

ПРИМЕНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ АСВТ ДЛЯ ВЛ 110 КВ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

АВТОРЫ:

В.Н. КУРЬЯНОВ,
НИУ «МЭИ»

Е.С. ШВЕЦ,
НИУ «МЭИ»

Л.В. ТИМАШОВА,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В.А. ФОКИН,
ООО «ЭНЕРГОСЕРВИС»

В современном электросетевом комплексе России существует проблема физического и морального износа оборудования и, как следствие, его низкой энергоэффективности. Важнейшим показателем энергетической эффективности электроэнергетической системы является уровень потерь энергии. В условиях роста потерь электроэнергии в электрических сетях

увеличивается количество вопросов, требующих безотлагательного решения. Среди них: реконструкция и техническое перевооружение электрических сетей; совершенствование проектных решений путем использования прогрессивных технических разработок, современных технологий и материалов, повышающих безотказность, долговечность и ремонтпригодность линий электропередачи.

Ключевые слова: электросетевой комплекс; инновационные проводники; потери электроэнергии; совершенствование проектных решений; высокотемпературный провод; реконструкция и техническое перевооружение.



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуален вопрос поиска путей повышения энергоэффективности электросетевого комплекса, одним из которых является использование инновационных проводов, имеющих лучшие характеристики, чем провода АС: обеспечение большей пропускной способности, механической прочности, устойчивости к высоким температурам, старению и агрессивным воздействиям со стороны окружающей среды.

Оптимизация потерь электроэнергии в электрических сетях требует незамедлительного внедрения некоторых мероприятий:

- модернизация электросетевого оборудования и внедрение новых технологий энергосбережения;
- научно-исследовательские, проектные и опытно-конструкторские работы, связанные с расчетами, анализом, нормированием и снижением потерь электроэнергии в электрических сетях.

Вследствие постоянного увеличения энергопотребления во многих

городах и регионах страны возникает проблема недостаточной пропускной способности линий электропередачи.

С целью повышения экономической и эксплуатационной надежности при сооружении и реконструкции воздушных линий (ВЛ) электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения необходимо:

- совершенствование нормативно-правовой базы, организация систем мониторинга баланса и потерь;
- совершенствование проектных решений путем использования прогрессивных технических решений и современных технологий и материалов, повышающих безотказность, долговечность и ремонтпригодность линий электропередачи;
- экономическое обоснование надежности ВЛ электропередачи с учетом ее назначения;
- использование конструктивных решений на основе арматуры с улучшенными электромеханическими характеристиками и повышенной надежностью;
- проведение инструментального

исследования элементов ВЛЭП, эксплуатируемых более 30 лет, с целью определения объемов реконструкции или модернизации.

ПРИМЕНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ВЫСОКО- ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ АСВТ

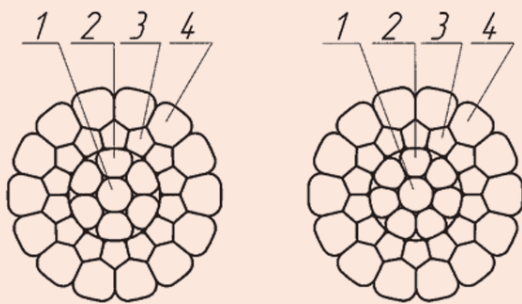
В качестве приоритетных направлений политики модернизации электросетевого строительства рассматриваются реконструкция и техническое перевооружение морально устаревшего и физически изношенного оборудования. При сроках службы от 50 лет предусматривается полное восстановление электропередачи на железобетонных и металлических опорах, при меньших сроках — реконструкция активной части ВЛ.

Высокопрочный неизолированный сталеалюминевый провод АСВТ изготавливается в трех вариантах [1, 3].

У первого варианта (рис. 1) конструкция металлического оцинкованного сердечника представлена в виде центральной проволоки и повива из шести проволок. Вокруг сердечника сделаны два повива из проволок разного сечения по 14 шт. каждый.

У второго варианта (рис. 1) конструкция металлического оцинкованного сердечника представлена в виде центральной проволоки и повива из семи проволок. Как и у провода первого исполнения, вокруг сердечника сделаны два повива из про-

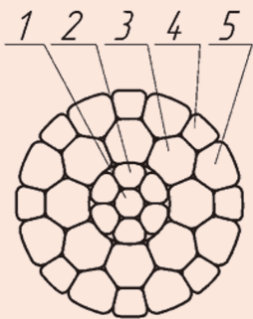
ПРОВОД ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ (ВЫСОКОПРОЧНЫЙ) АСВТ (АСВП) ИСП.1, ИСП.2



1 — центральный повив стального сердечника; 2 — проволоки стального сердечника; 3 — алюминиевые проволоки первого повива; 4 — алюминиевые проволоки второго повива

Рис. 1

ПРОВОД ВЫСОКО-ТЕМПЕРАТУРНЫЙ (ВЫСОКОПРОЧНЫЙ) АСВТ (АСВП) ИСП.3



1 — центральный повив стального сердечника; 2 — проволоки стального сердечника; 3 — алюминиевые проволоки первого повива; 4,5 — алюминиевые проволоки второго повива

Рис. 2

волок разного сечения по 14 шт. каждый.

У третьего варианта (рис. 2) сердечник выполнен из 7 проволок, аналогично как для варианта 1. Вокруг сердечника сделан последовательно первый повив из 8 алюминиевых проволок, второй повив, чередующийся из 8 проволок большего диаметра и 8 проволок меньшего диаметра.

Во всех вариантах исполнения провода АСВТ (АСВП) сердечник пластически деформирован по наружным поверхностям проволоки со степенью обжатия площади поперечного сечения 10–12,5%. Наружные поверхности проволок пластически деформированы со степенью обжатия площади поперечного сечения 11,5–13,5%.

Стальной сердечник изготавливается из оцинкованных проволок с временным сопротивлением

ЗАВИСИМОСТЬ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДЛЯ $T_{пр} = 80^{\circ}\text{C}$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ВЕТРА

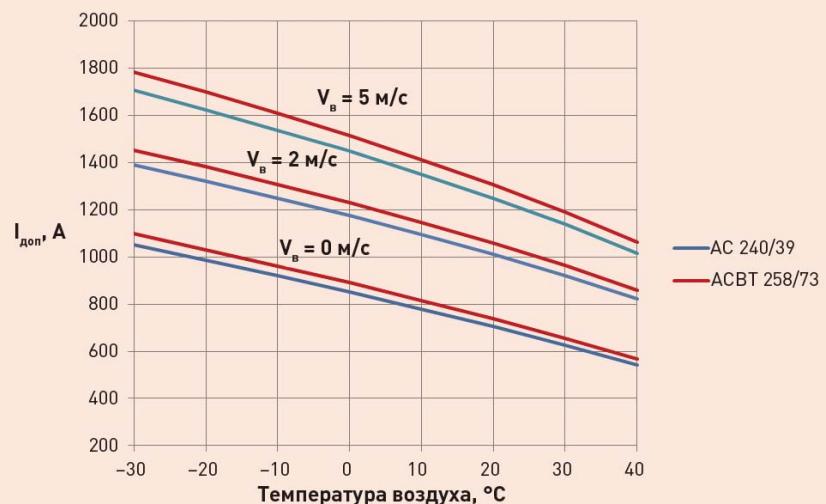


Рис. 3

разрыву не менее 1960 Н/мм² по ГОСТ 7372-79 «Проволока стальная канатная. Технические условия». Сердечник покрывается слоем термостойкой смазки, толщиной 0,3±0,7 мм, стойкой к воздействию высокой температуры. Поверх слоя смазки последовательно располагаются повивы проволок из сплава на основе алюминия, включающего цирконий 0,20±0,40 вес.%.

Отличие данной конструкции от стандартных сталеалюминиевых проводов АС состоит в том, что перед свивкой стальной сердечник и проволоки повивов пластически деформируют. За счет применения технологии компактирования провода предотвращается раскручивание провода и взаимное перемещение его элементов под действием сил на растяжение.

В отличие от стандартного провода токопроводящие проволоки у АСВТ

выполнены из алюминиево-циркониевого сплава. Добавки циркония в алюминиевый сплав повышают прочность и температуру рекристаллизации, при этом практически не снижают его проводимость.

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

Повышение технического ресурса провода или грозозащитного троса за счет пластического обжатия связано еще с несколькими важными особенностями. В частности, низкое аэродинамическое сопротивление за счет гладкой поверхности и самопогашение колебаний препятствуют преждевременному повреждению проволок и разрушению системы «провод — арматура» от вибрационных нагрузок.

В свою очередь, закрытая конструкция обеспечивает консервацию смазки в грозотросе или сердечнике провода, что в комплексе с инновационной технологией цинкования обеспечивает превосходную коррозионную защиту.

Отдельно стоит отметить и низкую эксплуатационную вытяжку пластически деформированных изделий вне зависимости от металла, из ко-

торого они сделаны. Ползучесть в таких изделиях практически отсутствует, поэтому нет необходимости в предварительной вытяжке.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК

Действующими Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) допустимая токовая нагрузка по нагреву проводов определяется с учетом наиболее высокой температуры провода 70 °С. Опыт эксплуатации и многочисленные исследования показали, что без ущерба для прочности провода можно повысить его температуру до 90 °С.

Расчет предельных токовых нагрузок в районах с максимальной температурой воздуха ниже 45 °С допускается производить без учета

влияния солнечной радиации. Поглощенная проводом энергия солнца в умеренных широтах может повысить температуру провода, работающего в диапазоне температур 60–70 °С и более, всего на 2–3 °С, что лежит в пределах точности расчета [2].

На рис. 3 представлен график зависимости токовой нагрузки от температуры воздуха для $t_{np} = 80$ °С при различных скоростях ветра. Провод марки АСВТ в сравнении с проводом АС способен выдержать большую нагрузку при равных условиях окружающей среды. Разница допустимой нагрузки для сравниваемых проводов составляет 5%. При увеличении тока в проводе температура провода АСВТ ниже, чем у провода АС. Разница значений особенно заметна при больших нагрузках и достигает 5–7%.

Следует отметить, что, согласно нормативной документации провода марки АС разрешено эксплуатировать при температуре провода до 80–90 °С в то время, как производитель проводов марки АСВТ заявляет допустимую температуру t_{np} в 150 °С.

На рис. 4 представлена зависимость допустимой токовой нагрузки от температуры воздуха при скорости ветра 1,2 м/с для проводов АС и АСВТ в условиях максимальной для них температуры эксплуатации 80 °С и 150 °С соответственно. При одинаковом диаметре длительно допустимый ток для высокотемпературного провода на 30–35% превышает значение для стандартного провода. Данная характеристика позволяет использовать инновационный провод в случаях, когда необходимо существенно повысить токовые нагрузки на линии электропередачи, не увеличивая сечения, а также в районах с высокими температурами окружающей среды.

ЗАВИСИМОСТЬ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОВОДОВ АС И АСВТ ОДИНАКОВОГО ДИАМЕТРА ПРИ СКОРОСТИ ВЕТРА 1,2 М/С

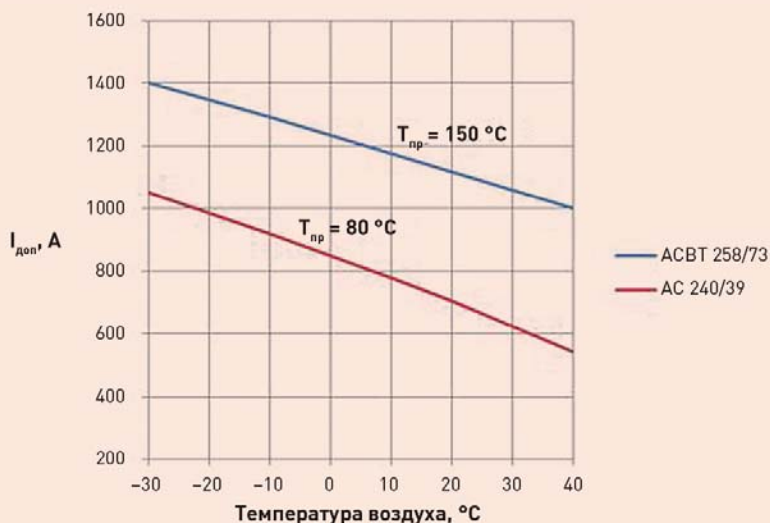


Рис. 4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕАЛЮМИНЕВЫХ ПРОВОДОВ АСВТ НА СНИЖЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ВНУТРИ ПРОВОЛОК И СОКРАЩЕНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ОТ СТАЛЬНОГО СЕРДЕЧНИКА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЛ 110 КВ

Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты молекулярных токов приобретают в большей или меньшей степени преимущественную ориентацию по направлению поля либо против его направления (ферромагнетики и диамагнетики). В результате чего суммарный момент молекулярных токов становится отличным от нуля, а тело — намагниченным. Мерой намагниченности вещества является векторная величина, равная сумме магнитных моментов молекулярных токов, заключенных в единице объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}, \quad (1)$$

где \vec{p}_{mi} — магнитный момент i -го молекулярного тока;

$$\vec{p}_{mi} = IS, \quad (2)$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАВНИВАЕМЫХ ПРОВОДОВ

Номинальное сечение, мм ²	Диаметр провода, мм	Стальной сердечник		Алюминиевая часть провода		Токовая нагрузка, А
		Число проволок	Диаметр проволоки, мм	Число проволок	Диаметр проволоки, мм	
АС 205/27	19,80	7	2,20	24	3,30	541,7 А
АС 240/39	21,60	7	2,65	26	3,40	610,0 А
АСВТ 128/36	15,20	1	2,70	14	1,95	690,1 А
		6	2,55	14	2,80	

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, РЕШАЕМЫЕ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АСВП/АСВТ

Проблема	Решение
Потери на корону	Увеличение напряжения возникновения короны относительно АС равного диаметра
Увеличение пролета или стрелы провеса	Увеличение длины пролета до 40%
Реконструкция старых ВЛ без замены опор	АСВП/АСВТ, конструкции 4, 6, 7
Увеличение пропускной способности без удорожания	Увеличение пропускной способности до 100% без значительного удорожания относительно АС
Ветровые нагрузки	Снижение ветровой нагрузки на провод АСВП (АСВТ) относительно АС — 25–40%
Вибрационные нагрузки	Низкое аэродинамическое сопротивление и самогашение колебаний препятствует преждевременному разрушению системы «провод — арматура»
Гололед	Интенсивность образования ГИО на компактных проводах ниже на 10–12 %

Таблица 2

где S — поперечное сечение проводника, м²; I — ток в проводнике.

Намагниченность связана с магнитной индукцией B в веществе и напряженностью магнитного поля H соотношением:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}. \quad (3)$$

В изотропной среде:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} - \vec{J}, \quad (4)$$

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}, \quad (5)$$

$$\chi = \mu - 1, \quad (6)$$

где χ — относительная магнитная восприимчивость вещества; μ — относительная магнитная проницаемость вещества.

Согласно теореме о циркуляции вектора H , циркуляция вектора напряженности магнитного поля по некоторому контуру равна ал-

ИЗМЕНЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ В ПРОВОДЕ АСВТ 128/36 ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОВОДА АС 205/27 И АС 240/32

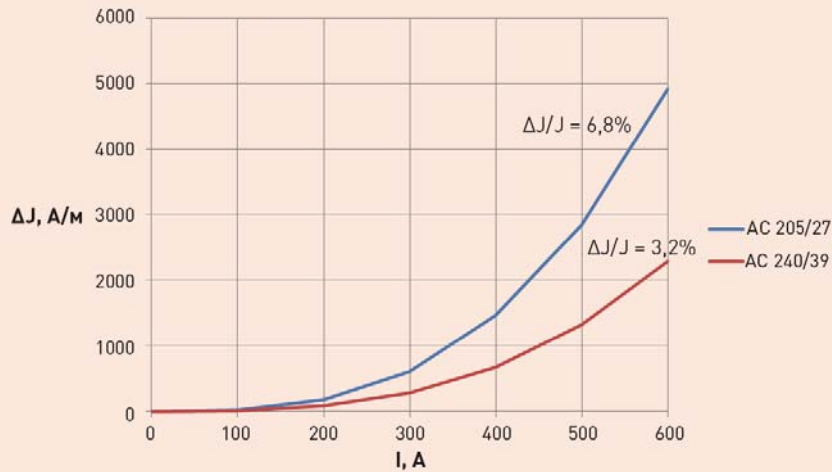


Рис. 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА

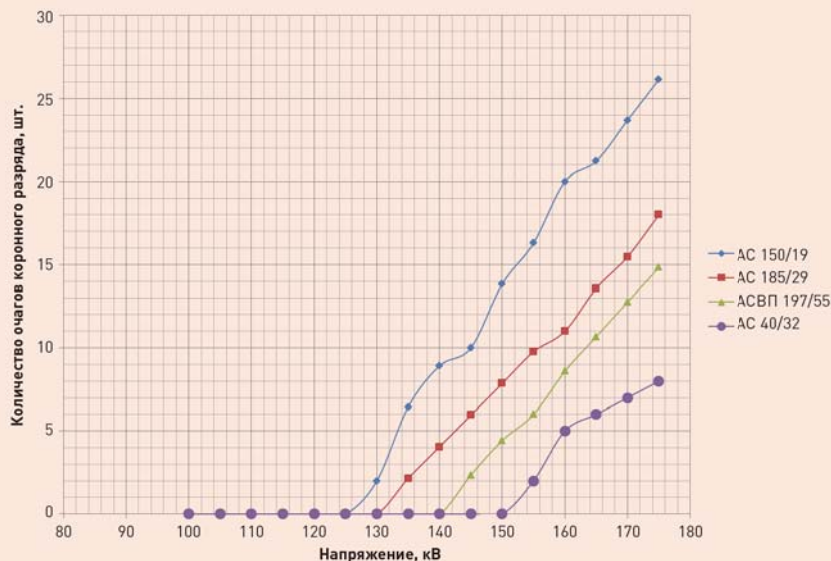


Рис. 6

гебраической сумме макроток, охватываемых этим контуром:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} \quad (7)$$

или

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{макро}} \quad (8)$$

где $\vec{j}_{\text{макро}}$ — плотность макроскопических токов.

$$\vec{j}_{\text{макро}} = \frac{\vec{I}_{\text{макро}}}{S} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r^2 \quad \text{при } r < R \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} = I \quad \text{при } r > R \quad (11)$$

Следовательно,

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2} \quad \text{при } r < R \quad (12)$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{при } r > R \quad (13)$$

Тогда величина магнитной индукции равна соответственно:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Ir}{2\pi R^2} \quad \text{при } r < R \quad (14)$$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad \text{при } r > R \quad (15)$$

Объемная плотность энергии:

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 r^2} = \frac{dW}{dV} = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\Delta W}{\Delta S \cdot l} \quad (16)$$

Энергия магнитного поля:

$$W = \int_V w dV = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV = \int_V \frac{BH}{2} dV \quad (17)$$

Для оценки намагниченности в проводе АСВТ относительно стандартного АС были рассмотрены несколько вариантов. Марки проводов подбирались с близкими по значению допустимыми токами. Основные характеристики данных проводов представлены в таблице 1.

Изменение величины намагниченности для пары проводника АСВТ и АС определим по формуле:

$$\Delta J = \frac{\mu_0 I^3}{4\pi \Delta W}, \quad (18)$$

где ΔW — изменение энергии магнитного поля, Дж.

$$\Delta W = V \Delta \omega \quad (19)$$

$$\Delta \omega = \frac{(B_{AC})^2 - (B_{АСВТ})^2}{2\mu_0} \quad (20)$$

В ходе расчетов установлено, что с увеличением токовой нагрузки в электросети изменение намагниченности в проводе возрастает. На рис. 5 представлен график изменения намагниченности в проводе АСВТ 128/36 относительно провода АС 205/27 и АС 240/32.

Относительное снижение намагниченности высокотемпературного провода АСВТ в сравнении с проводом АС составляет 3–7% для различных вариантов.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА НА КОРОНУ

Коронный разряд появляется вблизи проводящей поверхности с малым радиусом кривизны. Микровыступы шероховатой поверхности провода могут быть источниками разряда, и шероховатость провода способствует активизации ионизационных процессов и появлению коронных разрядов. На напряжение зажигания короны влияют множество факторов: температура, давление и влажность воздуха; шероховатость поверхностей проводов; конструктивное решение фазы; положение фазы относительно других фаз.

В испытательном центре АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проведены испытания

опытных образцов проводников на возникновение коронных разрядов, результаты которых приведены на рис. 6.

По результатам проведенных сравнительных испытаний установлено, что для проводов одинакового диаметра ($\emptyset 18,8$ мм) напряжение возникновения коронного разряда на проводе АСВП производства ООО «Энергосервис» выше напряжения возникновения коронного разряда на проводе марки АС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численных экспериментов проведено исследование эффективности применения современных высокотемпературных проводов марки АСВТ в электросетевом комплексе, получены данные по предельным нагрузкам, сокращению тепловыделения и намагниченности в процессе эксплуатации.

По результатам проведенных сравнительных испытаний установлено, что для проводов одинакового диаметра напряжение возникновения коронного разряда на проводе АСВП выше напряжения возникновения коронного разряда на проводе марки АС.

Относительное снижение намагниченности высокотемпературного провода АСВТ в сравнении с проводом АС составляет 3–7%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости инновационных высокотемпературных проводов в случаях, когда необходимо существенно повысить токовые нагрузки на линии электропередачи, не увеличивая сечения, а также в районах с высокими температурами окружающей среды.

Экономический эффект от применения проводов АСВТ при ре-

конструкции электрических сетей напряжением 110 кВ достигается за счет снижения потерь на намагничивание и перегревание провода, возникновения потерь на корону, а также увеличения пропускной способности сети и повышения надежности электроснабжения. Учитывая тот факт, что существующие на данный момент ЛЭП находятся в эксплуатации более 25–40 лет и исчерпали свой ресурс, замена их на новые крайне необходима. В расчете на 1 км провода сети 110 кВ для Волгоградской области дисконтированный срок окупаемости замены стандартного провода не превышает 5 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Фокин, А.К. Власов, В.И. Фролов. Несущий трос контактной сети железной дороги // Патент России № 2509666. 2014. Бюл. №8.
2. РД34.20.547 (МТ 34-70-037-87) Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи.
3. Патент на полезную модель №132241 РФ. Сталеалюминевый провод для воздушной линии электропередачи. / В.А. Фокин. — Оpubл. 10.09.2013.
4. Л. Гуревич и др. Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминевых проводах различной конструкции // Электроэнергия. Передача и распределение. №5 (26) сентябрь — октябрь 2014. С. 72–75.
5. V.N. Kuryanov, M.M. Sultanov, V.A. Fokin. Innovative high-efficiency wires of energy grids power transmission lines // Энергия единой сети. 2016. Special Issue. С. 96–103.
6. Е.С. Швеиц, Т.А. Донец, В.Н. Курьянов. Исследование эффективности практического применения инновационных проводов для воздушных линий электропередач 110 кВ // Электроэнергетика глазами молодежи: VII Международная научно-техническая конференция, Казань, 2016.
7. В.Н. Курьянов, М.М. Султанов, В.А. Фокин, Л.В. Тимашова. Инновационные высокоэффективные провода для линий электропередачи // Энергия единой сети. 2016. № 4 (27). С. 70–78..