –50 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 7 | 50 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 8 | 70 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 9 | 90 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 10 | 150 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |
| 11 | 180 | 0 | 0 | $\gamma_1$ |

Таблица 3

нагрузки (МДРН) и средней эксплуатационной нагрузки (СЭН) для этих изделий согласно ТУ 3587-006-51154035-2005 составили соответственно 60% и 30% от механической прочности на разрыв (МПР). Для изделия ОКГТ ТУ 113-12,5 МДРН взято 60% от МПР, а СЭН – 40% от МПР, что соответствует СТО 71915393-ТУ 113-2013.

Первый расчет выполняли при постоянных значениях модуля Е и КЛТР без учета влияния температуры. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Использованные значения климатических нагрузок и варьируемых температур нагрева ОКГТ при токе КЗ для расчетов изменения напряжений и стрел провеса при заданном максимальном весовом пролете $L_{вес}$ приведены в табл. 3. Результаты расчета изменения механических напряжений и стрел провеса при различных режимах показаны на рис. 2.

Второй вариант расчета проводили с учетом изменения значений модуля Е и КЛТР в зависимости от температуры по данным В.Е. Зиновьева [7] и Справочника по электротехническим материалам [8]. Результаты расчета изменения напряжений и стрел провеса при различных режимах с учетом изменения значений модуля Е и КЛТР показаны на рис. 3.

Сравнительный анализ кривых рис. 2 и 3 показывает, что изменения модуля Е и КЛТР довольно существенно влияют на значения стрел провеса, начиная уже с +50 °С. Особенно заметно увеличиваются значения стрел провеса при повышении относительного содержания алюминия в конструкции сравниваемых изделий. Алюминий, как известно, используют для увеличения проводимости и стойкости к токам КЗ, но при этом необходимо учитывать существенное увеличение стрел провеса таких изделий не только в рабочих режимах, но и при значениях токов КЗ, близких к предельным. Так, например, для ОКГТ-с-1-24-19,2/232 значение стрелы провеса при температуре 180 °С (режим 11) оказалось значительно выше, чем при воздействии максимальной толщины гололеда вместе с ветром (режим 1). Данное превышение составило величину более 2 м, что может привести к недопустимому уменьшению расстояния между ОКГТ и токоведущими проводами ВЛ, создавая предпосылки для аварийной ситуации.

Анализ термической стойкости ОКГТ при прохождении тока КЗ проводили с использованием модулей Magnetic Fields и Heat Transfer in Solids лицензионного пакета программ COMSOL Multiphysics по методике, описанной в статье Л.М. Гуревича, В.Ф. Даненко, Д.В. Проничева, М.Д. Трунова [9] и верифицированной по экспериментальным данным натурных испытаний ОКГТ в Испытательном центре высоковольтной аппаратуры ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».



## РАСЧЕТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ σ (ПУНКТИР) И СТРЕЛЫ ПРОВЕСА f (СПЛОШНЫЕ) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

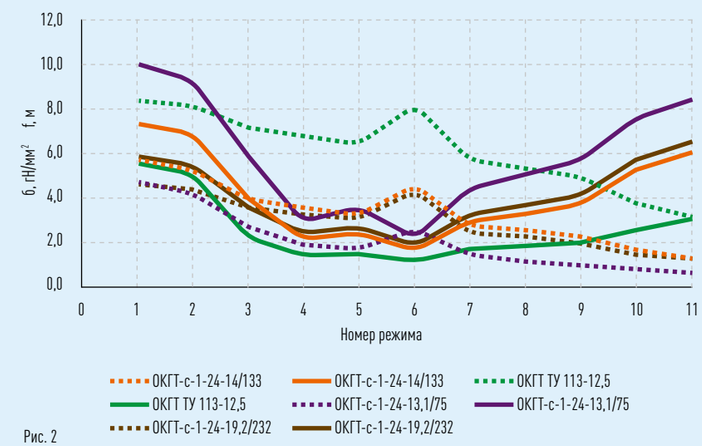



Рис. 2

## РАСЧЕТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ σ (ПУНКТИР) И СТРЕЛЫ ПРОВЕСА f (СПЛОШНЫЕ) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ МОДУЛЯ Е И КЛТР

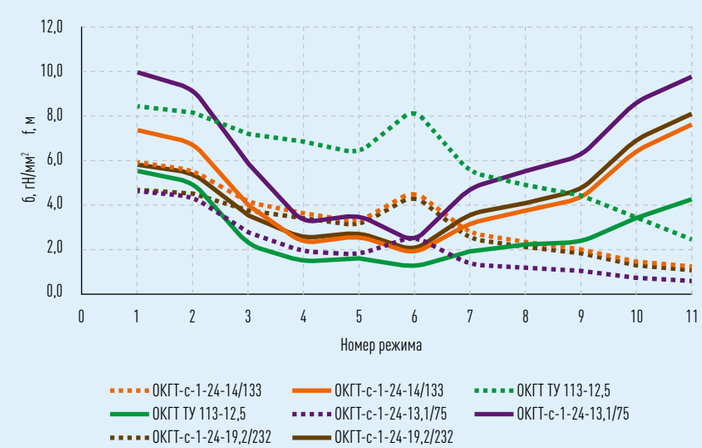



Рис. 3

ИНФОРМАЦИЯ

## ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ОКГТ

**(ИЗ СТО 56947007-33.180.10.174-2014 )**

4.2.1. ОКГТ должны соответствовать общим требованиям к конструкции оптического кабеля, приведенным в ГОСТ Р 52266...

4.2.2. ОКГТ должны иметь силовые несущие элементы в виде металлических проволок, которые могут иметь круглое, трапецеидальное и Z-образное сечение. Проволоки должны быть преформированы и при обрыве не выходить из повива более чем на 1–2 шага скрутки.

4.2.3. Силовые элементы ОКГТ должны быть однородного качества и изготовлены из одного из следующих материалов или их сочетания:
- проволока стальная, плакированная алюминием;
- проволока из алюминиевого сплава;
- проволока стальная оцинкованная для особо жестких условий (ОЖ).

Допускается любое сочетание проволок стальных плакированных алюминием, проволок из алюминиевого сплава.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДОЛЬ ЛИНИИ, ПРОХОДЯЩЕЙ ЧЕРЕЗ ЦЕНТРЫ ПРОВОЛОК ОКГТ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТОКА КЗ: (А) ОКГТ ТУ 113-12,5; (Б) ОКГТ-С-1-24-13,1/75; (В) ОКГТ-С-1-24-14/133; (Г) ОКГТ-С-1-24-19,2/232

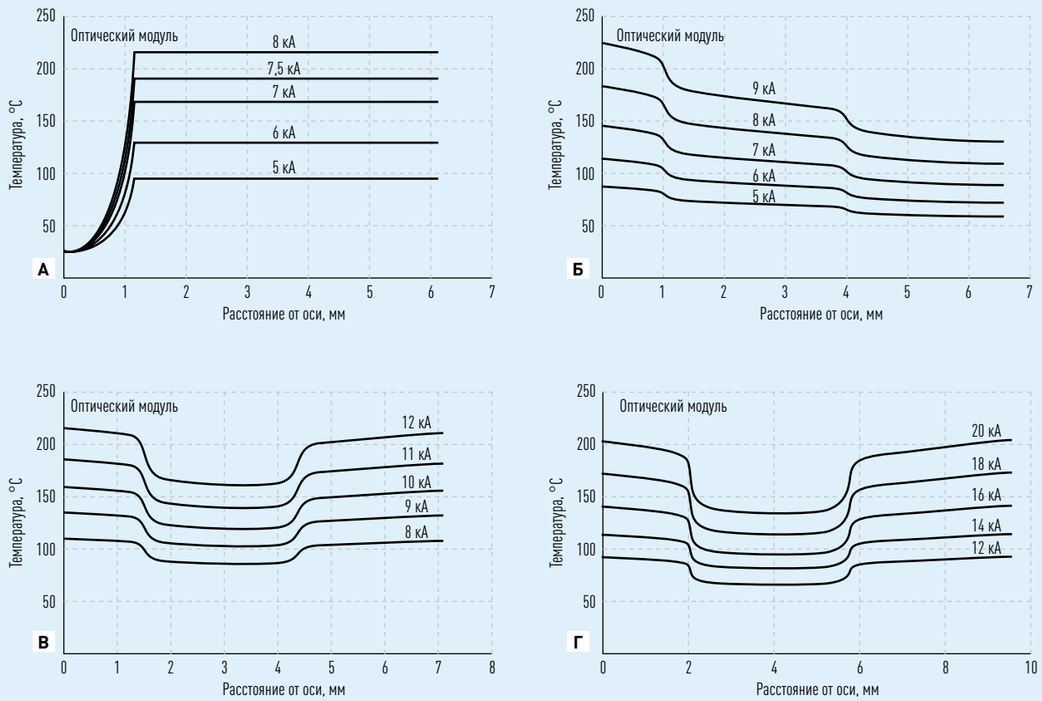



Рис. 4

При анализе термической стойкости ОКГТ проводили расчеты:

– нестационарного магнитного поля, вызванного импульсом переменного тока частотой 50 Гц, с целью получения распределения плотности тока в каждом из проводников троса в зависимости от времени;
– нестационарного температурного поля, использующего в качестве источника теплоты джоулевы потери.

В связи с тем что дифференциал температур вдоль оси ОКГТ невелик, то теплопередачей вдоль оси пренебрегали и использовали плоскую схему моделирования.

Расчет температурного поля проводили при времени протекания тока КЗ 1 с. Величину тока КЗ варьировали вплоть до достижения на внешней поверхности оптического модуля температур, превышающих 200 °С, способных изменить значения оптических характеристик ВОЛС. В связи с тем что центры проволок в ОКГТ ТУ 113-12,5 не лежат на одной прямой, распределение температуры (рис. 4) приведено вдоль директорий, показанных на рис. 1.

Результаты моделирования показали, что использование в конструкции грозозащитных тросов ОКГТ ТУ 113-12,5 проволок с хорошо освоенным отечественной промышленностью цинковым покрытием обеспечивает при прохождении токов КЗ 7,5 кА в течение 1 с безопасные значения температуры на поверхности оптического модуля, не приводящие к изменению оптических характеристик ОВ.

Наличие алюминиевых проволок и покрытие стальных проволок алюминием в ОКГТ-с-1-24-13,1/75 позволяет при меньшей погонной массе увеличить максимальный ток КЗ до ≈ 9 кА. Грозозащитные тросы производства ООО «Саранскабель-Оптика» ОКГТ-с-1-24-14/133 и ОКГТ-с-1-24-19,2/232, в конструкции которых используется стальная проволока с объемным содержанием алюминиевого покрытия до 25%, выдерживают токи КЗ соответственно до ≈ 12 и 20 кА. Однако, как показали проводимые на кафедре ТВН МЭИ аттестационные испытания на стойкость к разрядам молнии грозозащитных тросов, имеющих в конструкции стальную проволоку, плакированную алюминием, или проволоку из алюминиевого сплава для обеспечения требований по термической стойкости к токам КЗ [10], образцы ОКГТ после испытаний находились в неудовлетворительном состоянии: имели глубокие оплавления покрытий и обрывы проволок из алюминиевого сплава при разрядах молнии значительно меньших, чем для стальных проволок.

## ВЫВОДЫ

В статье проведен сравнительный расчет стрел провесов и механических напряжений четырех марок ОКГТ производства филиала «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ» и ООО «Саранскабель–Оптика» на примере ВЛ 220 кВ ПС «Литейная» – ПС «Петров Вал» для различных значений климатических нагрузок и варьируемых температур нагрева ОКГТ при токе КЗ. Минимальная стрела провеса при принятых режимах наблюдалась у ОКГТ производства филиала «Волгоградский» АО «Редаелли ССМ». Расчет с учетом изменений величины модуля Юнга и КЛТР с ростом температуры приводит к существенному увеличению получаемых значений стрел провеса изделий при токах КЗ, близких к предельным, создающим предпосылки для аварийной ситуации.

Использование алюминиевых проволок и стальных проволок с алюминиевым покрытием в конструкции ОКГТ-с производства ООО «Саранскабель–Оптика» позволяет несколько увеличить максимально допустимый ток КЗ при одновременном снижении, по данным аттестационных испытаний, стойкости грозозащитных тросов к разрядам молнии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE 1138-2009. IEEE Standard for Testing and Performance for Optical Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines.
2. МЭК 60794-4-2003: Кабели волоконно-оптические. Ч. 4: Оптические кабели для применения на воздушных линиях электропередачи. (IEC 60794-4-2003. Optical fiber cables. Part 4: Sectional specification - Aerial optical cables along electrical power lines).
3. ГОСТ Р 52266-2004: Кабельные изделия. Кабели оптические. Общие технические условия. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11.11.2004 № 70-ст.
4. СТО 56947007-33.180.10.174-2014: Оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос, натяжные и поддерживающие зажимы, муфты для организации ВОЛС-ВЛ на линиях электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Общие технические условия. Утвержден и введен в действие приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 21.05.2014 № 237.
5. Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ОАО «Россети»: http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/092014_razdel1.PervObor.pdf
6. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 2. М.: Энергия, 2005.
7. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.
8. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. М.: Энергия, 1976.
9. 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.
10. Механошин Б.И., Богданова О.И., Гилязов М.З., Матвеев Д.А. Комплексный подход к обеспечению грозоупорности ВЛ / Сб. материалов III Российской конференции по молниезащите. СПб., 22–23 мая 2012 г. http://lightningprotection.ru/wp-content/uploads/Конференция-22-23-мая-2012.pdf

ИНФОРМАЦИЯ

### ИЗ СТО 56947007-33.180.10.174-2014

Волоконно-оптическая линия связи на воздушных линиях электропередачи – линия связи для передачи информации с использованием размещаемого на ВЛ оптического кабеля, как отдельно подвешенного или навиваемого на провод ВЛ, так и встроенного в грозозащитный трос или фазный провод.