

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИ ОБЖАТЫХ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ (АСВП), ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ (АСВТ) ПРОВОДОВ, ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ (ТУ062-2008) И ОКГТ (ТУ113-2013) ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И НОВОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЛ

А.К. Власов, к.т.н., управляющий директор ООО «Энергосервис»

Уважаемые коллеги!

На основании рассмотрения карт климатического районирования территории РФ (ПУЭ 7, гл. 2.5) многие районы нашей страны находятся в зоне самых неблагоприятных климатических воздействий по их величине и суммарному эффекту (особенно юг, Дальний Восток, Крайний Север). Более чем 50% территории РФ составляют районы по давлению ветра, гололеду — III и выше, по продолжительности гроз — 40 часов и выше, встречаются протяженные зоны с частой и интенсивной «пляской». Предлагаемые нами изделия как раз наиболее эффективно должны использоваться в таких экстремальных условиях, они специально для них создавались.

Тем не менее, основные задачи при проектировании являются общими для всех ВЛ. Это:

- высокая величина пропускной способности;
- снижение потерь при передаче электрической энергии от источника к потребителю;
- высокая надежность работы в конкретных регионах размещения в течение заданного срока эксплуатации при воздействии всего спектра реальных нагрузок (гололед, ветер, грозовые разряды, короткое замыкание, агрессивность среды).

Решение всех перечисленных основных задач должно осуществляться с минимальными затратами и в соответствии с действующими нормативными требованиями (ПУЭ изд. 7, ТТ к отдельным видам применяемого оборудования).

К большому сожалению, вплоть до настоящего времени, не существует единых технических требований и правил для использования проводов, отличных от АС проводов по ГОСТ 839–80. Все пун-

кты ПУЭ изд. 7 относятся только к проводам этого типа, а также к грозотросам по ГОСТ 3063–80 (С, ТК 35; С, ТК 50; С, ТК70). В 2008 году ОАО «ФСК ЕЭС» были выпущены технические требования к грозотросам и ОКГТ СТО 56947007-29.060.50.015–2008, но их первая редакция по значению основополагающих требований надежности и работоспособности противоречила не только ПУЭ, но и не соответствовала здравому смыслу. Например, там было написано, что максимально допустимую нагрузку (МДРН) и среднеэксплуатационную (СЭН) должен задавать производитель, хотя их уровень однозначно определяет ПУЭ (табл. 2.5.7), а допустимая потеря механической прочности от одного удара молнии может составлять до 25% от механической прочности (МПР) грозотроса (п. 3.7). Указанная величина потерь прочности по умолчанию распространялась также на вибрационные испытания (эоловая вибрация и «пляска»), что приводило к необходимости под каждый вид испытаний делать отдельный образец, а суммарный коэффициент запаса прочности принимаемого изделия получался меньше единицы. Конечно, при этом совершенно законный ЗАК на применение могло получать и получало практически любое канатное изделие. Даже канаты по ГОСТ 3062, 3063, запрещенные к применению письмом ФСК ЕЭС №ЧА/29/57 от 22.06.2009 г., успешно бы прошли такие испытания. По проводам ситуация еще хуже. Все производители новых инновационных конструкций вынуждены подстраиваться под существующие нормы АС проводов по ГОСТ 839–80 и действующих для них правил, что иногда создает непроходимые, неоправданные тех-

тически, запреты на применение прогрессивных технических решений.

В этой связи нам кажется, что создание единых технических требований для проводов и грозотросов, новая редакция ПУЭ должны в ближайшее время исправить ситуацию, связанную с отсутствием нормативной базы для внедрения инновационных решений в сфере применения новых конструкций проводов и грозотросов с учетом использования всех их преимуществ.

Коллектив компании ООО «Энергосервис» совместно с заводом-производителем российско-итальянским предприятием АО «Редаелли ССМ» предлагает к применению на ВЛ следующие изделия: провода высокопрочные (АСВП), провода высокотемпературные (АСВТ), грозотросы для защиты ВЛ от прямых ударов молнии (ТУ062–2008) и ОКГТ оптический кабель, встроенный в грозотрос (ТУ113–2013).

Подробно об особенностях конструкции, технологии, испытаниях грозотросов рассказано в литературе [1–7], поэтому перечислим здесь только их подтвержденные испытаниями основные преимущества:

1. Абсолютная стойкость к ударам молнии максимальной мощности.
2. Стойкость к последовательному циклу воздействий: удары молнии — вибрационные нагрузки (эоловая вибрация, «пляска»).
3. Повышенная механическая прочность позволяет использовать тросы значительно меньших диаметров и веса в одинаковых по длине пролетах ВЛ.
4. Высокая стойкость конструкции к сочетанию нагрузок растяжение–изгиб (тяжение–эоловая вибрация). Обеспечивается применением авторской технологии сочетания линейной свивки проволок и пластической деформации изделия в целом.
5. Максимальная коррозионная стойкость Zn покрытий группы ОЖ +5%, нанесенных с использованием единственного в РФ агрегата оцинкования, обеспечивающего идеальную адгезию, заданную максимальную толщину и равномерность Zn слоев гарантировано на всех проволоках конструкции.
6. Предельный для канатных витых изделий модуль линейной упругости E . Обеспечивается применением авторской технологии пластической деформации изделия в целом. Позволяет за счет снижения линейных удлинений уменьшать величину стрел провеса при воздействии предельно низких температур и максимальных значений толщины стенки гололеда.
7. Минимальный допуск на значение МПР и веса изделия (менее 1%) обеспечивается разработанной

технологией изготовления — финишной пластической деформацией изделия в целом и фактической его калибровкой.

По результатам всех проведенных испытаний на образцах отсутствовали повреждения и разрушения, а МПР не изменялась от заданного производителем значения.

Всеми перечисленными преимуществами обладают также наши ОКГТ (ТУ113–2013). Отличие в конструкции заключается в замене центральной проволоки на оптический модуль (ОМ) с разным количеством оптических волокон (ОВ), размещенных внутри модуля в заливочном геле.

В настоящее время положительный опыт эксплуатационного применения грозотросов ТУ062–2008 составляет 6 лет, на многие новые ВЛ от 35 до 750 кВ в течение этого времени навешано более 13 000 км. Тем не менее, при реконструкции старых ВЛ, даже при наличии фактического запрещения в качестве грозотроса зачастую используют не имеющие аттестации обычные стальные канаты по ГОС 3062, 3063. Аргументацией для этого служит то, что «старые» опоры не выдерживают вес и тяжения наших изделий. Если отбросить факт вопиющего нарушения основного технического регламента ОАО «Россети» и рассмотреть техническую сторону проблемы, то можно прийти к следующим выводам:

1. Максимальное превышение веса грозотросов по ТУ062–2008 над стальными канатами одинаковых номинальных диаметров приблизительно составляет 11%. Допуск на диаметр грозотросов, согласно п. 6 упомянутых выше преимуществ менее 1%, поэтому можно считать, что фактические значения диаметров, сечения, веса и разрывного усилия соответствуют номиналу. У стальных канатов картина совершенно иная: по техническим требованиям ГОСТ 3241 максимальный допуск на диаметр составляет +6%, это значит, что сечение и вес изделия могут быть на самом деле больше на 6% от номинала, и фактическая суммарная разница в весе изделий составит всего 5%. Суммарно такое превышение на 1 метр распределенной нагрузки от веса получается 20–30 грамм. Следовательно, этой величиной можно пренебречь как малой величиной существенно более высокого порядка в отношении значений других вертикальных нагрузок, например, гололеда.

2. Тяжение, безусловно, является более веским аргументом, но решение этого вопроса однозначно вытекает из рассмотренного ниже примера расчета напряжений и стрел провеса для ВЛ 500 кВ Енисей–Итатская. Заданное проектом ограничение

Таблица 1

$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{р}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{а}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{с}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{гр}}, ^\circ\text{C}$	$b_{\text{а}} = b_{\text{в}}, \text{мм}$	$q_4, \text{даН/мм}^2$	$q_5, \text{даН/мм}^2$	$H_{\text{пр}}, \text{м}$	$f_{\text{габ}}, \text{м}$
-60	-5,0	-0,8	38	15	20	80	18	17,7	14

усилия на опоры всего 6118 даН, что составляет для грозотроса ТУ062–2008 диаметр 11,0 мм всего 44% МПР. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Режимы изменения напряжений и стрел провеса для определенного расчетом габаритного пролета стального каната по 11.0-ГОСТ 3063 равного 346,2 м, значения коэффициентов климатических нагрузок стандартные и максимально допустимая температура нагрева 90 °С (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

Номер режима	Температура, °С	Ветер	Гололед, мм	Уд. нагрузка
1	-5,0	q_5	20	γ_7
2	-5,0	$q_4 = 0$	20	γ_3
3	-5,0	80	0	γ_6
4	-0,8	$q_4 = 0$	0	γ_1
5	15	$q_6 = 0,06 \cdot q_4$	0	γ_9
6	-60	$q_4 = 0$	0	γ_1
7	38	$q_4 = 0$	0	γ_1
8	70	$q_4 = 0$	0	γ_1
9	90	$q_4 = 0$	0	γ_1
10	150	$q_4 = 0$	0	γ_1
11	210	$q_4 = 0$	0	γ_1

Данные расчета однозначно показывают, что при существенных ограничениях усилий от тяжения проводов на опоры навеска грозотросов по ТУ062–2008 с уменьшенными диаметрами, по сравнению с традиционно используемыми стальными канатами по ГОСТ 3062, 3063, позволяет даже снизить стрелы провеса грозотроса. Для рассматриваемой в примере ВЛ использование грозотроса ТУ062–2008 диаметром 8.0 мм вместо стального каната по ГОСТ 3063 диаметром 11,0 мм могло бы позволить увеличить длину габаритного пролета на 8%.

Для тех же исходных данных и режимов совершенно иная картина получается, если усилия на опоры выше или равно по значению 13965 даН (МПР грозотроса ТУ 062–2008) (рис. 2).

Значение габаритного пролета стального каната 11,0 по ГОСТ 3063 уже составило 469 м, но заменить этот стальной канат по ГОСТ 3063 возможно в этом габаритном пролете нашим грозотросом ТУ 062–2008 диаметром 9,2 мм с разрывной группой 190 кг/мм².

Конечно, увеличение расстояний между опорами до максимальных значений является актуальной задачей нового строительства ВЛ. Для решения этой проблемы необходим комплексный подход к

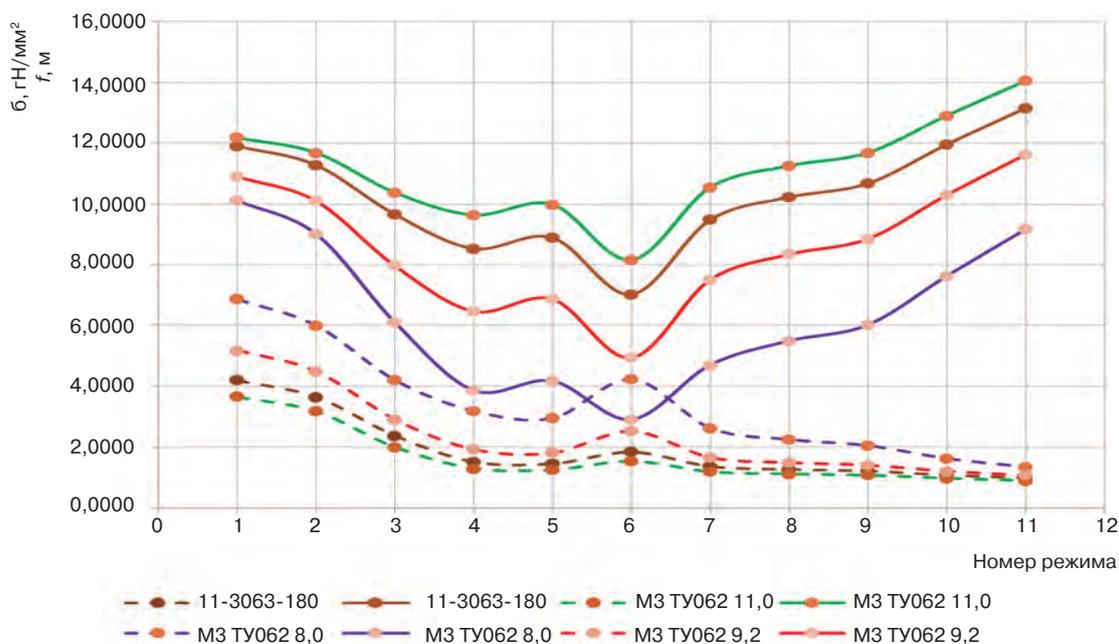


Рис. 1

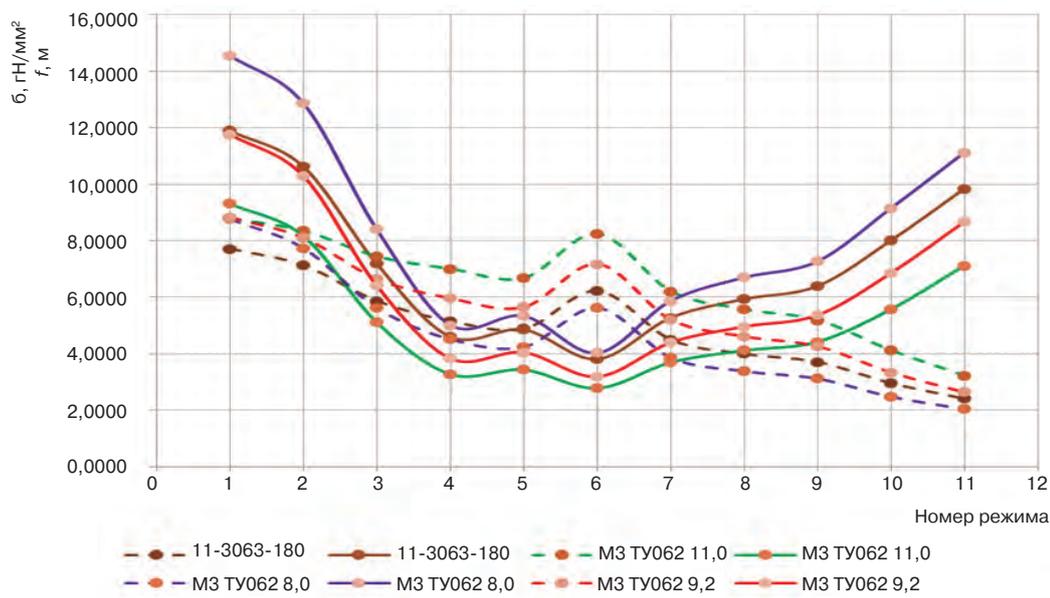


Рис. 2

Таблица 3

$t_{-}, ^\circ\text{C}$	$t_{r}, ^\circ\text{C}$	$t_{9}, ^\circ\text{C}$	$t_{+}, ^\circ\text{C}$	$t_{rp}, ^\circ\text{C}$	$b_{9} = b_{y}, \text{мм}$	$q_{4}, \text{даН/мм}^2$	$q_{5}, \text{даН/мм}^2$	$H_{np}, \text{м}$	$f_{габ}, \text{м}$
-55	-10,0	-10	35	20	20	80	20	9,9	11,7

проектированию линий. Для предлагаемых изделий это означает безусловное использование проводов нашей конструкции в системе с нашими же грозотросами. В приведенном выше примере в качестве основного провода был выбран провод АС 500/64, в расчетный пролет которого уже вписывали наш высокопрочный грозотрос.

Ниже приведен расчет для ВЛ 110 кВ габаритного пролета провода АСВП 128/37 в сравнении с проводами приблизительно одинаковых сечений и диаметров: АС 120/27; ТАСР 120; АССР 297-Т16. Допустимая нагрузкой на опоры 7264 даН. Здесь значения напряжений и стрел провеса всех остальных проводов приведены в габаритном пролете нашего провода (табл. 3).

Режимы изменения напряжений и стрел провеса для определенного расчетом габаритного пролета провода АСВП 128/37, равного 337,8 м, значения коэффициентов климатических нагрузок стандартные и максимально допустимая температура нагрева 90°C. (табл. 4, рис. 3).

Таблица 4

Номер режима	Температура, °С	Ветер	Гололед, мм	Уд. Нагрузка
1	-10,0	q_5	20	γ7
2	-10,0	$q_4 = 0$	20	γ3

3	-10,0	80	0	γ6
4	-10,0	$q_4 = 0$	0	γ1
5	15	$q_6 = 0,06 * q_4$	0	γ9
6	-55	$q_4 = 0$	0	γ1
7	35	$q_4 = 0$	0	γ1
8	70	$q_4 = 0$	0	γ1
9	90	$q_4 = 0$	0	γ1
10	150	$q_4 = 0$	0	γ1
11	210	$q_4 = 0$	0	γ1

Значение габаритного пролета удалось увеличить в приведенном примере по сравнению с проводом АС 120/27 на 27%, используя провода АСВП 128/37. Интересно, что при большем количестве стали (соотношение 3,45 по отношению к 4,3 у АС 120/27) наш провод имеет примерно тот же диаметр, а его проводимость на 10% выше. Похожие результаты можно получить сравнением наших проводов АСВП и АСВТ с конструктивным исполнением I и II по СТО ТУ 120–2013 года с аналогичными проводами АС с соотношением сечений Al к стали равным 4,3. Таким образом, наши провода могут быть рекомендованы к применению на замену упомянутым проводам АС проводов для районов по гололеду ветру на-

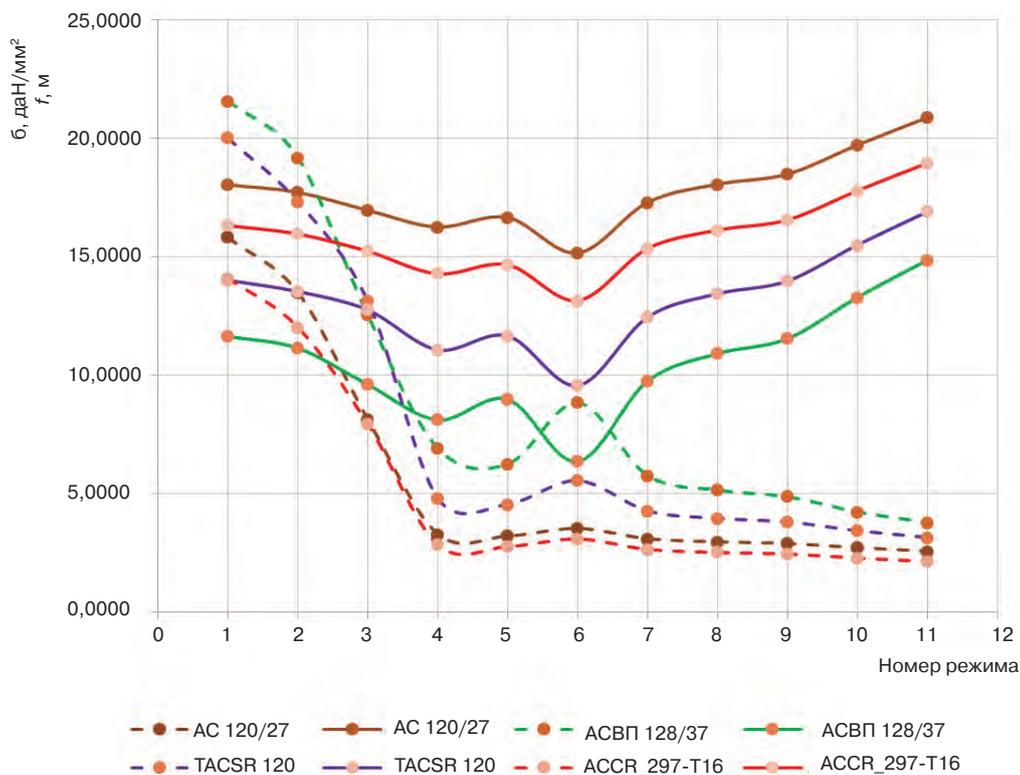


Рис. 3

чая с III, так как заданные проектами стрелы провеса при использовании наших проводов можно получить в пролетах на 20–30% длиннее, уменьшить количество промежуточных опор на ВЛ и, соответственно, сократить затраты на строительство. В задачи наших ближайших перспективных разработок также входит создание конструкций с сердечником повышенной прочности, но с уменьшенными значениями сечений по стали, что сможет позволить при тех же тяжениях, что и у АС проводов, существенно снизить их вес и уменьшить длину пролета на 20–30%, не снижая показатели проводимости.

АСВП и АСВТ провода с конструктивным исполнением по группе III позволяют при приблизительно том же весе, тяжениях и диаметрах АС проводов на 25 % поднять их проводимость. Сравнение также проведено с проводами АС, у которых соотношение Al к стали равно 4,3.

Интересен также эффект использования АСВП (АСВТ) провода 371/106 взамен провода 300/204 (соотношение Al к стали 1,4). Мы можем получить при одинаковых стрелах провеса и габаритных пролетах приблизительно 30% снижение веса и 25% увеличение проводимости нашего провода.

Конечно, показать работоспособность и полностью использовать конструктивные преимущества наших проводов и грозотросов возможно только при идеальной совместной работе грозотроса, а также провода и сердечника в устройстве крепления (соединения). В нашем случае эта задача решена ЗАО «Электросетьстройпроект», разработавшим специально для наших конструкций проводов и грозотросов устройства крепления и соединения спирального типа, прошедшие совместно с проводами и грозотросами весь необходимый цикл совместных аттестационных испытаний.

Предлагаемые нами к использованию на ВЛ пластиковые обжатые провода типа АСВП и АСВТ отличаются от проводов классической конструкции тем, что после свивки сердечник пластиково обжимается. Аналогичной операции подвергают и токоведущие повивы после свивки. В первом случае используется Al обычных марок, во втором с добавками заданного количества Zr, увеличивающего предельно допустимую температуру использования этих проводов с 90 до 210 °С.

Необходимые для представления и расчетов технические характеристики всех наших изделий, а также их вид, перечень и некоторые результаты ат-

тестационных испытаний представлены в литературе [1–7], на нашем сайте <http://w.w.energoserwise.com> и на изображенных в презентации таблицах.

Основные преимущества проводов АСВП и АСВТ перед стандартными АС проводами по ГОСТ 839–80:

Повышенная механическая прочность и компактность конструкции позволяет: использовать провода при тех же значениях диаметров и увеличить расстояния между опорами минимально на 20–30% без существенного изменения проводимости ВЛ. При увеличении прочности сердечника и уменьшении диаметров проводов при сохранении проводимости возможно уменьшение до 30% их веса и увеличение габаритных пролетов до 20%.

При одинаковых значениях механической прочности изделий на 20–30% поднимается его проводимость, а также повышается предельно допустимое значение тока при одинаковых максимально допустимых температурах.

Уменьшение стоимости строительства и повышенная надежность работы проводов в связке с грозотросами или ОКГТ для районов по давлению ветра, гололеду — III и выше.

Высокая стойкость конструкций к сочетанию нагрузок растяжение — изгиб (тяжение и эоловая вибрация). Обеспечивается применением авторской технологии сочетания линейной свивки проволок сердечника и токоведущих слоев и пластической деформации сердечника, и изделия в целом.

Высокотемпературные провода — это совершенно новый класс изделий, не имеющих аналогов ни в ПУЭ изд. 7, ни в ГОСТе 839–80, поэтому их применение в настоящее не оговорено никакими нормативными документами. Их основная цель за счет повышения температуры рекристаллизации Al сплава повысить пропускную способность и значения предельно допустимого тока, а также увеличить максимально допустимую температуру использования провода.

В табл. 4 приведено сравнение характеристик проводов АС (ACSR), AERO-Z компании NEXANS [5] и проводов АСВТ производства АО «Редаелли ССМ».

Применение проводов AERO-Z значительно улучшает токовые характеристики проводов по сравнению с проводами АС, снижает сопротивление и погонную массу. В то же время провода АСВТ имеют более высокую прочность при примерно одинаковой по сравнению с проводами AERO-Z пропускной способности. Возрастание по отношению к проводу АС массы компенсируется более высокой прочностью провода АСВТ. Иными словами, провода АСВТ позволяют увеличить длину пролета, обеспечить большую пропускную способность при меньшем диаметре, чем провода АС (см. табл. 4).

Обоснованный подход к выбору провода показывает, что провода АСВП, АСВТ, грозозащитные тросы ТУ 062–2008 и ОКГТ ТУ 113–2013 позволяют расширить традиционные рамки проектирования ВЛ и решать задачи, которые ранее были неразрешимы или решение их сопровождалось значительными трудностями, а также при наличии конкретного технического задания, требования для выпуска этих изделий с заранее программируемыми свойствами.

Выводы

1. Сравнительная оценка параметров сталеалюминиевых проводов различных типов и стандартных грозотросов с предлагаемыми по ТУ 062–2008 и ТУ 113–2013, их расчеты на механическую прочность при различных режимах климатических условий показали, что сталеалюминиевые пластически обжатые провода АСВП и АСВТ в сочетании с грозотросами (ТУ 062–2008) или ОКГТ (ТУ 113–2013) позволяют гибко решать проблемы проектирования и нового строительства ВЛ. Стоимость проводов АСВП незначительно превышает стои-

Таблица 4
Сравнение характеристик проводов АС, AERO-Z, АСВП

Марка	Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление, Ом/км	Разрывное усилие, Н	Масса, кг/км	Ток, А
АС 240/56	22,4	241/56,3 (100% / 100%)	0,1197 (100%)	98253 (100%)	1106 (100%)	610 (100%)
AERO-Z 346-2Z	22,4	345,65 (143% / 0%)	0,0974 (81%)	111320 (113%)	958 (87%)	852 (140%)
АСВП 277/79	22,4	277,3/78,8 (115% / 140%)	0,104 (87%)	163940 (167%)	1399,6 (127%)	861,77 (141%)
АСВТ 277/79	22,4	277,3/78,8 (115% / 140%)	0,104 (87%)	163940 (167%)	1399,6 (127%)	1199,6 (197%)

Примечание. Значения величин для провода АС взяты за 100%.

мость проводов АС, а более высокая прочность позволит получить экономию капитальных затрат за счет снижения количества опор. В случае использования в новом проекте проводов АСВТ значительно сократит стоимость затрат в сравнении с импортными аналогами. Пропускная способность ВЛ за счет применения проводов АСВП и АСВТ может быть повышена на величину от нескольких десятков до нескольких сот процентов по отношению к проводам АС (ACSR).

При реконструкции старых ВЛ провода АСВП, АСВТ с усиленным сердечником по сравнению с проводами АС той же пропускной способности позволят снизить нагрузки на опоры и уменьшить стрелы провиса.

Показаны перспективы и преимущества применения грозотросов ТУ 062 (ОКГТ ТУ 113), проводов АСВП и АСВТ для регионов с повышенными значениями ветровых, грозовых и гололедных воздействий.

Комплексное грамотное применение проводов АСВП и АСВТ вместе грозотросами ТУ 062–2008 или ОКГТ ТУ 113–2013, а также использование совместно с ними спиральной арматуры, специально разработанной для их ЗАО «Электросетьстройпроект», при новом строительстве и реконструкции ВЛ могут существенно повысить ее надежность при воздействии всего спектра климатических нагрузок, увеличить пропускную способность, снизить затраты.

Литература

1. О повышении служебных свойств канатов для молниезащиты воздушных линий электропереда-

чи / А.К. Власов, В.А. Фокин, В.В. Петрович, В.И. Фролов, В.Ф. Даненко // Сталь. — 2011. — № 7. — С. 78–81

2. Исследование стойкости грозозащитных тросов к ударам молнии и механическим воздействиям / А.К. Власов, В.А. Фокин, В.Ф. Даненко, В.И. Фролов, Е.Ю. Кушкина // Сталь. — 2013. — № 9. — С. 66–70.

3. Патент РФ № 2490742. Способ изготовления стального троса / Фокин В. А., Власов А. К., Фролов В. И. Оpubл. 20.08.2013. Бюл. № 23.

4. Патент РФ № 2447525 Способ изготовления высокотемпературного провода для воздушной линии электропередачи и провод, полученный данным способом / Фокин В. А., Власов А. К., Петрович В.И., Звягинцев А.В., Фролов В. И. Оpubл. 10.04.2012. Бюл. № 10.

5. Колосов С.В. Новое поколение проводов ВЛ: пластически деформированные провода / С. В. Колосов, В. А. Фокин // Электроэнергия: передача и распределение. — 2014. — № 1. — С. 90–92.

6. Патент РФ № 132241. Сталеалюминевый провод для воздушной линии электропередачи / Фокин В. А., Власов А. К., Петрович В. В., Звягинцев А. В., Фролов В. И. Оpubл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

7. Гуревич Л.М. Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминиевых проводах различной конструкции / Л. М. Гуревич, В.Ф. Даненко, Д.В. Проничев, М. Д. Трунов. — 2014 // Электроэнергия: передача и распределение — № 5 (26). — С. 62–65.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Л.М. Гуревич, В.Ф. Даненко, Д.В. Проничев, М.Д. Трунов,
Волгоградский государственный технический университет*

Развитие промышленности и социальной сферы приводит к постоянному росту потребления электроэнергии, что в густонаселенных районах может быть обеспечено [1] только за счет увеличения пропускной способности уже существующих воздушных линий (ВЛ). Эту проблему решают созданием имеющих более высокую стоимость конструкций проводов с увеличенным токоведущим сечением или с повышенными рабочими температурами, характеристики которых выше чем у классических сталеалюминиевых проводов АС.

Анализ отказов элементов ВЛ показывает [2], что нарушения, связанные с выходом из строя проводов и грозозащитных тросов, составляют от 40 до 55% от общего количества всех нарушений и увеличиваются на $\approx 3-5\%$ в год. Основными причинами повреждения являются гололедные нагрузки, износ от действия вибрации, «пляски» и коррозии. Поэтому при оптимизации конструкции проводов необходимо учитывать не только пропускную способность и эксплуатационные потери (нагрев проводов из-за их активного сопротивления, затраты на перемагничивание стального сердечника, потери при коронных разрядах), но и эксплуатационную прочность в различных климатических условиях.

По мнению разработчика новых проводов [3], высокий уровень потерь в российских электросетях определяется не только изношенностью электросетевого оборудования, но и устаревшей нормативной базой, регламентирующей производство проводов. Рассмотрим тормозящее действие нормативной базы на примере разработанного

ООО «Энергосервис» и ОАО «Северсталь» нового класса проводов с повышенными прочностью и пропускной способностью — пластически обжатых высокопрочных проводов АСВП [4, 5], прошедших аттестацию межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС». Провода АСВП обладают существенно большими прочностью и токовой пропускной способностью по сравнению с проводами АС, что достигнуто повышением конструктивной плотности проводов за счет последовательного пластического обжатия сердечника и токоведущих повивов после свивки [4, 5]. В отличие от проводов с высоким процентом заполнения сечения за счет использования профилированной (Z-образной, Ω -образной и трапециевидальной) проволоки, в пластически обжатых проводах используют традиционные круглые алюминиевые проволоки, а при пластическом обжатии достигается более высокая плотность заполнения сечения, чем при сборке профилированных. Пластическая деформация со степенью обжатия площади поперечного сечения провода 8–9% не допускает раскручивания провода и взаимного смещения элементов под действием растягивающих сил, приводит за счет наклепа к повышению прочности алюминиевых проволок до 2 раз, а разница в удельной электропроводности мягкого АМ и наклепанного АТ алюминия не превышает 1% [6]. Затраты на провода АСВП и переоборудование ВЛ для них незначительно превышают аналогичные затраты при использовании проводов АС, но повышение пропускной способности (от нескольких десятков до нескольких сот процентов) и прочности перекрывает дополнительные затраты, снижает нагрузки на опоры, тяжение, ве-

тровую и гололедную нагрузки и, в конечном итоге, повышает надежность ВЛ. Меньший диаметр проводов АСВП по сравнению с АС той же прочности позволяет снизить: «пляску» проводов; аэродинамический коэффициент; уровень внутренней коррозии в проводе; уровень усталости металла в проводе; возможность обледенения и налипания снега на почти цилиндрическую наружную поверхность провода. В работе [7] экспериментально доказано, что жесткость на кручение компактных проводов выше крутильной жесткости традиционных даже при близких значениях диаметров. По многим своим характеристикам провод АСВП близок к эксплуатационным свойствам компактных проводов *Aero-Z* или *ACSS/TW* [8] при значительно более низкой стоимости.

Следует отметить высокую грозостойкость проводов АСВП вследствие протяженного контакта значительной площади между витками алюминиевой проволоки, первый и второй повивы которой выполнены с линейным касанием проволок с одинаковым шагом свивки в одном направлении. Конструкции с линейным касанием широко используются в грузоподъемных тросах, их основным преимуществом перед канатами с точечным контактом заключается в сочетании гибкости с высокими износостойкостью и прочностью [9]. Однако в соответствии с п. 2.3. ГОСТ 839–80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия» скрутка повивов должна проводиться в противоположные стороны. В ПУЭ-7 [10] нет прямого указания на направления свивки многопроволочных проводов, но в соответствии с п. 2.5.78 «для снижения потерь электроэнергии на перемагничивание стальных сердечников в сталеалюминиевых проводах ... рекомендуется применять провода с четным числом повивов алюминиевых проволок». Снижение потерь на перемагничивание при четном числе повивов возможно только при свивке проволок в противоположные стороны.

Таким образом, использование проводов со свивкой в одном направлении с линейным касанием проволок, обеспечивающих сочетание гибкости, высоких износостойкости и прочности и, следовательно, позволяющих резко уменьшить выход из строя проводов, не рекомендуется только из-за вероятности повышенных потерь на перемагничивание стальных сердечников.

Проведем ориентировочную оценку возможных величин потерь по методике [11], по которой при передаче переменного тока необходимо учитывать поверхностный эффект и магнитные потери в сталь-

ном сердечнике. Выделяющиеся в проводе тепловые потери P не превышают

$$P = k_n \times k_m \times R_{20} \times I_d^2, \quad (1)$$

где k_n – зависящий от конструкции провода коэффициент, учитывающий поверхностный эффект для переменного тока ($k_n = 1,0–1,05$); k_m – коэффициент потерь на перемагничивание, зависящий от количества и направления повивов алюминия; R_{20} – сопротивление провода постоянному току при 20°C ; I_d – допустимый ток. Методика [11] рекомендует принимать для одного слоя алюминия значения $k_m = 1,15$, а для двух слоев $k_m = 1,04$. Провода марки АСВП с двумя слоями алюминия по потерям на перемагничивание должны быть аналогичны проводам АС с одним повивом алюминия, поэтому суммарные расчетные потери в АСВП превышают потери в проводе АС с двумя слоями алюминия на 10,5%. Однако приведенные в [11] значения коэффициента k_m практически не учитывают реальную конструкцию сталеалюминиевого провода.

Для определения возможного диапазона потерь моделировалось методом конечных элементов прохождение переменного тока через отрезок сталеалюминиевого провода с 7-ю стальными проволоками (диаметры недеформированных проволок 2,7 и 2,55 мм) и 28-ю алюминиевыми проволоками в двух повивах ($\varnothing 1,95$ и 2,8 мм) четырех различных конструкций (рис. 1):

- недеформированный провод, в котором направление свивки в каждом следующем повиве меняется на противоположное (вариант 1);
- недеформированный провод с постоянным направлением и шагом свивки во всех повивах (вариант 2);
- пластически деформированный провод, в котором направление свивки в каждом следующем повиве меняется на противоположное (вариант 3);
- пластически деформированный провод с постоянным направлением и шагом свивки во всех повивах (вариант 4). Вариант 4 наиболее близок к конструкции проводов АСВП.

Шаг свивки всех повивов принимался равным 160 мм. В вариантах 1 и 2 электрический контакт между алюминиевыми проводами отсутствовал, а в вариантах 3 и 4 пренебрегали влиянием загрязнений и оксидных пленок на контактных поверхностях алюминиевых проволок на межвитковое прохождение тока.

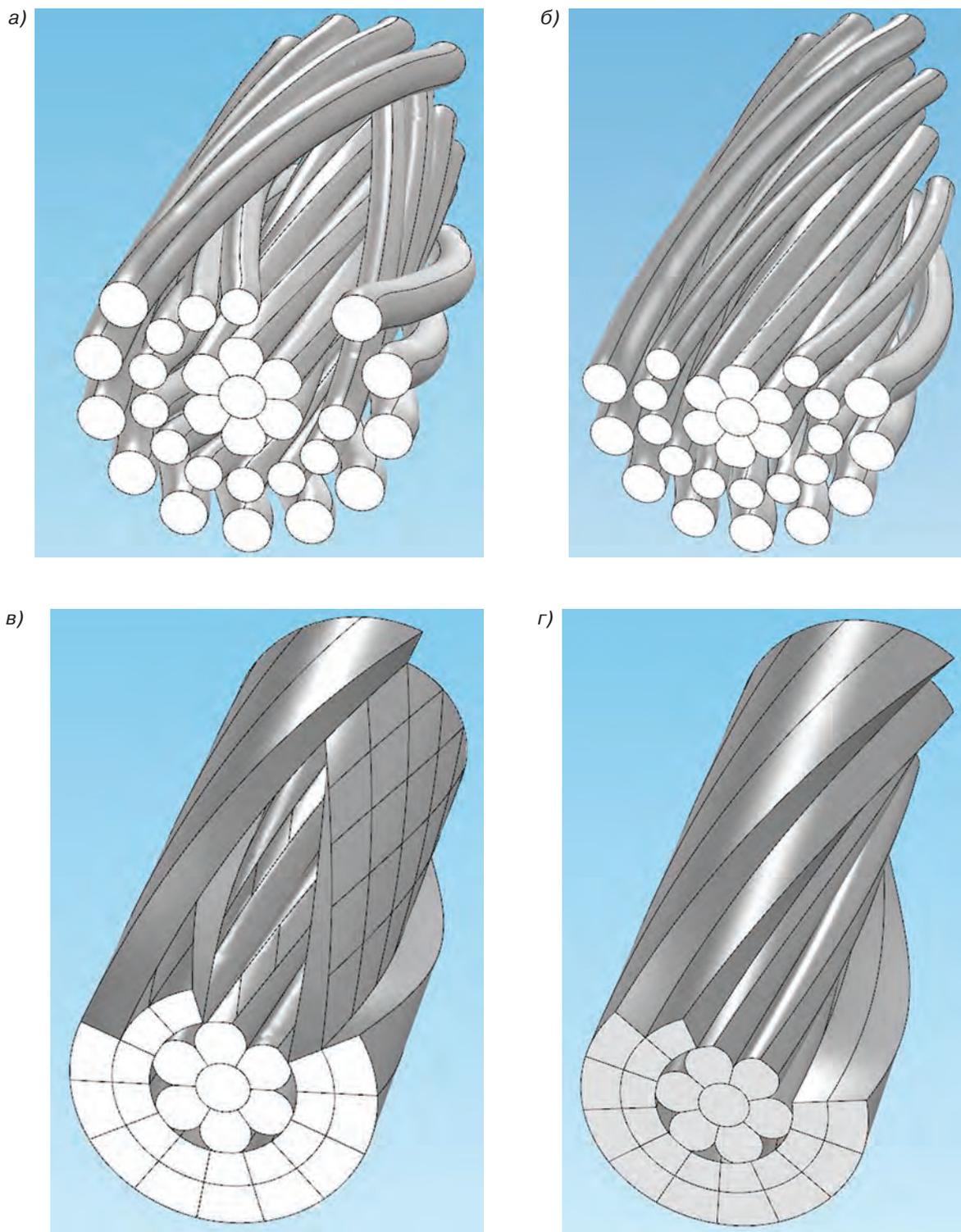


Рис. 1. Сталеалюминиевые провода четырех моделируемых конструкций: а — вариант 1; б — вариант 2; в — вариант 3; г — вариант 4

Для моделирования использовали пакет программ *COMSOL Multiphysics* с модулями *Magnetic Fields* и *Heat Transfer in Solids*. Из-за отсутствия градиента температур вдоль оси провода теплопередачей в этом направлении пренебрегали. Для моделирования нагрева использовали следующие зависимости:

- закон Ампера–Максвелла

$$(j\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)A + \nabla(\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \cdot A - M) = J_e, \quad (2)$$

где A – векторный потенциал электромагнитного поля; M – вектор намагниченности; j – плотность тока; σ – электропроводность; ω – угловая частота; ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума; J_e – плотность тока от внешних источников; ϵ_r и μ_r – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, ∇ – оператор Набла;

- ток, текущий по проводам

$$I = \int J_e dS, \quad (3)$$

где S – площадь нормального сечения элемента (сила проходящего переменного тока – 690 А, частота – 50 Гц);

- стационарное уравнение теплопроводности

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q, \quad (4)$$

где ρ и C_p – соответственно плотность и теплоемкость материала; Q – мощность внутренних источников теплоты, складывающаяся из индуктивных потерь Q_I и потерь на сопротивление Q_R ; T – температура; t – время; k – коэффициент теплопроводности;

- тепловой поток на внешних границах кабеля

$$q = \alpha(T_{\text{вн}} - T), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, зависящий от ряда факторов (скорость и направление ветра, интенсивность конвективных потоков, степень черноты провода и др.), $T_{\text{вн}}$ – температура окружающего провод воздуха и, соответственно, начальная температура сталеалюминиевого провода (принята 20 °С). Нагрев под действием солнечного излучения не учитывался.

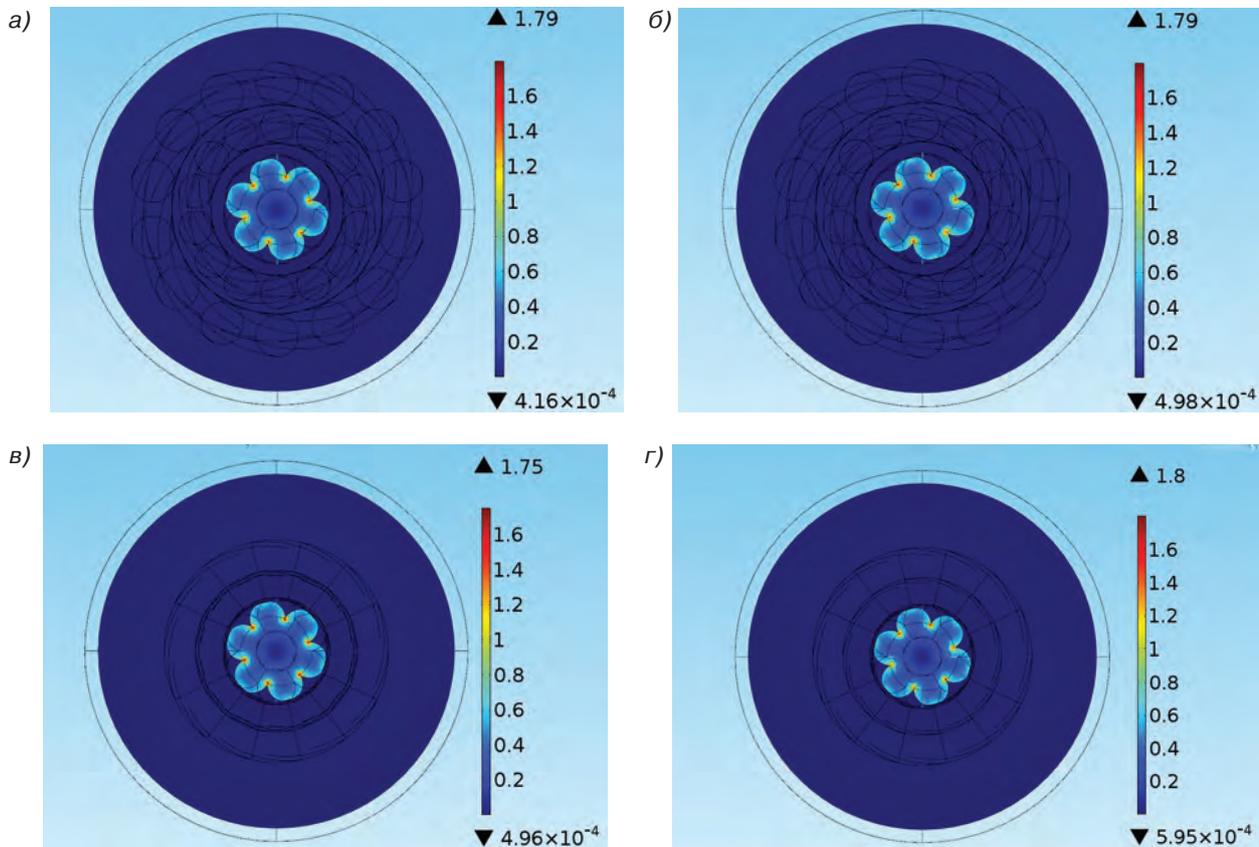


Рис. 2. Распределение нормальной плотности магнитного потока (T_n) в поперечном сечении сталеалюминиевых проводов: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4

На рис. 2 показано полученное при моделировании распределение нормальной плотности магнитного потока (T_d) в поперечном сечении сталеалюминиевых проводов во всех вариантах.

Пластическое деформирование с формированием электрических контактов высокой проводимости и изменение направления свивки проводов при выбранном шаге практически не приводили к изменению визуализации величины и характера распределения нормальной плотности магнитного потока (рис. 2). Модуль *Magnetic Fields* пакета *Comsol* позволяет численно определять величины выделяющегося при прохождении переменного тока тепла в элементах провода за счет электромагнитных процессов (таблица).

Таблица. Расчетные электрические характеристики моделируемых проводов

Показатель	Моделируемая конструкция			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Плотность тока, А/м ² : в алюминиевых проводах в стальном сердечнике	4866793	4866920	4842958	4842868
	560239	561195	534405	534772
Вектор электрического смещения, С/м ² : в алюминиевых проводах в стальном сердечнике	$2,51 \cdot 10^{-13}$	$2,70 \cdot 10^{-13}$	$4,03 \cdot 10^{-13}$	$5,75 \cdot 10^{-13}$
	$1,31 \cdot 10^{-11}$	$1,32 \cdot 10^{-11}$	$1,45 \cdot 10^{-11}$	$1,39 \cdot 10^{-11}$
Выделение электромагнитной теплоты, Вт/м ³ : в алюминиевых проводах в стальном сердечнике	509763	509791	504176	504157
	43389	43535	39486	39534

Как видно из таблицы, изменение направления свивки практически не изменяет величину выделяющейся теплоты в элементах сталеалюминиевого провода, а использование пластического деформирования с образованием электрических контактов высокой проводимости между проволоками приводит к снижению тепловыделений в алюминии на 1%, а в железе на 10%. Следовательно, электрические потери в проводах типа АСВП, по меньшей мере, не превышают потерь в проводах АС.

Выводы

1. Проведенное методом конечных элементов моделирование прохождения переменного тока по сталеалюминиевым проводам различной конструкции показало, что направление свивки алюминиевых проволок при четном количестве повивов практически не влияет на выделение теплоты в стальном сердечнике.

2. Формирование электрических контактов высокой проводимости между проволоками в результате пластического деформирования позволяет снизить на 10% тепловыделение в стальном сердечнике сталеалюминиевых проводов типа АСВП.

Литература

1. Колосов С.В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С.В. Колосов, С.В. Рыжов, В.Е. Сюзин // Энергетик. — 2011. — № 1. — С. 18–22.

2. Яковлев Л.В. Комплекс работ и предложений по повышению надежности ВЛ на стадии проектирования и эксплуатации / Л.В. Яковлев, Р.С. Каверина, Л.А. Дубинич. Сборник докладов Третьей Российской научн.-практ. конф. с международным участием «Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс». Новосибирск, 3–5 июня 2008 г. — Новосибирск, 2008. — С. 28–49.

3. Федоров Н.А. Энергоэффективное решение с проводом нового поколения АССС™ на примере реконструкции ВЛ 110кВ // Сб. докладов международной научно-практической конференции «Опоры для умных сетей: проектирование и реконструкция». РФ, СПб, 2013.

4. Колосов, С.В. Новое поколение проводов ВЛ: пластически деформированные провода / С.В. Колосов, В.А. Фокин // Электроэнергия: передача и распределение. — 2014. — № 1. — С. 90–92.

5. Патент РФ № 132241. Сталеалюминиевый провод для воздушной линии электропередачи / В.А. Фокин, А.К. Власов, В.В. Петрович, А.В. Звягинцев, В.И. Фролов. Оpubл.: 10.09.2013. Бюл. № 25.

6. Справочник по электротехническим материалам. Том 3 / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 728 с.

7. Назим, Я.В. Исследования крутильной жесткости проводов для воздушных линий электропередачи / Я.В. Назим // Металлические конструкции. — 2011. — Т. 17, № 3. — С. 199–215.

8. Алексеев Б. А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок / Б. А. Алексеев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2009. — № 3. — С. 45–50.

9. Бузуев, И. И. Обеспечение безопасной эксплуатации механизмов подъема грузоподъемных машин. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. — 88 с.

10. Устройства электроустановок ПУЭ. Изд. 7-е. Утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002 № 204.

11. СТО 56947007-29.240.55.143–2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. Стандарт организации. Дата введения: 13.02.2013. ОАО «ФСК ЕЭС», 2013.



VII ВОРОНЕЖСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

26-27 ФЕВРАЛЯ 2015г.

Развитие промышленного комплекса региона в современных условиях.

Актуальные проблемы эффективного развития промышленности, импортозамещение и модернизация производства.

Поддержка:

Торгово-промышленная палата РФ

Ассоциация экономического взаимодействия субъектов РФ "Центрально-Черноземная"

Региональное Объединение работодателей "Совет промышленников и предпринимателей Воронежской области"

Воронежский ЦНТИ-филиала ФГБУ "Российское энергетическое агентство" Минэнерго РФ

Организаторы:

Правительство Воронежской области

Администрация городского округа г. Воронеж

Торгово-промышленная палата Воронежской области

Вс ПД
ВАШ ПАРТНЕР В БИЗНЕСЕ



подробности на сайте
www.veta.ru

тел.: **(473) 251-20-12** многоканальный
e-mail: mach@mail.ru, veta@yandex.ru



ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ

ООО «ЭНЕРГОСЕРВИС»

energoservice.com
тел. (495) 799-92-35

ПРОСТЫЕ РЕШЕНИЯ
СЛОЖНЫХ ПРОБЛЕМ



Наша продукция:

- Грозозащитный трос, сохраняющий все исходные свойства после удара молнии 147 Кл
- Грозозащитный трос с оптическим кабелем связи (ОКГТ), сохраняющий полную работоспособность после удара молнии 110Кл
- Провода сталеалюминиевые АСВП и АСВТ для воздушных линий электропередач 35 – 750 кВ могут привести к 25% экономии затрат в проекте в связи с меньшим количеством опор
- Медный несущий трос контактной сети железных дорог с прочностью бронзового

Продукция получила высокую оценку на тематических выставках **Hannover Messe-2013, CIGRE-2014**

Комплекс изделий для ВЛЭП (Грозотрос, ОКГТ, высокопрочный и высокотемпературный провода) удостоены первой премии ОАО «Россети» — «За лучший реализованный инновационный проект-2014»

Награждены дипломом Министерства энергетики РФ за активное участие в составе российской экспозиции в технической выставке CIGRE-2014

