

B2 Воздушные линии электропередач PS2 УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Исследование сталеалюминевых пластически компактированных проводов для воздушных линий электропередач

Курьянов В.Н.¹, Гуревич Л.М.², Тимашова Л.В.³, Фокин В.А.⁴

¹НИУ "Московский Энергетический Институт", ²Волгоградский ГТУ,
³НТЦ ФСК ЕЭС, ⁴ООО "Энергосервис"
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В настоящем докладе рассмотрены вопросы технологии производства и эффективности эксплуатации компактированных (пластически обжатых) сталеалюминевых проводов для воздушных линий (ВЛ) электропередач в сочетании с анализом потерь электроэнергии, обусловленных стримерными разрядами, аэродинамическими и гололедными нагрузками.

Пластическое деформирование алюминиевых проволок и стального сердечника позволяет достичь увеличения коэффициента заполнения рабочего сечения проводов ВЛ значительно более простым и дешевым способом, чем применение профилированных омега (Ω) - или зетобразных (Z) проволок.

Испытания, проведенные в 2017-2019 гг. в специализированных научно-технических лабораториях России и Германии, показали, что применение компактированных проводов на ВЛ 110-220 кВ в ряде случаев позволяет увеличить длины пролетов до 140% (по сравнению с классическими проводами), в ряде случаев возможно уменьшение аэродинамических (на 20-35%) и гололедных нагрузок (на 25-40%) при сохранении габаритов и пропускной способности ВЛ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технология пластического обжатия проводов и грозотросов, значения ветровой и гололедной нагрузки на провода типов АС и АСВП, международные стандарты DIN EN 50189, DIN EN 62004, напряжение коронного зажигания, стримерное начало коронного разряда для компактированного высокотемпературного провода.

Vek077@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Изобретение и массовое внедрение новых типов неизолированных высокотемпературных проводов показало, что одним из перспективных направлений улучшения их характеристик является компактирование [1].

Первое упоминание о технологии пластического обжатия проводов встречается при рассмотрении способов повышения технического ресурса стальных канатов в книге М.А. Букштейна «Производство и использование стальных канатов» (М.: «Металлургия», 1973).

Технология пластического обжатия применима для прядей из круглой проволоки, и необходима, чтобы придать им большую плотность и гладкую поверхность, что способствует увеличению контакта проволок. Такие канаты в СССР изготавливались по технологии, разработанной Отраслевой научно-исследовательской лабораторией стальных канатов (г. Одесса, УССР).

10.04.2012 г. получен Российский патент № 2447525 на способ изготовления высокотемпературного провода для воздушных линий электропередачи. Изобретение относится к области электротехники, а именно к технологии изготовления высокопрочных и высокотемпературных проводов (АСВП), предназначенных для передачи электрической энергии по ВЛ 35 кВ и выше. Авторы разработки: В.А.Фокин, А.К. Власов, В.В. Петрович, А.В. Звягинцев, В.И. Фролов.

Технология производства данных проводов в России освоена на предприятиях ОАО «Северсталь-метиз».

I. КОМПАКТИРОВАНИЕ

Применение кругового (радиального) пластического обжатия провода позволяет улучшить сразу несколько характеристик: повысить точность изготовления прядей по диаметру, уплотнить свивку (рис. 1), устранить возможную неравномерность натяжения проволок, сформировать полосовой контакт между проволоками, нейтрализовать свивочные напряжения, обеспечить равномерное распределение нагрузки между составными элементами.

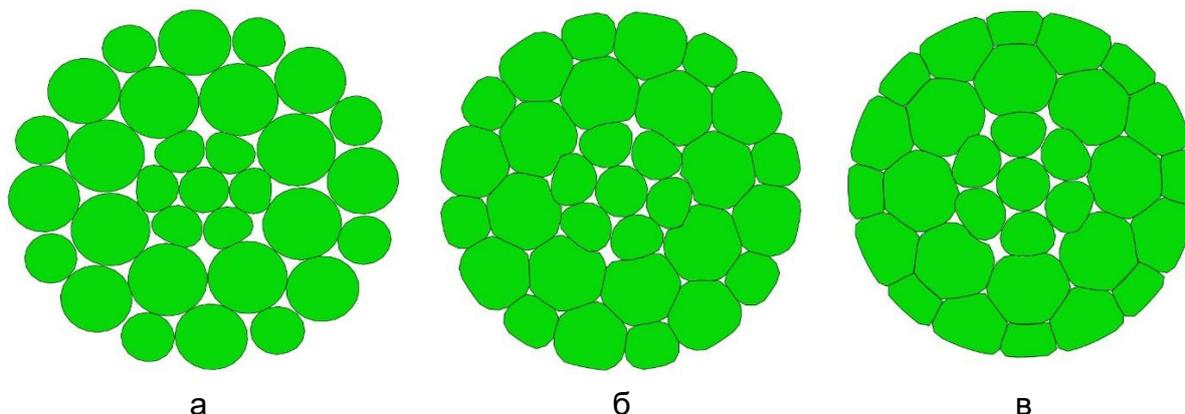
Дополнительное снижение габаритов провода достигается при использовании пластического деформирования не только наружного слоя, но и предварительного обжатия стального сердечника (со степенью 11,5-13,5%).

Эффективное пластическое обжатие применимо только при линейном касании (ЛК) проволок, т.к. при точечном касании (ТК)

проволоки деформируются в местах контакта, что снижает их надежность при эксплуатации [2].

Внешняя поверхность проводов, полученных с применением такой технологии, оказывается более гладкой и ровной, чем у проводов, выполненных из круглых проволок, что позволяет уменьшить нагрузку от климатических воздействий, значительно снизить аэродинамическое сопротивление и пляску проводов.

Рис.1. Изменение профиля алюминиевых проволок внешних повивов и плотности заполнения сталеалюминиевого провода АСВП 216 /33 при различных степенях компактирования: а – после навивки (Ø19,2 мм); б, в - после обжатий до Ø17,8 и Ø16,2мм соответственно.



Компьютерное моделирование поведения потока воздуха вблизи провода в пакете программ COMSOL Multiphysics показало (рис. 2), что более гладкий контур и меньший диаметр проводов типа АСВП позволяет снизить ветровую нагрузку в среднем на 33% (табл. 1).

Измененная геометрия проволок провода, улучшает свойства такого провода по изгибной и крутильной жесткости, стойкости к вибрации, пляске и термоциклированию.

Таблица 1.

Значения ветровой нагрузки на провода типов АС и АСВП с различным контуром поперечного сечения в зависимости от скорости воздушного потока

Скорость U_{AB} , м/с	Ветровая нагрузка, действующая на провода следующих марок, Н/м					
	АСВП 128/37	АС 120/19	АСВП 216/32	АС 240/34	АСВП 277/79	АС 240/56
25	3.6	4.8	4.9	6.9	5.2	7.0
32	5.9	7.9	7.8	11.4	8.4	11.5
60	20.8	28.5	28.4	41.5	29.8	41.6

Применение технологии пластического деформирования дает ряд технических преимуществ:

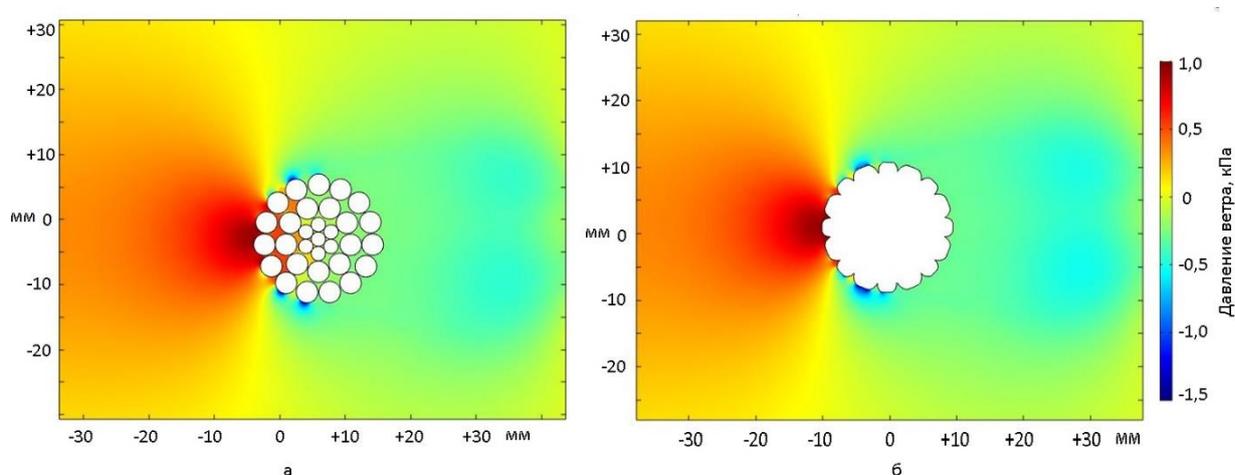
– увеличение коэффициента заполнения провода до 92-97%;

– уменьшение аэродинамической нагрузки на провод (на 20-35%) и самогашение его колебаний;

– снижение обледенения (на 25-40%) и растяжения провода в несколько раз.

Таким образом, компактирование позволяет достичь улучшения эксплуатационных характеристик ВЛ по сравнению с классическими сталеалюминиевыми проводами аналогичных диаметров.

Рис. 2. Ветровое давление, действующее на провода при скорости ветра 60 м/с (район по ветру I): а - АС 400/64; б - АСВП 477/66

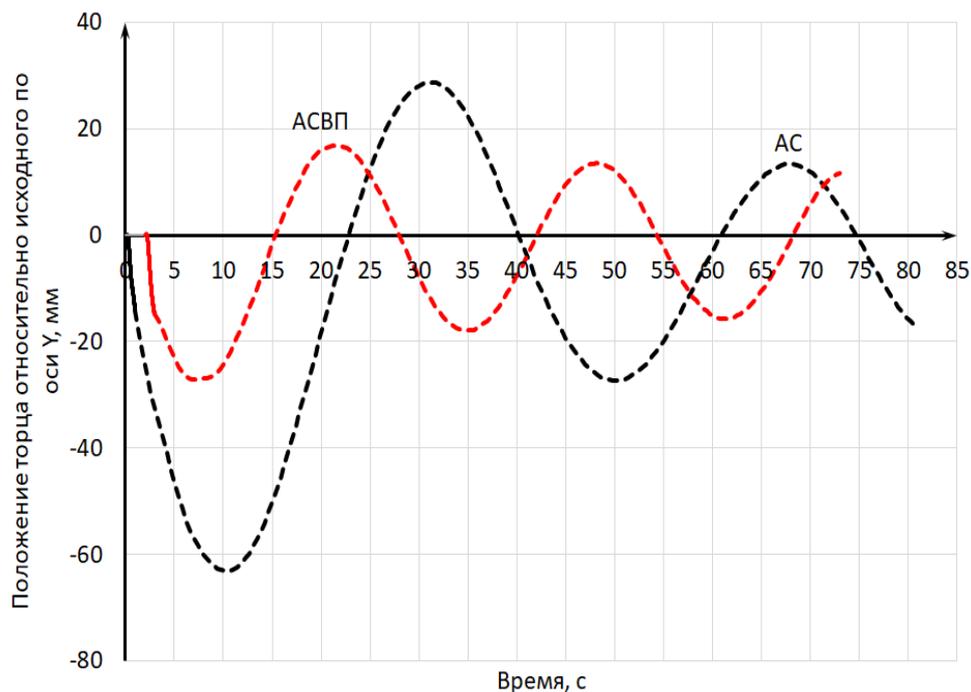


Сравнение поведения сталеалюминиевых проводов традиционной конструкции (типа АС) и пластически обжатых (типа АСВП) с близкими площадями стальных и алюминиевых проволок проведено после импульсного ветрового воздействия методом компьютерного моделирования на базе программного комплекса SIMULIA/Abaqus.

В процессе моделирования к консольно-заземленному отрезку провода прикладывали однократное импульсное изгибающее воздействие, а затем фиксировали изменение амплитуды и частоты затухающих колебаний.

У провода АСВП 128/36 за счет более тесного контакта проволок начальная амплитуда и период колебания оказалась примерно в 1,7 раза меньше, чем у провода АС120/27 при одной и той же набранной скорости изгибаемого провода при импульсном воздействии (рис. 3).

Рис. 3. Изменение во времени вертикальной координаты свободного торца отрезка проводов АСВП 128/36 и АС120/27 при затухающих колебаниях.



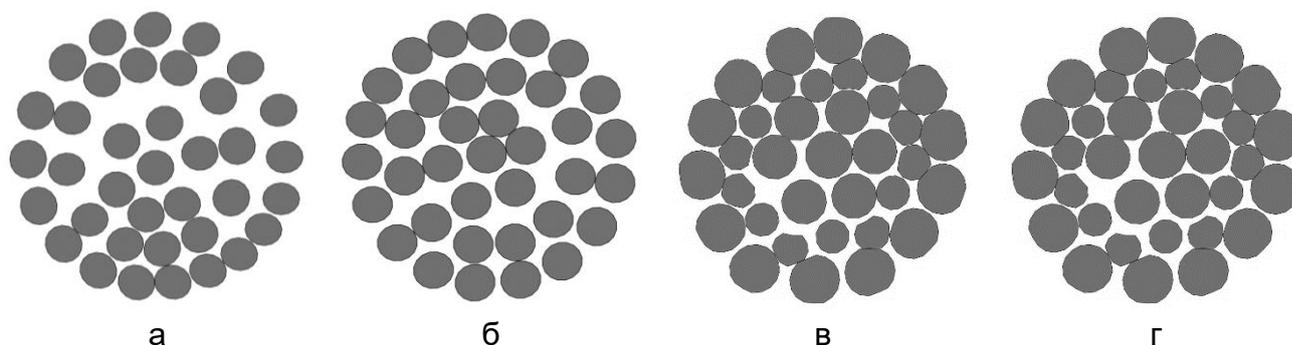
б

Близкая к гладкой наружная поверхность у пластически деформированных проводов типа АСВП, аналогичная профилю наружного слоя проводов из сегментных, Ω - и Z-образных алюминиевых проволок позволяет уменьшить вибрацию и пляску проводов, налипание снега и льда.

В то же время, даже по сравнению с проводами из сегментных, Ω - и Z-образных алюминиевых проволок, провода АСВП должны обладать большей торсионной жесткостью, уменьшенной вероятностью пляски и повышенной стойкостью к вибрации, лучшим самодемпфированием, так как, в отличие от них, имеют развитую поверхность контакта соседних проволок не только внутри одного повива, но и между повивами.

Для традиционных проводов типа АС характерно значительное изменение геометрии провода в процессе колебания с формированием больших расстояний между проволоками (рис.4 а, б), причем увеличение внешнего размера провода происходит как в плоскости колебаний, так и перпендикулярно к ней. Контакт между большинством проволок пластически обжатого провода АСВП (рис. 4 в, г) сохраняется даже в точках экстремумов.

Рис. 4. Поперечные сечения колеблющихся моделируемых проводов АС120/27 (а, б) и АСВП 128/36 (в, г) в первых нижних (а, в) и верхних (б, г) мертвых точках.



II. СРАВНЕНИЕ ПРОВОДОВ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

В ходе испытаний нового компактированного высокотемпературного алюминиево-стального провода проверялись как механические, так и электрические свойства в соответствии с актуальными европейскими нормами и стандартами.

Для проведения испытаний привлекались два испытательных института международного значения.

Механические и электрические испытания многожильного провода, включая сопутствующую арматуру проведены фирмой Spie/SAG FGH Engineering & Test GmbH в Германии (г. Ланген земли Гессен, Питлерштрассе 44), рисунок 5.

Институт испытаний и сертификации VDE (VDE Testing and Certification Institute, Германия, г. Оффенбах, ул. Мериан 28) сопровождал данный проект и отвечал за его управление в целом. Испытания успешно завершены.

В соответствии со стандартами DIN EN 50189, DIN EN 62004 проведены полные испытания:

- испытание одиночного провода (диаметр, прочность на растяжение и удельное сопротивление),
- исследование структуры провода,
- тесты проволок на прочность,
- тест на сопротивление постоянному току провода, на несущую способность после напряженно-деформированного теста,
- напряженно-деформированное состояние провода и сердечника,
- коэффициент теплового расширения,
- ползучесть,
- температурный тест,
- испытания на растяжение.

Возможность применения компактированного провода для решения задач строительства и эксплуатации ВЛ с применением различных проводов показана в Таблице 2.

Таблица 2.
Сравнение ВЛ с применением проводов разного типа

Задача	Решение с помощью АС	Решение с помощью компактированного проводника	Обоснование
Снижение потерь электроэнергии от коронных разрядов и уровня шума, без увеличения диаметра провода	-	+	Экспериментальное подтверждение ОАО "НТЦ "ФСК ЕЭС" и VDE (Германия)
Повышение устойчивости молниезащиты и токам короткого замыкания	-	+	Экспериментальное подтверждение ОАО "НТЦ "ФСК ЕЭС" и VDE (Германия)
Значительное снижение относительного удлинения при эксплуатации	-	+	Экспериментальное подтверждение ОАО "НТЦ "ФСК ЕЭС"
Гашение вибрации, пляски и собственных колебаний проводов при необходимом диаметре	-	+	Экспериментальные и вычислительные работы подтверждение ВолГТУ, ОАО "ВНИИЖТ" и МЭИ
Увеличение длины пролета и (или) провисания, без увеличения диаметра провода	-	+	Техническое решение
Замена провода на существующих опорах электропередачи, снижение нагрузки на все элементы воздушной линии и (или) повышение ее пропускной способности	-	+	Техническое решение
Снижение ветрового давления при сохранении диаметра провода	-	+	Вычислительное подтверждение ВолГТУ и МЭИ
Замена провода в кольцевых сетях и уменьшение диаметра провода	-	+	Техническое решение
Уменьшение обледенения при необходимом диаметре провода	-	+	Вычислительное подтверждение ВолГТУ и МЭИ
Сохранение пропускной способности провода в регионах с высокими температурами окружающей среды и солнечной радиации, без увеличения диаметра провода	-	+	Проектные решения и расчеты подтверждение ВолГТУ и МЭИ

Рис. 5. Испытательный полигон в Германии (г. Ланген, земля Гессен)



III. ИСПЫТАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА

Важным моментом при использовании проводов меньшего диаметра является риск возникновения потерь электроэнергии от коронирования и повышения акустического уровня шума.

Испытательной лабораторией электрооборудования высоковольтных электрических сетей по требованиям электромагнитной совместимости АО "Научно технический центр ФСК ЕЭС" (расположен по адресу Россия, г. Москва, Каширское шоссе 22, корпус 3), а затем в Институте ассоциации электротехники (VDE Testing and Certification Institute, Германия), были проведены четыре исследования для тестирования этой проблемы.

На первом этапе для сравнения и изучения коронных разрядов взяты два провода одинакового диаметра (18,8 мм). В общей сложности, четыре провода, используемые в эксперименте (Таблица 3).

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями МЭК 61284. На основании результатов сравнительных испытаний, проведенных в НТЦ ФСК ЕЭС, установлено, что компактированный провод 197/55, изготовленный с использованием технологии пластического обжатия, имеет напряжение возникновения коронного разряда (142,2 кв) на 5,7% выше, чем классический провод АС 185/29 (134,5 кв) того же диаметра (18,8 мм).

Аналогичные испытания проведены для компактированного провода 216/33 и классического АС 240/32 с различными диаметрами. По результатам сравнительных испытаний провод АС 240/32 (диаметр 21,6 мм) и компактированный провод 216/33

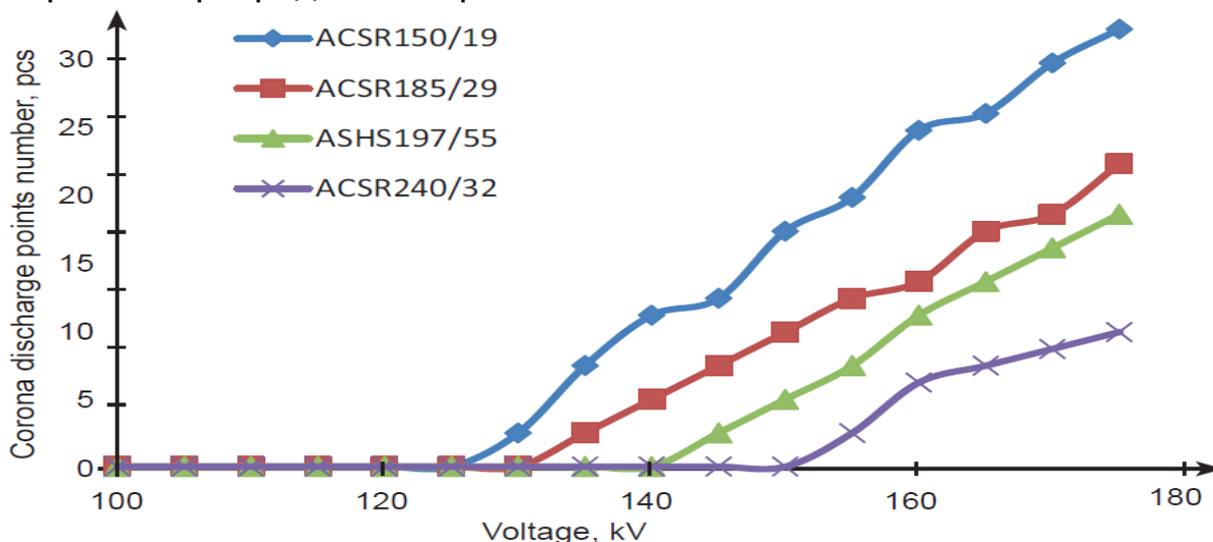
(диаметр 18,5 мм) имеют одинаковое напряжение возникновения коронного разряда.

Однако длительно допустимый ток сравниваемых проводов существенно отличается (510 А для провода АС 240/32 и 689 А для компактированного провода 216/33 ($t = 70^\circ \text{C}$) и 1040 А для компактированного провода 216/33 ($t = 150^\circ \text{C}$).

Испытательное напряжение для возникновения видимой короны на воздушных линиях 220 кВ было определено лабораторией FGH Engineering & Test GmbH как 167,7 кВ (фазное напряжение) и испытательной лабораторией электрооборудования высоковольтных электрических сетей по требованиям электромагнитной совместимости НТЦ ФСК ЕЭС, как 160,0 кВ (фазное напряжение). Процедура испытаний в обеих лабораториях была одинаковой.

Уровни напряжения и зарегистрированные результаты при испытании видимой короны показаны на Рис. 6.

Рис. 6. Зависимость количества очагов возникновения коронного разряда от напряжения.



Испытания проводились в соответствии с методом IEC 61284: 1998 и дали аналогичные результаты для напряжения коронного зажигания и начала стримера коронного разряда. Незначительные различия в результатах возникают из-за условий проведения испытаний образцов проводов.

Таблица 3.
Технические данные испытанных проводов

Тип проводника	Диаметр проводника (наружный), мм	Количество алюминиевых проводов в проводнике, шт	Диаметр наружного слоя проводов,	Длительно допустимый ток, А

			мм	
АС 150/19	16,8	24	2,8	450
АС 185/29	18,8	26	2,98	510
АСВП/АСВТ 197/55	18,8	28	3,45	561/943*
АС 240/32	21,6	24	3,6	605

* $t_{max} = 70^{\circ}\text{C}$ для высокопрочных сталеалюминиевых компактированных проводов и $t_{max} = 150^{\circ}\text{C}$ для высокотемпературных компактированных сталеалюминиевых проводов.

Образцы проводов взяты непосредственно из барабана при испытаниях в лаборатории Fgh Engineering & Test GmbH. Что касается испытаний лаборатории НТЦ ФСК ЕЭС, то поверхность образцов проводов дополнительно очищалась от загрязнений и мелких дефектов (связанных с транспортировкой и размоткой), которые могли вызвать коронный разряд. Это было сделано для изучения начала возникновения очагов коронных разрядов нового компактированного высокотемпературного провода 19.6-216/33-1.

По результатам испытаний, полученных лабораториями, было установлено, что стримерное начало коронного разряда для компактированного высокотемпературного провода 19.6-216/33-1 находится на уровне 139,7-150 кВ (фазное напряжение). Исходя из уровня коронного разряда, этот провод рекомендуется использовать в отечественных и зарубежных электрических сетях 110, 115, 138 и 150 кВ (в некоторых случаях провод может использоваться до 220 кВ). Рассчитанные удельные потери на корону для хорошей погоды представлены в таблицах 4, 5.

Таблица 4.

Удельные потери на корону в хорошую погоду (ВЛ 220 кВ)

Конструкция провода (модель проводника; диаметр проводника)	Изменение среднегодовых потерь
АС 240/32, Ø 21,6 mm	26,67%
АС 300/39, Ø 24,0 mm	0,00%
АС 330/43, Ø 25,2 mm	-13,33%
АСВП 317/47, Ø 22,3 mm	-13,33%
АСВП 295/44, Ø 21,5 mm	-6,67%

Таблица 5.

Удельные потери на корону в хорошую погоду (ВЛ 330 кВ с расщепленной фазой, состоящей из 2 проводов с шагом 40 см)

Конструкция провода (модель проводника; диаметр проводника)	Изменение среднегодовых потерь
2 × АС 300/39, Ø 24,0 mm	18,52%
2 × АС 400/51, Ø 27,5 mm	0,00%
2 × АСВП 317/47, Ø 22,3 mm	-7,41%
2 × АСВП 295/44, Ø 21,5 mm	3,70%

Провода типа АСВП имеют преимущества в плане меньших потерь на корону по сравнению с проводами типа АС того же диаметра. Также, провода АСВП имеют соответствующие потери от возникновения коронных разрядов в отношении проводников АС с более большим диаметром и подобными электрическими и механическими характеристиками.

IV. СНИЖЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ, ГОЛОЛЕДНЫХ и МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОПОРЫ ВЛ

Интенсивная гололедная нагрузка воздушных линий электропередачи является одной из актуальных проблем электроэнергетики в странах с соответствующими погодными условиями.

Пластически деформированные, компактированные провода имеют ряд преимуществ, в том числе - снижение вибрационных нагрузок и самозатухание колебаний.

Пластически деформированные провода имеют почти гладкую внешнюю поверхность (близкую к проводам из сегментированных Ω - и Z-образных алюминиевых проволок). Благодаря этому, вибрация и пляска проводов, а также покрытие льдом снижается.

В то же время, компактированные провода имеют большую жесткость на кручение, меньшую вероятность пляски проводников, повышенную виброустойчивость и способность к самозатуханию колебаний даже по сравнению с проводниками из сегментированных Ω -и Z-образных алюминиевых проволок, поскольку компактированные провода имеют развитую контактную поверхность соседних проволок не только внутри одного слоя, но и между слоями [3].

Пластическая деформация проводов не только значительно повышает механическую прочность, но и в несколько раз снижает относительное удлинение в процессе эксплуатации (независимо от металла). Соответствующие испытания изделий из различных металлов (от стали до меди) проводились в ОАО "ВНИИЖТ" и НТЦ ФСК ЕЭС. [4].

V. УВЕЛИЧЕНИЕ ДЛИНЫ ПРОЛЕТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Пластически деформированные, компактированные провода позволяют увеличить расстояние между опорами воздушной линии до 140% от стандартных пролетов (при отсутствии ограничений, связанных с изменением трассы линии). Это актуально при строительстве новых ВЛ. Например, проведен сравнительный анализ длины пролета для провода АСВП 128/37, установленного на ВЛ 110 кВ, и проводов АС 120/27 и АС 120/19, имеющих одинаковое поперечное сечение и диаметры.

Применение провода АСВП 128/37 позволяет увеличить длину пролета от 212 до 294 м по сравнению с проводом АС 120/27. Провод АСВП 128/37 имеет более высокое содержание стали (отношение площади поперечного сечения алюминия и стали составляет 3,45 для проводника АСВП 128/37 и 4,3 для проводника АС 120/27), равный диаметр (15,2 мм) и повышенную пропускную способность (на 8% выше).

Эффективным примером применения компактированных проводов является проект ВЛ-150 кВ от подстанции №53 до подстанции "Мурманская" (Таблица 8 и Рисунок 7).

Провод АСВП 258/73 является наиболее эффективным вариантом при строительстве новой воздушной линии.

В свою очередь, провод АСВП 216/33 является оптимальным вариантом при реконструкции ВЛ (замене проводников на существующих опорах электропередачи). Наглядным примером является также проект ВЛ 220 кВ, разработанный НТЦ ФСК ЕЭС.

Рис. 7. Расчетные пролеты для ВЛ 150 кВ до подстанции "Мурманская".

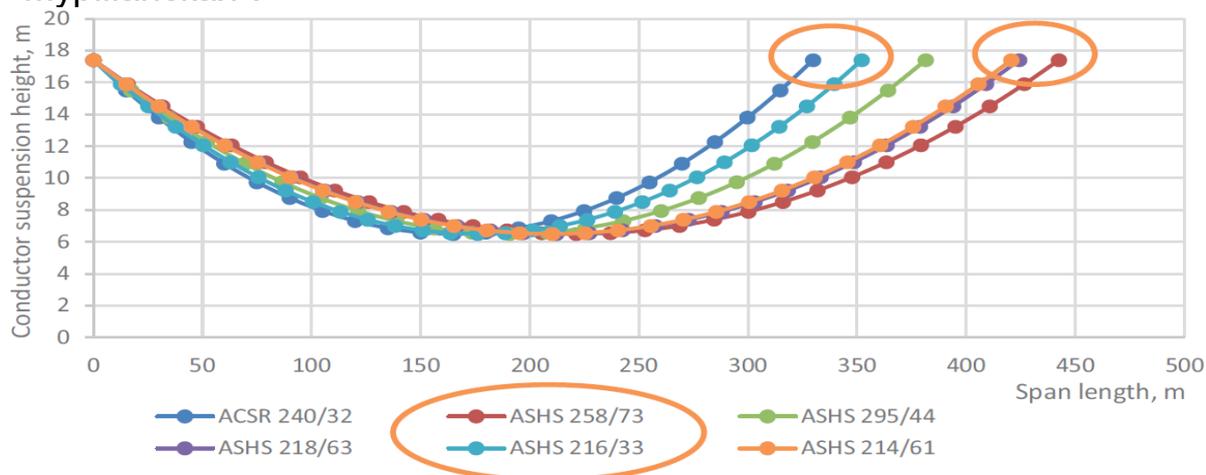


Таблица 6.

Показатели применения проводов на ВЛ 150 кВ до подстанции "Мурманская"

Провод	Разрывное усилие, кН	Максимальное натяжение, Н/м	Диаметр проводника, мм	Масса проводника (1 км), кг	Длина пролета, м
АС 240/32	75,05	3377,33	21,6	921	330
АСВП258/73	151,533	6819,13	21,6	1296,5	443
АСВП 295/44	109	4905,05	21,5	1183	382
АСВП 218/63	130,096	5854,44	19,82	1106,7	424
АСВП 216/33	81,5	3667,51	18,5	855	352
АСВП 214/61	126,672	5700,33	19,6	1080,9	421

Правильное использование компактированных проводов в сочетании с пластически обжатым грозотросом (ТУ 062-2008) или грозотросом с волоконно-оптическим сердечником (ТУ 113-2013) для нового строительства и реконструкции существующих ВЛ 35-750 кВ позволяет:

- значительно увеличить их пропускную способность,
- снизить капитальные и эксплуатационные затраты,
- повысить надежность при воздействии всего диапазона климатических нагрузок.

VI. ПОДДЕРЖАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В ЗОНАХ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Благодаря своим конструктивным особенностям высокотемпературный провод АСВТ дешевле в несколько раз по сравнению с аналогами с длительной допустимой температурой 150 °С.

Характеристики и особенности провода АСВП подтверждены в ходе российско-германских испытаний. Согласно действующему правилам эксплуатации электроустановок, допустимый ток определяется с учетом самой высокой температуры нагрева провода (70°С).

Расчет предельных токов при температурах ниже 45°С может производиться без учета влияния солнечной радиации. Поглощенная солнечная радиация в средних широтах может нагревать провод на 2-3° С (для проводов, работающих в диапазоне температур 60-70°С и выше). Высокопрочный провод АСВП способен выдержать большую нагрузку при равных условиях окружающей среды по сравнению с проводом АС.

Разница в допустимой нагрузке при сравнении проводов составляет 5%. Температура компактированного провода меньше по сравнению с проводом АС, при увеличении тока нагрузки. Разница температур особенно заметна при больших токах (около 5-7%).

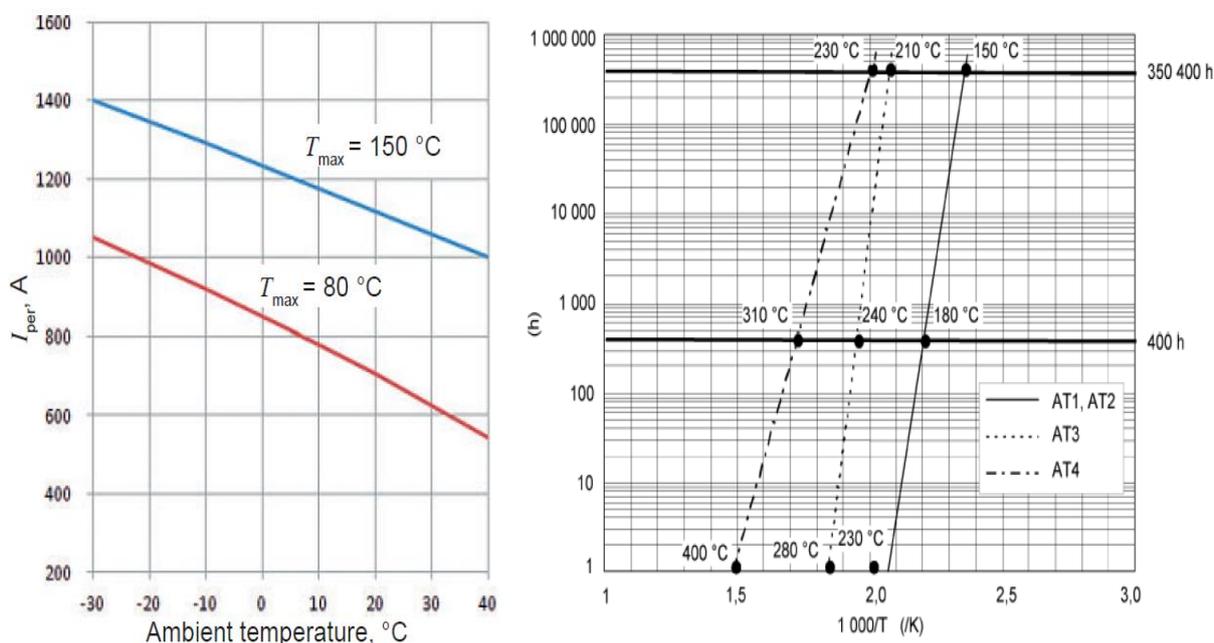
Следует отметить, что, согласно нормативной документации, стандартные провода допускаются к эксплуатации при их температуре до 90° С. Допустимая температура для компактированного провода составляет 150° С.

На Рис. 8 представлена зависимость допустимой токовой нагрузки от температуры воздуха (скорость ветра равна 1.2 м/с) для проводов типа АС и АСВТ в условиях максимальной рабочей температуры 80°С и 150°С соответственно.

Длительно допустимый ток для высокотемпературного компактированного провода на 30-35% превышает значение для стандартного провода того же диаметра.

Таким образом, компактированные провода можно использовать когда необходимо значительно увеличить мощность передаваемой электрической энергии, без увеличения сечения проводов.

Рис. 8. Зависимость токовой нагрузки от температуры окружающей среды для проводов АС и АСВП с одинаковым диаметром при скорости ветра 1,2 м/с: слева теоретическая модель, справа - экспериментальное подтверждение в испытательном центре в Германии.



Таким образом, компактированные провода могут применяться в зонах с высокими температурами окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование пластически спрессованных (компактированных) проводов и грозотросов при новом строительстве и рекон-

струкции ВЛ 35-750 кВ позволяет существенно повысить надежность электросетей при воздействии всего диапазона климатических нагрузок, увеличить пропускную способность ВЛ, снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

Испытания компактированных проводов, проведенные в НТЦ "ФСК ЕЭС" и в двух независимых исследовательских лабораториях Германии, показали ряд технических преимуществ:

- уменьшение потерь электроэнергии на корону;
- уменьшение аэродинамической нагрузки (на 20-35%) и самогашение колебаний;
- снижение обледенения (на 25-40%) и снижение растяжения в несколько раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Working Group B2.26 SIGRE. "Guide for qualifying high temperature conductors for use on overhead lines" (Technical Brochure nr 426, August 2010)
2. Гуревич Л., Власов А. Фокин В. Новые типы пластически деформированных проводов, грозозащитных тросов и ОКГТ [Электронный ресурс]// Электроэнергия. Передача и распределение.- 2015.- № 5 (32). Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/326596>
3. Гуревич Л. М., Даненко В. Ф., Проничев Д. В., Трунов М.Д. Моделирование электромагнитных потерь в различных сталеалюминиевых проводниках //Электроэнергия. Передача и распределение.- 2014.- № 5 (26). С. 68-71.
4. Лопарев В. В., Образцов Ю.В. Об особенностях современных изолированных проводов для воздушных линий электропередачи// Кабели и провода.- 2014.- №6 (349). С. 9-15.
5. Курьянов В. Н., Султанов М. М., Фокин В. А., Тимашова Л. В. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропередачи// Энергия единой сети.- 2016.- № 4 (27). С. 70-78.