

ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.315.1:519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-52-56

В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, А. Е. Кобышев

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ПРОВОЛОК В СЛОЯХ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА НА ПЛОТНОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ СМЕЖНЫХ СЛОЕВ ПОСЛЕ СВИВКИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: omd@vstu.ru, leongur@mail.ru, koby01@mail.ru

В работе приведены расчетные формулы для определения средних радиусов слоев после свивки двух-слойного грозозащитного троса с линейным касанием проволок между слоями при различном соотношении диаметров проволок δ_1/δ_2 .

Показано, что плотность свивки зависит от соотношения диаметров проволок δ_1/δ_2 . Для троса конструкции $3,0+9 \times 1,68+9 \times 3,0$ ($\delta_1/\delta_2=0,56$) выполняется условие плотной свивки элементов троса. При свивке троса конструкции $3,0+9 \times 1,6+9 \times 3,0$ ($\delta_1/\delta_2=0,533$) между слоями троса образуется радиальный зазор, величина которого превышает допуск на диаметр проволоки.

Ключевые слова: грозозащитный трос, оптический кабель, проволока, слой, диаметр, радиус, зазор, плотная свивка

V. F. Danenko, L. M. Gurevich, A. E. Kobyshev

THE INFLUENCE OF THE RATIO OF THE WIRE DIAMETERS IN THE LAYERS OF THE LIGHTNING PROTECTION CABLE ON THE DENSITY OF THE POSITION OF ADJACENT LAYERS AFTER WINDING

Volgograd State Technical University

The paper presents calculation formulas for determining the average radii of the layers after twisting a two-layer lightning protection cable with a linear tangle of wires between the layers with a different ratio of wire diameters δ_1/δ_2 .

It is shown that the density of the twisting depends on the ratio of wire diameters δ_1/δ_2 . For cable construction $3,0+9 \times 1,68+9 \times 3,0$ ($\delta_1/\delta_2=0,56$) the condition of tight coiling of the cable elements is fulfilled. When twisting the construction cable $3,0+9 \times 1,6+9 \times 3,0$ ($\delta_1/\delta_2=0,533$) a radial gap is formed between the cable layers, the value of which exceeds the tolerance for the wire diameter.

Keywords: lightning protection cable, optical cable, wire, layer, diameter, radius, gap, dense bundle

Грозозащитный трос со встроенным оптическим кабелем (ОКГТ) представляет собой трос из нескольких слоев стальных проволок и трубчатый корпус из алюминия или нержавеющей стали (центральный или в повиве), заполненный гидрофобным гелем и оптическими волокнами (ОВ) [1–3]. ОКГТ обеспечивает защиту линий электропередачи от ударов молнии и позволяет организовать волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) на линиях электропередачи.

Согласно [1], до 80 % всех оптических кабелей (ОК), совмещенных с воздушными ли-

ниями (ВЛ), монтируется путем встраивания оптического кабеля в грозозащитный трос. При этом ОВ располагают внутри центральной трубки. Особенностью конструкции пластически деформированного ОКГТ с центральным оптическим кабелем является выполнение всех повивов с одинаковым шагом свивки в одном направлении с линейным касанием проволок соседних слоев [4–6].

При круговом радиальном обжати ОКГТ слои проволок уплотняются за счет заполнения зазоров между линейно-контактирующими первоначально круглыми проволоками, деформа-

ция проволок происходит практически без уменьшения площади поперечного сечения. Переход к удлинению проволок, вызывающему уменьшение их продольной жесткости [7], происходит при уровне заполнения зазоров 70–75 % [8]. Важной характеристикой ОК является его стойкость к раздавливающим нагрузкам, вызывающим приращение затухания ОВ [9].

Большое значение для обеспечения требуемой структурной плотности двухслойного грозозащитного троса имеет рациональный выбор диаметра проволок в каждом слое. Диаметр проволок рассчитывают из условия отсутствия в слое излишних зазоров и защемления проволок при свивке. Для наружного слоя целесообразно использовать проволоки диаметром не менее 2,5 мм [3], в связи с частым действием разрядов молний. Соотношение диаметров проволок наружного и внутреннего слоев отражается на процессе формообразования проволок и условиях передачи радиального давления внутрь троса при круговом обжатии [10–12]. Неравномерность проработки поперечного сечения по слоям вызывает неоднородность напряженного состояния проволок в поперечном сечении троса [8].

Цель работы – определение расчетным методом влияния соотношения диаметров проволок наружного и внутреннего слоя ОКГТ конструкции 1+9+9 на плотность взаимного расположения смежных слоев проволок троса после свивки.

Методика исследования

Одним из условий, определяющих высокое качество стальных тросов, является плотная

свивка проволок между отдельными слоями [13]. Для плотной свивки троса необходимо соблюдение определенного соотношения между диаметрами проволок первого δ_1 и второго δ_2 слоев. При кратности свивки $K_t=8,0$ для троса конструкции 1+9+9 рекомендуется выполнение принятого в заводской практике соотношения $\delta_1/\delta_2=0,5644$ [14]. Проволоки наружного слоя должны вписываться в окружность диаметром d_n .

Расчеты средних радиусов слоев троса проводили для двух типов конструкции: 3,0+9×1,68+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,56$; вариант 1) и 3,0+9×1,6+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,533$; вариант 2) при кратности свивки $K_t=8,0$, числе проволок в слое $n=9$ и углах свивки $\alpha_1=9,23^\circ$ и $\alpha_2=16,45^\circ$ [14]. При равенстве значений диаметра сердечника $\delta_c=3,0$ мм и проволок второго слоя $\delta_2=3,0$ мм, диаметр проволок первого слоя принимали $\delta_1=1,68$ мм (вариант 1), с учетом допускаемого отклонения по диаметру +0,08 мм (ГОСТ 7372–79), и $\delta_1=1,6$ мм (вариант 2).

Средние радиусы слоев троса конструкции 1+9+9 определяли из предложенной Д. Г. Житковым схемы поперечного сечения двух смежных слоев проволок, находящихся в линейном контакте (рис. 1). Нормальное сечение проволок слоев троса, свитых под углами α_1 и α_2 , для упрощения принимали в виде эллипса. При этом малая ось эллипса равна диаметру проволоки $a=\delta$, а большая – $b=\delta/\cos\alpha$. Следует отметить, что увеличение большой оси эллипса по отношению к малой не превышает 3 %, поэтому погрешности в расчетах параметров троса, в случае принятия поперечного сечения проволок за круг, получаются незначительными и ими часто пренебрегают.

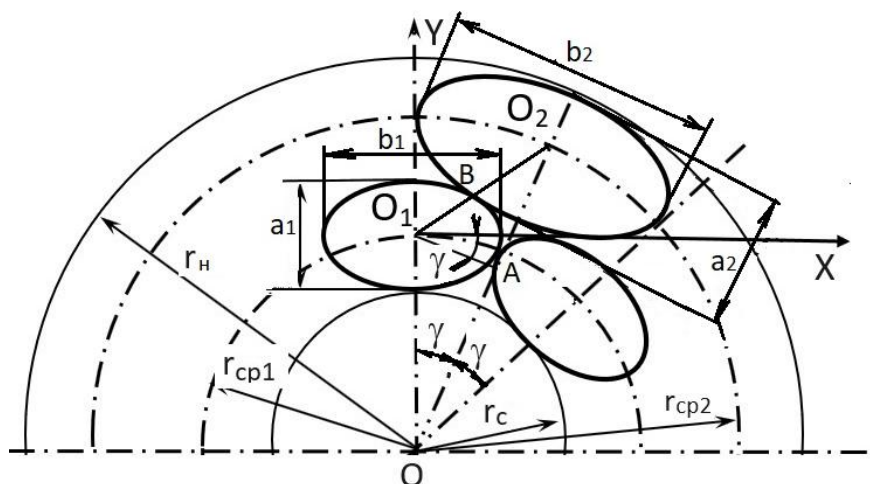


Рис. 1. Расчетная схема к определению средних радиусов слоев троса конструкции 1+9+9

Полярный радиус эллипсов ρ первого слоя троса (отрезок O_1A на рис. 1), в зависимости от угла свивки α и диаметра проволок δ слоя, определяли по уравнению [14]

$$\rho = \frac{\delta}{2\cos\gamma\sqrt{\cos^2\alpha + \tan^2\gamma}} \quad (1)$$

Средний радиус первого слоя троса

$$r_{cp1} = \rho / \sin\gamma, \quad (2)$$

где центральный угол $\gamma = 180^\circ/n$.

При определении среднего радиуса второго слоя принимали, что точка соприкосновения

двух проволок соседних слоев троса при линейном касании (точка B) лежит на линии O_1O_2 , соединяющей центры их сечений, при условии $O_1B=r_1$ и $O_2B=r_2$. Такое допущение не дает значительной погрешности при расчете.

Из прямоугольного треугольника O_1O_2A средний радиус слоя 2

$$r_{cp2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - \rho^2} \quad (3)$$

Наружный диаметр троса определяли по уравнению $d_n = 2(r_{cp2} + r_2)$.

Расчетные значения средних радиусов слоев троса приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры троса конструкции 1+9+9

Конструкция троса	Диаметр проволок, δ , мм		Соотношение диаметров проволок, δ_1/δ_2	Угол свивки α , град.		Значения средних радиусов слоев r_{cp} , полученные расчетом			
	слой 1	слой 2		слой 1	слой 2	по уравнениям (1–3)		по уравнению (4)	
						$r_{cp,1}$, мм	$r_{cp,2}$, мм	$r_{cp,1}$, мм	$r_{cp,2}$, мм
3,0+9×1,68+9×3,0	1,68	3,0	0,56	9,23	16,45	2,484	4,552	2,484	4,552
3,0+9×1,6+9×3,0	1,6		0,533			2,366	4,412	2,366	

Средние радиусы слоев троса r_{cp} определяли также по предложенному П. П. Нестеровым варианту расчета, полученному из условия плотного касания проволок в слоях и между слоями [13]

$$r_{cp} = \frac{\delta}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{ctg}\pi/n}{\cos\alpha} \right)^2} \quad (4)$$

Формула (4) также выведена на основании допущения, что поперечное сечение свитой проволоки в плоскости нормальной к оси троса имеет вид эллипса. Расчеты по уравнениям (1–3) и (4) дают одинаковые значения среднего радиуса слоев r_{cp} для обоих вариантов конструкции троса, за исключением среднего радиуса

второго слоя $r_{cp2} = 4,412$ мм троса конструкции 3,0+9×1,6+9×3,0 (табл. 1).

При использовании приведенных выше формул подразумевалось, что параметры свивки слоев троса связаны условием плотного касания проволок. Для проверки влияния соотношения диаметра проволок δ_1/δ_2 на величину зазора между проволоками Δ_τ определяли значение суммарного зазора $\Sigma\Delta_\tau$ в слоях троса в тангенциальном направлении по уравнению

$$\Sigma\Delta_\tau = 2\pi \cdot r_{cp} - \frac{n\delta}{\cos\alpha} \quad (5)$$

Расчетные значения зазоров Δ_τ , полученные при определении средних радиусов слоя r_{cp} троса по уравнению (4), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зазоры между проволоками в слоях троса

Конструкция троса	Большая ось эллипса $b=\delta/\cos\alpha$, мм		Суммарный зазор между проволоками в слоях троса $\Sigma\Delta_\tau$, мм		Зазор между проволоками в слоях троса, Δ_τ , мм	
	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2
3,0+9×1,68+9×3,0	1,702	3,128	0,282	0,435	0,031	0,048
3,0+9×1,6+9×3,0	1,621		0,271		0,030	

Анализ данных табл. 2 говорит о достаточно плотной свивке проволок в тангенциальном направлении. Величина зазоров между проволоками слоя 1 ($\Delta_\tau=0,031$ и $0,030$ мм) и слоя 2

($\Delta_\tau=0,048$ мм) не превышает верхнее предельное отклонение диаметров проволоки (ГОСТ 7372–79). Отрицательное значение зазора между проволоками слоя 2 троса конструкции

3,0+9×1,6+9×3,0 ($\Delta\tau=-0,049$ мм), полученное при расчете r_{cp} по уравнению (3), говорит о переполнении слоя, что связывается с отклонением соотношения диаметров проволок δ_1/δ_2 от стандартного ($\delta_1/\delta_2=0,533 < \delta_1/\delta_2=0,5644$).

При равенстве значений среднего радиуса $r_{cp2} = 4,552$ мм исследуемых конструкций троса и плотном касании проволок смежных слоев троса конструкции 3,0+9×1,68+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,56$), зазор между смежными слоями троса конструкции 3,0+9×1,6+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,533$) после свивки

равен разности значений средних радиусов r_{cp1} внутреннего слоя $\Delta=2,484-2,366=0,118$ мм, определенных по уравнению (3) (см. табл. 1). Величина зазора превышает допускаемые отклонения по диаметру проволок (ГОСТ 7372-79).

Моделирование процесса свивки исследуемых тросов с различным соотношением диаметров проволок δ_1/δ_2 показало, что до начала пластической деформации плотная укладка элементов достигается для троса конструкции 3,0+9×1,68+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,56$) (рис. 2, а).

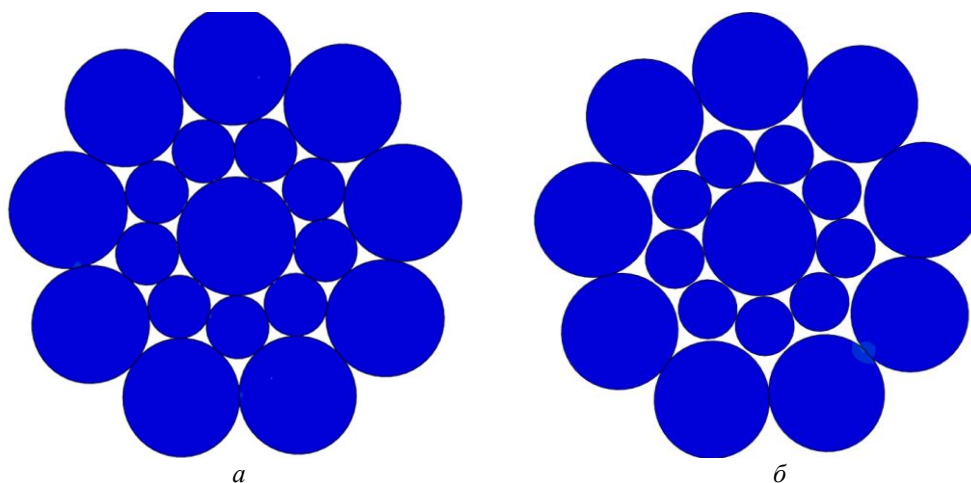


Рис. 2. Поперечное сечение троса конструкции 1+9+9 до кругового обжатия:
а – 3,0+9×1,68+9×3,0; б – 3,0+9×1,6+9×3,0

В поперечном сечении троса конструкции 3,0+9×1,6+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,533$) между проволоками наружного и внутреннего слоя образуется зазор величиной $\Delta=0,088$ мм (рис. 2, б), что согласуется с приведенными выше результатами расчета.

Наличие исходного зазора между слоями троса оказывает влияние на величину передаваемого вглубь троса радиального давления и степень деформации поверхности сердечника при круговом обжатии троса.

Выводы

В работе определены средние радиусы слоев грозозащитного троса конструкции 1+9+9 с различным соотношением диаметров проволок δ_1/δ_2 .

Расчетные формулы выведены с допущениями, что в плоскости, нормальной к оси троса, свитые проволоки имеют поперечное сечение в виде эллипса, а точки соприкосновения двух проволок смежных слоев троса лежат на линии, соединяющей центры их сечения.

Показано, что плотность свивки элементов троса зависит от соотношения диаметров

проволок δ_1/δ_2 . Для троса конструкции 3,0+9×1,68+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,56$) выполняется условие плотной свивки элементов троса. При свивке троса конструкции 3,0+9×1,6+9×3,0 ($\delta_1/\delta_2=0,533$) между проволоками смежных слоев образуется зазор $\Delta=0,118$ мм, величина которого превышает допуск на диаметр проволоки. Нарушение плотности положения смежных слоев троса подтверждается результатами моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боксимер, М. Э. Преимущества оптического кабеля ОКГТ / М. Э. Боксимер // Электротехнический рынок. – 2007. – № 7–8. – С. 11–13.
2. Ивановский, Д. А. Применение оптического кабеля, встроенного в грозотрос, для передачи информации между элементами энергосистемы / Д. А. Ивановский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 33–35.
3. Дубицкий, С. Д. Грозозащитный трос с оптическим волокном. Термическая стойкость к прямому удару молнии / С. Д. Дубицкий, Н. В. Коровкин, Е. Бабков // Новости электротехники. – 2011. – № 4 <http://www.news.elteh.ru/arh/2011/70/07.php>.
4. Пат. 2441293 С1 РФ, МПК H01B 11/22. Грозозащитный трос с оптическим кабелем связи / Власов А. К., Фокин В. А., Петрович В. В., Фролов В. И.; заявлено 03.11.2010, опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3.

5. П. м. 161760 РФ, МПК H01B 11/22, G02B 6/44 Молниезащитный трос с оптическим кабелем связи / Власов А. К., Фокин В. А., Фролов В. И. ; заявлено 08.09.2015, опубл. 10.05.2016, Бюл. № 13.

6. Пат. 2784837 С1 РФ, СПК H01B 11/22. Грозозащитный трос со встроенным волокну-оптическим кабелем связи (варианты) / Кулеш С. В. ; заявлено 27.12.2021, опубл. 30.11.2022, Бюл. № 34.

7. А. с. 867976 СССР. Способ изготовления проволочного каната / D 07 B 7/02 / М. Ф. Глушко, В. А. Малиновский, Ю. В. Кобяков [и др.] // Открытия. Изобретения. – 1981, Бюл. № 36. – С. 101.

8. Харитонов, В. А. Закономерности распределения деформации проволок в многослойной пряжи при круговом калибрующем обжатии / В. А. Харитонов, А. Б. Иванов, Т. А. Лаптева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Том 62. – № 9. – С. 691–697.

9. Никулина, Т. Г. Исследование приращений затухания ОВ при деформациях модуля оптического кабеля / Т. Г. Никулина, Н. С. Лиманский, А. Г. Никулин // Информационные технологии. – Том 7. – № 2. – 2009. – С. 46–49.

10. Гуревич, Л. М. Компьютерное моделирование кругового пластического обжатия грозозащитного троса с оптическим модулем / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко // Черные металлы. – 2022. – № 8. – С. 60–66.

11. Гуревич, Л. М. Компьютерное моделирование при проектировании процесса кругового обжатия грозозащитного троса с оптическим модулем / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, Д. В. Проничев, М. Д. Трунов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 8 (168) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 97–102.

12. О расширении области применения пластически обжатых стальных прядей и изготовленных из них канатов / В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, Е. Ю. Кушкина, Э. Б. Гладских // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 764–772.

13. Ветров, А. П. Определение причин появления дефектов в закрытых канатах / А. П. Ветров, Л. Ф. Каноненко // Сб. тр. «Стальные канаты». – Вып. 8. – Киев : Техника, 1971. – С. 54–59.

14. Букштейн, М. А. Производство и использование стальных канатов. – 2-е изд. / М. А. Букштейн. – М. : Металлургия, 1973. – 360 с.