

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

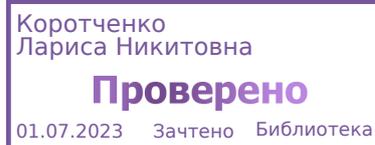
Ашуров Бободжон Каримович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Направление подготовки
08.04.01 – «Строительство»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2023



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель:

Иванов Сергей Николаевич
докт. тех. наук, доцент

Рецензент:

Головко Александр Владимирович
доцент кафедры "Строительные
конструкции, здания и сооружения"
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»

Защита состоится «27» июня 2023 г. в 9 часов 00 мин. на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ» ауд. 212/1.

Секретарь ГЭК

И. В. Погорельских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: В данном исследовании изучается влияние изменения параметров состава изоляции в процессе производства на надежность кабельной линии.

Повышение электробезопасности зависит от состояния всех элементов энергосистемы и в первую очередь от эффективности линий электропередач. Одним из наиболее перспективных направлений является повышение эффективности систем электропередачи путем увеличения температуропроводности изоляционных компонентов.

Для обеспечения требуемых свойств применяют композитные материалы. Проверка соответствия его параметров проводится с помощью компьютерного анализа модели композитного материала.

Применение композитных материалов имеет ряд преимуществ. Во-первых, они способны увеличить долговечность системы, что позволяет снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт. Во-вторых, такие материалы расширяют область применения линий электропередачи, обеспечивая более эффективную передачу электрической энергии. В конечном счете, это приводит к обеспечению высокого уровня электробезопасности.

Объектом исследования является силовой кабель среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Предметом исследования является изменение теплофизических свойств изоляции в результате введения добавок и влияние этих изменений на надёжность силовых кабельных линий.

Целью диссертационной работы является исследование надежности силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом изменения теплофизических свойств изоляции вследствие введения добавок.

Для реализации этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. анализ основных проблем, связанных с эксплуатацией высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена;

2. аналитический обзор процессов теплового старения полимерных материалов элементов конструкции;

3. исследование распределения теплового поля при эксплуатации кабелей с изоляцией из XLPE с учетом всех источников тепла;

4. на основе численных исследований оценка распределения теплового поля в кабелях с учетом изменения свойств изоляции и разработка методики прогнозирования их срока службы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников. Общий объем диссертации 113 страниц, 16 таблиц и 38 рисунков.

Результаты: В результате работы проведен анализ теплофизических свойств и надежности силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при введении добавок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны способы и этапы монтажа кабельных линий. Обосновывается необходимость повышения надежности кабельных линий систем электроснабжения путем применения современных композитных материалов.

В первой главе проводится анализ существующих систем электроснабжения. Рассматривается общая структура системы электроснабжения и проблемные области с точки зрения потерь энергии. Описаны типовые схемы электроснабжения предприятий и классы потребителей. Дано общее представление о классификации кабелей и их маркировки, представлен типовой ряд сечений проводников.

Обозначена разница между воздушной и подземной прокладкой линий с точки зрения законодательства и магнитной безопасности. Поднимается вопрос эффективности подземной прокладки кабельных линий в сравнении с воздушными ЛЭП. Вопрос рассматривается с точки зрения экономики на этапе прокладывания и в ходе эксплуатации, надежности и долговечности,

средств контроля и их точности. Приводится пример расчета. Приведены примеры случаев, связанных с проблемами ремонта и восстановления.

Рассматриваются способы подземной укладки кабеля с описанием самого процесса укладки. Уделено внимание укладке кабеля с прогреванием при отрицательных температурах и способам прогревания. Также отдельно рассмотрена прокладка кабельных линий на опорных конструкциях и в лотках.

Ставится вопрос о старении кабельной линии, влиянии нестабильной внешней среды на изменение срока службы, контроле оставшегося срока службы и его повышении при использовании композитных материалов.

Во второй главе подробно рассматривается кабель из сшитого полиэтилена. Прежде всего разбираются его конструктивные особенности. Из каких слоев он состоит, за какие свойства отвечает каждый слой и какие материалы применяются для их изготовления. Сравниваются свойства кабеля из сшитого полиэтилена и кабеля с бумажной пропиткой. Дается описание выходных характеристик кабеля из сшитого полиэтилена: диапазоны сечений и диапазоны допустимых напряжений. Сравниваются свойства полиэтилена высокого и низкого давления, а также возможные примеси для улучшения свойств полиэтилена, а также ПВХ композиты. Отдельно уделяется внимание волокнам из оксида алюминия (Al_2O_3) в качестве добавки улучшающей теплопроводность кабеля из сшитого полиэтилена.

В третьей главе рассматриваются проблемы эксплуатации кабельных линий. Сперва раскрывается проблематика механических повреждений. Современная российская энергетика находится не в лучшем состоянии. Статистически на 100 км кабельных линий приходится 4,5-12 случаев неисправностей. Мы в повседневной жизни можем наблюдать внеплановое отключение электричества, свидетельствующее об аварии. Такие ситуации могут разворачиваться в любое время года. В целом это приводит к трате человеческих ресурсов и материалов на устранение таких проблем, что не является нормой и удерживает энергосистему в режиме аварийного

восстановления. В свою очередь это отвлекает от качественного мониторинга и систематического обслуживания.

В российской энергетике физический износ кабельных групп находится на уровне 70-80 %. Повреждения кабельных линий класса напряжения 110 (220) кВ обычно происходят по нескольким основным причинам: дефекты от некачественного прокладывания кабельной линии – 20%; естественное старение силовых кабелей – 31 %; механические повреждения – 30 %; заводские дефекты – 10 %; коррозия – 9 %.

Описаны этапы старения кабеля от зарождения микротрещин до пробоя.

Немного рассматривается влияние температуры на возникновение пробоя. Слабая теплопроводность приводит к накоплению температуры в изоляции, ее последующему старению и пробую.

В зависимости от типа грунта и глубины заложения кабель, проложенный в земле, подвергается воздействиям внешней среды: положительных и отрицательных температур и слабым химическим воздействиям грунта, что уменьшает его срок службы. Кабель в воде чувствует себя замечательно, так как вода хорошо отбирает температуру. Наличие влаги в грунте позволяет лучше охлаждать кабель, ее недостаток может – приводит к перегреву. Грунт может быть неоднороден по всей длине кабеля и в целом оказывает значительное влияние.

В четвертой главе влияние температуры на старение рассматривается подробно. Даются графики зависимостей срока службы от температуры, изменение дефектности изоляции от времени старения, зависимость числа трещин и механической прочности от удлинения. Рассматривается вопрос о методах испытания кабеля. Влага проникает в микротрещины диэлектрика и постепенно разрушает его с каждым циклом перегрева. Пробой изоляции является сложным многофакторным процессом. Сокращение времени испытаний достигается за счет увеличения интенсивности тепловых напряжений, которые являются основным фактором, вызывающим

ухудшение свойств изоляции. Приведены формулы устанавливающие связь между различными характеристиками изоляции: дефектности, ее скоростью роста, вероятностью дефекта на определенной длине провода и другие.

Причинами старения изоляторов являются:

1. перенапряжение и частичный разряд под рабочим напряжением;
2. термическая деградация материала;
3. смачивание и водное разрушение изолятора (рост древовидной формы, насыщенной водой); и
4. повреждения, вызванные электродинамическими силами, вибрациями и т.д.

В зависимости от типа активатора и основного агента, вызывающего деградацию полимера, можно выделить следующие типы старения:

- Термическая деградация;
- Атмосферное (озоновое) старение;
- Фотостарение;
- Радиационное старение;
- Деградация вследствие гидролиза;
- Старение под действием механических нагрузок (усталость);
- Биологическая деградация полимерных материалов.

Под воздействием кислорода воздуха, света и тепла полиэтилен теряет свою эластичность и пластичность, становясь твердым и хрупким (старение). Для замедления старения в полиэтилен добавляют небольшое количество термостабилизаторов (ароматические амины, фенолы, соединения серы) и светостабилизаторов (сажа, графит). Использование пластификаторов ПВХ нежелательно в кабелях, предназначенных для использования при низких температурах или подверженных быстрым изменениям температуры.

Когда кабель находится под напряжением, сначала нагревается проводник, а затем изоляция и оболочка. Эксперименты показывают, что разница температур между жилой и оболочкой кабеля 6 кВ составляет около 15 °С и около 20 °С для кабеля 10 кВ. Поэтому в практических условиях

измерения обычно ограничиваются температурой оболочки, учитывая, что температура жилы кабеля на 15-20 °С выше.

Силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией имеют оболочку из ПВХ-пластиката. Такие оболочки устойчивы к тепловому старению, не распространяют пламя и устойчивы к воздействию кислот и других агрессивных веществ. Толщина оболочки принимается от 1,8 мм вверх, в зависимости от диаметра кабеля.

Рассматривается выгодное отличие кабеля из сшитого полиэтилена перед другими типами кабелей. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют следующие преимущества: более высокая пропускная способность за счет более высоких рабочих температур, повышенная аварийная устойчивость, повышенная эксплуатационная надежность, более низкие затраты на монтаж и относительно небольшой вес.

Электрическое сопротивление изоляции является фундаментальным свойством электроизоляционных материалов. Сопротивление изоляции измеряется при постоянном токе между одной жилой и другими жилами кабеля, а также между жилой кабеля и его оболочкой. По мере старения изоляции жилы кабеля и воздействия внешних условий сопротивление изоляции уменьшается. Значение сопротивления изоляции зависит от температуры диэлектрика и уменьшается экспоненциально с увеличением температуры. В среднем, сопротивление изоляции уменьшается в 1,5 раза на каждые 10 °С увеличения температуры.

Состояние изоляции кабеля оценивается по току утечки и его фазовой асимметрии (разности токов). При хорошем состоянии изоляции сила тока утечки в момент повышения напряжения каждой фазы быстро увеличивается за счет емкости кабеля, а затем быстро уменьшается: 500 мкА для кабелей 10 кВ, 20 кВ, ... до 800 мкА для кабелей 35 кВ. Асимметрия кабеля с неповрежденной изоляцией не должна превышать 50 %.

Уделено внимание распределению теплового поля. Тепловое поведение и пропускная способность кабельных линий среднего напряжения определяются:

- током линии;
- поперечным сечением проводника и экрана;
- дуговым расположением экрана;
- геометрией расположения проводников;
- средой, в которой проложена линия;
- наличием внешних проводников или устройств, ограничивающих теплопередачу (препятствующие проводящие или диэлектрические трубки).

Процесс передачи тепла в кабелях с многослойной изоляцией происходит путем теплопроводности. Между ее слоями имеются зазоры и неровности, что может привести к контактному термическому сопротивлению. Особенно нежелательными для изоляции кабелей и проводов являются пузыри и мембраны.

Описаны программные пакеты для моделирования теплового баланса такие как Ansys и ELCUT.

В пятой главе проведен анализ процессов теплообмена в кабельных линиях. В программном комплексе ELCUT были составлены модели при прокладке треугольником и при прокладке в горизонтальной плоскости. Для обоих вариантов укладки используя метод конечных элементов были получены картина распределения температурного поля и картина распределения температуры в грунте. В результате решения данной задачи получены температуры нагрева жилы и температуры на границе оболочки кабеля.

Для проверки адекватности разработанных математических моделей и достоверности полученных результатов, проведено сравнение полученных численных результатов с результатами, представленными в открытой литературе. Сопоставляя с результатами в программном комплексе ELCUT, погрешность расчета температур на поверхности кабеля составляет менее 1%, что говорит об адекватности расчета.

В шестой главе с помощью имитационного моделирования в программном комплексе ELCUT определяется влияние добавки оксида алюминия (Al_2O_3) в изоляцию на теплопроводность.

Основной целью имитационного моделирования является оценка влияния отдельных параметров элементов на свойства системы и поиск неоптимальных конструкций. Имитационные модели строятся на основе физического представления исследуемого объекта. Выбор программного обеспечения особенно важен, когда модель создается в условиях, когда законы распределения размеров и топология отдельных компонентов в конструкции неизвестны, а задача несовершенна.

Решение задач имитационного моделирования композитов в ELCUT не отличается от многих других пакетов и описывается следующим алгоритмом:

1. выбор типа решаемой задачи;
2. выбор класса задачи;
3. создание геометрической модели;
4. определение свойства материала;
5. определение нагрузок;
6. задание граничных условий;
7. создание сетки конечных элементов;
8. решение задачи;
9. обработка результатов решения.

Расчет электромагнитных полей переменного тока и теплопроводности позволяет определить образ распределения мощности тепловыделения в исследуемом элементе, который передается пакетом в задачу более низкого уровня, нестационарную теплопроводность. Геометрия имитационной модели представляет собой осесимметричную формулировку с вращающимся телом, что расширяет двумерное решение до трехмерной задачи. Геометрическое моделирование характеризуется следующими моментами. Размеры отдельных компонентов и их взаиморасположение в композитной структуре должны быть случайными. Это означает, что возможные формы и размеры отдельных компонентов генерируются программным обеспечением, а топология в пределах исследуемой области определяется на основе уравнений Ван-дер-Ваальса.

По результатам экспериментов по варьированию содержания элементной добавки сплава Al_2O_3 сделан вывод, что наличие добавки увеличивает безотказность работы. В случае композитной добавки эффект лучше. Ограничение содержания оксида алюминия максимум 25%. То есть определяющим расчетным параметром по результатам моделирования является доля легируемого оксида алюминия, а вторым важным параметром – количественный состав легирующих добавок.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что вероятность безотказной работы кабельной линии увеличивается на 1,9 % при увеличении диаметра элементарного модификатора с 15 мм до 40 мм при сравнительной оценке визуализации температурного поля, соответствующего различным размерам легирующих добавок в монолитном оксиде алюминия.

Вероятность надежности увеличивается еще на 1,3 % при увеличении теплопроводности композитного материала путем замены одноэлементного оксида алюминия на четырехэлементный (композитный) в определенной пропорции (25 %). Влияние топологии расположения легирующих элементов в направлении градиента температуры на надежность композиционного материала в исследуемом диапазоне теоретически не превышает 0,4 %. Ограничение расчетного пространства максимальным содержанием оксида алюминия 25 % связано с гипотезой о потере стабильности синтезированного материала.

Первым расчетным параметром является процентное содержание легируемого оксида алюминия, а вторым параметром – количественный состав легирующих добавок. Повышение надежности за счет улучшения тепловых характеристик обеспечиваемое введением композитных модификаторов, приводит к повышению электробезопасности модернизируемых и вновь строящихся промышленных зданий предприятий.

Список использованных источников

1. Ашуров, Б. К. Повышение электробезопасности при проектировании промышленных зданий и сооружений / Б. К. Ашуров, С. Н. Иванов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 10-14 апреля 2023 г. : в 2 ч. / редкол. : С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023. – Ч. 1. – С. 141-143.

2. Ашуров, Б. К. Повышение энергетической эффективности зданий / Б. К. Ашуров, А. Самандари, С. Н. Иванов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 г. : в 4 ч. / редкол. : А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – Ч. 1. – С. 100-102.