

## **Повышение надёжности и энергоэффективности линий электропередач 35 -750 кВ и контактной сети железных дорог за счёт применения пластически деформированных изделий.**

### *Актуальность работы*

На сегодняшний день в электросетевом комплексе России существует проблема её 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.

В связи с этим, в настоящее время актуален вопрос поиска и внедрения инновационных проводников с улучшенными характеристиками: высокой электропроводностью, высокая механическая прочность, устойчивостью к высоким температурам, старению и агрессивным воздействиям со стороны окружающей среды.

В качестве иллюстрации данного тезиса, можно привести цитату из Протокола Технического Совета ПАО «Россети» (п.2, Протокол № 1ТС/2017 от 25 мая 2017 г.): «В ПАО «Россети» эксплуатируется 44 тыс. км провода новых типов или 1% от общей протяженности провода (4,5 млн. км), из них более 41 тыс. км - СИП различных модификаций, что составляет 0,9 % от общей протяженности провода и менее 3 тыс. км - неизолированный провод, что составляет менее 0,1 % от общей протяженности провода».

*Цель работы* – Создание конструкции провода позволяющего увеличить пропускную способность без полной реконструкции ВЛ, максимально увеличив токоведущую часть, минимизировав стальной сердечник, но без значительной потери прочности.

Оценка потенциала энергоэффективности линий электропередачи напряжением 110 кВ при использовании высокотемпературного провода марки АСВТ, опередила создание провода в двух исполнениях включая высокотемпературное.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработать технологичную конструкцию стального сердечника меньшего диаметра, но без значительной потери прочности.
2. Выполнить сравнительный анализ возможных токовых нагрузок высокотемпературных и стандартных сталеалюминиевых проводов по условию сохранения механической прочности при изменяющихся параметрах среды.
3. Оценить влияние пластической деформации провода на снижение намагниченности внутри проволок и сокращения тепловыделения от стального сердечника при эксплуатации в сети напряжением 110 кВ.

4. Произвести анализ влияния изменения ветровой нагрузки на интенсивность гололедообразования на компактированных проводах при их эксплуатации в электрических сетях высокого напряжения.

5. Выполнить расчет экономического эффекта при внедрении современных высокотемпературных проводов АСВТ в отечественной электроэнергетике для ВЛ-110.

Причины, по которым в разработку была включена высокотемпературная модификация:

- большой потенциал коммерциализации именно этой модификации, за счёт перспектив применения в южных регионах (исследования содержатся в настоящем отчёте), при построении кольцевых схем сети и значительного увеличения пропускной способности старых ВЛ (последние два тезиса нашли своё подтверждение на заседании Технического Совета ПАО «Россети» (п.2, Протокол № 1ТС/2017 от 25 мая 2017 г.)).

- отсутствие необходимости дополнительных затрат на разработку, благодаря имеющимся результатам работ по проводу АСВТ.

*Методы исследования* включали в себя математические расчеты и модели; анализ существующих экспериментальных результатов и патентов; обработку результатов расчетов и моделирования; отбор оптимальных вариантов для производства образцов; экспериментальное подтверждение результатов расчётов.

*Достоверность результатов и выводов работы:*

Экспериментальное подтверждение результатов расчётов, при проведении испытаний образцов, произведённых в металле.

Полученные результаты сопоставлены с результатами моделирования, имеющимися данными утвержденных методик, ГОСТов, нормативных документов и результатов иных исследований.

*Основные тенденции модернизации ВЛ ведущими электросетевыми компаниями мира* свидетельствует о том, что перспективным направлением является разработка новых конструкций провода, но без значительного удорожания, и работающего с «простой» арматурой.

**Тренды:** увеличение электропроводности и механической прочности, коэффициента заполнения внутреннего пространства, устойчивость к высоким температурам, малый вес, устойчивость к старению и воздействию окружающей среды.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В РОССИИ. ОБЗОР НАИБОЛЕЕ ИЗВЕСТНЫХ РАЗРАБОТОК ПРОВОДОВ.

### 1.1 Состояние балансовых соотношений генерирующих мощностей на рынке электрической энергии и структура российской электроэнергетики

Значение электроэнергетики в экономике России трудно переоценить – это основа современной жизни страны. Российская Федерация обладает значительным потенциалом возобновляемых источников, крупными запасами энергетических ископаемых, входит в десятку наиболее обеспеченных энергоресурсами государств.

Вместе с тем, по выработке на одного жителя в 2005 году страна находилась приблизительно на одном уровне с энергоимпортирующими государствами Западной Европы, имеющими меньшие транспортные потери и затраты на отопление.

Таблица 1.1 – Структура установленной мощности электростанций объединенных энергосистем и ЭЭС России на 01.01.2017 года

ЭЭС РОССИИ	236343,63
ОЭС Центра	52878,57
ОЭС Средней Волги	27003,22
ОЭС Урала	51131,73
ОЭС Северо-Запада	23572,13
ОЭС Юга	20601,65
ОЭС Сибири	51969,83
ОЭС Востока	9186,50

Однако после спада в 90-х с 1998 года потребление постоянно растёт, в частности в 2007 году выработка всеми станциями единой энергосистемы составила 997,3 млрд. кВт·ч, что практически равно показателям 1990 года - 1082 млрд. кВт·ч).

На начало 2017 г. общая установленная мощность электростанций ЭЭС России составила 236,34 ГВт.

Таблица 1.2 – Основные источники энергии по установленной мощности

Источники энергии	Установленная мощность, ГВт	
	Россия	США
Тепловые станции на горючих ископаемых	160,2	776
Гидроэнергетика	48,1	79
Атомные станции	27,9	102
Ветроэнергетика	0,01	59
Солнечная энергетика	0,08	3

Таблица 1.3 – Структура выработки электроэнергии в Российской Федерации по видам электростанций в 2016 году

Название объектов и показателей	Нарастающий итог с начала года
ВЫРАБОТКА ВСЕГО	100,0%
Теплоэлектростанции	58,6%
Гидроэлектростанции	17,4%
Атомные электростанции	18,3%
Ветряные электростанции	0,013%
Солнечные электростанции	0,044%
Электрические станции промышленных предприятий	5,6%

Производство электроэнергии в 2016 году составило 1064,1 ТВт·ч (для сравнения в США 4047 ТВт·ч., в Китае 5650 ТВт·ч). Совокупная установленная мощность электростанций в Российской Федерации с учетом технологически изолированных энергосистем по состоянию на 1 января 2017 г. составляет 244,1 ГВт. Сетевое хозяйство ЕЭС России насчитывает более 10 700 линий электропередачи класса напряжения 110 – 1150 кВ.

В структуре потребления электроэнергии выделяется промышленность – 36 %, топливно-энергетический комплекс – 18 %, индивидуальные потребители – 15 %, также большее значение имеют потери в сетях – до 11,5%.

Потери электроэнергии в электрических сетях – важнейший показатель их энергетической эффективности, энергосбытовой деятельности, оперативного, эксплуатационного и ремонтного обслуживания электрических сетей. Рост потерь электроэнергии в электрических сетях России все отчетливее свидетельствует о следующих накапливающихся проблемах, требующих безотлагательного решения:

- реконструкция и техническое перевооружение электрических сетей,
- совершенствование учета электроэнергии, в первую очередь в части замены устаревших приборов,
- налаживание конструктивного взаимодействия электросетевых и энергосбытовых организаций при расчете и анализе фактических и прогнозных балансов электроэнергии в электрических сетях и т.п.

По мнению международных экспертов и опыту передовых отечественных электрических сетей, если относительные потери энергии при ее передаче и распределении в электрических сетях не превышают 4–5%, то такие потери считаются удовлетворительными. Потери электроэнергии на уровне 10% можно считать максимально допустимыми с точки зрения физики передачи электроэнергии по сетям.

Таблица 1.4 – Относительные потери электрической энергии в электрических сетях промышленно развитых стран

Страна	Усредненный показатель потерь, %	
	В основной сети	В распределительной сети
Австрия	1,5	4,5
Финляндия	1,6	4,2
Франция	2,1	3,7
Греция	2,4	6,8
Норвегия	1,6	5,0
Португалия	1,1	6,4
Испания	1,2	7,1
Швеция	2,1	2,3
Великобритания	1,6	< 7,0

Хронический недостаток инвестиций реконструкцию и в развитие российских электрических сетей, в совершенствование систем управления их режимами, учета электроэнергии привел к их значительному (до 70%) физическому и моральному износу, что отрицательно повлияло на динамику относительных потерь электроэнергии в отечественных электрических сетях.

По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстата), абсолютные фактические потери электроэнергии в электрических сетях России в 2009 году составили 100,96 млрд. кВт·ч от отпуска электроэнергии в сеть, равно 913,9 млрд. кВт·ч. По отношению к суммарному отпуску электроэнергии в сеть потери составляют 11,05%, что на 150-200% выше, чем в электрических сетях промышленно развитых стран, а также сетях Минэнерго СССР в конце 1980-х годов (тогда они составляли - 8,65%).

Суммарный резерв снижения потерь в настоящее время по минимальным оценкам находится в пределах 15–25 млрд. кВт·ч, в том числе: около 3–5 млрд. кВт·ч – резерв снижения технических потерь; 12–20 млрд. кВт·ч – резерв снижения коммерческих потерь.

Наличие указанных резервов объясняется следующими факторами:

- значительным физическим износом и моральным устареванием сетевого оборудования;
- неоптимальными режимами работы электрических сетей по уровням напряжения и большой составляющей реактивной мощности;
- низкой квалификацией персонала электросетевых компаний для внедрения современных программ оптимизации потерь электроэнергии;
- использованием несовершенных расчетных методов определения количества отпущенной и потребленной электроэнергии при отсутствии приборов учета;
- низкой эффективности борьбы с хищениями электроэнергии;
- недопустимыми погрешностями измерений объемов электроэнергии;
- несовершенством системы снятия показаний приборов учета и выставления счетов за потребленную электроэнергию;
- ростом хищений энергии.

Значительное превышение фактических потерь над технологически обоснованными, требует системного подхода к решению этой. Передовой зарубежный опыт показывает, что даже при сравнительно благополучных относительных потерях электроэнергии в сетях отдельных зарубежных электрокомпаний, временное ослабление внимания к ним неизменно приводит к росту потерь.

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

- модернизация электросетевого оборудования и внедрение новых технологий энергосбережения, в первую очередь устройств компенсации реактивной мощности и средств регулирования напряжения;
- совершенствование и автоматизация средств и систем учета электроэнергии, в том числе позволяющих дистанционно отслеживать характер потребления в реальном времени;
- внедрение новых IT-технологий для расчетов фактических и прогнозируемых балансов электроэнергии в электрических сетях, а также технических и коммерческих потерь;
- научно-исследовательские, проектные и опытно-конструкторские работы, связанные с расчетами, анализом, нормированием и снижением потерь электроэнергии в электрических сетях, разработкой и совершенствованием нормативных документов.

Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях позволит решить несколько проблем:

1. Уменьшение убытков электросетевых организаций из-за сокращения сверхнормативных потерь, тем самым аккумулируя дополнительные средства на дальнейшую оптимизацию.
2. Разгрузка электрических сетей от дополнительных потоков мощности, обеспечивая возможность подключения дополнительных потребителей.
3. Сокращение расхода топлива, а также вредных выбросов на электрических станциях за счет снижения выработки электроэнергии для компенсации потерь.

#### 1.2 Статистика отказов энерготехнологического оборудования электрических сетей

Вследствие постоянного увеличения энергопотребления во многих городах и регионах страны возникает проблема недостаточной пропускной способности линий электропередач. Так, по данным ОАО «ФСК ЕЭС» составлен список субъектов федерации с пиковыми нагрузками, в который входит 16 областей, в том числе Московская, Ленинградская, области, Краснодарский край и другие. Так на сегодня энергопотребление этих регионов превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2020 года, в 3-4 раза и продолжает увеличиваться. Чтобы обеспечить подобное увеличение спроса необходимо постоянное расширение или обновление распределительных сетей энергоснабжающих предприятий.

Одним из основных показателей уровня электроэнергетики в стране является модернизация электрических линий. Так о техническом состоянии электросетей возможно судить по возрастной структуре линий электропередачи.

В нашей стране более 20% (по протяженности) воздушных линий электропередачи напряжением 220-500 кВ эксплуатируется свыше 40 лет, 67% – старше 25 лет. Около 50% подстанционного оборудования эксплуатируется сверх норматива (более 25 лет), из них 17% достигли аварийного срока эксплуатации (более 35 лет). Эти цифры характеризуют серьезную проблему энергетической системы России – старение основных фондов. Физически и морально изношенные электрические сети – основной фактор увеличения числа нарушений их работы (в два раза за последние 15 лет). Наиболее сложной в этом отношении является ситуация в ОЭС Северо-Запада, Центра, Северного Кавказа и Урала.

Таблица 1.5 – Доля отказов ВЛ в процентах от всех отказов, вызванных износом и старением элементов

Напряжение ВЛ, кВ	Доля отказов ВЛ, % на опорах		
	металлических	железобетонных	деревянных
35–100	55	40	30
220–500	70	52	–
750	75	–	–

По данным ПАО «МРСК Юга» - Волгоградэнерго за 2016 год на территории Волгоградской области было зафиксировано 2707 аварийных отключений. На рисунке 1.1 показана сводная диаграмма причин аварий.



Рисунок 1.1 – Количество отказов в электросетях Волгоградской области за 2016 г.

Как видно из диаграммы, треть всех отключений происходит по причине обрывов цепи, около 20 % - по причине механического износа сетей вследствие их старения. С распадом СССР практически полностью остановилось строительство электрических сетей, с конца 90-х наблюдается некоторый рост строительства, как для присоединения новых потребителей, так и взамен пришедших в негодность. Общий ввод электрических сетей напряжением 110 кВ и выше в последние годы находился на уровне 1-2 тысяч км в год. Для модернизации энергосистемы страны проработана концепция строительства 50 тыс. км ВЛ электропередачи напряжением 220 кВ и выше 2020 года. В таблице 1.6 представлены данные по вводам электросетевых объектов 220 кВ и выше по России на период 2010-2020 гг.

Таблица 1.6 – Строительство ВЛ в России за период 2010-2020 гг.

Напряжение	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ	Всего
Ввод ВЛ, тыс. км	22,77	3,89	20,84	1,01	50,23

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 воздушных линий. Таким образом, до 2020 года подлежат реконструкции примерно 20 тыс. км воздушных линий электропередачи напряжением 330 кВ и выше, а до 2015 г. – порядка 7,6 тыс. км ВЛ 220 кВ.

С целью повышения экономичности и эксплуатационной надежности при сооружении и реконструкции воздушных линий электропередач 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 воздушной линии 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.

### 1.3 Анализ опыта эксплуатации высокотемпературных проводов в зарубежных странах

Сегодня на мировом рынке производства высокотемпературных проводов конкурируют несколько десятков компаний. В работе будут рассмотрены поставщики актуальные для нашей страны: Lumpi-Berndorf, Австрия; J-Power Systems, Япония; 3M, США.

#### 1. Провода TACSR/ACS и (Z)TACSR/HACIN компании Lumpi-Berndorf, Австрия

Увеличение пропускной способности проводов TACSR/ACS и (Z)TACSR/HACIN обеспечивается их большей, по сравнению с обычными сталеалюминевыми проводами, рабочей температурой. За счет повышенной устойчивости к температурам свыше 100°C данные провода могут нести более высокую токовую нагрузку в нормальных условиях.

Конструктивно данные провода также как и провод марки AC имеют стальной сердечник и токопроводящие повивы. Отличия в конструкции состоят в использованных материалах. Токопроводящие повивы высокотемпературных проводов сделаны из специального термостойкого алюминия TAL, либо сверхтермостойкого сплава ZTAL. Проволоки сердечника выполнены из стальной проволоки, плакированной алюминием.

Оба сплава TAL и ZTAL состоят из чистого алюминия с добавкой циркония, с той разницей, что сплав ZTAL имеет большее количество циркония.

В проводах Lumpi-Berndorf в качестве материала для сердечника применяется сталь с покрытием из алюминия. Для повышения прочностных свойств и уменьшения стрел провеса в проводах (Z)TACSR/HACIN применяется специальный сплав «Инвар», с нанесением на поверхность проволоки алюминиевого покрытия.

Использование термоустойчивого алюминия, как токонесущей части провода, дает возможность значительно увеличить пропускную способность, а применение супертермоустойчивого сплава еще усиливает этот эффект. В таблице приведено сравнение технических характеристик различных проводов.



Линии, работающие в штатном режиме при температуре проводов 150°C или 210°C, не подвержены отложению гололеда, что означает, как резкое снижение вероятности возникновения пляски, так и уменьшение гололедных и ветровых нагрузок на опоры.

Таблица 1.8 – Сравнение технических характеристик проводов TACSR/ACS, (Z)TACSR/HACIN и AC

Характеристика	Марка провода		
	AC 240/39	TACSR/HACIN	ZTACSR/HACIN
Масса, кг	959	939	939
Разрывное усилие, кН	80,9	87,26	87,26
Токонесущая способность, А	610	861	1180
Возрастание тока, %	100	141	193
Возрастание стоимости, %	100	450	550

Высокотемпературные провода позволяют достигать пропускной способности до 150% при меньшем диаметре поперечного сечения, тем самым снижая нагрузку на опоры, либо позволяя увеличить пролеты линии.

Отсутствие конструктивных отличий проводов TACSR/ACS и (Z)TACSR/HACIN от классических проводов AC, позволяет использовать все известные типы арматуры: спиральную арматуру, клиновые и прессуемые зажимы. Обязательным условием подобной арматуры является расчет ее функционирования для работы с высокотемпературными проводами.

Методики работы и монтажа проводов Lumpi-Berndorf идентичны методикам для классического провода AC, тем самым для монтажа подобных линий не требуется предварительное обучение персонала либо применение новых технологий.

Провода Lumpi-Berndorf аттестованы межведомственной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС».

Недостатком проводов TACSR/HACIN и (Z)TACSR/HACIN Lumpi-Berndorf является их высокая стоимость.

## 2. Провода G(Z)TACSR компании Power Systems, Япония

Как и провода «Lumpi-Berndorf», G(Z)TACSR устойчивы к высокой температуре и в течение продолжительного времени могут выдерживать высокую токовую нагрузку.

Особенность провода GTACSR заключается в том, что между токопроводящими слоями провода и стальным сердечником имеется зазор, отсюда и название - «провод с зазором».

При нагревании провода в процессе эксплуатации до температур выше температуры монтажа все тяжение приходится на сердечник, выполненный из стали, тем самым расширение и провес провода совпадает с характеристиками используемых в проводах сердечников. Это является их неоспоримым преимуществом, так как таким образом провод значительно меньше подвержен удлинению за счет возрастания температуры. При рабочих температурах стрела провеса провода ощутимо меньше, чем для проводов AC.

Механические характеристики, совместно с высокой пропускной способностью, делают этот провод серьезным претендентом для решения проблемы пропускной способности линий.

Провод GZTACSR отличается от провода GTACSR тем, что в токопроводящей части использован сверхтермостойкий сплав ZTAL.

В то же время, наличие зазора между сердечником и токопроводящими повивами провода, добавляет проводу ряд недостатков:

- сложная конструкция провода;
- сложная технология монтажа провода;
- необходимость применения специального оборудования;
- необходимость дополнительного обучения персонала;
- сложный ремонт провода;
- высокая стоимость провода за километр: ~ 400 % в сравнении с проводом АС;

По информации от National Grid (Национальной электроэнергетической компании Великобритании) есть замечания по поводу применения проводов с зазором. Согласно инструкции по обслуживанию, ремонт провода с зазором сложен - при повреждении более 10% алюминиевых проволок или при повреждении сердечника провода необходима замена на всем анкерном участке.

### 3. Провода ACCR компании 3М, США

Высокая рабочая температура провода ACCR позволяет пропускать высокие токи, аналогично проводам Lumpi-Berndorf и J-Power Systems. Особенностью данного провода является композитный сердечник, выполненный из материала с малым коэффициентом температурного расширения и высокой прочностью. Такое изменение в конструкции позволяет улучшить, по сравнению со стандартным алюминиевым проводом со стальным сердечником, механические характеристики провода при высоких температурах.

Сердечник провода ACCR изготавливается из нитей оксида алюминия, распределенных в высокочистом алюминии. Токопроводящие повивы провода изготовлены из термостойкого алюминиевого сплава.

В качестве токопроводящей части провода принимается циркониевый сплав алюминия, который также сохраняет свои свойства при повышенных температурах.

Сердечник, выполненный из композитных проволок, практически не уступает по механическим характеристикам сердечникам из стали, представленным в таблице 1.9.

Очевидно, что при сходных параметрах, пропускная способность провода ACCR примерно вдвое выше аналогичного по сечениям провода АС.

В то же время, применение композитных проволок имеет ряд недостатков, основным из которых является повышенная хрупкость проволок сердечника. Это требует повышенного внимания при монтаже провода и его транспортировке. Также необходимо особенно тщательно ограничивать факторы тяжения при подвеске провода, угол и радиус изгиба.

Таблица 1.9 – Сравнение характеристик проводов АС и ACCR

Характеристика	АС 240/39	ACCR 470-T16
Диаметр, мм	21,6	21,6
Сечение провода, мм <sup>2</sup>	274,6	277
Сечение сердечника, мм <sup>2</sup>	38,6	39
Сечение токопроводящих повивов, мм <sup>2</sup>	236	238
Масса, кг/км	952	793
Разрывное усилие, кН	80,895	87,090
Допустимый ток, А	610	1213

Второй недостаток провода ACCR - это его крайне высокая стоимость. Провод ACCR более чем в десять раз дороже провода AC. Этот фактор ограничивает сферу применения провода до пролетов с чрезвычайно высокими требованиями по характеристикам. Именно так компания 3M позиционирует этот провод: решение для зон с максимальными требованиями по токовой нагрузке и высокими требованиями к габаритам линии.

Опыт применения проводов повышенной пропускной способности в Европе, Японии и Америке уже насчитывает более двух десятков лет. Объемы поставок у всех вышеперечисленных компаний исчисляются сотнями тонн в год и растут каждый год. В каждом случае применение проводов повышенной пропускной способности оправдано экономически - единственный критерий, показывающий необходимость применения этих проводов. Для эффективного и динамичного развития электрических сетей России необходимо разработать и утвердить методику экономической оценки целесообразности применения проводов повышенной пропускной способности.

В 2008 году некоторые производители проводов повышенной пропускной способности вышли на российский рынок. В настоящее время на отечественном рынке представлен широкий спектр проводов нового поколения, что позволяет более эффективно решать задачи оптимизации конструкции линий. Однако, в связи с тем, что конструкция и работа проводов отличаются от классических, потребуются изменение расчетных программ для проектирования линий, а также изменение подхода к оптимизации ВЛ.

Повышение пропускной способности ВЛ требует дополнительных затрат. Однако, временные и финансовые затраты на переоборудование ВЛ с применением проводов повышенной пропускной способности значительно ниже, чем затраты на постройку новой ВЛ.

Стоимость переоборудования ВЛ для некоторых проводов нового поколения незначительно превышает стоимость переоборудования на провода AC, но эффективность повышения пропускной способности перекрывает дополнительные затраты, позволяет достигнуть требуемых токов значительно быстрее и дешевле, снижает нагрузки на опоры и тяжение, ветровую и гололедную нагрузки и, в конечном итоге, повышает надежность самой ВЛ и системы линий в целом [3-5].

1.4 Патентный поиск технических решений конструктивной реализации высокотемпературных проводов

- Высокотемпературный алюминиевый провод с несущим композиционным сердечником для воздушных линий электропередачи (варианты) (Патент на полезную модель РФ №100846. МПК H01B 5/08)

Полезная модель относится к электротехнике, а именно к конструкции проводов сверхдальних, магистральных, распределительных воздушных линий электропередачи и электрических сетей. Провод содержит композиционный несущий сердечник одножильной конструкции и многопроволочную токопроводящую жилу. Упрочняющий каркас выполнен путем спиральной намотки термостойкой нити с зазором или встык, или с перекрытием, а многопроволочная токопроводящая жила выполнена из теплостойкого алюминиевого сплава, имеющего предел длительной эксплуатации до 300°C. Согласно полезной модели, токопроводящая жила выполнена из теплостойкого алюминий-циркониевого сплава или предварительно отожженного алюминия А5Е, А7Е. Несущий сердечник выполнен из высокопрочного армирующего волокна, содержащего стеклянные, углеродные, арамидные, полиимидные, керамические, базальтовые, борные волокна. Полимерная матрица сердечника содержит в качестве термореактивного теплостойкого связующего эпоксидную композицию или термореактивные связующие на основе кремнеорганических, полиамидных, эпоксидных и других смол, имеющих предел длительной эксплуатации до 350°C. Конструктивная особенность полезной модели является

то, что многожильный композиционный несущий сердечник содержит наружное защитное покрытие на основе фторопластов, способных длительно эксплуатироваться при температурах 150-250°C или термо-тепlostойких композиций на основе кремнийорганических полимеров, имеющих предел длительной эксплуатации до 350°C.

Настоящая полезная модель решает следующие задачи:

- повышение устойчивости высокотемпературных проводов воздушных линий электропередачи с композиционным несущим сердечником к знакопеременным нагрузкам, вибрации, изгибу, кручению;
- повышение надежности проводов воздушных линий электропередачи при их безопасной эксплуатации при температурах 100-300°C;
- увеличение пропускной способности воздушных линий электропередачи;
- уменьшение провиса проводов высоковольтных линий электропередачи и снижение нагрузки на опоры ВЛ;
- уменьшение технологического брака при изготовлении высокотемпературных проводов высоковольтных линий электропередачи.

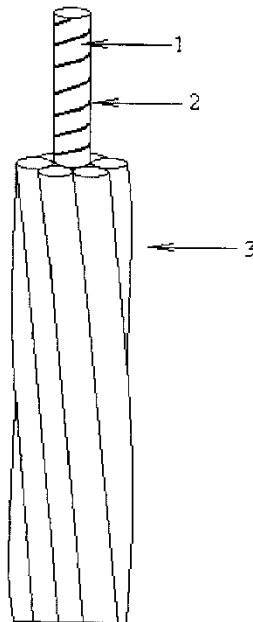


Рисунок 1.2 – Высокотемпературный алюминиевый провод с несущим композиционным сердечником для воздушных линий электропередачи: 1 – композиционный сердечник, 2 – упрочняющий спиральный каркас, 3 – многопроволочная токопроводящая жила.

- Провод высокотемпературный для высоковольтной линии электропередачи (Патент на полезную модель РФ №103967. МПК H01B 5/08)

Полезная модель относится к энергетике и может быть использован для передачи электрической энергии на промышленной частоте, в труднодоступных для обслуживания районах, со сложными климатическими условиями там, где высока вероятность перегрева и провисания проводов, из-за коротких замыканий. Техническим эффектом является создание провода, который выдерживает высокие температуры при рабочем токе и токе короткого замыкания, не изменяя геометрических размеров, за счет того, что сердечник скручен из проволок из немагнитной азотсодержащей аустенитной стали, а повивы выполнены из проволок термостабилизированного алюминий-циркониевого сплава. Такое сочетание придает проводу повышенную механическую

прочность, при работе провода на повышенных нагрузках, с рабочей температурой до 250°C, увеличивающей пропускную способность провода, что в целом увеличивает срок службы провода, при повышенной эксплуатационной его надежности, технологичности при изготовлении, монтаже и ремонте.

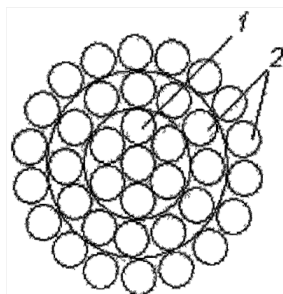


Рисунок 1.3 – Сечение провода высокотемпературного: 1 – проволоки сердечника; 2 – проволоки токопроводящих повивов

- Провод для линии передачи (Патент изобретение РФ №2063080. МПК H01B 5/08)

Задачей изобретения является снижение активного сопротивления токонесущего провода при одновременном повышении его прочности. Данная конструкция провода состоит из стального сердечника и нескольких повивов из алюминиевых проволок. Основными существенными отличиями предложения являются изготовление сердечника из азотсодержащей аустенитной стали по а. с. N1507854, при этом алюминиевые повивы выполнены из проволок различного диаметра, наибольший из которых у проволок наружного повива. Перечисленные существенные признаки определяют новизну и изобретательский уровень предложения.

На рисунке 1.4 изображен токонесущий провод с алюминиевыми повивами из проволок одинакового диаметра. На рис.1.5 провод, у которого наружный повив выполнен из алюминиевых проволок наибольшего диаметра, где 1 – проволоки стального сердечника, 2 – проволоки из алюминия, 3 – прядь, при 3-х прядном наполнении сердечника.

Для повышения механической прочности провода алюминиевые повивы выполнены из проволок различного диаметра, при этом наибольшим принят диаметр проволок наружного повива. Разрывная прочность проволок пропорциональна их сечению. Поэтому предлагаемый провод, выполненный согласно рисунку 1.5 защищен от повреждений при его монтаже на линии электропередачи, обрывов и истирания наружного повива при зацепах и трении о поверхность земли. Благодаря низкой относительной магнитной проницаемости сердечника предельное увеличение диаметра проволок наружного повива не вызывает добавочных потерь электроэнергии. Азотсодержащая немагнитная сталь обладает низкой проводимостью и высокой коррозионной стойкостью, не требует защитного цинкового или алюминиевого покрытия и смазки.

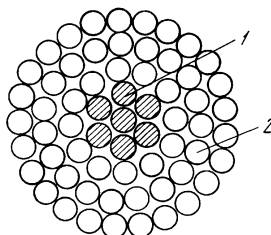


Рисунок 1.4 – Токонесущий провод из проволок одинакового диаметра: 1 – стальной сердечник; 2 – алюминиевые проволоки

В высокотемпературном проводе для воздушной линии электропередачи, содержащем стальной сердечник из одной центральной и семи скрученных вокруг него стальных высокопрочных проволок диаметром каждая  $0,85 \div 9,6$  мм, оцинкованных слоем толщиной  $0,04 \div 0,32$  мм, с одновременной деформацией со степенью обжатия площади поперечного сечения сердечника  $6 \div 8\%$  с получением общего диаметра стального сердечника  $6,0 \div 22,5$  мм, стальной сердечник покрывают слоем толщиной  $0,3 \div 0,7$  мм смазкой, стойкой к воздействию высокой температуры.

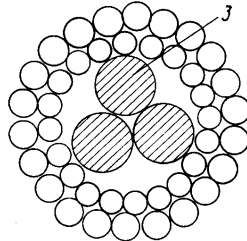


Рисунок 1.5 – Токонесущий провод из проволок различного диаметра: 3 – сердечник

• Способ изготовления высокотемпературного провода для воздушной линии электропередачи и провод, полученный данным способом (Патент РФ № 2447525. МПК H01B 5/04)

Поверх слоя смазки расположены последовательно первый и второй повивы проволок из сплава на основе алюминия, включающего цирконий, с чередованием семи токопроводящих проволок диаметром  $1,15 \div 3,30$  мм и семи токопроводящих проволок диаметром  $0,85 \div 2,55$  мм в первом повиве и с чередованием четырнадцати токопроводящих проволок диаметром  $0,85 \div 3,30$  мм и с чередованием четырнадцати токопроводящих проволок диаметром  $1,45 \div 4,05$  мм в 2 повиве.

Это позволяет применять вновь разработанный высокотемпературный провод для передачи и распределения электрической энергии на номинальное переменное напряжение 36 кВ и выше, номинальной частотой 50 Гц, допускающий рабочую температуру  $210^\circ\text{C}$  при максимальных значениях пропускаемого тока, что позволит существенно увеличить эффективность ВЛ за счет увеличения количества передаваемой в единицу времени электроэнергии, сократить материальные и финансовые затраты при выполнении проектов воздушной линии в районах со сложными географическими и метеорологическими условиями, выполнять проекты реконструкции линий электропередачи с повышенным уровнем экологической безопасности.

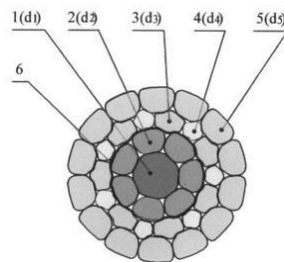


Рисунок 1.6 – Высокотемпературный провод в разрезе: 1 - центральная стальная проволока диаметром  $d_1$ ; 2 – семь стальных проволок диаметром  $d_2$ ; 3 – первый повив с чередованием семи токопроводящих алюминиевых проволок с диаметром  $d_3$ ; 4 – семь токопроводящих проволок с диаметром  $d_4$ ; 5 – второй повив четырнадцати токопроводящих проволок с диаметром  $d_5$ ; 6 – смазка, стойкая к воздействию высоких температур.

• Провод неизолированный со скользящим сердечником для воздушных линий электропередачи (Патент на полезную модель РФ № 127241. МПК H01B 5/10)

Особенности представленного технического решения:

1) Повышение срока службы провода за счет центровки сердечника и наличия смазки, что исключает возникновение сухого трения между сердечником и внутренней поверхностью повива из токопроводящих проволок.

2) Увеличение проводимости провода за счет введения в состав смазки графита или других компонентов, выполнения повивов провода из технически чистого алюминия, а также применения электропроводящих центрирующих элементов.

3) Уменьшение электросопротивления и габаритов провода за счет выполнения проволок трансформированными, плотно заполняющими все пространство вокруг сердечника

Сущность полезной модели поясняется изображением провода на рисунке 1.7.

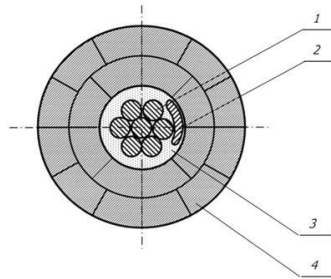


Рисунок 1.7 – Провод неизолированный со скользящим сердечником:

1 – стальной сердечник; 2 – центрирующие элементы; 3 – высокотемпературная смазка; 4 – повивы трансформированных алюминиевых проволок.

Как следствие, использование данного провода ведет к повышению надежности и безопасности линии при возникновении экстремальных условий, к уменьшению сопутствующего нагрева провода и безвозвратных потерь при передаче электроэнергии, т.е. к снижению себестоимости передаваемой энергии.

• Провод неизолированный сталалюминиевый высокопрочный, (и высокотемпературный) для воздушных линий электропередачи с сердечником повышенной прочности, имеет ряд конструктивных отличий от ранее известных проводов, в т.ч. и АСВП/АСВТ. Уменьшение диаметра проволок сердечника при увеличении их количества и группы прочности каждой, позволили достичь большей прочности всей конструкции. Однако это вызвало необходимость изменения конструкции самого провода.

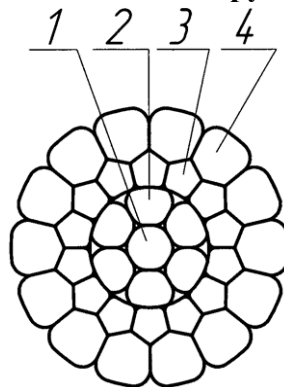


Рисунок 1.8 – Провод неизолированный сталалюминиевый высокопрочный, высокотемпературный:

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

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СЕРДЕЧНИКА

Разработка Высокопрочного металлического сердечника для неизолированных проводов двух исполнений (высокопрочных и высокотемпературных):

В процессе работы были разработаны ряд вариантов, часть из которых показали отрицательные результаты на этапе компьютерного моделирования.

В металле были исследованы следующие технологии изготовления высокопрочного металлического сердечника для неизолированных проводов предназначенных для передачи электрической энергии по воздушным линиям электропередачи (ВЛ) 36 кВ и выше:

1. Пластически обжатый сердечник, скрученный из стальных проволок с коррозионнозащитным металлическим покрытием.

К недостаткам данного пластически обжатого стального сердечника необходимо отнести:

- низкое увеличение прочности на 5-10% по отношению к стальному сердечнику сталеалюминиевого провода по ГОСТ 839-80;

- конструкция такого стального сердечника (1+6) не сможет обеспечить изготовление всего диапазона сталеалюминиевых проводов.

2. Сердечник, сечение которого выполнено в виде эллипса.

К недостаткам данного сердечника необходимо отнести довольно сложное в техническом плане изготовление сердечника, имеющего в поперечном сечении форму эллипса.

3. Стальной оцинкованный сердечник выполнен из круглой проволоки, изготовленной по ГОСТ 9850-72 «Проволока стальная оцинкованная для сердечников проводов Технические условия».

К существенным недостаткам данного стального оцинкованного сердечника необходимо отметить, изготовление его из проволок с довольно низким временным сопротивлением разрыву от 1450 до 1380Н/мм<sup>2</sup> в зависимости от диаметра проволоки. Такое низкое временное сопротивление разрыву проволок, идущих на изготовление сердечника, для вышеуказанного провода, увеличивает обрывность провода при повышенных ветровых нагрузках, обледенении, обильном налипании снега, что приводит к аварийным ситуациям на высоковольтных линиях.

**Задачей нашей разработки в конечном итоге является максимальное сохранение прочности при одновременном уменьшении диаметра, стойкости к ветровым нагрузкам металлического сердечника для неизолированных проводов.**

В результате были определены три варианта высокопрочного металлического сердечника, различной конструкции в зависимости от диаметра сердечника из оцинкованных проволок, плотность цинкового покрытия по группе ОЖ, с временным сопротивлением разрыву, не менее 1960 (200) Н/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>) по ГОСТ 7372-79 «Проволока стальная канатная. Технические условия»

- По первому варианту: конструкция сердечника (1+7) (Фиг.1), в котором вокруг центральной проволоки 1, сделан повив из семи проволок 2. Сердечник пластически деформирован по наружным поверхностям проволоки, степень обжатия площади поперечного сечения 11,5-13,5%.
- По второму варианту: конструкция сердечника (1+5+5/5+10) (Фиг.2), в котором вокруг центральной проволоки 1, последовательно сделан первый повив 2 из 5 проволок, второй повив чередующийся из 5 проволок 3 большего диаметра и 5 проволок 4 меньшего диаметра, третий повив из 10 проволок 5. Все три повива выполнены с одинаковым шагом свивки, в одном направлении и с линейным касанием проволок первого, второго и третьего повивов,



наружные поверхности проволок третьего повива пластически деформированы по наружным поверхностям проволоки, степень обжатия площади поперечного сечения 11,5-13,5%.

- По третьему варианту: конструкция сердечника (1+7+7/7+14) (Фиг.3), в котором вокруг центральной проволоки 1, последовательно сделан первый повив 2 из 7 проволок, второй повив чередующийся из 7 проволок 3 большего диаметра и 7 проволок 4 меньшего диаметра, третий повив из 14 проволок 5. Все три повива выполнены с одинаковым шагом свивки, в одном направлении и с линейным касанием проволок первого, второго и третьего повивов, наружные поверхности проволок третьего повива пластически деформированы, степень обжатия площади поперечного сечения 11,5-13,5%.

Это позволяет, используя новые конструкции высокопрочного металлического сердечника для неизолированных проводов, оцинкованную проволоку по группе ОЖ с временным сопротивлением, не менее 1960 (200) Н/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>), способ изготовления сердечника, увеличить на 35-45% прочность его, по отношению к стальному сердечнику сталеалюминиевого провода по ГОСТ 839-80.

**В настоящем отчёте приведены только успешные технические решения**

### ГЛАВА 3 СИСТЕМА КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОВОДНИКОВ

В последнее десятилетие с ростом быстродействия компьютерной техники появилась возможность использовать программные пакеты конечно-элементного анализа, позволяющие моделировать процессы деформирования сложных разнородных систем. Возможность компьютерного моделирования позволяет не только улучшить понимание процессов, происходящих при производстве и эксплуатации проводов, но и оптимизировать их конструкцию применительно к запросам потребителя, значительно сократить трудоемкость и себестоимость экспериментальных работ по освоению производства продукции.

Разработка именно провода 216/33 позволила в полной мере отладить элементы конструирования и создать именно систему.

Использование методов конечно-элементного моделирования позволило:

- оптимизировать геометрические размеры элементов ОКГТ и АСВП, технологические параметры пластического деформирования, обеспечивающие необходимую степень заполнения сечения;
- обеспечить целостность волокон оптического модуля при обжатии ;
- установить распределение температурных полей по сечению ОКГТ при различных длительности и силы тока короткого замыкания;
- осуществить сравнительный анализ служебных свойств ОКГТ конкурирующих производителей в различных климатических условиях.

Проведенное методом конечных элементов моделирование электромагнитных и тепловых эффектов при прохождении переменного тока в сталеалюминевых проводах различной конструкции показало, что, вопреки закреплённому в НТД мнению, направление свивки алюминиевых проволок при четном количестве повивов практически не влияет на выделение теплоты в стальном сердечнике, а формирование электрических контактов высокой проводимости между проволоками в результате пластического обжатия позволяет снизить на 10% тепловыделение в стальном сердечнике сталеалюминевых проводов типа АСВП по сравнению с традиционными проводами АС.

Оценка влияния ветра на провода с различной формой поперечного сечения с использованием двумерной модели конечно-элементного моделирования показала, что среднее снижение ветровой нагрузки на провод типа АСВП относительно стандартного АС при близкой допустимой токовой нагрузке составляет 25-40%.

Методы конечно-элементного компьютерного моделирования позволяют обоснованно оптимизировать конструкцию пластически обжатых металлических канатов линейного касания с целью повышения разрывной прочности при заданных габаритах. Существующие в литературе рекомендации по выбору конструкции канатов из металлических проволок достаточно противоречивы. Часть из них базируется на геометрических принципах синтеза конструкции каната и направлена на достижение максимальной плотности укладки проволок (К. В. Михайлов [17]) рекомендует принимать диаметр центральной проволоки семипроволочной пряди на 10 % больше диаметра наружных спирально уложенных повивочных проволок, что должно обеспечивать вовлечение центральной проволоки в общую работу пряди за счет ее радиального обжатия слоем спирально уложенных повивочных проволок. Близки рекомендации ГОСТ 13840-68 «Канаты стальные арматурные 1х7. Технические условия». Однако такой подход можно поставить под сомнение, так как согласно исследованиям, при растяжении стальных канатов первыми теряют свою конструктивную целостность наиболее короткие центральные проволоки прядей, именно в них первоначально при растяжении образуются «шейки» и разрывы. Проведенное конечно-элементное компьютерное моделирование обжатия в роликовых волокнах и последующего растяжения как стальных, так и медных проводов с центральным стальным сердечником, спроектированных исходя из традиционных рекомендаций, показало близкий характер изменения зависимости «усилие – деформация»: первоначально при увеличении деформации растяжения наблюдается почти линейный рост необходимого усилия, сопровождающийся упругой и небольшой пластической деформациями наружных витков и значительной распределенной пластической деформацией центральной проволоки. Начало формирования шейки и последующий разрыв центральной стальной проволоки приводит к замедлению роста необходимого для растяжения усилия, а затем значительному его снижению. Пластическая деформация медных проводов в момент образования шейки в стали не превышала 14%. Только при интенсивном образовании шейки в центральном стальном проводе начинается значительная пластическая деформация проволок спиральных повивов, приводящая вновь к росту деформирующего усилия. Таким образом, увеличение диаметра центральной проволоки по сравнению с проволоками спиральных повивов при сохранении габаритов каната может приводить только к снижению разрывного усилия. Результаты конечно-элементного моделирования показали необходимость для повышения разрывного усилия канатов и проводов использовать вместо одной центральной проволоки сердечника, свитого из трех или четырех проволок меньшего диаметра, либо введения дополнительных стальных проволок в спиральные повивы из медных проволок. Это обеспечило: сближение значений упругих и пластических деформаций витого сердечника и проволок следующих повивов; возможность использования более тонких проволок сердечника с повышенным классом прочности, и, в конечном итоге рост разрывного усилия более чем на 20%. Результаты моделирования позволили создать: защищенный патентом на полезную модель №171205, прошедший испытания и одобренный Управлением электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» компактированный несущий медных провод с центральным свитым стальным сердечником МК-120-ВСМ-4 для высокоскоростных железнодорожных магистралей диаметром 14 мм с разрывным усилием 83 кН; стальной грозотрос диаметром 24 мм с разрывным усилием 700 кН.

В результате серии НИР, включающих в себя моделирование и опытно-экспериментальные исследования изделий, подтвердившие расчётные характеристики, практически создана система оперативного конструирования проводников под требования эксплуатирующих организаций. Методы исследования включали в себя математические расчеты и модели; анализ существующих экспериментальных результатов и патентов; обработку результатов расчетов и моделирования;

отбор оптимальных вариантов для производства образцов; экспериментальное подтверждение результатов расчётов.

Достоверность результатов и выводов работы:

Экспериментальное подтверждение результатов расчётов, при проведении испытаний образцов, произведённых в металле.

Полученные результаты сопоставлены с результатами моделирования, имеющимися данными утвержденных методик, ГОСТов, нормативных документов и результатов иных исследований.

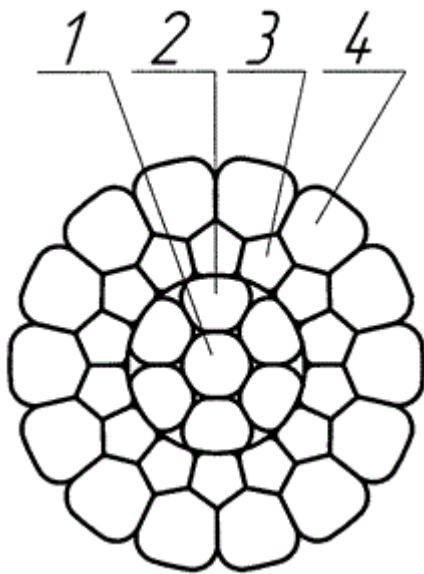
Основные тенденции модернизации ВЛ ведущими электросетевыми компаниями мира свидетельствует о том, что перспективным направлением является разработка новых конструкций провода, но без значительного удорожания, и работающего с «простой» арматурой.

Тренды: увеличение электропроводности и механической прочности, коэффициента заполнения внутреннего пространства, устойчивость к высоким температурам, малый вес, устойчивость к старению и воздействию окружающей среды.

**В настоящем отчёте приведены только успешные технические решения**

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОВОДА

*фиг. 1*



В процессе работы были разработаны ряд вариантов, часть из которых показали отрицательные результаты на этапе компьютерного моделирования, так же как и при работе над сердечником. Далее исследовались несколько вариантов:

1. Сталеалюминиевый провод, включающий изготовление стального сердечника из одной центральной и шести скрученных вокруг нее стальных оцинкованных проволок диаметром  $2,2 \div 3,6$  мм каждая, наложение на стальной сердечник на прессе кольцевого слоя выпрессованного алюминия, охлаждение водой на расстоянии не менее 1,5 м от зоны прессования алюминия и намотку на приемный барабан готового провода.

Недостатками данного провода являются:

- использование в сталеалюминиевом проводе стального сердечника в виде стальной круглой проволоки низкоуглеродистой термически не обработанной, второго класса по ГОСТ 3282 (настоящий стандарт распространяется на круглую низкоуглеродистую стальную проволоку, предназначенную для изготовления гвоздей, увязки, ограждений и других целей) не способствует

поддержанию заданных эксплуатационных свойств провода, в связи с низким временным сопротивлением разрыву проволоки, и стального сердечника в целом;

- требуется проведение специальной операции по подготовке поверхности стальной проволоки для наложения алюминия;

- довольно сложная конструкция для устранения неровностей на поверхности стальной круглой проволоки

2.Трехповивный провод для воздушных линий электропередачи, содержит сердечник, поверх которого расположены повивы с алюминиевыми проволоками, как минимум один повив содержит стальные проволоки.

Недостатками известного трехповивного провода являются:

- технологическая сложность изготовления провода из набора проволок с большим отличием в механических свойствах проволок;

- использование трехповивных проводов на воздушных линиях электропередач с соотношением стальных проволок к алюминиевым 1:5, не способствует увеличению механической прочности до параметров стальных проводов;

- применение алюминиевых проволок в конструкции повышает стоимость провода;

- низкий технический ресурс из-за применения в конструкции точечного касания круглых проволок в проводе типа ТК (скрутка повивов в противоположные стороны);

- неоптимальное рабочее сечение проводника из-за больших воздушных зазоров между круглыми проволоками в конструкции, (уменьшает усилие на разрыв и снижает суммарное электрическое сопротивление провода в целом).

3.Провод для воздушных линий электропередачи, содержащий повивы стальных плакированных алюминием проволок, отличающийся тем, что толщина слоя плакированного алюминия на поверхности стальной проволоки находится в пределах  $(0,02 \div 0,5)$  мм таким образом, что обеспечивается пропускная способность провода по электрическому току в пределах  $(0,8 \div 8)$  ампер на квадратный миллиметр его поперечного сечения при максимально допустимой температуре поверхности провода, равной  $250^{\circ}\text{C}$ .

Недостатком известного провода является:

- при обозначенной толщине слоя плакированного алюминия на поверхности стальной проволоки, для получения требуемого размера поперечного сечения алюминиевого провода, необходимо значительное увеличение количества проволок в данной конструкции провода, что ведет к увеличению его диаметра, массы по отношению к известным применяющимся в настоящее время проводам для ВЛ. При заданных стрелах провеса, ветровых и гололедных нагрузках создаются повышенные нагрузки на элементы опор, на которые существующие опоры могут быть не рассчитаны. Поэтому может возникнуть необходимость в их усилении, в установке дополнительных промежуточных опор в пролетах воздушной линии или установке новых (замене) опор.

4.Сталеалюминиевого провода, который включает изготовление стального сердечника обеспечивающего механическую прочность провода, из стальных оцинкованных проволок диаметром  $1,50 \div 4,61$  мм каждая, покрытие сердечника слоем защитной термостойкой смазки и изготовление одного или несколько повивов проволок из алюминия (см. Технические условия ГОСТ 839-80 «Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи»).

К недостаткам этого известного способа можно отнести следующее:

- пониженная механическая прочность;

- пониженная пропускная способность, повышенный нагрев;

- повышенные вибрации провода под действием ветра, повышенная парусность;

- повышенное налипание снега и льда, повышенное образование гололедных отложений;  
 - температурный предел нагрева проходящим током при длительной эксплуатации равный не более 90°C, при температуре 100-110°C токоведущий повив провода теряет прочность, что ограничивает возможности передачи проводом и по количеству передаваемой электроэнергии (величине тока), так как начинается его разрушение и(или) величина стрелы прогиба становится больше допустимой величины, определяемой правилами безопасной эксплуатации высоковольтных линий.

Задачей настоящей разработки являлось создание неизолированного сталеалюминиевого провода двух типов: высокопрочный и высокотемпературный с увеличенным сечением токоведущей части в том же диаметре, относительно АСВП/АСВТ.

#### **Итоговое техническое решение:**

Сердечник пластически деформирован по наружным поверхностям по схеме представленной выше. Вокруг сердечника сделаны последовательно повивы, первый повив из 14 алюминиевых проволок 3 и второй повив из 14 алюминиевых проволок 4, наружные поверхности проволок пластически деформированы, степень обжатия площади поперечного сечения 11,5-13,5%. Это позволяет, используя новую конструкцию высокопрочного металлического сердечника для неизолированных проводов, оцинкованную проволоку по группе ОЖ с временным сопротивлением, не менее 1960 (200) Н/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>), способ изготовления сердечника, увеличить на 35-45% прочность его, по отношению к стальному сердечнику сталеалюминиевого провода по ГОСТ 839-80.

Высокотемпературное исполнение отличает лишь то, что повивы из алюминиевых проволок из сплава на основе алюминия, включающий цирконий 0,20-0,40 вес.%. Это позволяет применение вновь разработанного высокотемпературного провода (варианты) для передачи и распределения электрической энергии на номинальное переменное напряжение 35 кВ и выше, номинальной частотой 50 Гц, допускающих рабочую температуру провода - 210°C при максимальных значениях пропускаемого тока, что позволит существенно увеличить надёжность и эффективность ВЛ.

Наименование провода	Диаметр, мм	Разрывное усилие, Н	Электрическое сопротивление, Ом/км	Длительно допустимый ток, А	Вес, кг/км	Примечания
<b>Целевые показатели</b>	<b>18,5</b>	<b>90 000</b>	<b>-</b>	<b>1100</b>	<b>850</b>	
<b>АСВП 216/33</b>	<b>18,5</b>	<b>90 000 (89 500*)</b>	<b>0,133</b>	<b>1039 (t<sub>пров</sub> 70°C) 1168 (t<sub>пров</sub> 90°C)</b>	<b>870</b>	<b>Основной согласно Соглашения</b>
<b>АСВТ 216/33</b>	18,5	90 000 (89 500*)	0,133	<b>1430 (t<sub>пров</sub> 150°C)</b>	<b>870</b>	Дополнительно, Высокотемпературное исп.
АС 185/29	18,8	62 055	0,1521	510	728	Провод АС, как ориентир по диаметру
АС 240/39	21,6	80 895	0,1222	635	952	Провод АС, как ориентир для ВЛ-220
АААС-Z242-2Z	18,9	71650	0,1352	636	654	импортный, как ориентир АСВП 216/33

**В настоящем отчёте приведены только успешные технические решения**

## **ГЛАВА 5 АРМАТУРА**

В разработке арматуры принимали участие ЗАО «НТЦ «Электросети» (спиральная) и ООО ПО «Форэнгерго» (прессуемая, по требованию ПАО «ФСК ЕЭС»).

Основной особенностью арматуры такого типа является то, что в её состав входят элементы, которые контактируют непосредственно и с алюминиевой, и со стальной частями провода, перераспределяя нагрузку на все элементы провода.

В конструкции 216/33 именно эта особенность и стала главной проблемой, из-за сложной конструкции и малого диаметра. Обладая достаточно высокой гибкостью, спиральные элементы хорошо сочетаются с проводом и после монтажа фактически образуют с ним единое целое, что дополнительно формирует своеобразный защитный слой. В свою очередь, несколько циклов комплексных испытаний прессуемой арматуры в комплексе с АСВП 216/33 показали, что и этот класс зажимов обеспечивает надёжность работы системы «провод-арматура».

Изгибная жёсткость провода увеличивается, повышается усталостная прочность и, в итоге, уменьшается износ. Одной из сфер применения указанной конструкции является анкерное крепление проводов на больших переходах, когда необходимая прочность заделки и провода имеет особенное значение. На внутреннюю поверхность пряди нанесен абразив. Если необходимо дополнительно защитить провод в зоне крепления, зажим устанавливается на предварительно навиваемый спиральный протектор. Крепление зажима к опоре осуществляется посредством коуша и стандартной сцепной арматуры. Нормативная прочность заделки провода в зажиме составляет не менее 95% от разрывной прочности провода.

Фактическая прочность системы «провод-арматура» в натяжных зажимах спирального типа НС-18,4/18,7-32(100) (ТУ 3449-002-27560230-06) производства КФ АО «Электросетьстройпроект» составила 89,5 кН, что составляет 99,4% от МПР провода АСВП 216/33 и соответствует требованиям ПАО «ФСК ЕЭС» и ПАО «Россети» к арматуре (должно быть не менее 95% МПР провода). Результаты подтверждены заводскими испытаниями и независимыми испытаниями НТЦ «Электросети» (протоколы прилагаются).

**В настоящем отчёте приведены только успешные технические решения**

## **ГЛАВА 5. ОФОРМЛЕНИЕ ТРУДОВЫХ ОТНОШЕНИЙ**

Фокин В. А., Генеральный директор

Власов А. К., по вопросам электротехники, разработке оптимальных конструкций и методологии испытаний

Фролов В. И. по вопросам модернизация канатного производства

Гуревич, Л.М., по вопросам металловедения и разработке оптимальных сплавов

Хромов В.Г., консультант по вопросам металловедения и разработке оптимальных технологий

Последний в ходе начального этапа был заменён на Звягинцева Александра Васильевича. Причина замены – достаточная квалификация д.т.н., проф. Гуревича Л.М. для целей Проекта в области металловедения, разработки оптимальных сплавов и моделирования.

Привлечение Звягинцева А.В. восполнило недостаток практического опыта применения проводов в электросетевом комплексе, а также опыта разработки и внедрения оптимальных конструкций арматуры. Звягинцев А.В., помимо участия в отработке продукта и системы «провод – спиральная арматура», обеспечил разработку дополнительного вида арматуры – прессуемой.

Со всеми соавторами по патентам, значимым для Проекта заключены лицензионные Соглашения, зарегистрированные в Роспатент.

## **ГЛАВА 6. ПУБЛИКАЦИИ И ПРЕЗЕНТАЦИИ НА ТЕМАТИЧЕСКИХ ПУБЛИЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЯХ**

- Публикация по результатам научно-практической конференции «Особенности эксплуатации и проектирования ВЛ 35-750 кВ с использованием высокопрочных и высокотемпературных проводов» в журнале «Энергия Единой Сети» (№1(30) 2017г). В интересах коммерциализации

продуктов разрабатываемых в рамках Проекта, как к публикации, так и к самой Конференции были привлечены НТЦ «ФСК ЕЭС» и РНК СИГРЭ. Как результат такого решения и использования сложившегося восприятия уже реализованных проектов стало:

- Официальная публикация РНК СИГРЭ

- Включение материала по проводам с усиленным сердечником в перечень проектов для представления на Сессии СИГРЭ 2018 (Париж)

- Протокол МЭС Центра о отборе линейных объектов применения после аттестации продуктов

- Решение ПАО «МОЭСК» о опытном применении модификации продукта на ВЛ 110

➤ 10 марта 2017г проведены комплексные заводские испытания новых проводников 216/33 в высокопрочном исполнении и их модификаций, разработанных в рамках Проекта, с участием представителей ПАО «МОЭСК» и УК «РУСАЛ».

➤ 24 апреля 2017 г. в рамках крупнейшей в мире промышленной выставки «Hannover Messe» проведены переговоры с VDE, совместно РЭЦ, где были намечены основные направления совместной работы по взаимному признанию сертификации. Руководству VDE была представлена презентация модификаций новых проводов с усиленным сердечником. Сторонами были поддержаны выдвинутые Генеральным директором Метсбытсервис предложения по созданию программы поэтапного взаимного признания сертификационных испытаний в области электроэнергетики, как наиболее перспективного первого шага. Учитывая идентичность регламента аттестационных испытаний в части элементов электросетевого комплекса России и Германии, по заключению научно-технического центра SAG Германия, такую работу можно было бы начать на основе взаимной инспекции федеральных испытательных центров. Причём именно подписанное РЭЦ и VDE соглашение открывает вполне реальные перспективы для реализации такой задачи. Возможным пилотным проектом сторонами признан проект разработки новых проводов с усиленным сердечником. В результате переговоров была выработана предварительная последовательность конкретных действий сторон на ближайший период, реализуемая в настоящее время.

Входе конференции организованной Комитетом РСПП по техническому регулированию в рамках Hannover Messe 2017, прошли презентация новых продуктов и переговоры Метсбытсервис с Президентом DKE/Президентом CENELEC Бернхардом Тисом (Bernhard Thies – Президент DKE, президент CENELEC (Европейского комитета по электротехнике)) и Председателем Европейского сотрудничества по аккредитации (EA) и Daakks Томасом Факламом ( Thomas Facklam, Daakks – Национальный орган по аккредитации ФРГ) о участии этих авторитетнейших институтов Германии в работе намеченной в ходе встречи с VDE.

## ГЛАВА 7. ДОПОЛНИТЕЛЬНО РАЗРАБОТАННЫЕ ПРОДУКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

### 7.1. Сравнение подтверждённых технических характеристик итоговых образцов разработанных проводов.

Наименование провода	Диаметр, мм	Разрывное усилие, Н	Электрическое сопротивление, Ом/км	Длительно допустимый ток, А	Вес, кг/км	Примечания
Целевые	18,5	90 000	-	1100	850	
АСВП 216/33	18,5	90 000 (89 500*)	0,133	1039 (t <sub>пров</sub> 70°C) 1168 (t <sub>пров</sub> 90°C)	870	Основной согласно Соглашения

АСВТ 216/33	18,5	90 000 (89 500*)	0,133	1430 ( $t_{\text{пров}} 150^{\circ}\text{C}$ )	870	Дополнительно, Высокотемпера- турное исп.
АНВП 240,72 6101 Т4-290	18,5	69 800	0,135	1146 ( $t_{\text{пров}} 70^{\circ}\text{C}$ ) 1300 ( $t_{\text{пров}} 90^{\circ}\text{C}$ )	670	Дополнительно, Без стального сердечника**
АСВП 216/33К	18,5	92 945	0,125	1556 ( $t_{\text{пров}} 70^{\circ}\text{C}$ ) 1755 ( $t_{\text{пров}} 90^{\circ}\text{C}$ )	897	Дополнительно, в соответствии с требованиями сетевых компаний ЕЭС***
АС 185/29	18,8	62 055	0,1521	510	728	Провод АС, как ориентир по диаметру
АС 240/39	21,6	80 895	0,1222	635	952	Провод АС, как ориентир для ВЛ-220
АААС-Z242-2Z	18,9	71650	0,1352	636	654	импортный, как ориентир АСВП 216/33

\*- Фактическая прочность системы «провод-арматура» в натяжных зажимах спирального типаНС-18,4/18,7-32(100) (ТУ 3449-002-27560230-06) производства КФ АО «Электросетьстройпроект» составила 89,5 кН, что составляет 99,4% от МПР провода АСВП 216/33 и соответствует требованиям ПАО «ФСК ЕЭС» и ПАО «Россети» к арматуре (должно быть не менее 95% МПР провода). Результаты подтверждены заводскими испытаниями и независимыми испытаниями НТЦ «Электросети» (протоколы прилагаются).

Разработка АСВП 216/33 открыла дополнительные возможности для модификаций пластически деформированных проводов на основе только отечественных материалов (УК «Русал»):

1. (\*\*\*) - Использован инновационный сплав 6101 Т4-290
2. (\*\*\*) – запрос сформулирован компанией TenneT и Федеральным ведомством Германии по развитию сетей (Bundesnetzagentur). Заинтересованность в данной конструкции есть и у компании TERNA.

Разработка модификаций не связана с дополнительными затратами в рамках гранта.

## 7.2. ОБЪЕКТ ПРОМЫШЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ. МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В отличие от провода АСВП/АСВТ сердечник выполнен из более тонких и более прочных стальных проволок, что позволяет увеличить сечение токопроводящих проволок в том же диаметре. В высокотемпературном токоведущие проволоки выполнены из алюминивно-циркониевого сплава. Добавки циркония в алюминиевый сплав повышают прочность и температуру рекристаллизации, при этом практически не снижают его проводимость.

Таблица 4.1 – Технические характеристики проводов АСВТ в сравнении с АС и АААС

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Сечение алюминий/сталь, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм		эл. сопр. 1 км провода пост.току при 20°С, Ом	Разрывное усилие, Н	Масса 1 км провода, кг
		Провода	Стального сердечника			
АААС-Z177-1Z	179,27	16,50	-	0,1851	52300	563,0
АС 185/29	181/29	18,80	6,90	0,1591	62055	728,0
АСВТ 197/55	196,8/55,5	18,80	8,95	0,1460	116750	990,5
АСВТ 214/61	214/60,9	19,60	9,36	0,1348	126672	1080,9



АС 205/27	205/26,6	19,80	6,6	0,1407	63740	774
АСВТ 162/45	162,3/45,5	17,10	8,17	0,1780	96146	814,8
АААС-Z242-2Z	246,02	18,90	-	0,1352	71650	654,0
АС 240/39	236/38,6	21,60	8,00	0,1222	80895	952,0
АСВТ 258/73	257,7/72,7	21,60	10,30	0,1116	151533	1296,5

Таблица 2.2 – Сравнение допустимых токовых нагрузок для проводов АСВТ, АС, АААС

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Ток при $t_{пр}$ 80°C $t_{окр.ср} = 20°C$	Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Ток при $t_{пр}$ 80°C $t_{окр.ср} = 25°C$	Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Ток при $t_{пр}$ 150°C $t_{окр.ср} = 20°C$
АС 185/29	510	АААС-Z177-1Z	526	АСВТ 197/55	942,8
АС 205/27	548	АААС-Z242-2Z	636	АСВТ 162/45	821,6
АС 240/39	610	АААС-Z366-2Z	819	АСВТ 258/73	1141,0

### Сравнение подтверждённых технических характеристик итоговых образцов проводов АСВП 216/33.

Наименование провода	Диаметр, мм	Разрывное усилие, Н	Электрическое сопротивление, Ом/км	Длительно допустимый ток, А	Вес, кг/км	Примечания
Целевые	18,5	90 000	-	1100	850	
АСВП 216/33	18,5	90 000 (89 500*)	0,133	1039 ( $t_{пров} 70°C$ ) 1168 ( $t_{пров} 90°C$ )	870	Основной согласно Соглашения
АСВТ 216/33	18,5	90 000 (89 500*)	0,133	1430 ( $t_{пров} 150°C$ )	870	Дополнительно, Высокотемпературное исп.

Минимально допустимой температурой для алюминиево-циркониевого сплава считается 150°C. Длительный нагрев проводника при данной температуре не приводит к снижению его прочности. Однако следует принимать во внимание возникающие в проводе вибрации, вызывающие разрушение провода по причине усталости. Предел усталости для алюминиево-циркониевых сплавов при температуре 150°C примерно равен пределу усталости алюминия при 90°C.

Сравнительный анализ проводников по условиям сохранения механической прочности воздушных линий на основе методики расчета предельных токовых нагрузок ЛЭП для изменяющихся параметров окружающей среды (скорость ветра, температура воздуха)

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

Расчет предельных токовых нагрузок в районах с максимальной температурой воздуха ниже 45 °C 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 [21].

Ток в проводе при заданном значении перегрева по отношению к воздуху определяется из уравнения теплового баланса для провода

$$I = \sqrt{\frac{(\alpha_n + \alpha_k)\Delta t}{R_t}}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/(м·°С)

$$\alpha_n = 7.24\xi d \left( \frac{T_{cp}}{1000} \right)^3, \quad (2.2)$$

где  $\xi$  - постоянная лучеиспускания; для проводов, находящихся в эксплуатации, принимается равной 0,6;  $d$  - диаметр провода, см;  $T_{cp}$  - среднее значение между температурой провода и температурой воздуха, К

$$T_{cp} = \frac{t_{np} + t_e}{2} + 273, \quad (2.3)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м·°С).

$$\alpha_k = 0,16 \cdot d^{0,75} \Delta t^{0,3} \text{ при } v < 1,2 \text{ м/с}, \quad (2.4)$$

$$\alpha_k = 1,1\sqrt{vd} \text{ при } v \geq 1,2 \text{ м/с}, \quad (2.5)$$

где  $v$  - скорость ветра, направленного перпендикулярно проводу, м/с.  
Сопротивление провода при температуре  $t$ , Ом/м

$$R_t = \frac{R_{20}(1 + \alpha't)}{1,08}, \quad (2.6)$$

где  $R_{20}$  - сопротивление провода при температуре 20 °С, Ом/м;  $\alpha'$  - температурный коэффициент электрического сопротивления материала провода (для меди и алюминия принимается равным 0,004 °С<sup>-1</sup>).

Температура провода при заданных климатических условиях определяется из уравнения:

$$k_m k_n I^2 R_{20} (1 + \beta_r (t_{np} - 20)) + P_c = (\alpha_k + \alpha_n) F (t_{np} - t_e), \quad (2.7)$$

где  $k_m$  - коэффициент, учитывающий магнитные потери в стальном сердечнике, для 1 слоя алюминия равен 1.15, для 2-х - 1.04, для 3-х - 1.10;  $k_n$  - коэффициент, учитывающий поверхностный эффект, при отсутствии опытных данных,  $k_n = 1,05$ ;  $\beta_r$  - температурный коэффициент, для алюминия равен 0,00403 1/°С, для стали равен 0,00600 1/°С;  $P_c$  - мощность солнечного излучения, поглощаемая проводом;  $F$  - площадь поверхности теплообмена.

Определить температуру провода возможно итерационным методом. В этом случае, значение температуры при  $k$ -й итерации будет иметь вид:

$$t_{np} = \frac{k_m k_n I^2 R_{20} (1 - 20\beta_r) + P_c + (\alpha_k^{(k-1)} + \alpha_n^{(k-1)}) F t_e}{(\alpha_k^{(k-1)} + \alpha_n^{(k-1)}) F - k_m k_n I^2 R_{20} \beta_r} \quad (2.8)$$

Мощность солнечного излучения, в расчете на 1 м провода

$$P_c = \varepsilon_n k_H d_{np} k_{мес} W_p \sin \psi_c, \quad (2.9)$$

где  $\varepsilon_n$  - коэффициент поглощения провода, равен 0,6;  $k_H$  - коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря;  $k_{мес}$  - коэффициент, учитывающий интенсивность солнечного излучения от времени года;  $W_p$  - интенсивность радиации;  $\psi_c$  - угол наклона солнечных лучей

$$\psi_c = \arccos(\cos(h_c) \cdot \cos(180 - \psi_l)), \quad (2.10)$$

$$h_c = 113,5 - \varphi, \quad (2.11)$$

здесь  $h_c$  - угловая высота Солнца для северного полушария Земли;  $\varphi$  – широта местности, для Волгограда 48.41;  $\psi_l$  - ориентация линии электропередачи по отношению к меридиану.

$$k_H = 0,116 \cdot \lg H + 0,752, \quad (2.12)$$

где  $H$  – высота над уровнем моря, для Волгограда от 12 м до 156 м.

Интенсивность радиации представляется в виде зависимости с учетом чистоты воздуха. Для воздуха средней загрязненности имеет вид

$$W_p = 134,282 + 26,738h_c - 0 / 3134h_c^2 + 1,2893 \cdot 10^{-3} \cdot h_c^3 \quad (2.13)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется исходя из уравнений конвективного теплообмена  $Nu = f(Re, Gr)$  (2.14)

$$\text{Критерий Нуссельта} \quad Nu = \frac{\alpha_k d_{np}}{\lambda_g}, \quad (2.15)$$

где  $\lambda_g$  - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С).

$$\text{Критерий Рейнольдса} \quad Re = \frac{\nu d_{np}}{\nu_g}, \quad (2.16)$$

где  $\nu$  - скорость ветра, м/с;  $\nu_g$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

$$\lambda_g = 2,44 \cdot 10^{-2} \sqrt{1 + 0,0069 \cdot t_g} \quad (2.17)$$

$$\nu_g = 13,28 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0069 \cdot t_g) \quad (2.18)$$

$$\text{Критерий Грасгофа} \quad Gr = \frac{g \beta_g d_{np}^3 (t_{np} - t_g)}{\nu_g^2}, \quad (2.19)$$

где  $\beta_g$  - температурный коэффициент объемного расширения воздуха

$$\beta_g = \frac{1}{t_g + 273} \quad (2.20)$$

$$Nu = 0,437 k_\psi Re_y^{0,5} \text{ при } 5 < Re \leq 10^3, \quad (2.21)$$

$$Nu = 0,218 k_\psi Re_y^{0,6} \text{ при } 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5, \quad (2.22)$$

$$Nu = 0,0201 k_\psi Re_y^{0,8} \text{ при } 2 \cdot 10^5 < Re \leq 2 \cdot 10^6, \quad (2.23)$$

$$Re_y = Re + \sqrt{0,5Gr}, \quad (2.24)$$

здесь  $k_\psi$  - коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра (справочная величина);  $Re_y$  – эквивалентный критерий Рейнольдса, учитывает совместное действие свободной и вынужденной конвекции.

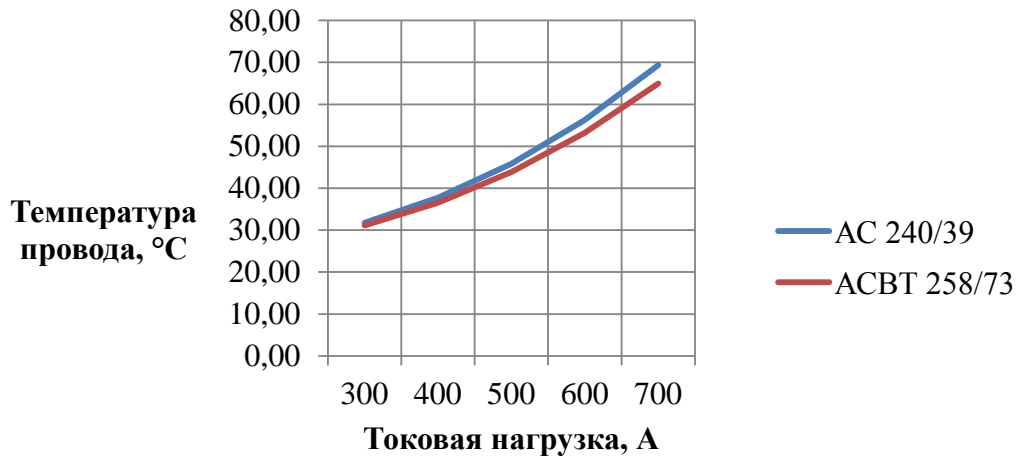


Рисунок 2.4 – График зависимости температуры провода от величины токовой нагрузки при  $t_{o.c.} = 20^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра  $0,6 \text{ м/с}$

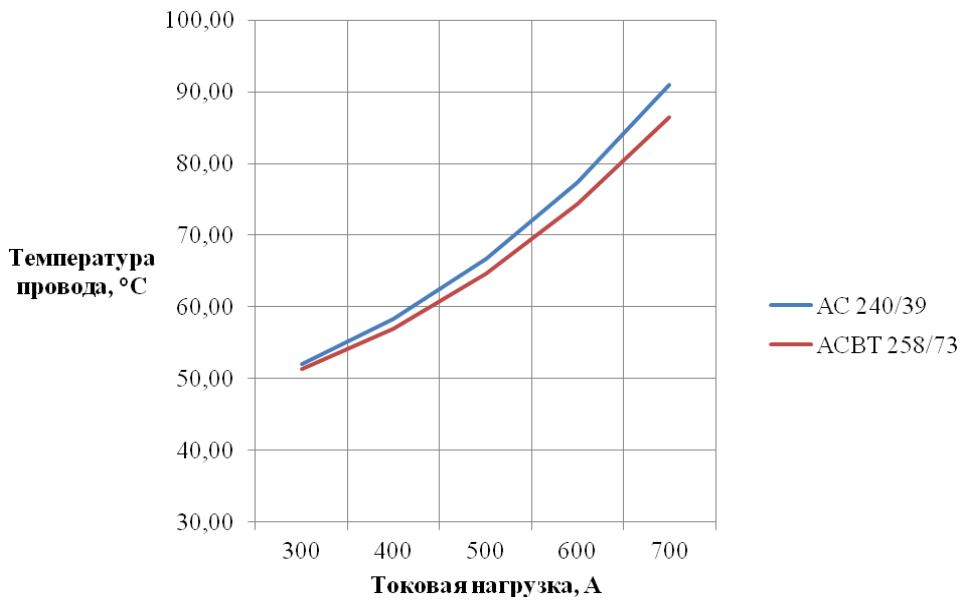


Рисунок 2.5 – График зависимости температуры провода от величины токовой нагрузки при  $t_{o.c.} = 40^{\circ}\text{C}$  и скорости ветра  $0,6 \text{ м/с}$

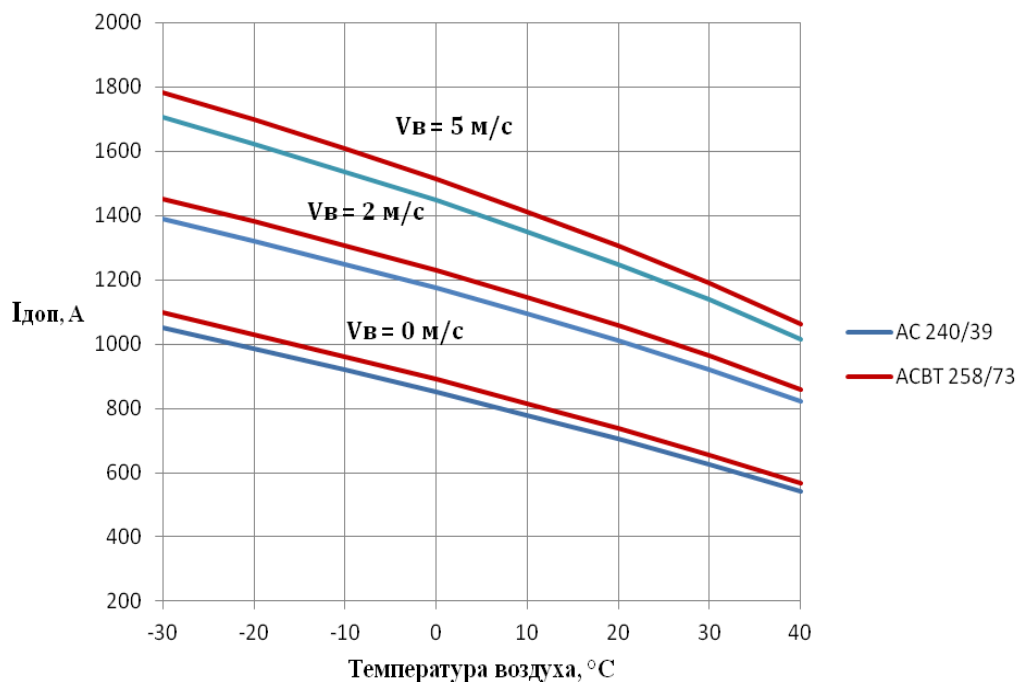
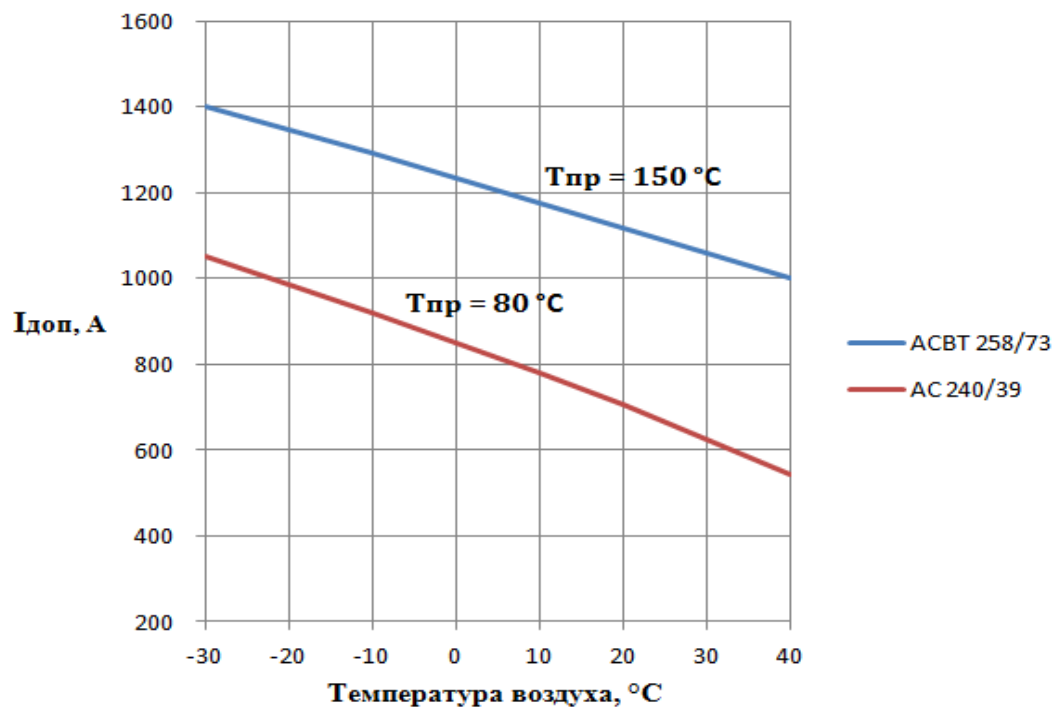


Рисунок 2.6 – График зависимости токовой нагрузки от температуры воздуха для  $t_{пр} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  при различных скоростях ветра

Рисунок 2.7 – График зависимости токовой нагрузки от температуры воздуха для проводов AC и



ACBT одинакового диаметра при скорости ветра  $1,2\text{ м/с}$

Очевидно, что при увеличении тока в проводе, температура провода ACBT ниже, чем у провода AC. Разница значений особенно заметна при больших нагрузках и достигает 5–7%.

При анализе графика 2.5 очевидно, что 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% .

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. 2.7 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.

Данный факт позволяет использовать инновационный провод в случаях, когда необходимо существенно повысить токовые нагрузки на линии электропередач не увеличивая сечения, а также в районах с высокими температурами окружающей среды.

2.1 Оценка влияния пластической деформации сталеалюминиевых проводов АСВТ на снижение величины намагничивания внутри проволок и сокращение тепловыделения от стального сердечника при эксплуатации ВЛ-110

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 и тело становится намагниченным. Мерой намагниченности вещества является векторная величина, равная сумме магнитных моментов молекулярных токов, заключенных в единице объема вещества:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi}, \quad (2.25)$$

где  $\vec{p}_{mi}$  - магнитный момент  $i$ -го молекулярного тока.

$$\vec{p}_{mi} = IS, \quad (2.26)$$

где  $S$  – поперечное сечение проводника,  $m^2$ ;  $I$  – ток в проводнике.

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

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \quad (2.27)$$

В изотропной среде

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} - \vec{J} \quad (2.28)$$

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H} \quad (2.29)$$

$$\chi = \mu - 1 \quad (2.30)$$

где  $\chi$  - относительная магнитная восприимчивость вещества;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость вещества.

Согласно теореме о циркуляции вектора  $H$ , циркуляция вектора напряженности магнитного поля по некоторому контуру равна алгебраической сумме макроточков, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} \quad (2.31)$$

или

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{макро}}, \quad (2.32)$$

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

$$\vec{j}_{\text{макро}} = \frac{\vec{I}_{\text{макро}}}{S} \quad (2.33)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r^2, \text{ при } r < R \quad (2.34)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i^{\text{макро}} = I, \text{ при } r > R \quad (2.35)$$

Следовательно,

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2}, \text{ при } r < R \quad (2.36)$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \text{ при } r > R \quad (2.37)$$

Тогда, величина магнитной индукции равна соответственно:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Ir}{2\pi R^2}, \text{ при } r < R \quad (2.38)$$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}, \text{ при } r > R \quad (2.39)$$

Объемная плотность энергии

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 r^2} = \frac{dW}{dV} = \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{\Delta W}{\Delta S \cdot l} \quad (2.40)$$

Энергия магнитного поля

$$W = \int_V w dV = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV = \int_V \frac{BH}{2} dV \quad (2.41)$$

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 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики сравниваемых проводов

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Диаметр провода, мм	Стальной сердечник		Алюминиевая часть провода		Токвая нагрузка, А
		Число проволок	Диаметр проволок, мм	Число проволок	Диаметр проволок, 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	

Изменение величины намагниченности для пары проводника АСВТ и АС определим по

$$\text{формуле} \quad \Delta J = \frac{\mu_0 I^3}{4\pi \Delta W}, \quad (2.42)$$

где  $\Delta W$  - изменение энергии магнитного поля, Дж

$$\Delta W = V \Delta \omega \quad (2.43)$$

$$\Delta \omega = \frac{(B_{AC})^2 - (B_{АСВТ})^2}{2\mu_0} \quad (2.44)$$

В ходе расчётов установлено, что с увеличением токовой нагрузки в электросети, изменение намагниченности в проводе возрастает. Относительное снижение намагниченности высокотемпературного провода АСВТ в сравнении с проводом АС составляет 3-7 % для различных вариантов.

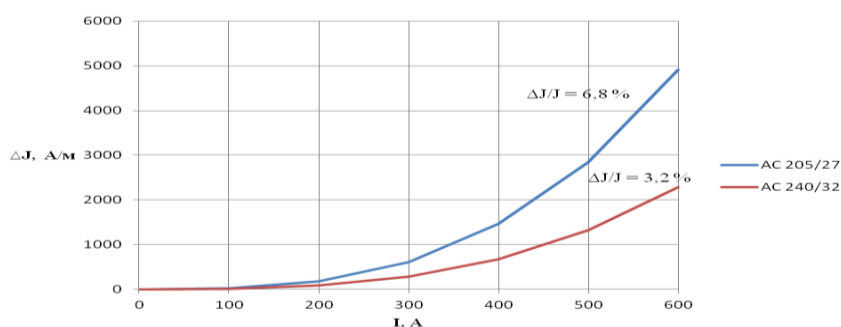


Рисунок 2.8 – Изменение намагниченности в проводе АСВП/АСВТ относительно провода АС 205/27 и АС 240/32

Известно, что при протекании переменного тока через провод, плотность тока в различных областях провода не одинакова. Согласно теории, плотность тока максимальна вблизи поверхности и минимальна на оси провода. Неравномерность распределения наиболее ощутима при высоких значениях частоты и большой толщине провода. Это явление называется скин-эффект и объясняется возникновением вихревого электрического поля электромагнитной индукции.

Суть явления заключается в том, что протекающий в проводнике ток создает внутри него магнитное поле, силовые линии которого лежат в плоскости, перпендикулярной к оси проводника. При возрастании тока усиливающееся магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля, которое у поверхности проводника направлено одинаково с током, а на оси проводника – противоположно току. Это поле, следовательно, будет усиливать ток на поверхности, и ослаблять его на оси. При уменьшении тока, ослабевающее магнитное поле вызовет электрическое поле, которое будет направлено противоположно по сравнению с первым случаем, т. е. будет у поверхности противоположно току, а на оси - совпадать с ним. В обоих случаях вихревое электрическое поле на оси проводника препятствует изменению тока, а на поверхности – способствует. Из этого следует, что на оси ток слабее, а на поверхности сильнее. Это явление в итоге приводит к уменьшению действующего сечения проводника и к увеличению его сопротивления [1,27-29].



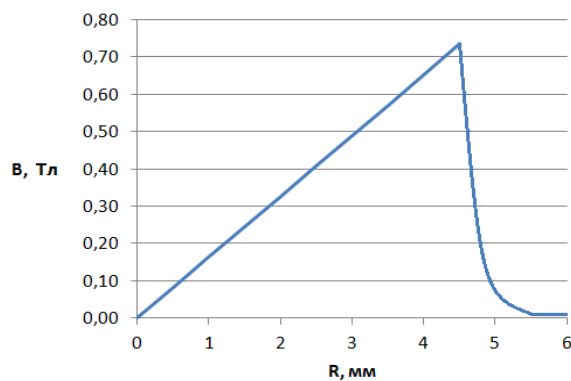


Рисунок 2.9 – Распределение магнитной индукции в зависимости от радиуса провода ( $d_{пр} = 19,8$  мм)

Данный график наглядно иллюстрирует явление скин-эффекта в проводе при протекании через него электрического тока. Величина магнитной индукции максимальна на поверхности провода, далее резко снижается по мере отдаления от неё.

Тепловые потери в проводнике с током определим по формуле

$$P = k_n k_m R_{20} I^2, \quad (2.45)$$

где  $k_n$  – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект,  $k_m$  – коэффициент, учитывающий магнитные потери в стальном сердечнике провода,  $R_{20}$  – активное сопротивление провода при  $20^\circ\text{C}$ .

Согласно СТО 56947007-29.240.55.143-2013,  $k_n$  принимают равным 1,05; коэффициент магнитных потерь определяется в зависимости от количества повивов алюминия поверх сердечника из стали. В случае для 2-х слоев алюминия  $k_m = 1,04$ ; для 1-го слоя алюминия  $k_m = 1,15$ . Из расчётов для проводов марок АСВТ и АС одинакового сечения при равных допустимых токах, имеем, что тепловые потери в стандартном сталеалюминиевом проводе превышают потери в проводе АСВТ на 17%.

#### 2.4 Выводы:

1. По результатам сравнительного анализа проводов АСВТ и АС по условию сохранения механической прочности, установлено, что при равных условиях окружающей среды, разница допустимой нагрузки для сравниваемых проводов составляет 5%. При увеличении тока в проводе, температура у АСВТ ниже, чем у АС. Разница показателей достигает 5–7% при высоких токовых нагрузках.

2. Для проводов одинакового диаметра длительно допустимый ток для высокотемпературного провода на 30-35 % превышает значение для стандартного провода.

3. При равных допустимых токах для проводов марок АСВТ и АС одинакового сечения, тепловые потери в стандартном сталеалюминиевом проводе превышают потери в проводе АСВТ на 17%.

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

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

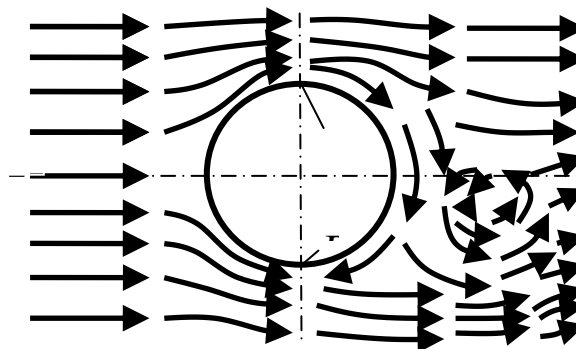
### 7.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОВОДОВ АСВТ НА ВЛ-110 КВ В УСЛОВИЯХ ЮГА РОССИИ

3.1 Исследование влияния изменения ветровой нагрузки и интенсивности гололедообразования на компактированных проводах АСВТ по отношению к стандартным проводам АС для обоснования практического применения на ВЛ-110

При эксплуатации линий электропередач особое внимание уделяют вибрациям провода. Вибрацией принято называть колебания проводов с амплитудой не более двух диаметров провода. Данное явление возникает при возникновении вихрей с подветренной стороны провода в случаях, когда поток воздуха направлен поперек оси или под углом к ней. С некоторой периодичностью наблюдаются отрывы ветра от поверхности провода и образование противоположно направленных вихрей.

Рисунок 3.1 – Образование вихрей за проводом

Отрыв вихря в нижней части влечет за собой возникновение кругового потока с



подветренной стороны, причем его скорость в точке А больше, чем в точке В. Вследствие этого появляется вертикальная составляющая давления ветра. В момент совпадения частоты образования вихрей с частотой собственных колебаний натянутого провода начинают зарождаться колебания в вертикальной плоскости.

Вибрации проводов возникают при скоростях ветра 0,6—0,8 м/с. При увеличении скорости ветра возрастает частота вибрации и количество волн в пролете, при скорости ветра свыше 5—8 м/с амплитуды вибрации настолько малы, что не опасны для провода.

По данным сайта Gismeteo.ru для Волгоградской области характерно увеличение скорости ветра до 16-18 м/с преимущественно в зимнее время. Среднегодовая скорость равна 5,17 м/с (за 2011-2016 гг.). Рисунок 3.2 иллюстрирует распределение средних и максимальных скоростей ветра в течение 2016 года.

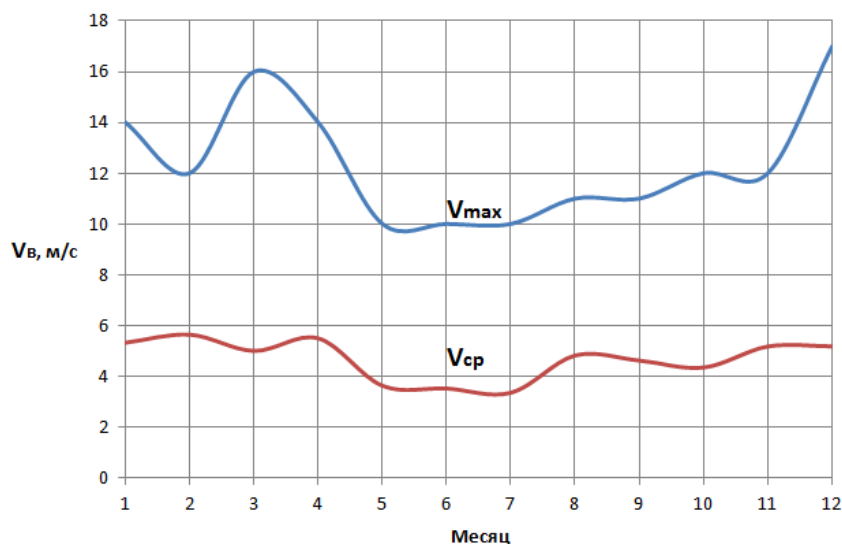


Рисунок 3.2 – Скорости ветра, наблюдаемые в г. Волгограде в 2016 г.

Многолетний опыт эксплуатации показывает, что вибрация проводов наблюдается чаще всего на линиях, проходящих по открытой и ровной местности с длиной пролётов более 120 м. Особенно опасна вибрация на переходах через реки и водные пространства с пролетами длиной более 500 м. На участках линий в лесной и пересеченной местности продолжительность и интенсивность вибраций значительно меньше.

Пляска проводов, так же как и вибрация, возбуждается ветром, но отличается от вибрации большей амплитудой, достигающей 12 - 14 м, и большой длиной волны. В плоскости, перпендикулярной оси линии, провод движется при пляске по вытянутому эллипсу, большая ось которого вертикальна или отклонена под небольшим углом (до 10 - 20°) от вертикали. Диаметры эллипса зависят от стрелы провеса: при пляске с одной полуволной в пролете большой диаметр эллипса может достигать 60 – 90% стрелы провеса, при пляске с двумя полуволнами равна 30 – 45% стрелы провеса. Малый диаметр эллипса обычно составляет 10 – 50% длины большого диаметра.

Как правило, пляска проводов наблюдается при гололеде. Гололед отлагается на проводах преимущественно с подветренной стороны, вследствие чего провод получает неправильную форму. При воздействии ветра на провод с односторонним гололедом скорость воздушного потока в верхней части увеличивается, а давление уменьшается. В результате возникает подъемная сила, вызывающая пляску провода.

Опасность пляски заключается в том, что колебания проводов отдельных фаз, а также проводов и тросов происходят несинхронно. Часто наблюдаются случаи, когда провода перемещаются в противоположных направлениях и сближаются или даже схлестываются. При этом происходят электрические разряды, вызывающие оплавление отдельных проволок, а иногда и обрывы проводов. Наблюдались также случаи, когда провода линий 500 кВ поднимались до уровня тросов и схлестывались с ними.

Наиболее опасными являются колебания с 1...4 полуволнами, при которых амплитуды колебаний весьма значительны и возникает опасность сближения между собой соседних проводов и тросов, что приводит к их перекрытию, пережогу или механическим повреждениям.

Отложение изморози или гололеда на проводах линий электропередачи вызывается замерзанием переохлажденных капель паров при резком переходе температуры окружающего воздуха из положительной области в отрицательную.

Отложение гололеда (изморози) на линиях электропередачи могут вызвать:

- разрегулировку проводов и грозозащитных тросов и их сближение между собой;
- сближение проводов и тросов при их подскоке вследствие одновременного сброса гололеда;
- пляску проводов;
- обрыв проводов и тросов;
- разрушение опор;
- перекрытие линейной изоляции ВЛ при таянии вследствие значительного снижения льдоразрядных характеристик изоляторов по сравнению с влагоразрядными характеристиками, по которым обычно выбирается необходимый уровень линейной изоляции.

Таблица 3.1 – Минимальные значения образований в соответствии с п.2.5.31 ПУЭ

Форма образования	Минимальные значения толщины стенки (гребня) отложений, являющихся опасным в мм		
	гололед	изморозь	
	плотность - 0,9 (лед)	плотность - 0,5 (рыхлый гололед)	плотность - 0,2 (иней)
сплошной круглый	15-20	25-30	40-45
односторонний	40-50	60-70	90-100

Традиционно для воздушных линий электропередач применяют провода сталеалюминиевые неизолированные марки АС, состоящие из стального сердечника и алюминиевых проволок, скрученных с направлением скрутки соседних повивов в противоположные стороны, причем наружный повив имеет правое направление скрутки. Точечное касание проволок соседних повивов не позволяет добиться плотной свивки, поэтому контур поперечного сечения такого провода состоит из суммы дуг контуров каждой проволоки наружного повива. Столь сложный контур провода должен иметь значительное лобовое сопротивление и приводить к формированию турбулентных завихрений в пристеночных слоях ветрового потока либо на некотором удаленном расстоянии за таким плохообтекаемым телом.

Проблема гололёдообразования на проводах линий электропередачи активно изучается во многих странах. На данном этапе изучения данного вопроса большое внимание уделяется математическому моделированию процесса. Различные математические модели приводились в зарубежной и русскоязычной литературе [6,34-35]. Однако достоверные результаты, учитывающие в совокупности климатические условия, конструктивные особенности провода и механизм образования льда на поверхности провода, на данный момент не получены. Результаты экспериментального моделирования механизма зарождения и нарастания ледяных отложений на образцах проводов проводились в климатической камере лаборатории Донбасской национальной академии строительства и архитектуры [11]. Специалистами тестировались образцы проводов марки АС, Aero-Z (с Z-образными проволоками в наружных повивах), а также секторные сталеалюминиевые провода марки AFLs.

При одинаковом сечении сталеалюминиего провода обычной конструкции и марок Aero-Z и AFLs, наружный диаметр АС значительно больше. По своим характеристикам провода марок Aero-

Z и AFLs близки к проводам АСВТ, следовательно, результаты исследований по образованию гололеда на проводах Aero-Z и AFLs могут быть распространены с некоторой точностью и на провода АСВТ.

По результатам экспериментов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры интенсивность гололедообразования на проводе AFLs ниже на 5 %, чем на АС аналогичной токовой загрузки. При этом вес гололеда на Aero-Z 242-2Z меньше на 30 %, чем на проводе АС 240/32.

По данным авторов [11], при равных условиях интенсивность образования гололедных отложений на компактных проводах ниже на 12 % (для моделируемых условий эксперимента, соответствующих 2-му району по стенке гололеда).

В качестве методов борьбы с гололедообразованием преимущественно применяют его плавку путем увеличения тока в линии.

Технологические карты плавки гололеда (изморози) на проводах и тросах линий электропередачи напряжением 35кВ и выше разрабатываются для воздушных линий, подверженных интенсивному гололедообразованию в двух вариантах по каждой ВЛ. В качестве расчетных принимаются следующие условия:

- толщина стенки гололеда равна 2 см;
- температура окружающего воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$ ;
- скорость ветра 5 м/сек.

Величина тока плавки выбирается по возможности такой, которая бы обеспечила плавку в течение 30-60 минут. Выбранные режимы плавки гололеда прорабатываются на предмет возможности их реализации по режиму сети и по условиям РЗА.

Плавку следует производить возможно большими токами, для ее быстреего завершения и восстановления схемы нормального режима.

При возникновении климатических условий для образования гололеда в районах прохождения ВЛ, на которых ток нагрузки меньше тока, препятствующего образованию гололеда или изморози, дежурный диспетчер, при наличии возможности, должен за счет перераспределения нагрузки или изменения схемы добиться увеличения нагрузки на указанных ВЛ, чтобы не допустить гололедных отложений.

Согласно ПУЭ одиночные алюминиевые и сталеалюминиевые провода сечением до  $95\text{ мм}^2$  в пролетах длиной более 80 м, сечением  $120 - 240\text{ мм}^2$  в пролетах более 100 м, сечением  $300\text{ мм}^2$  и более в пролетах более 120 м, стальные провода и тросы всех сечений в пролетах более 120 м должны быть защищены от вибрации.

В пролетах меньше указанных выше защита от вибрации не требуется. Участки любых линий, защищенные от поперечных ветров, не подлежат защите от вибрации. На больших переходах рек и водных пространств защита необходима независимо от напряжения в проводах.

На линиях напряжением 35 – 330 кВ обычно устанавливают виброгасители, выполненные в виде двух грузов, подвешенных на стальном тросе.

Виброгасители поглощают энергию вибрирующих проводов и уменьшают амплитуду вибрации около зажимов. Виброгасители должны быть установлены на определенных расстояниях от зажимов, определяемых в зависимости от марки и напряжения провода.

### 3.2 Технико-экономическое обоснование применения высокотемпературных проводов АСВТ в отечественной электроэнергетике для ВЛ-110

По официальным данным ПАО «МРСК Юга» - Волгоградэнерго за 2016 год на территории Волгоградской области было устранено 387 аварий в сетях 110 кВ, что составило 85% от общего количества отключений в сетях высокого напряжения. Оплаченные населением потери за 2016 год составили 343,12 млн. кВт·ч и 651,928 млн. руб. в денежном эквиваленте. Большое количество аварийных ситуаций возникает по причине высокого износа электрических сетей, а также вследствие обрыва проводов при неблагоприятных условиях среды. По данным ПАО «Россети» на территории России лишь около 19% ЛЭП эксплуатируется менее 25 лет и 17% - более 50 лет. В данной ситуации актуален вопрос реконструкции существующих ЛЭП.

Для оценки экономического эффекта срок окупаемости определяют как отношение капитальных вложений к полезному эффекту:

$$T_{ок} = \frac{\sum K}{\Delta\Phi} \quad (3.1)$$

$\sum K$  - капитальные вложения в мероприятия по внедрению проводов АСВТ в реконструкцию линий 110 кВ в расчете на 1 км участка, руб.

$$\sum K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (3.2)$$

$K_1$  - капитальные вложения в покупку провода АСВТ;  $K_2$  - затраты на монтажные работы;  $K_3$  - капитальные затраты на эксплуатацию проводов;  $K_4$  - затраты на проектно-сметные работы.

$$\sum K = K_1 + 0,1K_1 + 0,07K_1 + 0,05K_1 \quad (3.3)$$

Полезный эффект от реализации мероприятий по внедрению провода АСВТ определим по формуле

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3 \quad (3.4)$$

$\Delta\Phi_1$  - эффект от сокращения технологических потерь в сети, 5-7% (за счёт применения проводов с меньшим удельным сопротивлением и большими допустимыми токами нагрузки);  $\Delta\Phi_2$  - эффект от повышения надежности сети;  $\Delta\Phi_3$  - эффект от снижения потерь на тепловыделение.

Цена провода АСВТ составляет 170000 руб. за 1 км. С учётом затрат на монтажные и проектно-сметные работы, капитальные вложения на замену провода ЛЭП в расчете на 1 км составят  $\sum K = 215900$  руб.

Для оценки экономического эффекта воспользуемся официальными данными ПАО «МРСК Юга» - Волгоградэнерго за 2016 год, согласно которых, оплаченные потери в денежном выражении составили 110000 руб./км относительно уровня напряжения 110 кВ.

Учитывая результаты предыдущих расчётов (глава 2), имеем, снижение тепловых потерь в проводе АСВТ составляет 17% относительно провода АС. Разрывное усилие проводов АСВТ в среднем на 30-35% превышает данный параметр у проводов марки АС при равных сечениях.

Следовательно, возможно рассчитать дисконтированный срок окупаемости

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq I_0 \quad (3.5)$$

где  $n$  – число периодов;  $CF_t$  – приток денежных средств в период  $t$ ;  $r$  – барьерная ставка (коэффициент дисконтирования);  $I_0$  – величина исходных инвестиций в нулевой период.

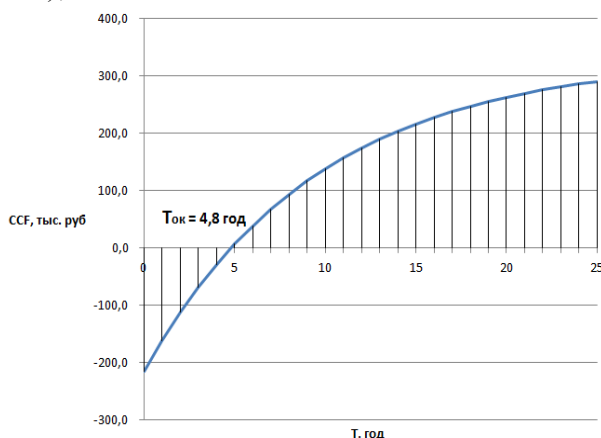


Рисунок 5.3 – Распределение кумулятивных денежных потоков ССФ по годам

На рисунке 5.2 представлено распределение денежных потоков по числу периодов. При ставке дисконтирования  $r = 11\%$  срок окупаемости составит менее 5 лет. Вложенные инвестиции будут возмещены в полном объеме в течение 16 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балаков Ю. Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок: Учебное пособие для вузов – 2-е изд., стереот.- М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
2. Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. – Электричество, 1989, № 11.
3. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика / Г.Ф.Быстрицкий // Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений – М.: Академия, 2005.- 208с.
4. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А. А., Федин В. Т. – Изд. 2-е. – Ростов н/Дон: Феникс, 2008. Энергоатомиздат.
5. Гологорский Е.Г. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4-500 кВ / под ред. Е.Г. Гологорского, А.Н.Кравцова, Б.М. Узелкова – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003 – 344с.
6. Горохов Е.В. Математическая формулировка задачи об осаждении облачных капель на провода электросетевых систем / Е.В. Горохов, А.М. Алехин // «Металеві конструкції» - Макеевка, 2006. - Том 11, №3. - С. 203207.
7. Гуревич Л. и др., Моделирование электромагнитных потерь в сталеалюминиевых проводах различной конструкции // Электроэнергия. Передача и распределение. №5 (26) сентябрь-октябрь 2014. С: 72-75.
8. Донец Т.А., Грушевский Ю.А., Швец Е.С., Курьянов В.Н., Анализ существующих инновационных алюминиевых проводов // Моделирование и создание объектов энерго- и ресурсосберегающих технологий: Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием, г. Волжский, 2015.

9. Идельчик В. И. Электрические сети и системы. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Информация об отпуске электроэнергии, потерях и объемах передачи филиала ПАО «МРСК Юга» - «Волгоградэнерго» за 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://volgogradenergo.mrsk-yuga.ru/klientam/>
11. Испытания на гололедофобность компактных и секторных проводов воздушных линий электропередачи в климатической камере/ Горохов Е. В., Назим Я. В., Васылев В. Н., Лях В. В.// Металлические конструкции. Том: 18 № 1. 2012. С: 73-84
12. Мансуров Н.Н., Попов В.С., Теоретическая электротехника. 9-е изд., исправленное. — М.-Л.: Энергия, 1966. — 624 с.
13. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. – Москва: Энергия, 1969. — 456 с.
14. Патент на изобретение №2063080 РФ, МПК H01B 5/08. Провод для линии передачи. / С.С. Клямкин и др. Заяв. 94004748/07, 08.02.1994; Опубл. 27.06.1994.
15. Патент на полезную модель № 127241 РФ, МПК H01B 5/10. Провод неизолированный со скользящим сердечником для воздушных линий электропередачи. / Открытое акционерное общество «Кирскабель» (RU) Заяв. 2012158179/07, 28.12.2012; Опубл. 20.04.2013.
16. Патент на полезную модель №132241 РФ. Сталеалюминиевый провод для воздушной линии электропередачи. / В.А. Фокин. – Опубл. 10.09.2013.
17. Правила Устройства Электроустановок (ПУЭ), изд. 7-е. М.: НТЦ «ЭНАС», 2003.
18. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 "Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям" (с изменениями и дополнениями). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/195516/>
19. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. (Межгосударственный стандарт): ГОСТ 839-80. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/6177615/>.
20. РД 34.20.182-90 Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ (с Изменением 1)
21. РД34.20.547 (МТ 34-70-037-87) Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи.
22. Рябков А.Я., Электрические сети и системы. – М.: Типография Госэнергоиздата, 1960. - 511 с.
23. Савельев И.В., Курс общей физики, т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: Учебное пособие, - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 496 с.
24. Сводные данные об аварийных отключениях сетей филиала «Волгоградэнерго» за 2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://volgogradenergo.mrsk-yuga.ru/klientam/>
25. СТО 56947007-29.240.55.143-2013 Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий.
26. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
27. Швец Е.С., Донец Т.А., Курьянов В.Н., Исследование эффективности практического применения инновационных проводов для воздушных линий электропередач 110 кВ //



Электроэнергетика глазами молодежи: VII Международная научно-техническая конференция, Казань, 2016.

28. Швец Е.С., Курьянов В.Н., Исследование влияния уровня токовой нагрузки на интенсивность нагрева проводов ЛЭП // XXIII Межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов, г. Волжский, 2017.

29. Швец Е.С., Курьянов В.Н., О перспективах развития инновационных проводов для линий электропередачи // XXII Межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов, г. Волжский, 2016.

30. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 435 с

31. Элементарный учебник физики: Учеб. пособие в 3 т. / Под ред. Г.С. Ландсберга: Т.2 Электричество и магнетизм – 12-е изд. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2001. – 480 с.

32. HOCHTEMPERATUR-BESTÄNDIGE FREILEITUNGSSEILE dauerbelastbar bis 150°C, Lumpi-Berndorf // <http://www.lumpi-berndorf.at/produkte/>

33. G(Z)TACSR Gap Type Conductor (Low Sag Up-rating Conductor) Catalog, J-Power Systems

34. Makkonen L., Lozowski E.P. Numerical Modelling of Icing on Power Network Equipment // Atmospheric Icing of Power Networks; M. Farzaneh (ed.) - Springer, 2008. -pp. 83-118.

35. Lozowski E.P., Makkonen L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment // Proc. XI International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS), June 2005. - Montreal, 2005. - pp. 55-62