

Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминиевых проводах различной конструкции

Леонид ГУРЕВИЧ, заведующий кафедрой, доцент, д.т.н.,
Владимир ДАНЕНКО, заместитель заведующего кафедрой, доцент, к.т.н.,
Дмитрий ПРОНИЧЕВ, доцент кафедры, к.т.н.,
Михаил ТРУНОВ, аспирант,
Волгоградский государственный технический университет



Развитие промышленности и социальной сферы приводит к постоянному росту потребления электроэнергии, что в густонаселённых районах может быть обеспечено [1] только за счёт 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 ≈ 3 –5% в год. Основными причинами повреждения являются гололёдные 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 в межведомственной комиссии ОАО «ФСК ЕЭС». Провода АСВП обладают существенно большей прочностью и токовой пропускной способностью по сравнению с проводами АС, что достигнуто повышением конструктивной плотности проводов за счёт последовательного пластического обжатия сердечника и токоведущих повивов после свивки [5]. В отличие от проводов с высоким процентом заполнения сечения за счёт использования профилированной проволоки, в пластиче-

ски 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 счёт наклёпа к повышению прочности алюминиевых проволок до 2 раз, а разница в удельной электропроводности мягкого АМ и наклёпанного 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, ветровую и гололёдную нагрузки и в конечном итоге повышает надёжность ВЛ. Меньший диаметр проводов АСВП по сравнению с проводами 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 жёсткость на кручение компактных проводов выше крутильной жёсткости 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 протяжённого контакта значительной площади между витками алюминиевой проволоки, первый и второй повивы которой выполнены с линейным касанием проволок. Конструкции

с линейным касанием широко используются в грузоподъёмных тросах, их основное преимущество 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 чётным числом повивов алюминиевых проволок». Снижение потерь на перемагничивание при чётном 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 реко-

мендуется только из-за вероятности повышенных потерь на перемагничивание стальных сердечников.

Проведём ориентировочную оценку возможных величин потерь по методике [11], по которой при передаче переменного тока необходимо учитывать поверхностный эффект и магнитные потери в стальном сердечнике. Выделяющиеся в проводе тепловые потери P не превышают

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

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_A — 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 расчётные потери в АСВП превышают потери в проводе АС с двумя слоями алюминия на 10,5%.

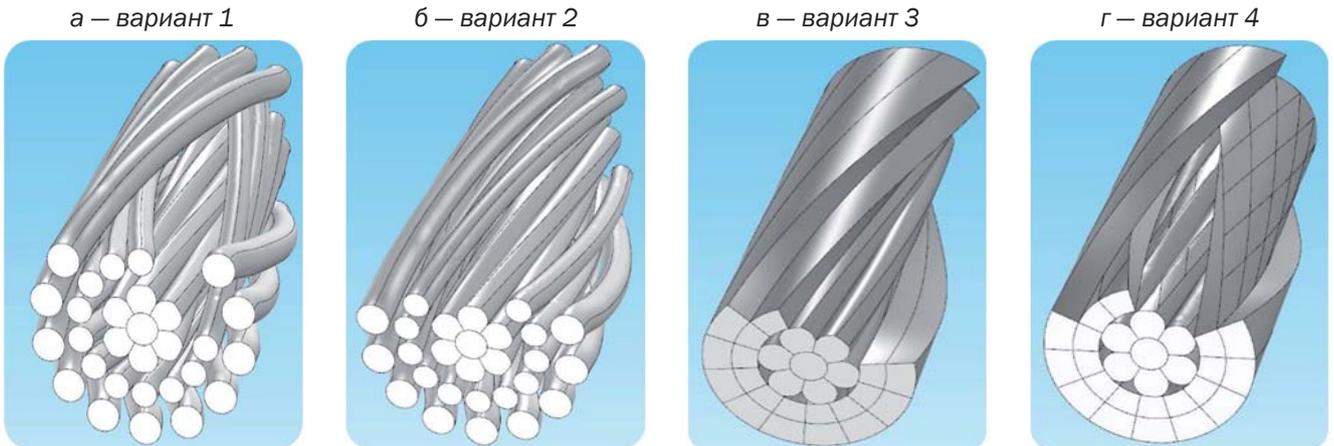
Однако приведённые в [11] значения коэффициента k_m практически не учитывают реальную конструкцию сталеалюминиевого провода.

Для определения возможного диапазона потерь моделировалось методом конечных элементов прохождение переменного тока через отрезок сталеалюминиевого провода с 7 стальными проволоками (диаметры недеформированных проволок 2,7 и 2,55 мм) и 28 алюминиевыми проволоками в двух повивах (диаметры 1,95 и 2,8 мм) четырёх 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);



Рис. 1. Сталеалюминевые провода четырёх моделируемых конструкций



- пластически обжатый провод, в котором направление свивки в каждом следующем повороте меняется на противоположное (вариант 3);
- пластически обжатый провод с постоянным направлением и шагом свивки во всех поворотах (вариант 4). Вариант 4 наиболее близок к конструкции проводов АСП.

Шаг свивки всех поворотов принимался равным 160 мм. В вариантах 1 и 2 электрический контакт между алюминиевыми проводами отсут-

ствовал, а в вариантах 3 и 4 пренебрегали влиянием загрязнений и оксидных плёнок на контактных поверхностях алюминиевых проволок на межвитковое прохождение тока.

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 — $(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0\varepsilon_r)A + \nabla \cdot (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \cdot A - M) = J_e$, (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 проницаемости 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:

$$\rho C_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (4)$$

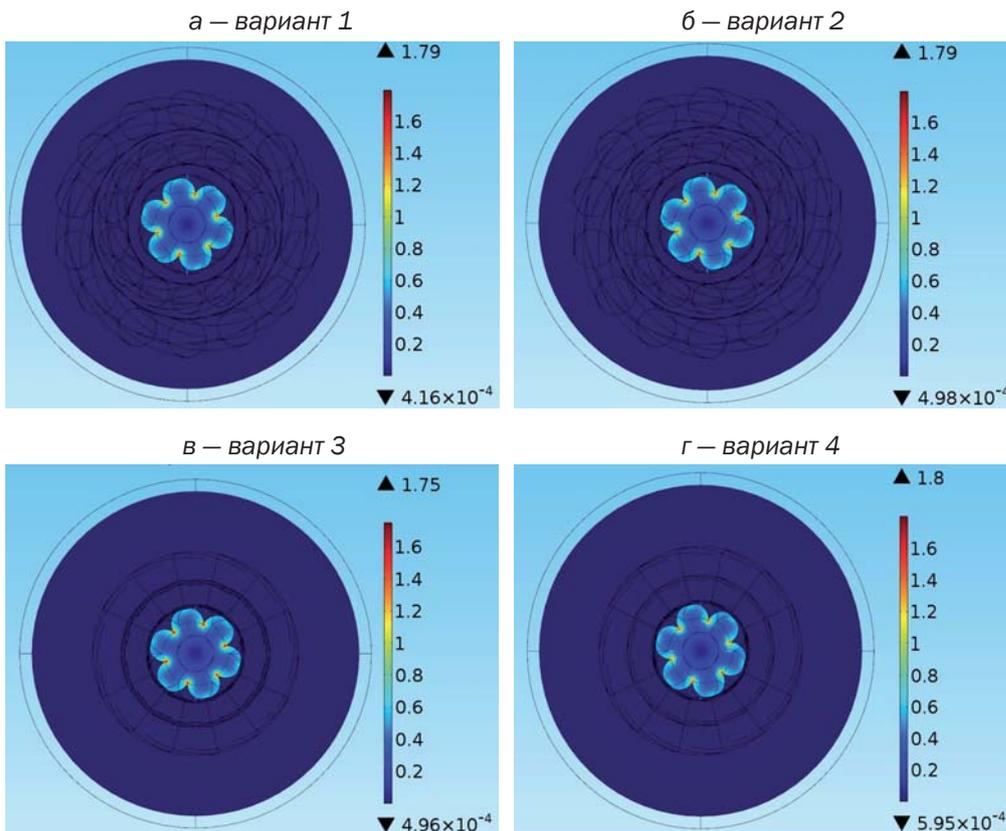
где ρ и C_p — соответственно плотность и теплоёмкость материала, Q — мощность внутренних источников теплоты, складывающаяся из индуктивных потерь Q_I и потерь на сопротивление Q_R , T — температура, t — время, k — коэффициент теплопроводности;

- тепловой поток на внешних границах кабеля:

$$q = \alpha(T_{вн} - T), \quad (5)$$

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

Рис. 2. Распределение нормальной плотности магнитного потока (T_n) в поперечном сечении сталеалюминевых проводов:



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

Пластическое обжатие с формированием электрических контактов высокой проводимости и изменение направления свивки проводов при выбранном шаге практически не приводило 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 счёт электромагнитных процессов (табл.).

Как видно из таблицы, изменение направления свивки практически не изменяет величину выделяющейся теплоты в элементах сталеалюминиевого провода, а использование пластического обжатия 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. Проведённое методом конечных элементов моделирование прохождения переменного тока по сталеалюминевым проводам различной конструкции показало, что направление свивки алюминиевых проволок при чётном количестве повивов практически не влияет на выделение теплоты в стальном сердечнике.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С.В. Колосов, С.В. Рыжов, В.Е. Сюзин // Энерге-

Табл. Расчётные электрические характеристики моделируемых проводов

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

тик: Производственно-массовый журнал. — 2011. — № 1. — с. 18–22.

- Яковлев Л.В. Комплекс работ и предложений по повышению надёжности 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.
- Федоров Н.А. Энергоэффективное решение с проводом нового поколения АССС™ на примере реконструкции ВЛ 110 кВ // Сб. докладов международной научно-практической конференции «Опоры для «умных» сетей: проектирование и реконструкция». РФ, С.-Пб. — 2013.
- 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.
- П.м. 132241 РФ МПК Н01В5/08 Сталеалюминевый 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.
- Справочник по электротехническим материалам. Том 3 / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 728 с.
- Назим Я.В. Исследования крутильной жёсткости проводов для воздушных линий электропередачи / Я.В. Назим // Металлические конструкции. 2011, т. 17, № 3. — с. 199–215.
- 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.
- Бузуев И.И. Обеспечение безопасной эксплуатации механизмов подъёма грузоподъёмных машин. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. — 88 с.
- УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПУЭ. Издание седьмое. Утверждены приказом Минэнерго России от 08.07.2002, № 204.
- СТО 56947007-29.240.55.143-2013. Методика расчёта предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий. Стандарт организации. Дата введения: 13.02.2013. ОАО «ФСК ЭЭС», 2013.