

Новые типы пластически деформированных проводов, грозозащитных тросов и ОКГТ

Леонид ГУРЕВИЧ,

заведующий кафедрой, д.т.н.,

Волгоградский государственный технический университет

Алексей ВЛАСОВ, к.т.н.,

Виктор ФОКИН

ВВЕДЕНИЕ

Анализ неисправностей в элементах российских линий электропередачи [2] показывает, что аварии, связанные с неисправностями проводов и грозозащитных тросов, составляют от 40 до 65% от всех зарегистрированных аварий, при этом их количество увеличивается примерно на 3—5% ежегодно. Главные причины повреждений — ледовая нагрузка на провода (избыточный вес, ветер), усталостный износ из-за вибрации проводов под воздействием ветра и галопирования, а также повреждения проводов после искровых перекрытий и ударов молнии. Поэтому оптимизация конструкции провода необходима не только в направлении токовой нагрузки и рабочих потерь (нагрев проводников за счёт их сопротивления, потери на перемагничивание стального сердечника, на вихревые токи и корону), но также за счёт их эксплуатационной пригодности для существенно различающихся климатических условий России.

Вопрос состоит в том, исчерпаны ли все ресурсы по модернизации предшествующих решений? Мы предлагаем ещё один метод перспективной модернизации проводов/грозозащитных тросов.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПАКТИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ

Потери энергии при изготовлении компактированных проводов, как показывают проведённые исследования [4], незначительны за счёт использования пластического деформирования с образованием электрических контактов высокой проводимости между проволоками.

Первые успешные результаты применения новой технологии изготовления проводов были получены на стальных тросах. Известно, что стальные тросы такой конструкции надёжно работали на протяжении многих лет, например на буровых установках. В ходе совершенствования этой технологии началось производство грозозащитных тросов (и ОКГТ), подверженных пластической деформации (рис. 1).

Рис. 1. Поперечное сечение нового грозотроса односторонней свивки с проволоками, подверженными пластической деформации



Изделия, разработанные компаниями ООО «Энергосервис» и АО «Северсталь», — новый класс компактированных проводов повышенной прочности и токовой нагрузки. Это провода типа АСВП и АСВТ [3, 4] подверженные пластической деформации, которые были аттестованы к применению на ВЛЭП, имеют высокие механическую прочность и токовую нагрузку.

Компактированный провод отличается от классической конструкции, потому что после скручивания сердечника он подвергается сжатию, в результате повышается его плотность в поперечном сечении, затем подобная процедура применяется к проводящим повивам после их скручивания. Пример такой конструкции показан на рис. 2.

Рис. 2. Модель нового компактированного провода (три проводящих слоя, сердечник)



В отличие от проводов высокой плотности заполнения поперечного сечения с использованием профилированного (Z-образного, Ω -образного и трапециевидного) провода, провода с пластической деформацией обычно представляют собой провода из круглых проволок и при компактировании имеют такую же или более высокую плотность свивки, чем конструкция из профилированных проводов (табл. 1).

Пластическая деформация предотвращает раскручивание провода и взаимное смещение его элементов под действием растягивающих сил, и из-за механического упрочнения прочность алюминиевых проводов увеличивается в 1,5—2 раза. Стоимость проводов АСВП и АСВТ сопоставима со стоимостью серийного провода АС. Реконструкция воздушных линий электропередачи с этими проводами также не выше, чем подобные затраты для обычных проводов, но повышение пропускной способности (на несколько десятков процентов для АСВП и до 80—100% для АСВТ) даёт дополнительный экономический эффект, уменьшает нагрузки на опоры, растягивающие усилия, нагрузки от ветра, дождя и

снега в совокупности с высокой усталостной прочностью новых проводов. В конечном итоге повышается надёжность воздушной линии электропередачи. Уменьшение диаметра проводов АСВП и АСВТ за счёт высоких прочности и плотности свивки по сравнению с обычными проводами АС обеспечивает снижение следующих параметров:

- аэродинамического сопротивления и, следовательно, ветровых нагрузок;
- уровня внутренней коррозии в проводе;
- интенсивности образования наледи на наружной поверхности проводов;
- галопирования проводов.

НЕКОТОРЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ ПРОВОДОВ СТАНДАРТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Очень важная задача — определить ниши, где использование новых проводов было бы самым выгодным для рынка. Как правило, такие ниши (или области) легче проанализировать в расчётных примерах применения новых конструкций по сравнению с существующими. Подобный расчёт приведён в табл. 2.

По данному примеру можно сделать вывод, что все эксплуатационные параметры новых проводов, представляющие важность при проектировании воздушных ЛЭП, действительно значительно превосходят параметры стандартных проводов при сопоставимой стоимости. Новые провода особенно подошли бы для новой ЛЭП, которая будет строиться в регионах с чрезмерными ветровыми и гололёдными нагрузками, для протяжённых пересечений рек, а также для линий с протяжёнными анкерными участками, что было отмечено на заседании секции НТС ПАО «Россети». Максимальный эффект в этих случаях достигается при совместном применении проводов АСВП (АСВТ) и грозотросов МЗ (ОКГТ). В последнем случае применения новых проводов можно уменьшить высоту концевых анкерных опор перехода до 25—30% относительно стандартных размеров опорных мачт. Это, в свою очередь, приведёт к значительному снижению стоимости всего перехода.

Понять, в каких случаях целесообразно применение проводов новой конструкции по сравнению с проводами передовых фирм-производителей, можно на представленном ниже примере ВЛ 220 кВ

Табл. 1. Преимущества новых проводов АСВП и АСВТ перед стандартными АС-проводами

<p>СТАНДАРТНЫЕ ПРОВОДА. Эксплуатация стандартных проводов протяжённостью многие миллионы километров на воздушных ЛЭП в разных странах — обычная практика. Некоторые недостатки, характерные для этих стандартных проводов:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⊖ 1. Низкие плотность потока мощности и прочность; ⊖ 2. Высокая чувствительность (низкая устойчивость к усталостным напряжениям) к изгибным усилиям в случае многослойной алюминиевой части; ⊖ 3. Недостаточная устойчивость к ударам молнии; ⊖ 4. Недостаточная устойчивость к коррозии проводов (в агрессивной атмосфере). 	<p>НОВЫЕ ПРОВОДА. В проводах, основанных на новом принципе, может использоваться много улучшений, важных для эксплуатации, а именно:</p> <ul style="list-style-type: none"> ⊕ 1. Повышенные плотность потока мощности и прочность; ⊕ 2. При одинаковой плотности потока мощности существенно меньший вес; ⊕ 3. Более высокие характеристики усталостной прочности при изгибе по сравнению со стандартными проводами; ⊕ 4. Высокая устойчивость к ударам молнии.
---	--

Табл. 2. Сравнение провода стандартного типа и предлагаемого нового типа АСВП (АСВТ). Вычисления выполнены при $T_{eds} = 20\% RBS$

Параметры проводов для сравнения	АС 150/24	АСВП, АСВТ 162/47	
	Значение	Значение	Изменение в % от АС
Поперечное сечение сердечника, мм ²	24,2	47,3	+90
Поперечное сечение алюминиевой части, мм ²	149	162,3	+8,9
Диаметр, мм	17,1	17,1	0,0
Номинальная прочность на разрыв, даН	5227,9	9882,4	+89,0
Максимальная токовая нагрузка, А	554	590,5 (822)	+6,6 (+48,4)
Длина пролёта воздушной ЛЭП при одинаковом провесе, м	280	364	+30
Мачты на 10 км воздушной ЛЭП	37	27	-27
Удельные электрические потери при одинаковой токовой нагрузке (150 А), МВт•ч/км в год	41,7	36,4	-12,7
Температурный коэффициент расширения проводника, 10 ⁻⁶ 1/°С	19,2	16,7	-13
Модуль упругости проводника, Е•10 ⁻³ , Н/мм ²	82,5	88	+6,7
Провес при максимальной температуре воздуха (+40°С), м, для пролётов 250/300 м	6,29	3,32	-47,2
	9,26	4,87	
Провес при температуре окружающей среды -5°С для зоны 3 по ветровой и ледовой нагрузкам, м, 250/300 м	6,66	4,41	-33,8
	9,63	6,04	
Электрическое поле в начале коронирования при сухой погоде, кВ/см	34,04	40,0	+17,5
Сопrotивление постоянному току (20°С), Ом/км	0,2039	0,1780	-12,7
Предварительный расчёт относительной стоимости проводов	100%	110—120%	

Табл. 3. Технические характеристики проводов с одинаковой пропускной способностью: АСВТ 216/61, GTACSR 217/49, АСВТ 216/33; TACSR/HACIN 212/49

Наименование провода	Отношение, $S_{Al}/S_{серд}$	S_{Al} , мм ²	$S_{серд}$, мм ²	Вес 1 км, кг	Диаметр провода, мм	Разрывное усилие, даН
АСВТ 214/61	3,514	214	60,9	1080,9	19,6	12667,20
GTACSR 217/49	4,429	217	49	1015	21	11296,0
АСВТ 216/33	6,574	216,3	32,9	870	18,5	9000,00
TACSR/HACIN 212/49	4,327	212	49	939	21	9755,0

Крымская — Афипская, введённой в эксплуатацию в 2009 году. К сожалению, в этом году наши новые провода ещё находились в стадии разработки и не могли рассматриваться в качестве альтернативы высокотемпературному проводу фирмы J-Power GTACSR 217/49, который и был выбран, несмотря на то, что превосходил по стоимости стандартный АС 240/39 в 10 раз. Основные технические характеристики сравниваемых проводов представлены в табл. 3.

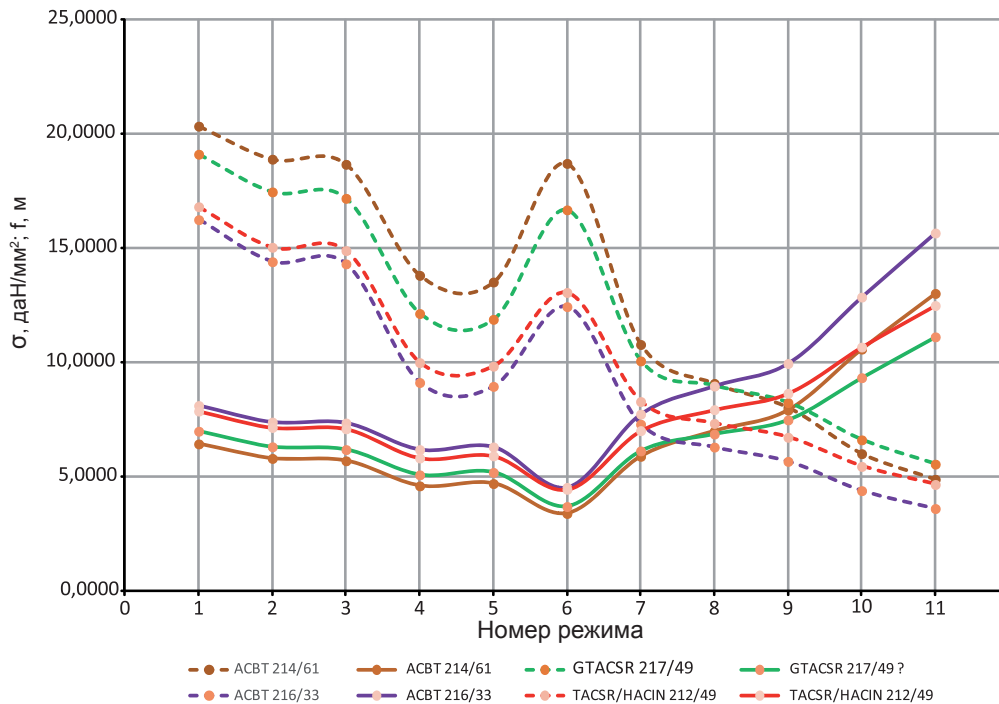
Как видно из представленной на рис. 3 диаграммы при нагрузке на опоры не менее 5710 даН, компактированный провод АСВТ 214/61 (конструкция I) практически не уступает проводу GTACSR 217/49 в высокотемпературной области, но превосходит его в рабочей области нагрузок и температур от -30°С до +150°С. Компактированный провод АСВТ 216/33 (конструкция IV) может рассматриваться в качестве альтернативы в заданном пролёте вплоть до максимальной температуры нагрева +150°С при

допущении стрел провеса до 12,8 м, но при этом его применение не влечёт за собой необходимого усиления опор, так как проектом принято ограничение этого усилия до 4259 даН.

Следует заметить, что режим нагрева проводов от температуры +150°С и выше является кратковременным, он необходим только в момент пиков нагрузки и не может использоваться большее время из-за роста прямых потерь по закону I^2 . В области температур ниже +150°С применение дорогих, сложных в конструкции и производстве проводов, в том числе, из инвара, композитных материалов, получается расточительным.

Из приведенного примера видно, что эффективное использование проводов АСВП и АСВТ (конструкций I и II) возможно при строительстве новых ВЛ, когда изменение расстояний между опорами и их усиление требуется по условиям проекта или приводит к суммарной экономии затрат.

Рис. 3. Стрелы провеса и напряжения в проводах в пролёте 360 м для заданных режимов нагружения и условий ВЛ 220 кВ Крымская — Афиопская (нагрузка на опоры 5710 даН)



Для работ по ремонту/модернизации старых ЛЭП можно порекомендовать другие новые провода (менее тяжёлые, с более тонким сердечником), дополнительно разработанные компанией «Энергосервис» (исполнение 4).

АСВП (исполнение 4), позволяет эффективно заменять провода АС 300/39 и АС 400/51 (I—II районы по гололёду) и АС 300/66 и АС 400/93 (III—IV районы по гололёду), при реконструкции ВЛЭП 220, 330, 500 кВ, а также АС185/43 (200/32, 205/27), в т.ч. без реконструкции ВЛЭП (на старых опорах), снижая энергопотери, в т.ч. на корону (за счёт гладкой поверхности), риск гололёдообразования (20—40%), аэродинамические нагрузки (до 40%), при одновременном повышении пропускной способности и срока службы (за счёт закрытой

конструкции сердечника и всего провода).

Линейка проводов АСВП (исполнение 4), позволяет увеличить энергоэффективность ВЛЭП, при плановых заменах, особенно учитывая возможность стыковки с проводами АС, наблюдаются практически равные нагрузки на опоры (с учётом аэродинамики и гололёда даже меньше).

Испытания проведены в соответствии с регламентом ПАО «Россети» на «пилотном» проводе АСВП 216/33, в системе «провод-арматура».

Модуль упругости — $0,79 \cdot 10^5$ Н/мм² для АСВП 216/33 и $0,63 \cdot 10^5$ Н/мм² для АС.

Также, в соответствии с техническим заданием

ДЗО ПАО «Россети», ООО «Энергосервис» разработало дополнительную серию проводов с сечением алюминиевой части 50—120 мм² для распределительных сетей 6—35 кВ. Провод этой серии при одинаковом диаметре и практически одинаковом весе обладает меньшим электрическим сопротивлением (на 14—29%), что позволяет снизить потери в распределительных сетях, повысить пропускную способность при их реконструкции без замены опор. Изделие, обладая повышенной механической прочностью (на 10—76%), позволяет снизить стрелы провеса или уменьшить количество опор ВЛ. Оно имеет способность выдерживать большие ветровые нагрузки из-за более обтекаемой формы провода, и снижать, по той же причине, гололёдообразование (до 20%).

Табл. 4. Провода АСВП/АСВТ (исполнение 4)

Номинальное сечение, мм ²	Расчётные параметры проводов марок АСВП					
	Сечение Алюминий-сталь, мм ²	Диаметр, мм		Электрическое сопротивление 1 км провода постоянному току при 20°C, Ом	Разрывное усилие, Н, не менее	Вес 1000 м, кг
		провода	сердечника			
216/33	216,3/32,9	18,5	6,7	0,1334	89500*	870
300/39	300/26	22,3	7,1	0,096	95520	1012,8
400/51	400/38	24,75	7,45	0,072	156270	1376,4
300/66	300/45	21,5	8,17	0,096	129150	1161
400/93	400/63	25,2	9,50	0,072	177510	1571,4

* разрывное усилие указано фактическое в реальных испытаниях системы «провод-зажим».

В случае необходимости провода могут быть изготовлены в высокотемпературном исполнении (АСВТ, $t_{\text{раб}}=150^\circ\text{C}$, $t_{\text{max}}=210^\circ\text{C}$).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НОВЫХ УРОВНЕЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДОВ

Одним из самых привлекательных преимуществ новых проводов, очевидно является их высокое усталостное сопротивление. В практическом применении это означает более низкие расходы на устройства защиты, например демпферы Стокбриджа, широко применяемые для гашения ветровых вибраций. По очень грубой оценке, характеристики усталостной прочности новых проводов должны приблизительно в два раза превосходить характеристики стандартных проводов АС, поскольку в новых проводах АСВП и АСВТ в основном присутствуют линейные контакты между спрессованными проволоками внутри алюминиевого слоя (рис. 4). Этот вывод может быть сделан при сравнении уровней усталостной устойчивости многослойных (с точечными контактами) и однослойных (с линейными контактами) стандартных проводов АС (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ГРОЗОТРОСОВ НОВОГО ТИПА

Правильное определение ползучести проводов недавно стало одним из важных требований, что явилось результатом работы эксплуатирующих организаций России, поскольку оказалось, что возможности многих воздушных ЛЭП не могут быть полностью использованы из-за увеличенного после многих лет эксплуатации провеса проводов.

Чтобы избежать этой проблемы с нашими изделиями в будущем, особое внимание уделяется испытаниям на ползучесть. Дополнительные испытания на ползучесть (выпячивание) проходят в настоящее время успешно, они выполняются при постоянной нагрузке $T_{eds} = 20\% \text{ RBS}$ для ОКГТ на экспериментальном стенде ЭССП, а для грозотросов (ТУ 062) и стальных канатов (ГОСТ 3064) с традиционной свивкой слоёв при $T_{eds} = 30\% \text{ RBS}$ на стендах ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Результаты, полученные при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, показаны на рис. 6. До сих пор испытания проводились при постоянных и строго контролируемых условиях, при этом полученные результаты могут быть представлены в довольно упрощённой форме. Теперь имеем приблизительные выражения для ползучести: $\Delta\epsilon = at^b$; где для ОКГТ (ТУ 113) $a = 0,0278$,

Рис. 4. Вид модели новой конструкции проводов АСВП /АСВТ

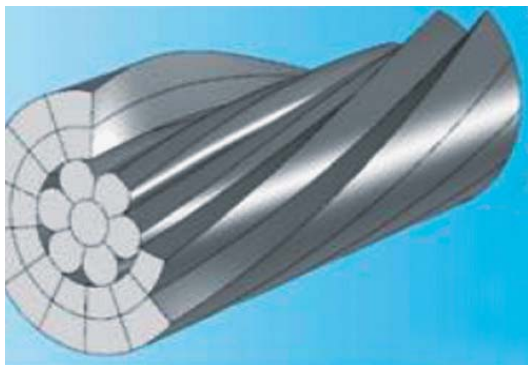


Рис. 5. Прогноз усталостной характеристики для проводов АСВП и АСВТ (заштрихованная область)

Результаты испытаний как функция $\sigma(N)$ для однослойных (эллипсы) и многослойных (треугольники) проводов АС воспроизведены на основе данных, N в мегациклах

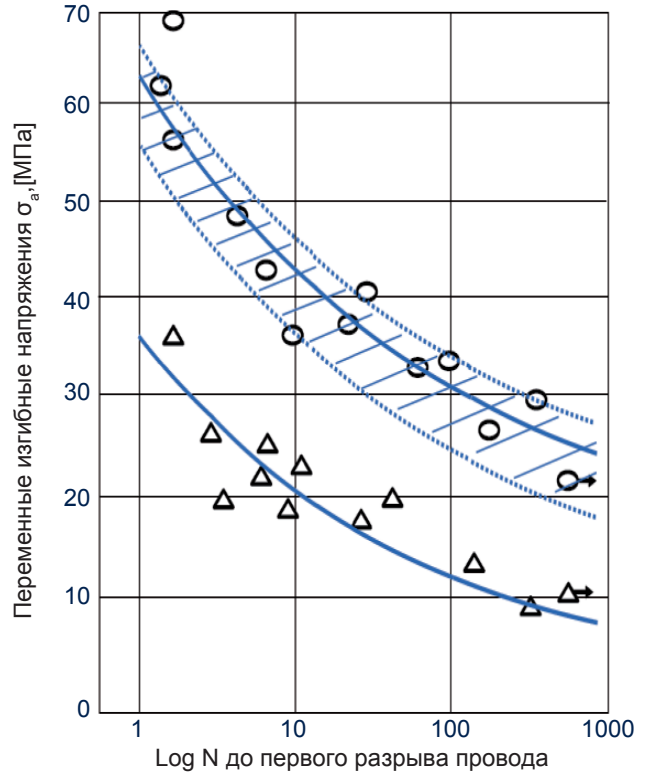
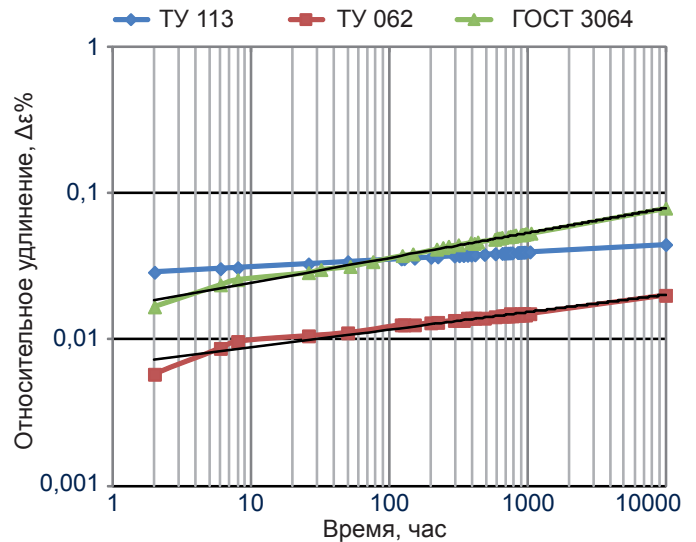


Рис. 6. Результаты испытаний на ползучесть грозотросов нового типа



$b = 0,0511$; для грозотроса (ТУ 062) $a = 0,0067$, $b = 0,119$; для ГОСТ 3064 $a = 0,0166$, $b = 0,1692$.

Из представленных сравнительных данных очевидно преимущество пластически деформированных изделий с традиционной свивкой круглых проволок с разнонаправленными слоями. Существенно снижаются величины удлинений у грозотроса по ТУ062, по сравнению с канатом по ГОСТ 3064, во всем исследованном временном диапазоне. Некоторое относительное увеличение начальных уд-

линейный ОКГТ в диапазоне времени до 100 часов объясняется наличием достаточно пластичного сердечника (кабеля с ОВ), при дальнейшей выдержке под нагрузкой они становятся меньше, чем у стального каната по ГОСТ 3064.

В целом можно сделать вывод о том, что применение новой технологии свивки в сочетании с пластической деформацией слоёв проволок в процессе изготовления существенно снижает удлинения ползучести, уменьшает интенсивность их нарастания с течением времени.

ПРЕВОСХОДНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НОВЫХ ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ К УДАРАМ МОЛНИИ

На рис. 7 показано частичное расплавление и прогорание грозозащитных тросов на воздушных ЛЭП. В случае попадания молнии в грозотрос для предотвращения аварий возможного замыкания разрушенных частей грозотроса на основной провод обычно требуется вмешательство сервисной ремонтной бригады и отключение ЛЭП для ремонта. Разрушение не всегда заметно и при дальнейшем воздействии ветровых вибраций может произойти в любой момент. В данном контексте этот вопрос представляет значительный практический интерес для сравнения в непосредственном экспериментальном испытании характеристик устойчивости к грозовым разрядам и последующим воздействиям ветровых вибраций грозозащитных тросов различных конструкций. Впервые такое прямое сравнение стойкости грозотросов к ударам молнии было выполнено в работе [1]. В ходе испытаний не удалось разрушить экспериментальный образец компактированного изделия даже максимальным для исследовательской установки разрядом в 147 Кулон, хотя обычные стальные канаты с круглыми проволоками начинали разрушаться и расплетаться уже при 60—80 Кулонах. Новое испытание проводилось в рамках подготовки к Техническому совету ПАО «ФСК ЕЭС», на трёх образцах грозозащитных тросов одного диаметра, изготовленных различными компаниями [2]. Как следует из вышеупомянутых результатов, самая высокая устойчивость к ударам молнии была получена на образцах грозозащитных тросов компактированной конструкции с новой технологией свивки. Низкая теплопроводность стали и её высокие точки плавления и испарения помогают сохранить геометрию отдельных стальных проводов, они остаются в большинстве случаев неповреждёнными. Дополнительная устойчивость компактированного троса МЗ обеспечивается более рассеянной зоной канала выброса и лучшей электро- и теплопроводностью отдельных проводов, удерживаемых в сжатом состоянии за счёт натяжения.

Данные исследования крайне важны и для ОКГТ, требования по молниестойкости к которым почему-то ниже, чем к обычным грозотросам! А ведь в случае попадания молнии в ОКГТ возникает риск не только отключения ЛЭП, но и повреждения связи и сигнализации.

Полученный результат имеет большое практическое значение, существенно увеличивая надёжность

Рис. 7. Обычный кабель ОКГТ с повреждёнными сильным ударом молнии проводами внешнего слоя (из алюминиевого сплава)



работы грозотросов в течение всего времени эксплуатации на ВЛ, снижая практически до нуля возможность разрушения и расплетения конструкции грозотроса и ОКГТ от удара молнии и последующего воздействия ветровой нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый комплекс продуктов (проводов, грозотросов и ОКГТ для ВЛЭП), позволяющий, особенно в случае комплексного применения при новом строительстве и реконструкции ВЛ, существенно повысить её надёжность при воздействии всего спектра климатических нагрузок, увеличить пропускную способность и при этом снизить стоимость жизненного цикла. Новые, запатентованные авторами продукты и способ их производства, конструкции компактированных проводов и грозотросов позволяют снизить аэродинамическое сопротивление и ветровые нагрузки на ВЛ; уровень внутренней коррозии в проводе; интенсивность образования гололёда на наружной поверхности проводов; галопирование проводов; удлинение (ползучести) при эксплуатации.

В то же время существенно повышаются пропускная способность и надёжность ВЛЭП; стойкость к ударам молнии и последовательным циклическим воздействиям: удар молнии — ветровая вибрация; механическая прочность, стойкость конструкции к изгибу и сочетанию нагрузок растяжение — изгиб (тяжение — золотая вибрация), а также усталостная прочность. **Подробно с материалами исследований, испытаний и разработками можно ознакомиться на сайте: <http://energyservice.com>.**

ЛИТЕРАТУРА

1. О повышении служебных свойств канатов для молниезащиты воздушных линий электропередачи // Власов А.К., Фокин В.А., Петрович В.В. и др. // *Сталь*. 2011. № 7. С. 78—81.
2. Исследование стойкости грозозащитных тросов к ударам молнии и механическим воздействиям // Власов А.К., Фокин В.А., Даненко В.Ф., Фролов В.И., Кушкина Е.Ю. // *Сталь*. 2013. — № 9.
3. Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминиевых проводах различной конструкции. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В., Трунов М.Д. // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*. № 5 (26) 2014.
4. Моделирование температуры и плотности тока в грозозащитном тросе с оптическим кабелем связи (ОКГТ) при прохождении тока короткого замыкания. Гуревич Л.М., Даненко В.Ф., Проничев Д.В., Трунов М.Д. // *Энергия Единой Сети* // № 5. 2014.