

ИННОВАЦИОННЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРОВОДА ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АВТОРЫ:

В.Н. КУРЬЯНОВ,
К.Т.Н.,
ФГБОУ ВО НИУ
«МОСКОВСКИЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

М.М. СУЛТАНОВ,
К.Т.Н.,
ФГБОУ ВО НИУ
«МОСКОВСКИЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

В.А. ФОКИН,
ООО «ЭНЕРГОСЕРВИС»

Л.В. ТИМАШОВА,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Для удовлетворения постоянно растущего спроса на электроэнергию в стране необходимо развивать новые технологии при активном участии как научно-исследовательских институтов, так и производителей оборудова-

ния и т.д. В статье представлена информация об инновационных проводах для воздушных линий электропередачи (ВЛ), параметры которых были определены на основании исследований, моделирования и лабораторных испытаний.

Ключевые слова: инновационный провод; высоковольтные линии электропередачи; потери мощности и энергии; экономическая эффективность; пластически деформированные провода.



Сечение грозотроса
с однонаправленными
скрученными пластически
деформированными проводами

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий при передаче электрической энергии постоянно возникали проблемы, что привело к возникновению целого ряда новых направлений в проектировании и строительстве воздушных линий, в результате чего изменились требования к проводам и конструкциям [1]. Анализ отказов на российских линиях электропередачи [2] показывает, что нарушения, связанные с отказами проводов, составляют от 40 до 55% от всех зарегистрированных нарушений и они увеличиваются примерно на 3–5% в год. Основными причинами повреждений являются гололедные нагрузки (избыточный вес, ветер), усталость, износ из-за эоловой вибрации и пляски проводов, а также коррозия и удары молний.

ПРОВОДА АСВТ, АСВП

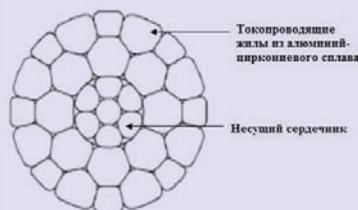


Рис. 1

ПРОВОДА АЕРО-Z

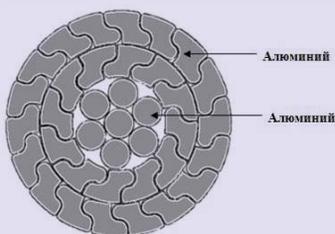


Рис. 2

Таким образом, при оптимизации проводов необходимо учитывать не только текущие несущие способности и технические потери (нагревание проводов вследствие их сопротивления постоянному току, перемагничивание стального сердечника, вихревые токи и потери на корону), но и возможность их применения в различных климатических условиях России.

Практика работы ведущих электросетевых компаний свидетельствует о том, что перспективным направлением в решении проблемы повышения пропускной способности ЛЭП является разработка новых конструкционных материалов для проводов и сердечников линий электропередачи, способных длительно эксплуатироваться при температурах 100–200 °С.

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОВОДА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Принципиально новая технология производства проводников с высоким коэффициентом заполнения, способных работать при высоких температурах нагрева, была создана российскими разработчиками. Это высокотемпературный алюминиевый неизолированный провод, конструктивно состоящий из несущего сердечника и скрученных токопроводящих жил (рис. 1), изготовленных из алюминий-циркониевого сплава. Инновационная конструкция является наиболее перспективной для использования в районах с повышенной гололедной и ветровой опасностью. Сталеалюминиевые неизолированные провода марки АСВП (высокопроч-

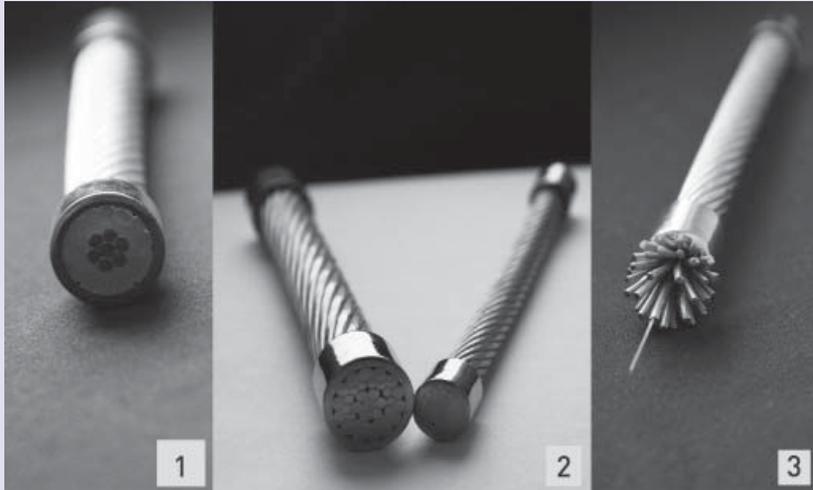
ный) и АСВТ (высокотемпературный) предназначены для передачи электрической энергии воздушными ЛЭП напряжением 35–1150 кВ.

Помимо применения новых материалов при изготовлении проводниковой продукции, наблюдается тенденция изменения конфигурации проволок в составе провода. Так, например, Z-образные проволоки (рис. 2), используемые в проводе марки АЕРО-Z, позволяют решать целый ряд проблем, среди которых: обледенение и налипание снега на проводах; снижение уровня усталости металла в проводе и, как следствие, увеличение жизненного цикла за счет самогашения колебаний; полное предотвращение внутренней коррозии провода; снижение тепловых потерь при транспортировке электроэнергии; пляска проводов и др. Тем не менее, у провода АЕРО-Z имеется ряд недостатков: сложность ремонта, относительно небольшая максимальная температура эксплуатации в 90 °С.

Пластическое деформирование алюминиевых проволок и проволок сердечника позволяет достичь увеличения коэффициента заполнения рабочего сечения значительно более простым и дешевым путем. Конструкция, полученная с применением такой технологии, также способствует увеличению полезного токопроводящего сечения провода, а его внешняя поверхность 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 [3].

Провод обладает высокой стойкостью к воздействиям импульса грозового разряда молнии, величина которого определяется районом подвески. Помимо этого, проводник стоек к термическому

КОМПЛЕКС ПРОДУКТОВ ДЛЯ ВЛ



1. Пластически деформированный провод (АСВП/АСВТ);
2. Грозотрос старой конструкции (большого диаметра) и новой конструкции (меньшего диаметра с той же молниестойкостью);
3. ОКТ (оптический кабель, встроенный в грозотрос).

Рис. 3

МОДЕЛЬ НОВЫХ ПРОВОДОВ С ОДНОНАПРАВ- ЛЕННОЙ СКРУТКОЙ



Рис. 4

СРАВНЕНИЕ АС, АЕРО-Z, АСВП, АСВТ ДИАМЕТРОМ 22,4 ММ

Марка	Диаметр, мм	Разрывное усилие, кН	Масса, кг/км	Ток, А
АС 240/56	22,4	98 253 (100%)	1106 (100%)	610 (100%)
АЕРО-Z 346-2Z	22,4	111 320 (113%)	958 (87%)	852 (140%)
Lumpi-TACSR	22,4	86 260 (113%)	957 (87%)	861 (141%)
J-Power Systems GATACSR	22,4	110 000 (113%)	1100 (100%)	860 (140%)
АСВП 277/79 Energoservice	22,4	163 940 (167%)	1399 (127%)	861 (141%)
АСВТ 258/73 Energoservice	21,6	151 553 (154,2%)	1296,5 (117%)	812,72 (133%)
АС 400/93	29,1	173 715 (100%)	1851 (100%)	860 (100%)
АСВП 371/106 Energoservice	26,0	225 001 (122,79%)	1872 (113%)	1059,9 (123%)
АСВТ 277/79 Energoservice	22,4	163 940 (167%)	1399 (127%)	1199 (197%)

Таблица 1

воздействию тока короткого замыкания, возникающему в процессе эксплуатации при однофазных и двухфазных коротких замыканиях на землю.

Экспериментально подтвержденная рабочая температура провода

марки АСВТ — 150 °С, предельно допустимая — 210 °С.

Другие производители используют Z-образную проволоку, которая показана на рис. 2. Именно она используется в проводе марки АЕРО-Z.

Такие провода представляют собой новый класс компактированных проводов с повышенной прочностью и пропускной способностью. Они пластически деформируются для получения высокой прочности проводников типов АСВТ, АСВП [3, 4], аттестованы ПАО «ФСК ЕЭС»

и имеют значительно более высокую механическую прочность и допустимые нагрузки по току. Проволоки нового грозотроса односторонне скручены, состоят из отдельно пластически деформированных проводов, что показано на рисунке на стр. 70. Компактированный проводник со скрученными проволоками отличается от классических конструкций, так как после скручивания сердечника его плотность по сечению повышается от сжатия, а затем аналогичная процедура применяется к проводкам, и происходит скручивание. Пример такой конструкции приведен на рис. 4.

Пластическая деформация со степенью обжатия поперечного сечения, рассчитанной для каждого из материалов, предотвращает раскручивание провода и взаимное перемещение его элементов

под действием сил на растяжение, а из-за механического упрочнения прочность алюминиевых проволок возрастает в 1,5–2 раза, в то время как разница в проводимости составляет менее 1% [5]. Стоимость проводников АСВП, АСВТ и реконструкции ВЛ с этими проводниками не выше, чем с обычными проводами, а в расчете на жизненный цикл даже ниже, но увеличение мощности (несколько десятков процентов для АСВП и до 80–100% для АСВТ) нивелирует любую разницу в цене, снижение же нагрузок на опоры уменьшает растягивающие нагрузки, нагрузки от ветра и мокрого снега, и в конечном счете повышает надежность воздушной линии.

При этом меньший по сравнению со стандартными проводами диаметр проводов АСВП обеспечит снижение: аэродинамического сопротивления и, следовательно,

ветровых нагрузок; уровня внутренней коррозии в проводнике; интенсивность гололедообразования на внешней поверхности; пляски проводов.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЫХ ПРОВОДОВ

Параметры новых проводов лучше, чем у старых, но они немного тяжелее, отлично подходят для новых линий, которые планируется построить в регионах с избыточными ветровыми или ледовыми нагрузками. Сопоставление основных характеристик представлено в табл. 1, 2, 3, 4.

Провод АСВТ имеет значительно более высокую прочность и про-

СРАВНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВОДОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАЗВИТИИ ЛЭП

№	Производитель	Провод	Диаметр, мм	Масса, кг/км	МТПС, А	Разрывное усилие, кН	Сопротивление, Ом/км	Стрела провеса при T_{max} , м
Традиционные провода								
1	Стандартные сталеалюминиевые провода	АС 240/32	21,6	921	605	72,7	0,121	13,2
2		АС 300/39	24,0	1 132	710	89,2	0,098	11,5
3		АС 400/51	27,5	1 490	825	115,4	0,075	11,7
Инновационные провода (с улучшенными характеристиками)								
4	«Энергосервис»	АСВТ 461/64 высоко-температурный	26,9	1 802	1668	170,5	0,063	9,3
		АСВТ 371/106	26	1882	1476	220,4	0,0776	7,8
		АСВТ 277/79	22,4	1400	1199	163,9	0,1040	7,7
		АСВП 277/79 high-strength	22,4	1400	862	163,9	0,1040	7,9
5	Lumpi-Berndorf (Австрия)	TACSR/HACIN 212/49	21	939	861	95,4	0,1283	10,5
6	Lumpi-Berndorf (Австрия)	TACSR/ACS 212/49	21	914	871	95,4	0,1283	11,6
7	J-Power Systems (Япония)	GTACSR 217/49	20,3	1015	840	110,7	0,136	9,1
8	Nexans (Франция)	AERO-Z 366-2Z	23,1	1014	732	116,2	0,092	9,9
9	ЗМ (США)	ACCR 405-T16	20,1	684	1059	70,0	0,129	8,2

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ СТАНДАРТНОГО АС И ПРЕДЛАГАЕМОГО АСВП (АСВТ). ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ НОВЫХ ПРОВОДОВ, ВАЖНЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЛ, ЗНАЧИТЕЛЬНО ПРЕВОСХОДЯТ ПАРАМЕТРЫ СТАНДАРТНЫХ ПРОВОДОВ ПРИ СОПОСТАВИМОЙ СТОИМОСТИ. ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЫПОЛНЕНЫ ПРИ TEDS = 20 % RBS

Параметры проводов для сравнения	АС 150/24	АСВП, АСВТ 162/47	
	величина параметра	величина параметра	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 пролета 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 пролетов: 250 / 300 м	6,29 9,26	3,32 4,87	-47,2
Провес при температуре окружающей среды -5 °С для зоны 3 по ветровой и ледовой нагрузке, м: 250/300	6,66 9,63	4,41 6,04	-33,8
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 расчет относительной стоимости проводов	100 %	110–120 %	

Таблица 3

пускную способность, чем провода АС и АЕРО-Z, а также целый ряд других типов проводов тех же диаметров.

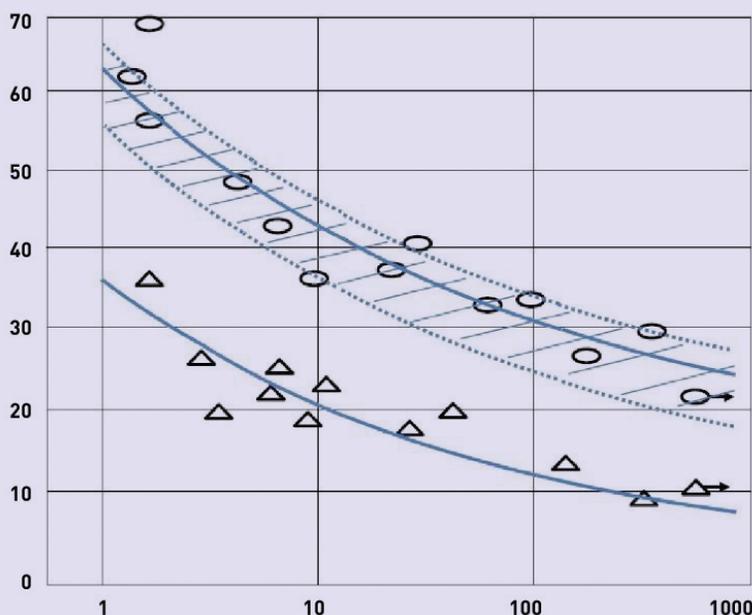
Из этого следует, что новые провода АСВП и АСВТ расширяют рамки проектирования ВЛ и позволяют решить задачи, которые раньше решить было нельзя или решение которых было связано с большими затратами.

В случае применения проводов на больших переходах можно уменьшить высоту концевых анкерных опор перехода до 25–30% при условии соблюдения стандартных размеров опорных башен; это, в свою очередь, приведет к снижению стоимости всего перехода. Кроме того, с уменьшением высоты опоры башни их индуктивность уменьшается, соответственно, уменьшается вероятность

прямых ударов молнии. Также следует иметь в виду, что уникальные технологические решения в производстве новых проводов позволяют предложить значительное снижение цены по сравнению с другими проводами с подобными же характеристиками.

При использовании новых проводов увеличивается прочность на разрыв и снижение удельных

ПРОГНОЗ УСТАЛОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ПРОВОДОВ АСВП, АСВТ (ЗАШТРИХОВАННАЯ ОБЛАСТЬ)



Результаты испытаний как функция $\sigma(N)$ для однослойных (эллипсы) и многослойных (треугольники) проводов АС воспроизведены на основе данных [7] N в мегациклах

Рис. 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРОВОДОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ НА ОСНОВЕ НОВОЙ ТЕХНОЛО- ГИИ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ СВИВКИ (Ø11,0 ММ)

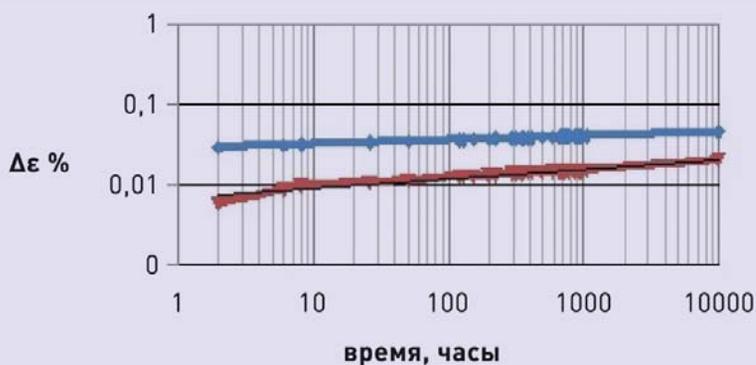


Рис. 6

потерь электроэнергии при той же текущей нагрузке, аэродинамические нагрузки (до 35%) и образование льда (до 25%), коэффициент расширения температуры проводника (15%) только из-за конструктивных особенностей проектирования. В случае применения для ремонта или модернизации старых ВЛ может быть рекомендовано применение других новых проводов (с более тонким сердечником и меньшим весом) [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

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 [8]. На рис. 5 показан прогноз усталостной характеристики для проводов АСВП и АСВТ.

Чтобы избежать этой проблемы с нашими изделиями в будущем, особое внимание уделяется испытаниям на ползучесть. Дополнительные испытания на ползучесть проводят при постоянной нагрузке $Teds = 20\% RBS$ для ОКГТ на экспериментальном стенде ЭССП, а для грозотросов (ТУ 062) и стальных канатов (ГОСТ 3064) с традиционной свивкой слоев при $Teds = 30\% RBS$ на стендах АО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Результаты испытаний, проведенных АО «НТЦ ФСК ЕЭС», показали:

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ГРОЗОВЫМ РАЗРЯДАМ ПРОВОДОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ ДИАМЕТРА

Номер образца	Конструкция, материал	Значения импульса, Кл	Процент возможных разрядов [9]	Механическая прочность после удара	Рисунок
Провод 1	7 стальных проволок с алюминиевой лакировкой обычной конструкции	80	≈ 85%	0,4...0,5 RTS	7
Провод 2	19 оцинкованных проволок обычной конструкции	85	≈ 90%	0,5...0,6 RTS	8
Провод 3	19 оцинкованных проволок однонаправленной скрутки, компактированных	110...140	> 99%	1,0 RTS	9

Таблица 4

- модуль упругости пластически деформированного однонаправленного витого грозотроса Ø11,0 мм примерно на 7% выше, чем модуль упругости обычного грозотроса Ø15,5 мм;
- грозотрос пластически деформированный Ø11,0 мм растягивается на 0,0150% от первоначальной длины в течение 1040 ч, в то время как обычный грозотрос Ø15,5 мм растягивается на 0,0532% за тот же период. Это означает, что у пластически деформированного провода Ø11,0 мм ползучесть почти в четыре раза меньше, чем у обычного провода Ø15,5 мм. Прогнозирование усталостного поведения в течение 25-летнего периода отличается почти в 4–5 раз в пользу провода сечением 11,0 мм.

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 упрощенной форме. В итоге мы имеем приблизительные выражения для ползучести: $\epsilon_{\text{греер}} = at^b$, где $a = 0,0278$, $b = 0,0511$.

В целом можно сделать вывод о том, что применение новой технологии свивки в сочетании с пластической деформацией слоев проволок в процессе изготовления существенно снижает удлинение, уменьшает интенсивность их нарастания с течением времени, вне зависимости от материала (сталь, алюминий-сталь или медь).

Алюминиевые провода позволяют дополнительно снижать температуру, но их использование связано с рядом негативных факторов, в числе которых низкая коррозионная стойкость алюминизированного покрытия в зоне контакта с нержавеющей трубкой оптического модуля; низкое сопротивление проводов заземления с алюминиевым покрытием. При выборе типа защитного покрытия для стальных проводов необходимо учитывать не только возможное изменение температурного поля в проводах при аналогичных значениях тока короткого замыкания, но и зависимость его значения от удельного сопротивления провода заземления, а также сопротивление и устойчивость к коррозии.

РАСЧЕТ

Расчет параметров проводов для окончательного выбора

оптимального решения провода будет автоматически специальной исследовательской программой под названием ВОПДУС, рис. 10.

ПРОВОДА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Российские разработчики создали изделия, обладающие одновременно высокой механической прочностью, незначительно изменяющейся длиной при колебаниях температуры, устойчивостью к коррозии, электрической проводимостью меди, имеющие лучшие аэродинамические характеристики, стандартные диаметры, достаточно технологичные при серийном производстве. При этом изделия совместимы со стандартной арматурой. Компактированные, пластически деформированные несущие тросы марки МК способны выполнять функции не только несущего троса, но и усиливающих проводов, электрических соединителей контактной подвески и проводов фидерных линий. Последние состоят из 36 уплотненных медных проволок различного диаметра и имеют при этом большее сечение, повы-

СОСТОЯНИЕ ПРОВОДА 1



Рис. 7

СОСТОЯНИЕ ПРОВОДА 2



Рис. 8

СОСТОЯНИЕ ПРОВОДА 3



Рис. 9

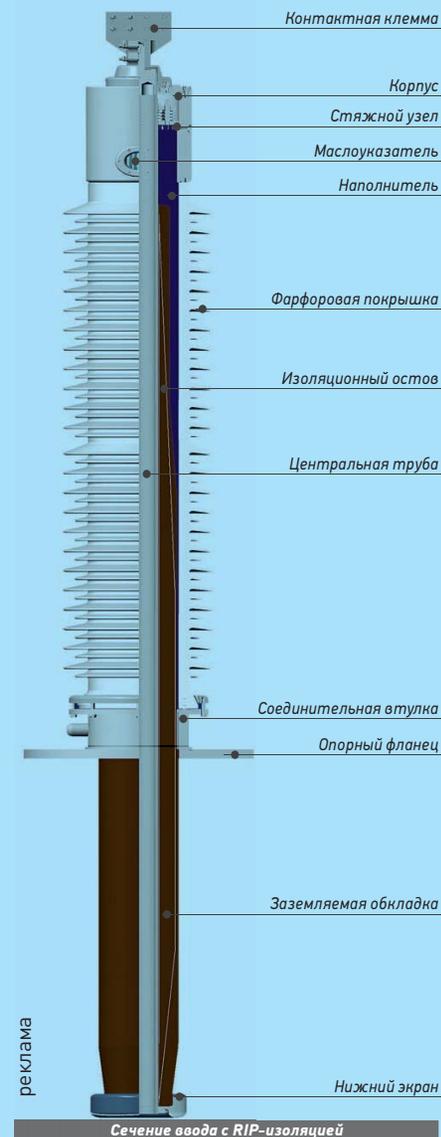
шенное разрывное усилие и более низкое удельное сопротивление.

Именно пример медного несущего троса контактной сети железных дорог наиболее ярко иллюстрирует

преимущество пластически деформированных изделий, повышающих механическую прочность до уровня бронзового, но с проводимостью чистой меди без использования сплавов или дорогих технологий.

Преимущества вводов с RIP-изоляцией

- Надежность
- Безопасность
- Технологичность
- Долговечность
- Экологичность
- Отсутствие необходимости в обслуживании
- Простота и легкость эксплуатации



ВЫВОД

Инновационная технология пластической деформации отмечена Патентами Германии и России и обеспечивает важные и перспективные преимущества. Кроме того, все новые продукты, несомненно, имеют очень перспективную особенность — при их использовании существенно повышается пропускная способность и надежность ЛЭП. В дополнение к преимуществам, перечисленным выше, новые провода уже показали стойкость к ударам молнии и последовательным циклическим воздействиям, механическую прочность, стойкость к изгибу и сочетанию нагрузок растяжения — изгиб (тяжение — эоловая вибрация), а также усталостную прочность.

Сравнительная оценка параметров стальных алюминиевых проводов различных типов и механических расчетов прочности в различных условиях окружающей среды показали, что сталеалюминиевые пластически деформированные провода позволяют гибко решать дизайнерские и строительные проблемы ЛЭП энергосистем.

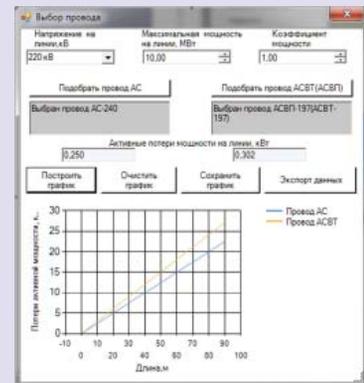
Математические методы моделирования с последующей серией экспериментов были использованы для демонстрации возможности применения сталеалюминиевых проводов с четным числом скрутки алюминиевых проволок, скрученных в противоположных направлениях, чтобы уменьшить потери электрической мощности за счет перемагничивания стальных стержней.

Пропускная способность высоковольтных линий может быть увеличена за счет применения АСВП на величину до нескольких десятков процентов по сравнению со стандартными проводами [3].

ПРИМЕР РАБОТЫ ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА



Рис. 10



Меньший диаметр проводов АСВП, АСВТ по сравнению со стандартными проводами с той же возможностью передачи позволяет снизить нагрузку на опоры и провисание проводов.

Данная публикация является результатом сотрудничества НИУ «Московский энергетический институт» и ООО «Энергосервис», занимающееся разработкой инновационных продуктов для ЛЭП. Более подробную информацию вы можете найти на сайте <http://www.energoserwise.com>. Авторы выражают благодарность руководству ПАО «Россети» за признание и стремление к инновациям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Transmission Line Reference Book, 345 KV and Above / Second Edition, Copyright 1992 by the Electric Power Research Institute Inc., Prepared by Project UHV.
2. Yakovlev L.V., Kaverina R.S., Dubinich L.A. Complex of works and proposals to improve the reliability of OHL on design and operation stages / Proceedings of the 3-rd Russian Science-Pract. Conf. with Intl participation "Power Lines 2008: The design, construction and operating experience and scientific and

technical progress". Novosibirsk, 3–5 June 2008. Novosibirsk, 2008. P. 28–49.

3. RF Patent № 132241 "Steel-aluminum conductor for Overhead Power Transmission Line" / Fokin V.A., Vlasov A.K., Petrovic V.V., Zvyagintsev A., Frolov V. Publ.: 09.10.2013. Bull. № 25
4. Kolosov S.V., Fokin V.A. A new generation of OHL conductors: plastically deformed conductors // Electricity: Transmission & Distribution. 2014. № 1. P. 90–92.
5. Electrotechnical Materials Handbook. Vol. 3 / Koritskii Ed. V., Pasyukov V.V., Tareev B.M. L.: Energoatomizdat, 1988.
6. Vlasov A.K. Innovative solutions for overhead lines // Electricity: transmission and distribution. 2015. № 1 (28). P. 48–51.
7. Transmission Line Reference Book, Wind-induced Conductor Motion / Second Edition, 2006 by the Electric Power Research Institute Inc.
8. Lint M. Russia and CIGRE: experience plus innovation // Electricity: transmission and distribution. 2013. № 5 (20). P. 126–134.
9. Gorin B.N., Lewitow V.I., Skiljewa A.K. Lightning Measurements on Ostankino-Television Tower in Moscow // Elektrichestvo. 1972. Vol. 2. P. 24–29.
10. Kuryanov V.N., Kush L.R., Sultanov M.M., Fokin V.A. Research of technical loss of electrical energy and economic efficiency of innovative messenger wire in overhead contact line system of railways // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2016. № 01-02 (189-190). P. 50–58.
11. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Fokin V.A. Innovative messenger wire in overhead contact line system of railways // Equipment of Railways. 2016. № 2 (34). P. 66–70.