

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА С ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЕМ СВЯЗИ

АВТОРЫ:

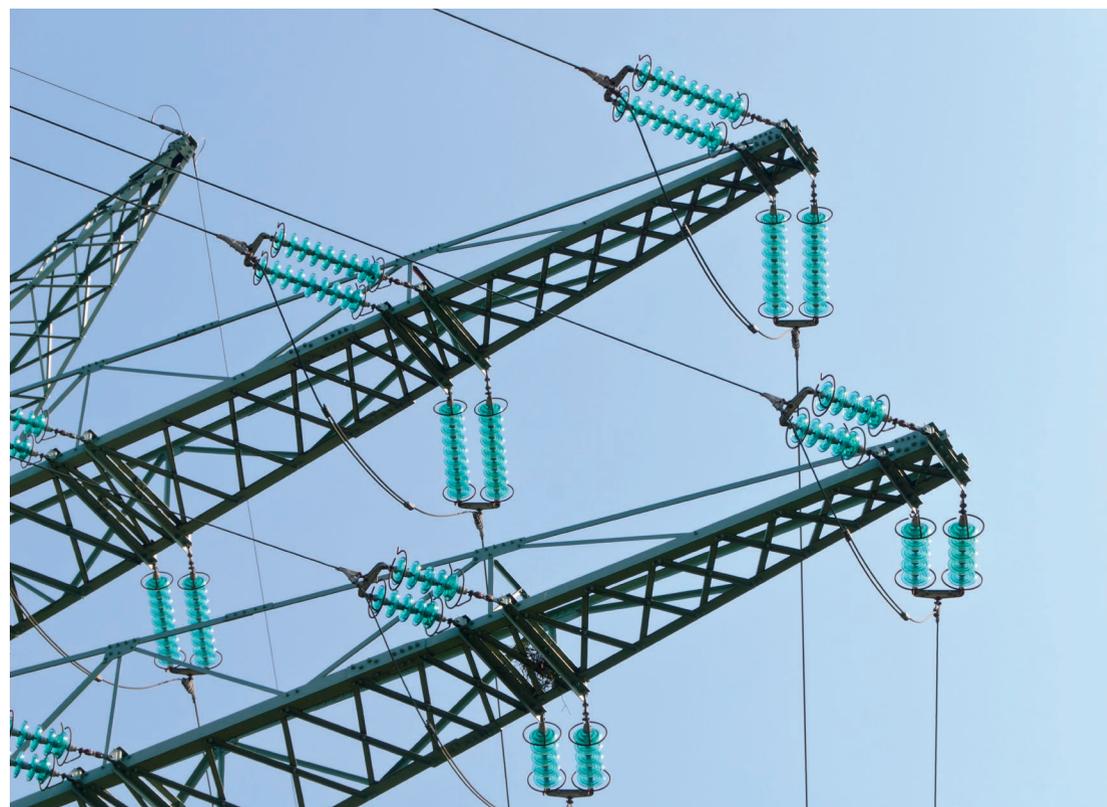
ГУРЕВИЧ Л.М.,
ДАНЕНКО В.Ф.,
ПРОНИЧЕВ Д.В.,
ТРУНОВ М.Д.,
ВОЛГОГРАДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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 эоловую 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 проводков 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 рекомендуемого 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.

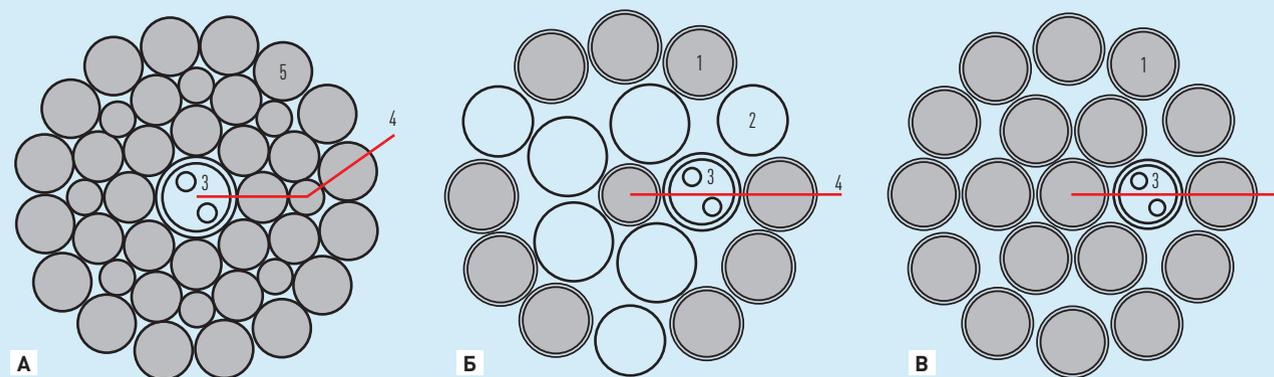
В России пионером в данной области является АО «Ростелеком», который ввел в эксплуатацию Транс-Сибирскую волоконно-оптическую линию связи длиной более 4000 км, построенную по опорам ВЛ напряжением 220 кВ с использованием оптического кабеля, встроенного в грозозащитный трос.

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, $E \times 10^{-3}$ при 20 °С, даН/мм ²	18,0	11,024	15,5	15,5
КЛТР при 20 °С $\alpha \times 10^6$, 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, $t_{\text{н}}$	°С	-50
Температура при гололеде, $t_{\text{г}}$	°С	-5
Температура, при которой рассчитывается расстояние от проводов до тросов и опор, для определения грозозащитных, $t_{\text{гр}}$	°С	15
Среднегодовая температура эксплуатации, $t_{\text{с}}$	°С	0
Максимальная температура эксплуатации, t_{max}	°С	50
Ветровое давление, W	даН/мм ²	65
Нормативная толщина стенки гололеда, $b_{\text{г}}$	мм	25
Максимальный весовой пролет, $L_{\text{вес}}$	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 «Саранскабель-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 «Саранскабель-Оптика».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении стандартных расчетов стрел провеса проводов и грозотросов на ВЛ принято исполь-

зовать постоянные значения модуля упругости E 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 E 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 E 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 E 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 «Саранскабель-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 «Саранскабель-Оптика» определено исходя из известной величины среднего значения удельного электрического сопротивления алюминия, равного 0,0283 Ом·мм²/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	Y_7
2	-5,0	0	25	Y_3
3	-5,0	W	0	Y_6
4	0	0	0	Y_1
5	15	0,06 W	0	Y_9
6	-50	0	0	Y_1
7	50	0	0	Y_1
8	70	0	0	Y_1
9	90	0	0	Y_1
10	150	0	0	Y_1
11	180	0	0	Y_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 натуральных испытаний ОКГТ в Испытательном центре высоковольтной аппаратуры ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

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...

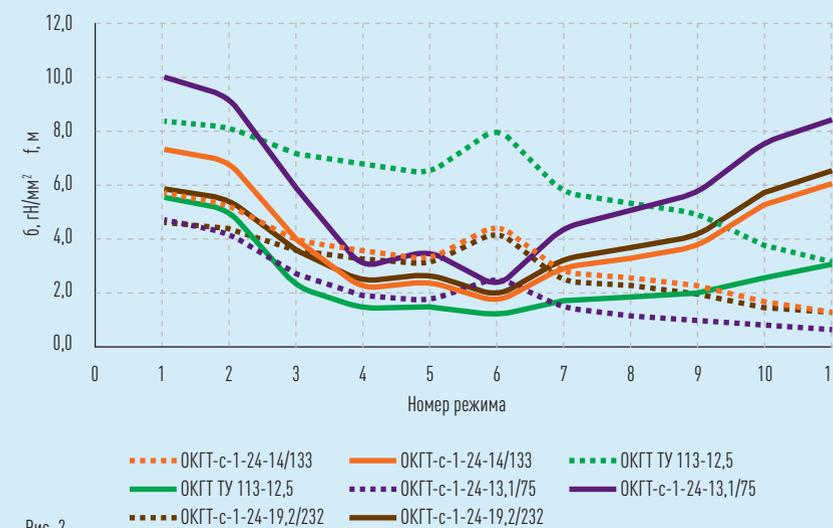
4.2.2. ОКГТ должны иметь силовые несущие элементы в виде металлических проволок, которые могут иметь круглое, трапециевидное и Z-образное сечение. Проволоки должны быть преформированы и при обрыве не выходить из повива более чем на 1–2 шага скрутки.

4.2.3. Силовые элементы ОКГТ должны быть однородного качества и изготовлены из одного из следующих материалов или их сочетания:

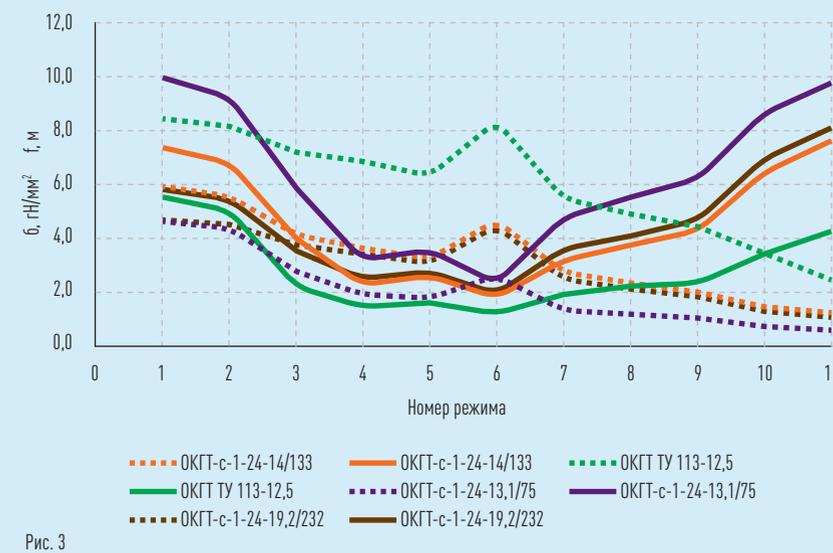
- проволока стальная, плакированная алюминием;
- проволока из алюминиевого сплава;
- проволока стальная оцинкованная для особо жестких условий (ОЖ).

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

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



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



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

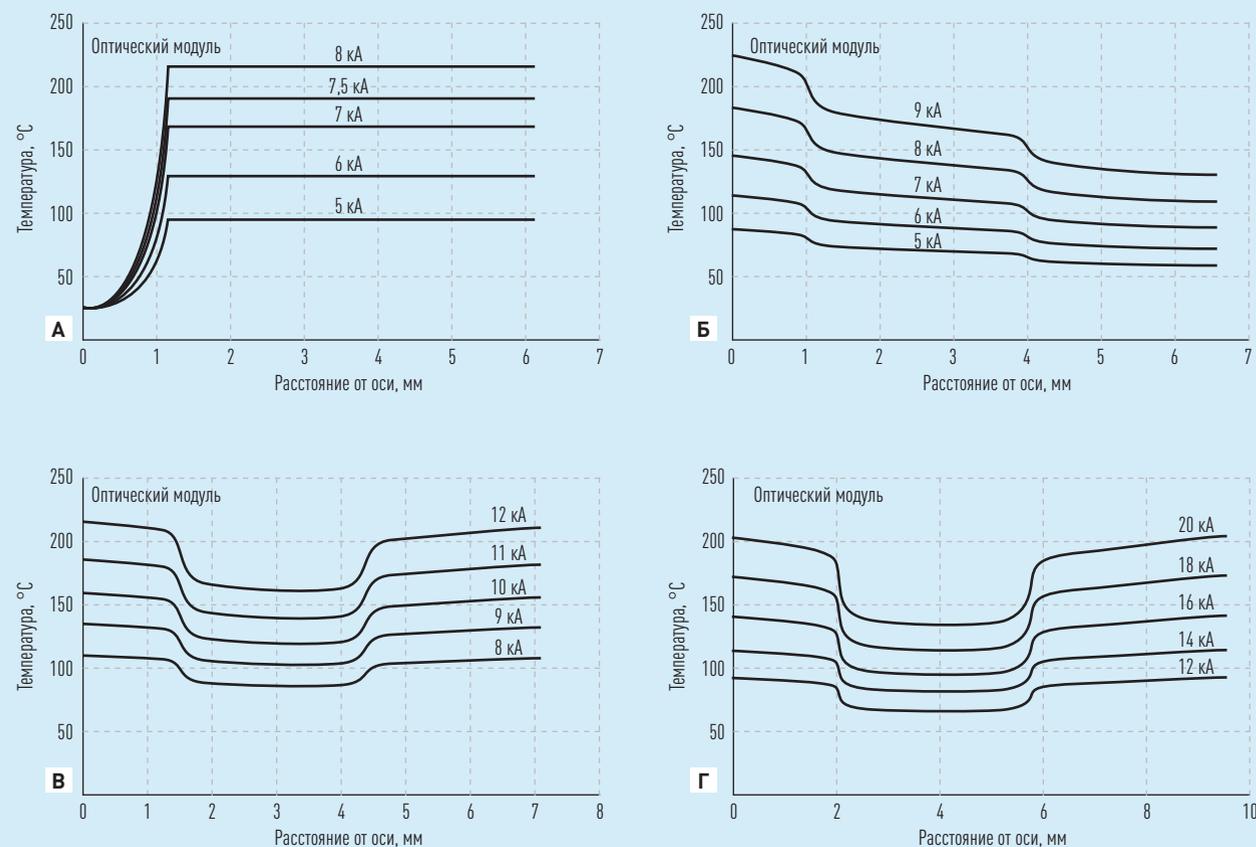


Рис. 4

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

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 навешиваемого на провод ВЛ, так и встроенного в грозозащитный трос или фазный провод.

6. объектах ОАО «Россети»: http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/092014_razdel1.PervObor.pdf
 7. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 2. М.: Энергия, 2005.
 8. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.
 9. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. М.: Энергия, 1976.
 10. 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.
- Механюшин 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>