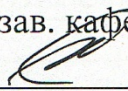


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО "АмГУ")

Факультет Энергетический
Кафедра Энергетики
Направление подготовки 13.04.02 - "Электроэнергетика и электротехника"
Направленность (профиль) образовательной программы:
Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

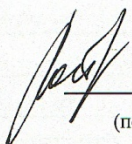
И.о.зав. кафедрой

 Н.В. Савина
« 09 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

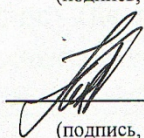
на тему: Оценка изменения характеристик СПЭ-изоляции кабелей в процессе эксплуатации

Исполнитель
студент группы 6420м

 09.06.18
(подпись, дата)

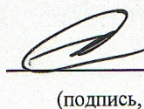
И.С. Белобокий

Руководитель
доцент, к.т.н.

 09.06.18
(подпись, дата)


А.Н. Козлов

Руководитель
магистерской программы

 09.06.18
(подпись, дата)

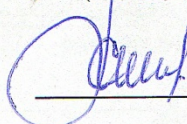
Н.В. Савина

Нормоконтроль
доцент, к.т.н.

 09.06.18
(подпись, дата)

А.Н. Козлов

Рецензент
(подпись, дата)

 09.06.18

С.А. Парубенко.

Благовещенск 2018

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО "АмГУ")

Факультет Энергетический
Кафедра Энергетики

УТВЕРЖДАЮ

До зав. кафедрой

Н.В. Савина

2018г.

« 21 » 03

ЗАДАНИЕ

К магистерской диссертации студента группы 642 011 Белодоного
Ивана Станиславовича

1. Тема магистерской диссертации Оценка изменений характеристик
СПЭ-изоляций в процессе эксплуатации

(утверждено приказом от 05.03.2018 № 550-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы

3. Исходные данные к работе Экспериментальные данные по импульсной прочности
изоляций кабелей с изоляцией из силсилового полиимиде

4. Содержание магистерской диссертации (перечень подлежащих разработке вопросов)

Изучить изменения характеристик СПЭ-изоляции в процессе эксплуатации,
оценить факторы влияющие на старение изоляции кабелей из силсилового
полиимиде. Анализ преимуществ и недостатков изоляции из силсилового полиимиде

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем,
программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) 1 таблица, 1 график,
1 презентация, 1 приложение, 3 расчетных листа.

6. Консультанты по магистерской диссертации (с указанием относящихся к ним
разделов)

7. Дата выдачи задания 01.03.2018

Руководитель магистерской диссертации Козлов Александр Николаевич
доцент, кандидат технических наук

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению

(подпись студента/дата)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 78 страниц, 4 формулы, 17 рисунков, 7 таблиц, 1 приложение, 20 источников.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ, СШИВКА, ПОЛИМЕРЫ, СШИТЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН, ИЗОЛЯЦИЯ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, СИЛАНОВАЯ СШИВКА, ПЕРОКСИДНАЯ СШИВКА, ТРИИНГИ.

В настоящее время идет бурное развитие электрических сетей, в которых все чаще для передачи энергии применяются кабельные линии. Также огромный объем существующий КЛ, в которых используются маслonaполненные кабели или кабели с бумажной пропитанной изоляцией, которые выработали свой эксплуатационный ресурс и в настоящее время происходит реконструкция этих сетей. При реконструкции и новом строительстве используются кабели с СПЭ изоляцией, которые начали обильно внедряться в эксплуатацию не так давно, поэтому исследований их надежности в процессе эксплуатации, изменение их характеристик со временем, а так же нормативная база развита на недостаточном уровне. Проходящие в настоящее время в России процессы реформирования электроэнергетики обуславливают повышение надежности работы, как энергосистемы в целом, так и отдельных энергетических объектов, а недостаточная на данный момент информационная база о кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилен не позволяет в полном объеме цели реформирования. В магистерской диссертации была выполнена оценка изменения характеристик кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также причин на это влияющих.

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень условных обозначений	6
Введение	7
1 Общие сведения	9
1.2 Производство сшитого полиэтилена	10
1.2.1 Методы сшивки полиэтилена	10
1.2.2 Технология производства	18
1.2.2.1 Силановая сшивка	18
1.2.2.2 Пероксидная сшивка	20
1.2.2.3 Электронная сшивка	21
2 Применение сшитого полиэтилена в качестве изоляции силовых кабелей	25
2.1 Нормативные требования к конструктивному исполнению кабелей с СПЭ изоляцией	25
2.2 Конструктивное исполнение кабелей с СПЭ изоляцией	26
2.3 Условия для использования кабелей с изоляцией из СПЭ	31
2.4 Основные технические и эксплуатационные характеристики кабелей с СПЭ изоляцией	33
2.4 Электрические характеристики кабелей	34
2.5. Требования к заземлению экранов	37
2.6 Климат и условия окружающей среды при эксплуатации	38
Ограничений на уровень влажности воздуха в процессе эксплуатации кабеля нет.	38
3 Опыт эксплуатации кабелей с спэ изоляцией	39
3.1 Надежность	39
3.1.1 Ресурс изоляционной системы КПИ	41

3.1.2 Режимы заземления нейтрали в РКС	43
3.1.3 Грозовые перенапряжения	47
3.1.5 Коммутационные перенапряжения	48
3.1.6 Тепловой режим эксплуатации	49
3.1.7 Выбор сечения экранов	51
3.1.8 Комплексная диагностика	54
3.1.9 Испытания	56
3.1.10 Нормативно-техническая база	59
4 Изменение характеристик кабелей с спэ изоляцией в процессе эксплуатации	61
4.1. Причины возникновения триингов и их типы.	62
4.2 Анализ влияния производственных факторов на возникновении триингов в процессе эксплуатации.	67
Заключение	73
Библиографический список	74
Приложение А	77

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КЗ – короткое замыкание;

ВЛ – воздушная линия;

КЛ – кабельная линия

СПЭ – сшитый полиэтилен

ЛЭП – линия электропередач

ОРУ – открытое распределительное устройство;

ПС – подстанция;

ПУЭ – правила устройства электроустановок;

ТПЖ – токопроводящая жила

ВВ – вакуумный выключатель

ВЧ – высокочастотный

ГОСТ – государственный стандарт

СТО – стандарт организации

РКС – распределительные кабельные сети

КБПИ – кабель с бумажной пропитанной изоляцией

ВВЕДЕНИЕ

Требования к энергетическому оборудованию, в том числе и кабельной со стороны, как субъектов и объектов электроэнергетики постоянно растут. В первую очередь это связано с бурным развитием промышленности, а также агломерацией городов. Там, где раньше строились высоковольтные ЛЭП были леса и поля, теперь на этом месте стоят мегаполисы, отсюда возникают необходимости переоборудования ВЛ в КЛ. Старые маслонаполненные кабели и кабели с пропитанной бумажной изоляцией не отвечают все требованиям, которым предъявляются в наше время к кабельной продукции.

В настоящее время на смену традиционным маслонаполненным кабелям и КБПИ приходят кабельные линии нового поколения. На современном этапе в ближайшей перспективе к таким ним можно отнести кабели, в которых в качестве изоляции используется сшитый полиэтилен. Применение в кабельной технике изоляционных материалов с улучшенными диэлектрическими и тепловыми свойствами позволяет существенно повысить пропускную способность кабельных линий.

Последние тенденции в развитии РКС направлены на внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, и замену на них кабелей с БПИ. На данный момент в странах Европы и Америки, а также в странах с развитой промышленностью, отошли от использования КБПИ, практически весь рынок занят кабельной продукцией с СПЭ изоляцией.

В связи с этим необходимо оценить все плюсы и минусы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также оценить изменение их характеристик в процессе эксплуатации, а также факторов влияющих на это.

Для достижения поставленной в ходе работы будут решены следующие задачи:

1. Анализ методов и технологий производства сшитого полиэтилена.

2. Сравнительный анализ характеристик сшитого полиэтилена полученного разными способами.

3. Анализ и оценка существующей нормативной базы.

4. Анализ опыта эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

5. Оценка причин изменения характеристик СПЭ изоляции в процессе эксплуатации и факторов этому способствующих.

6. Анализ и расчёт влияния триингов и технологии производства на значение пробивных напряжений в СПЭ изоляции.

Для решения поставленных задач использованы методы теоретической электротехники, математического анализа, математического моделирования, логического анализа, методы физического моделирования.

Научная новизна выполненных исследований и разработок состоит в следующем:

1. Выявлены преимущества и недостатки использования кабелей с СПЭ изоляцией по сравнению с маслонеполненными кабелями или кабелями с бумажной пропитанной изоляцией.

2. На основании расчётов выявлены причины влияющие на изменение характеристик СПЭ изоляции в процессе эксплуатации.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Раскрыты требования к режиму заземления нейтралей, а также коммутационным аппаратам в сетях с кабельными линиями с СПЭ изоляцией.

2. Были определены современные направления совершенствования процесса производства кабелей с СПЭ изоляцией.

3. Раскрыты преимущества применения кабелей с СПЭ изоляцией в зависимости от технологии производства.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Краткое описание и история создания сшитого полиэтилена

Сшитый полиэтилен является полимером этилена с поперечно сшитыми молекулами. Обозначается английскими буквами РЕ, эта аббревиатура расшифровывается как Polyethylene (полиэтилен), а буква Х обозначает Cross-linked (сшитый). Среди различных полиэтиленов он является наиболее плотным и обладает по сравнению с ними более высокими техническими показателями.

Первое промышленное производство сшитого полиэтилена начинается в 70-х годах XX века. Впервые его разработала компания Wisbro из Швеции. За 10 лет до этого – в середине 60-х для производства водопроводных труб Томасом Энгелем был запатентован поперечно-сшитый полиэтилен (РЕХ-а), в последующем единственным конкурентом которого стал сшитый полиэтилен сшитый по силановой технологии. Однако Томас, считал свое детище не практичным и крайне неперспективным, так как он не сможет выдержать ожесточенной конкуренции на рынке с более современными материалами. Поэтому Энгель продал свой патент на свое изобретение нескольким компаниям из Северной Кореи, Японии и Германии.

Сшитый полиэтилен благодаря достаточно высокой для полимерного материала прочностью и термостойкостью получил широкое распространения как при производстве водопроводных, канализационных и прочих труб, так и в качестве электрической изоляции в силовых кабелях всех диапазонов напряжений.

В наше время он используется при производстве:

- систем холодного, горячего водоснабжения и отопления;
- труб используемых в пищевой, химической и фармакологической промышленности;
- изоляционного материала в электроэнергетике;

- воздухозаборников и фильтров для автомобилей;
- и т.д.

В автомобилестроении СПЭ получил свое распространение благодаря:

- термостойкости;
- хорошей ударпрочностью;
- стойкость к воздействию химикатов;
- устойчивость к перепаду температур
- низкий модуль изгиба и хорошее сопротивление растрескиванию под напряжением.

Также он используется в медицине. Благодаря своим износостойким качествам из него делают:

- тазобедренные суставы;
- коленные суставы;
- зубные протезы.

Сшитый полиэтилен характеризуется следующими параметрами:

- степень, либо доля сшивки - доля общего количества звеньев полимера, которые вовлекаются в образование сетчатого полимера.
- доля материала в форме кристаллита;
- напряжение на разрыв;
- удлинение на разрыв.
- сопротивляемость

1.2 Производство сшитого полиэтилена

1.2.1 Методы сшивки полиэтилена

Полиэтилен – очень распространённый в промышленности и быту полимер, получаемый методом полимеризации Этилена. Широкому распространению и своей популярности полиэтилена послужила его низкая стоимость производства и отличные, как химические, так и физические свойства. Он легко поддается обработке, дешев, нетоксичен, биоинертен и обладает высокой приживаемостью, обладает водонепроницаемостью, имеет

высокую химическую стойкость, обладает относительно высокой механической и отличной диэлектрической прочностью и много других плюсов. На данный момент, среди органических веществ, полиэтилен занимает первое место в мире по объёмам производства. Но не смотря на все плюсы полиэтилена, его химических и физических свойств которыми он обладал было недостаточно для применения в некоторых сферах производства, поэтому учёными была разработана технология, называемая сшивкой.

Так что такое сшивка? Сшивка это физический процесс, при котором происходит изменение только молекулярной структуры полиэтилена, путем образования поперечных связей, молекулы связываются в широкоячеистую трехмерную сетку. Химический состав вещества при этом изменению не подвергается. После изменения его физического строения, материал приобретает новые физические свойства, которые существенно расширяют области его применения.

Для начала рассмотрим, то, как из молекулы этилена (C_2H_4) (рисунок 1) получается молекула полиэтилена.

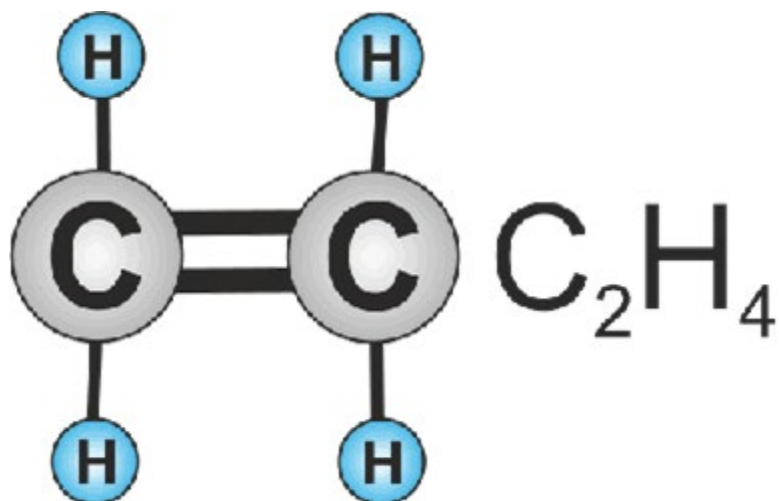


Рисунок 1 – молекула этилена состоящая из двух групп, включающая атом углерода и два атома водорода

Этилен это горючий газ, состоящий из двух атомов углерода и двух атомов водорода. Он бесцветен и его присутствие в воздухе нельзя почувствовать, так как он не имеет запаха. В молекуле этилена между углеродом имеется две химические связи, одна из которых является более слабой, в отличие от водорода, у которого с атомом углерода только одна (для обозначения химических связей между атомами применяются штрихи). Свободных связей молекула не имеет.

В каждой молекуле в мире между атомами вещества действует межатомное притяжения, которое не позволяет молекуле распадаться на атомы, но эту связь можно разорвать при помощи воздействия на атомы энергии, которая будет больше, чем энергии межатомного притяжения. Это воздействие можно осуществить, как химическим методом, так и физически, но обязательно это воздействие должно быть сильнее, чем межатомная связь. Например дополнительную энергию молекуле можно сообщить нагревом или бомбардировкой ее электронами.

Если молекулу этилена нагревать, то ничего не произойдет, так как энергии нагрева не будет хватать на разрыв двойной связи между атомами углерода. Для разрыва связи между молекулами этилена существует много других способов, позволяющих ее вытянуть в двухзвенную цепочку. Каждое звено этой цепочки называется мономером. Слово мономер происходит от греческого монос – один и мерос – часть. В процессе внешнего воздействия на молекулу этилена, происходит разрыв наиболее слабой связи. После этого у молекулы остаются две свободные связи, благодаря которым, мономеры начинают соединяться друг с другом последовательно (рисунок 2). В процессе соединения между собой они образуют бесконечную цепочку, которую можно назвать макромолекулой. Она и является полимером. Данное слово также происходит от греческого поли - много и мерос - часть.

По таким же принципам происходит образование и других полимеров, со схожим строением:

- полипропилен;

- поливинилхлорид,
- политетрофторэтилен.

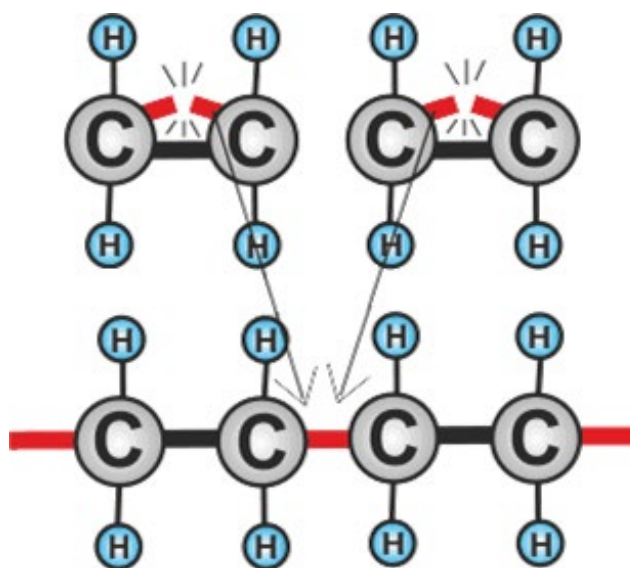


Рисунок 2 – Превращение этилена в полиэтилен

Теперь переходим к следующему этапу – это сам процесс сшивки полиэтилена, в котором происходит соединения отдельных цепочек полимера между собой. В процессе полимеризации мы получаем две отдельные цепочки вещества (рисунок 3), в процессе сшивки мы соединяем эти цепочки в сеть. Благодаря новой поперечной связи, сшитый полиэтилен приобретает такие новые свойства как:

1. Повышенная температура плавления;
2. Прочность;
3. Тугоплавкость;
4. Память формы.

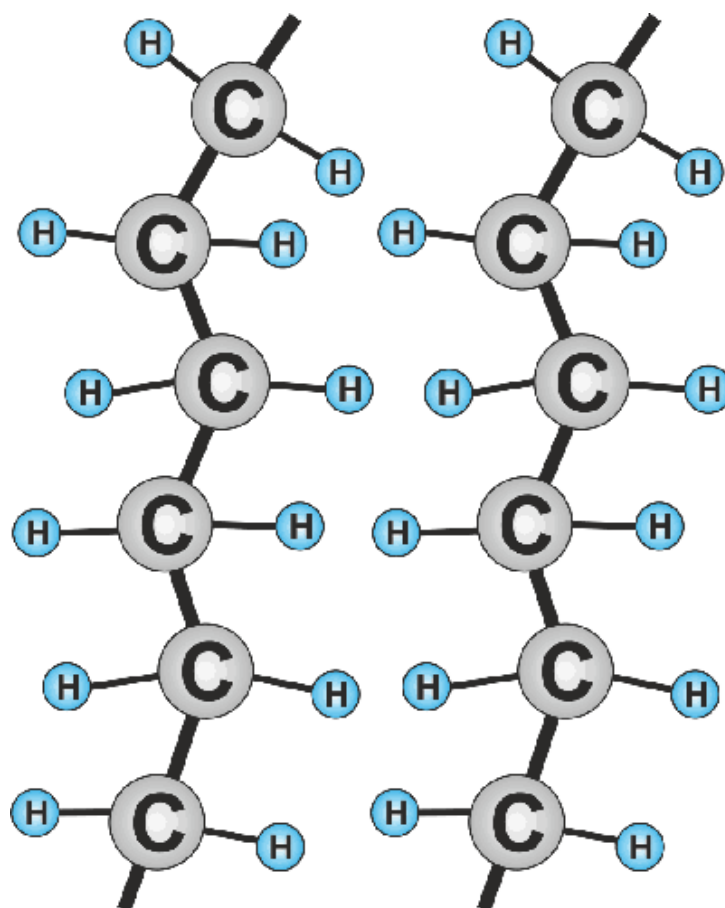


Рисунок 3 – отдельные цепочки полимера перед сшивкой

Для осуществления процесса сшивки, как уже говорилось ранее, необходимо разорвать более слабые связи в молекулах, а именно между атомами углерода (C) водорода (H), при этом связь между атомами углерода остается целой и изменение в полимерной цепочке не происходит. Сделать это можно разными способами, но все они делятся на два вида: физический и химический.

Давайте рассмотрим эти методы:

1. Физический (он же радиационный метод или электронный), при котором ионизирующее излучение вызывает отрыв атомов водорода от атомов углерода, вследствие чего образуются свободные для сшивки связи.

2. Химический метод в котором отделение атомов водорода происходит в результате химической реакции между молекулами полиэтилена и неустойчивыми органическими соединениями.

В экономическом сравнении химическая сшивка более затратная, по сравнению с физической. Однако и степень сшивки получается более высокой, до 90% при химическом методе и только до 70-75 % при физическом.

Для производства изоляции высоковольтных кабелей используется химический метод.

Далее при воздействии на молекулы полиэтилена (рисунок 4), например гамма излучения, генерируемого специальным устройством, атомы водорода с более слабыми связями отделяются от полимерных цепочек и соединяясь между собой в молекулу водорода самоудаляются из полиэтилена (рисунок 5). Свободные связи атомов углерода, которые остались от атомов водорода стремятся вновь вступить в реакцию, но уже не с водородом, а друг с другом, «сшиваясь», образуя между собой дополнительную прочную связь.

В результате поперечной сшивки появляется прочная трёхмерная сеть из полимерных цепочек этилена, которая схожа с кристаллической решеткой твердых элементов (рисунок 6). В этот момент полиэтилен переходит в упорядоченную сетчатую структуру сшитого полиэтилена. Именно поэтому весь этот процесс называется поперечной сшивкой полиэтилена.

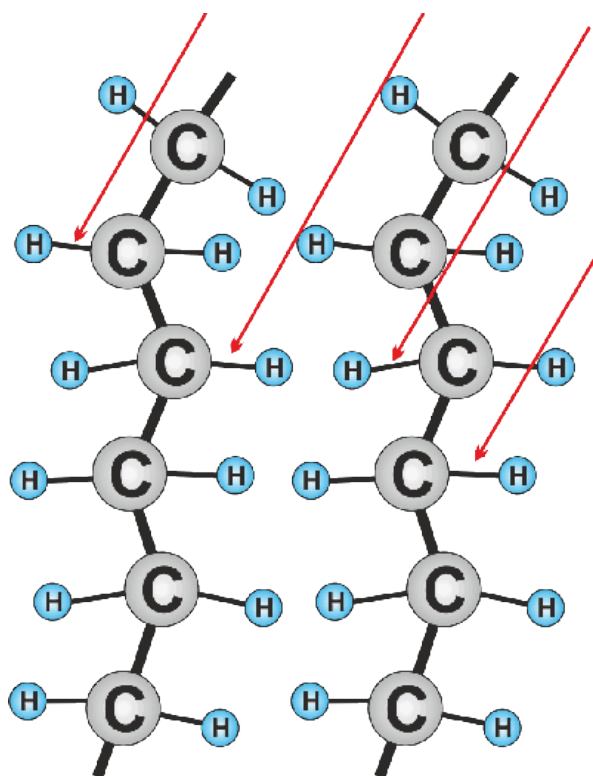


Рисунок 4 – Облучение молекул полиэтилена гамма излучением

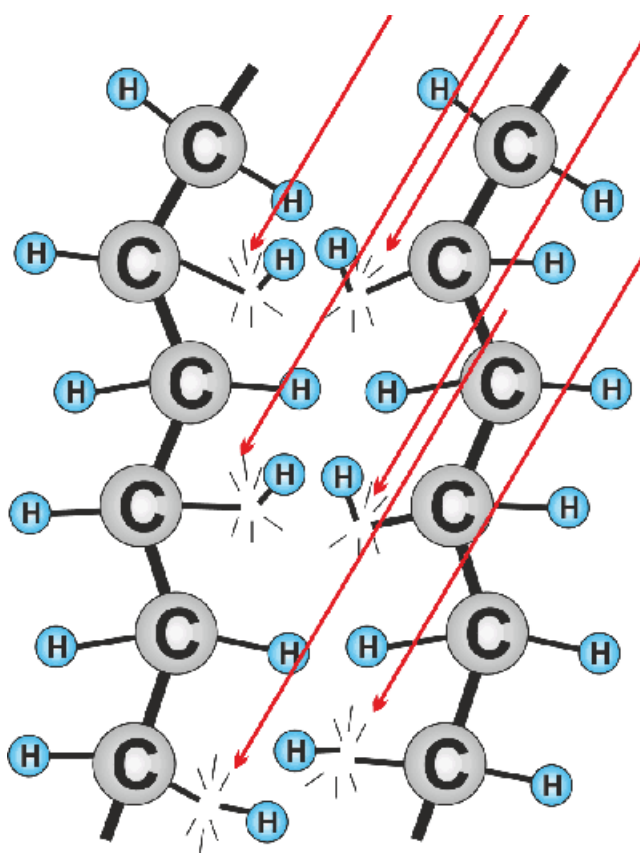


Рисунок 5 – Облучение молекул полиэтилена гамма излучением

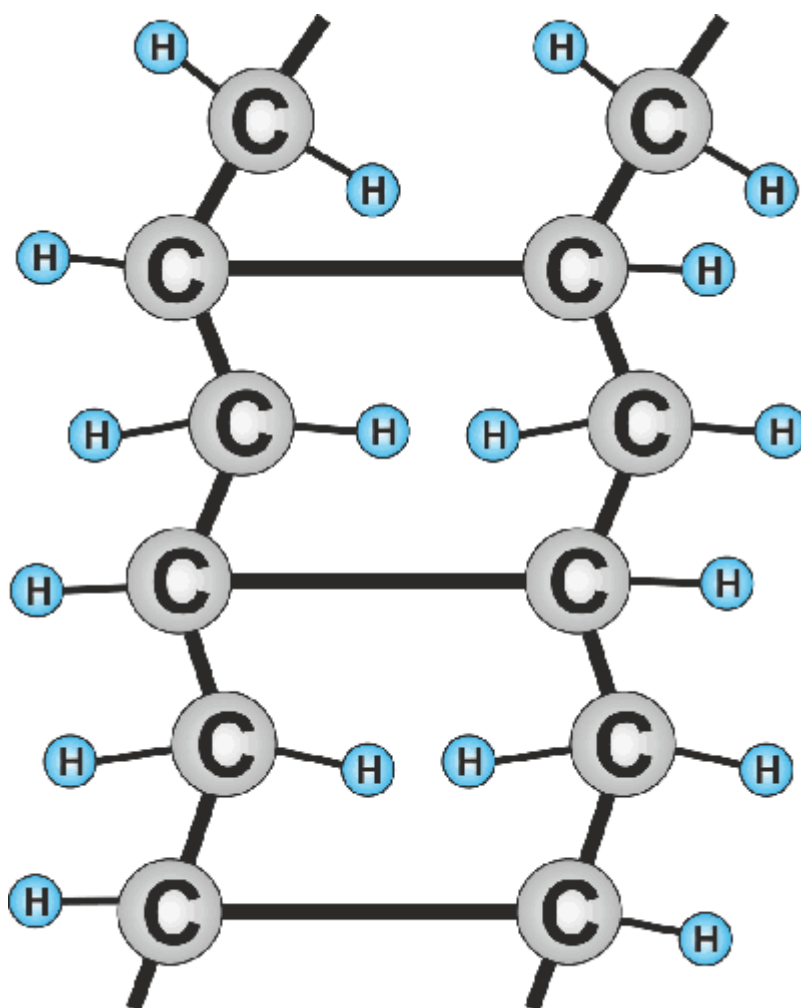


Рисунок 6 – Структура сшитого полиэтилена

После сшивки, кроме увеличения температуры плавления, материал приобретает ещё одно ценное свойство - "память" формы, так как из аморфного куска пластассы он превращается в вещество с чёткой структурой внутри. Растягивая подогретый модифицированный полиэтилен мы нарушаем внутреннее равновесие в его вновь образованных химических связях, вызывая упругие напряжения в его структуре. После охлаждения полиэтилен застывает, сохраняя свою новую форму. Но лишь только его снова нагреют, полиэтилен стремится вернуться в первоначальное, равновесное состояние, в котором межмолекулярные связи чувствуют себя наиболее комфортно.

1.2.2 Технология производства

Теперь давайте рассмотрим существующие на данное время технологии производства сшитого полиэтилена. Выделяются три основные технологии производства РЕ-Х:

1. РЕ-Ха – пероксидная сшивка (нагрев в присутствии пероксидов);
2. РЕ-Хб – силановая сшивка (обработка водяным паром, содержащим в себе силан + катализатор);
3. РЕ-Хс – электронная, так же в некоторых источниках указывается как радиационная (бомбардировка электронами);

Рассмотрим каждую из описанных технологий производства СПЭ ниже.

1.2.2.1 Силановая сшивка

Самым распространенным, менее затратным и более быстрым по технологии производства считается метод силанольной сшивки полиэтилена, который заключается в добавлении активных молекул силана (водородные соединения кремния общей формулы $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$, где $n = 1-8$). Этот метод был разработан в конце 60-х годов.

Сшивка производится во влажной среде (пар, вода) при температуре 80 - 90 °, отсутствие пара при сшивке, значительно увеличивает ее время. Гидролиз силанольных групп происходит под воздействием воды, вследствие чего происходит их последующее сшивание, которое ускоряется под действием тепла и катализатора. Применение данного способа сшивания при производстве кабелей на среднее напряжение ограничено, поскольку кабели на напряжение 10-35 кВ имеют значительно большую толщину изоляции, чем кабели на низкое напряжение. Поперечные связи при сшивке образуются Si-O-Si мостами, (Рисунок 7), из-за этого возникает проблема создания равномерных физико-механических свойств в радиальном направлении изоляции.

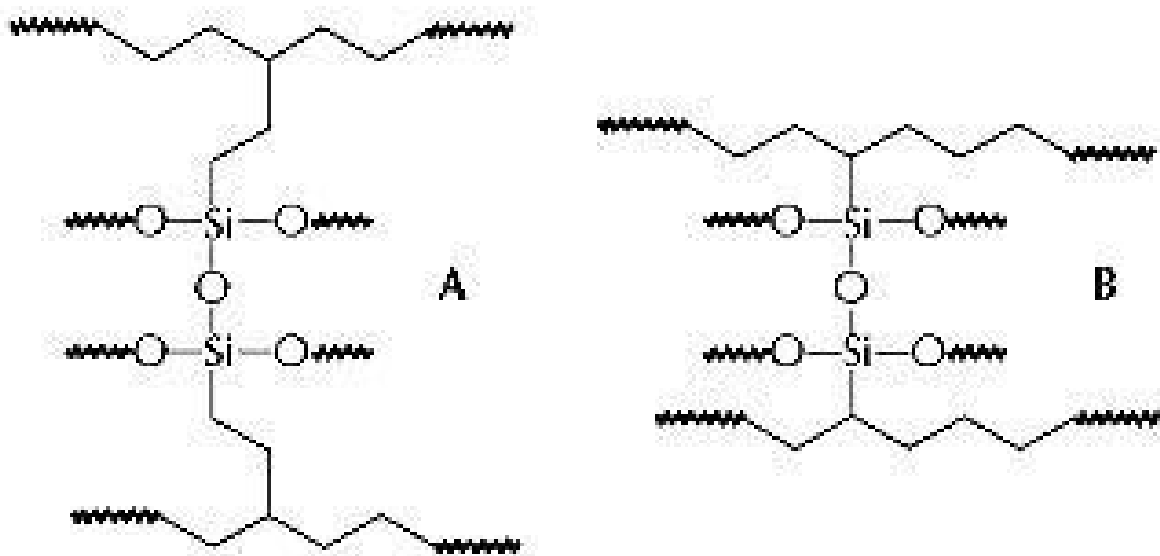


Рисунок 7 – Структура сшитого полиэтилена по силановой технологии (А – сшитый винилсилан, В – винилсилансополимеризации)

Технология сшивки силаном состоит из двух этапов:

1. Внедрение силана в полимер, либо привитием винилсилана на полимерную цепочку, либо сополимеризацией винилсилана с этиленом в реакторе полимеризации.
2. Сшивка в присутствии воды, обычно ускоряемая оловянным или другими подходящими катализаторами.

Силановое сшивание расширяет рамки производственного процесса, поскольку отпадает необходимость поддерживать температуру ниже температуры разложения перекиси. При использовании силана экструдат может быть быстро охлажден и подготовлен для чистовой обработки. Скорость полимеризации определяется скоростью диффузии влаги, поэтому для ускорения реакции часто применяется горячая водяная баня, паровая сауна или автоклав низкого давления.

Основные преимущества сшитого полиэтилена полученного по технологии силанового сшивания состоят в следующем:

- Низкая стоимость производства.
- Высокая скорость производства;

- Устойчивостью к термическому окислению при температуре до +160 °С;
- Ударной прочностью, способностью выдерживать длительные нагрузки;
- Эластичностью;
- Устойчивостью к химически активным веществам

При множестве положительных качеств полиэтилена, прошедшего силанольную сшивку, его термическая устойчивость всё же не достигает уровня, необходимого для изготовления изоляции кабелей высокого напряжения. Повышение температуры провода до + 250 °С изолятор выдерживает лишь непродолжительное время. Сфера применения этого материала ограничена:

- изоляция кабельно-проводниковой продукции, работающей под напряжением до 1 кВ;
- трубные изделия (горячее и холодное водоснабжение, газовые магистрали, отопление, канализация и пр.);
- монтажные пластиковые изделия

1.2.2.2 Пероксидная сшивка

Этот процесс производства СПЭ изоляции является достаточно сложным и дорогостоящим. Данный вид сшивки получил большее распространение, т. к. материал после обработки получает уникальные прочностные качества. Он широко применяется для производства изоляции кабелей на среднее и высокое напряжение.

Сшивка происходит при участии пероксидов и обязательном создании необходимой среды, которая включает в себя следующие условия:

- сухая среда с присутствием инертного газа (например азота);
- температуру +300...+400 °С;
- давление от 8 до 20 атм.

В процессе сшивки происходит реакция присоединения молекул имеющих один или несколько неспаренных электронов друг с другом,

вследствие чего происходит связь между атомами С разных полимерных цепочек. Для получения СПЭ материал перед экструдированием расплавляется вместе с антиокислителями и пероксидами. При повышении температуры пероксиды распадаются на свободные радикалы. Эти свободные частицы отрывают у звеньев полиэтилена по одному атому водорода, что приводит к появлению свободной связи у атома углерода. В соседних макромолекулах атомы углерода объединяются. Количество межмолекулярных связей составляет 2-3 на 1000 атомов углерода. Образуется трехмерная сетка, которая исключает возможность образования кристаллитов при охлаждении полимера. Технология пероксидной сшивки очень требовательна к соблюдению всех условий в процессе производства СПЭ.

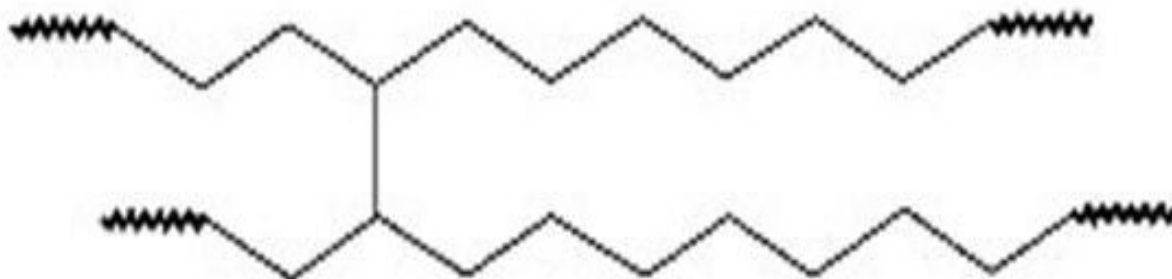


Рисунок 8 – Структура полиэтилена, сшитого по пероксидной технологии.

Разложение пероксидов происходит после экструзии с помощью протяженных линий непрерывной вулканизации, соляной бани или азотной системы. Пероксидно-сшитые изделия требуют продолжительного замедленного цикла термообработки (часто при повышенном давлении) для завершения процесса вулканизации. Максимальная доля сшивки определяется количеством пероксида.

1.2.2.3 Электронная сшивка

Электронный или радиационный метод относится к физическому способу и подразумевает в себе обработку полиэтилена рентгеновским излучением, как говорилось ранее. Этот процесс «выбивает» водородные атомы

из решетки соединения, а углероды, оставшиеся в свободных связях, сшиваются с атомами соседнего углерода. Результат процесса – сшитый полиэтилен маркировки РЕХ-С.

Плюс данного метода заключается в скорости производства СПЭ. Однако этот метод не является идеальным, потому как гамма-излучение существенно притупляется толщиной материала, и как следствие – неравномерная структура физической сшивки со средней степенью сшивки около 60%. Изделия полученные данным путем обладают невысоким порогом устойчивости к низкому температурному режиму, и не имеют памяти формы. Это жесткие изделия, поэтому работа с ними несколько усложняется.

На основании всего выше сказанного, сведем характеристики сшитого полиэтилена в зависимости от способа производства в таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристики сшитого полиэтилена в зависимости от технологии производства

Показатель	РЕХ-а	РЕХ-б	РЕХ-с
Технология сшивки	Метод Энгела (пероксидный)	Силановый	Радиационный
Материал необходимый для сшивки	Полиэтилен высокой плотности	Полиэтилен средней плотности	Полиэтилен средней плотности
Условия сшивки	Высокая температура, сшивка производится в жидком состоянии	Присутствие горячей воды или пара, сшивка производится в твердом состоянии вещества (сшивка – после экструзии)	Сшивка производится в твердом состоянии, в условиях окружающей среды (сшивка - после экструзии)
Максимальная степень сшивки, %	85 %	70 %	60 %
Молекулярная связь	C – C	-Si-O-Si	C – C

Показатель	PEX-a	PEX-b	PEX-c
Однородность структуры	Однородная	Менее однородная	Менее однородная
Скорость производства	Низкая	Высокая	Высокая
Себестоимость изготовления материала	Высокая	Очень низкая	Низкая
Эластичность трубы	Очень эластичные	Жесткие	Эластичные
Память на восстановление при изломах	Высокая	Плохая	Средняя
Зависимость концентрации тепла на плотность	Не влияет	Уменьшает плотность	Уменьшает плотность
Разложение под воздействие воды	Нет	Да	Нет
Термостойкость при повышении температуры	Высокая	Высокая	Низкая
Термостойкость при снижении температуры	Высокая	Низкая	Средняя
Стойкость к долговременному влиянию высокого давления	Высокая	Высокая	Средняя
Механическая прочность	Высокая	Средняя	Средняя

Показатель	PEX-a	PEX-b	PEX-c
Экологические характеристики материала	Не имеет токсических выделений. Имеет международный экологический сертификат ISO 14001. Применяется даже в фармакологической промышленности.	Насыщенный раствор силана при контакте с оловянными сплавами выделяют метанол. Материал не упоминается в списке с положительными экологическими характеристиками.	Материал внесен в список с положительными экологическими характеристиками.

2 ПРИМЕНЕНИЕ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В КАЧЕСТВЕ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Так сложилось, что в энергетике при строительстве кабельных линий низкого, среднего и высокого напряжения использовали кабели с БПИ, ввиду отсутствия на тот момент других технологий производства кабелей. Силовые кабели с БПИ имеют, существенны минусы по сравнению с кабелями с СПЭ изоляцией:

1. Сложность производства;
2. Долгое время производства;
3. Большая масса и стоимость, из-за металлической оболочки;
4. Ограничения связанные с горизонтальной прокладкой, при которой масло, которым пропитывается бумага в изоляции, стекает вниз.

Всех этих недостатков лишены, современные кабели, которые в качестве изоляционного материала используют сшитый полиэтилен.

Промышленно развитые страны начали использовать СПЭ в качестве изоляционного материала ещё в 70-х годах прошлого века, и в наше время многие страны полностью отказались от производства и использования кабели с БПИ в своих электрических сетях.

2.1 Нормативные требования к конструктивному исполнению кабелей с СПЭ изоляцией

Кабели силовые с изоляцией из СПЭ применяются в сетях номинальным напряжением 0,4 – 500 кВ, с частотой переменного тока в 50 Гц. Служат для транспортировки и распределения электрической мощности.

Кабели с СПЭ изоляцией могут применяться, как в сетях с заземленной, так и в сетях с изолированной нейтралью силового трансформатора.

Выпускаются как в однофазном, так и в трёхфазном исполнении.

Кабели произведенные в Российской Федерации должны отвечать требованию следующих нормативных документов:

1. ГОСТ Р 55025-2012 «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия. Условия создания. Нормы и требования»
2. ТУ предприятия, выпускающего кабель (ТУ 16.К71-335-2004. ТУ 3530-001-42747015-2005);
3. Стандарт МЭК 60502-2;

2.2 Конструктивное исполнение кабелей с СПЭ изоляцией

Конструкции кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена последнего поколения отличаются наличием герметизирующих элементов, препятствующих распространению влаги по токопроводящей жиле или в области металлического экрана. Такие кабели содержат водоблокирующие элементы, наложенные в виде обмотки водонабухающей ленты или водонабухающего порошка, введенного в промежутки между проволоками токопроводящей жилы или металлического экрана.

Пример конструктивного исполнения одножильного силового кабеля на напряжение 110-500 кВ приведен на рисунке 1.

1. Токопроводящая многопроволочная жила, которая изготавливается из алюминия или меди. По форме токопроводящие жилы выполняют круглыми (RM) или секторными (RMS – сегментированная жила (тип Milliken)). Материал из которого производится жила также как её форма и поперечное сечение зависит от значений нагрузочных (пропускной способности), и характеристик кабельной линии (условий прокладки). При выборе конструкции, также необходимо учитывать, что жилы с поперечным сечением более 1000 мм² выполняются, как правило, секторными (сегментированными). Это обусловлено необходимостью уменьшения поверхностного эффекта и, как следствие, увеличения пропускной способности кабельной линии.



Рисунок 9 - Конструкция одножильного кабеля из СПЭ на напряжение 110 - 500 кВ.

На рисунке 9 цифрами обозначены:

2. Внутренний электропроводящий экран по жиле - представляет собой тонкий слой электропроводящей полиэтиленовой композиции экструдированной на жилу. Электропроводящий экран по жиле необходим для равномерного распределения напряженности электрического поля на границе токпроводящей жилы и слоя изоляции.

3. Изоляция из сшитого полиэтилена - является основным электроизоляционным элементом в конструкции СПЭ кабелей 110-500 кВ.

Изоляция представляет собой слой сшитого полиэтилена обладающего высокой электрической прочностью. Изоляционный сшитый полиэтилен, должен выдерживать воздействие электрического поля, как в стационарном, так и в переходных режимах.

4. Внешний электропроводящий экран по изоляции - представляет собой тонкий слой электропроводящей композиции экструдированной на изоляцию из сшитого полиэтилена. Электропроводящий экран позволяет равномерно распределять напряжённость электрического поля между изоляцией и заземлённым проводником (проволочным экраном кабеля).

5. Разделительный слой - выполняется из электропроводящих лент, обладающих свойством водоблокирования (набухания при контакте с водой). Он необходим для защиты от распространения влаги в случае повреждения оболочки кабеля (продольная герметизация), а также механической и термической защиты внешнего электропроводящего экрана от возможного повреждения проволочным экраном кабеля.

6. Проволочный экран - выполняется из медных проволок, поверх которых накладывается медная лента. Основным назначением проволочного экрана является равномерное распространение нулевого потенциала по поверхности изоляции кабеля и пропускания токов короткого замыкания (КЗ). Для обеспечения возможности мониторинга температуры кабеля в проволочный экран могут дополнительно встраиваться оптоволоконные модули.

7. Разделительный слой - представляет собой слой электропроводящих лент обладающих водоблокирующими свойствами (продольная герметизация). Разделительный слой также необходим для предотвращения возможного затекания материала оболочки между проволокой экрана в процессе изготовления.

8. Поперечная герметизация - представляет собой слой ламинированной алюминиевой фольги, которая жестко скрепляется с внешней оболочкой и препятствует проникновению влаги через оболочку. В качестве поперечной герметизации также может использоваться оболочка из свинцового сплава или алюминия. Как правило такие конструкции применяются для подводных силовых кабелей.

9. Внешняя оболочка - в зависимости от назначения (места прокладки) силового кабеля, внешняя оболочка может выполняться из полиэтилена повышенной твёрдости, ПВХ пластиката пониженной горючести, ПВХ пластиката пониженной горючести с пониженным дымо и газовойделением (LS), безгалогеновой полиэтиленовой композиции (HF). Внешняя оболочка необходима для электрического изолирования проволочного экрана от земли. Внешняя оболочка должна защищать кабель от механических воздействий, возникающих при его монтаже и эксплуатации, а также от вредных внешних воздействий. Для проверки отсутствия повреждений внешней оболочки в процессе изготовления и после прокладки кабеля, на нее часто наносится слой из полупроводящего материала (графитовая краска либо полупроводящий полимер).

Условные буквенно-цифровые обозначения (маркировка) кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Обозначение маркировки силовых кабелей

Конструкция	Маркировка	Расшифровка
Материал жилы	(без обозначения)	Медная жила
	А	Алюминиевая жила
	гж	Герметизация жилы
Материал изоляции	Пв	Изоляция из сшитого (вулканизированного) полиэтилена
Оболочка	П	Оболочка из полиэтилена

Конструкция	Маркировка	Расшифровка
	Пу	Усиленная оболочка (для кабелей высокого и сверхвысокого напряжения)
	Пнг-НГ	Оболочка из композиции полиэтилена, не содержащей галогенов
	В	Оболочка из ПВХ пластиката
	Внг-А(В)	Оболочка из ПВХ пластиката пониженной горючести с индексом: А-нераспространение горения по кат. А; В- нераспространение горения по кат. В
	Внг-LS	Оболочка из ПВХ пластиката пониженной горючести, с пониженным дымо- и газовыделением
	Г (после обозначения оболочки)	Продольная герметизация экрана водоблокирующими лентами
	2г	Двойная герметизация: алюмополимерная лента, сваренная с оболочкой, для защиты от проникновения влаги в сочетании с продольной герметизацией водоблокирующими лентами
	ов (после обозначения экрана)	Оптические волокна в стальных трубах, встроенные в медный экран

Пример обозначения: АПвПг 1х240/35—10 — кабель с алюминиевой жилой (А), СПЭ-изоляцией (Пв), полиэтиленовой оболочкой (П), герметизацией экрана (г), одножильный (1), сечение жилы 240 мм, сечение экрана 35 мм, номинальное напряжение 10 кВ.

2.3 Условия для использования кабелей с изоляцией из СПЭ

При производстве кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, должны соблюдаться все требования нормативных документов указанных в п.2.1.

Их целесообразно применять в РКС при необходимости:

- прокладки ЛЭП в районах с высокими требованиями к экологический и пожарной безопасности;
- передать большую электрическую мощность;
- обеспечить высокий уровень надежности и безаварийности ив процессе передачи электрической энергии;
- при строительстве ЛЭП в условиях экстремальной эксплуатации (например подводные ЛЭП, или высоковольтные ЛЭП в черте города).

Однофазные кабели при прокладке в земле с разными коррозионными свойствами, для подвески на опоре или прокладке в кабельных лотках обычно применяются следующих марок:

- ПвП;
- АПвП;
- ПвПу;
- АПвПу.

Для прокладки в кабельных сооружениях данных кабелей необходимо соблюдение дополнительных противопожарных мер (обработка от воздействия огня).

При наличии в маркировке кабеля букв Г и 2Г обозначает о возможности прокладки в земле и под водой.

При строительстве КЛ в труднопроходимых местах, с большим количеством поворотов, количеством трубных переходов, либо более 2 по 40 метров и более, либо более 4 по 20 метров каждый и углом наклона более 30 °, рекомендуется применять кабели марок следующих марок:

- ПвПу;
- АПвПу.

В сухой грунт рекомендуется прокладывать следующие марки кабелей:

- ПвВ;
- АПвВ;
- ПвВнг;
- АПвВнг;
- ПвВнг – LS;
- АПвВнг - LS,
- ПвПнг – HF;
- АПвПнг – HF.

Для групповой прокладки в помещениях, кабельных лотках и кабельных сооружениях рекомендуется применять кабели марок

- ПвВнг-LS;
- АПвВнг-LS;
- ПвПнг – HF;
- АПвПнг.

Данные марки кабелей также используются в электроустановках, в которых установлены повышенные требования к плотности дыма при пожаре.

При необходимости использования кабелей с в помещениях с газом, который оказывает деструктивное воздействие на изоляцию, рекомендуется применять следующие марки:

- ПвПнг-HF;
- АПвПнг-HF.

Использования кабеля с СПЭ изоляцией в сетях с изолированной нейтралью рекомендуется при использовании на линии релейной защитой, действующей на отключение ЛЭП при однофазном замыкании на землю. Поэтому кабели с СПЭ изоляцией рекомендуется применять в сетях с эффективно или глухозаземленной нейтралью, так как на линиях напряжением 110 кВ и выше применяется основная быстродействующая, а также резервная защита от коротких замыканий на землю.

В случае допустимости работы ЛЭП в режиме однофазного замыкания на землю, возможен пробой изоляции из-за перенапряжения.

2.4 Основные технические и эксплуатационные характеристики кабелей с СПЭ изоляцией

Основные физические и механические характеристики кабелей с СПЭ изоляцией сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – физико-механические свойства

Параметр	Значение параметра
Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	0,4 – 500
Диапазон рабочей температуры окружающей среды, °С:	-
- ПвВ, АПвВ;	от + 50 до -50
- ПвВнг-LS, АПвВнг-LS;	от + 50 до -40
- ПвП, АПвП, ПвПу, АПвПу	от + 50 до -60
Относительная влажность воздуха	98
Допустимая рабочая температура токопроводящей жилы, °С	90
Предельно допустимая температура нагрева ТПЖ кабелей в аварийном режиме (или режиме перегрузки), °С	+ 130
Предельная температура нагрева ТПЖ по условиям невозгораемости, °С	400 (до 4 с) 350
Максимальная температура нагрева экрана при КЗ, °С	250
Максимальная температура нагрева ТПЖ при КЗ, °С	250
Минимально радиус изгиба при прокладке*	15 D_H
Примечание * - при монтаже с использованием специального шаблона допускается минимальный радиус изгиба кабеля 7,5 D_H .	

2.4 Электрические характеристики кабелей

Электрические параметры кабелей, в том числе, длительно допустимые токи и допустимые токи КЗ, должны быть указаны в ТУ предприятием - изготовителем для конкретных сечений ТПЖ кабеля.

Расчетные значения электрических сопротивлений ТПЖ кабеля и ёмкости приведены в таблице 3 и 4.

Таблица 3 - Электрические параметры одножильного кабеля

Сечение ТПЖ, мм ²	Сопротивление ТПЖ постоянному току при температуре 20 °С, Ом/км		Ёмкость, мкФ/км
	медной жилы	алюминиевой жилы	
50	0,387	0,641	0,23
70	0,268	0,443	0,26
95	0,193	0,320	0,29
120	0,153	0,253	0,31
150	0,124	0,206	0,34
185	0,0991	0,164	0,37
240	0,0754	0,125	0,41
300	0,0601	0,100	0,45
400	0,0470	0,0778	0,5
500	0,0366	0,0605	0,55
630	0,0280	0,0464	0,61
800	0,0221	0,0367	0,68

Таблица 4 - Электрические сопротивления ТПЖ кабелей переменному току при температуре 90°С при прокладке кабелей треугольником и в плоскости с расстоянием в свету равном диаметру кабеля

Сечение ТПЖ, мм ²	Активное сопротивление переменному току при 90°С, Ом/км				Индуктивное сопротивление, Ом/км	
	медные жилы		Алюминиевые жилы		при прокладке треугольником (Δ)	при прокладке в плоскости (...)
	(Δ)	(...)	(Δ)	(...)		
50	0,494	0,494	0,822	0,822	0,126	0,184
70	0,342	0,342	0,568	0,568	0,119	0,177
95	0,247	0,246	0,411	0,411	0,112	0,170
120	0,196	0,196	0,325	0,325	0,108	0,166
150	0,159	0,159	0,265	0,265	0,106	0,164
185	0,128	0,127	0,211	0,211	0,103	0,161
240	0,0981	0,0973	0,161	0,161	0,0987	0,157
300	0,0791	0,0781	0,130	0,129	0,0959	0,154
400	0,0633	0,0618	0,102	0,101	0,0928	0,151
500	0,0510	0,0490	0,0804	0,0790	0,0897	0,148
630	0,0417	0,0391	0,0639	0,0621	0,0867	0,145
800	0,0329	0,0301	0,0505	0,0496	0,0832	0,142

Значения допустимых токов односекундного короткого замыкания кабелей должны соответствовать значениям, указанным в таблице 5.

Таблица 5 - Допустимые значения токов односекундного короткого замыкания кабеля с изоляцией из СПЭ

Номинальное сечение жилы, мм ²	Токи короткого замыкания кабеля, кА	
	с медной жилой	с алюминиевой жилой
50	7,15	4,7
70	10,0	6,6
95	13,6	8,9
120	17,2	11,0
150	21,5	14,2
185	26,5	17,5
240	34,3	22,7
300	42,9	28,2
400	57,2	37,6
500	71,5	47,0
630	93,1	59,2
800	114,4	75,2

Допустимые токи односекундного короткого замыкания в медных экранах должны быть не более приведенных в таблице 6.

Таблица 6 - Допустимые значения токов односекундного короткого замыкания в медных экранах кабеля с изоляцией из СПЭ

Сечение медного экрана	Допустимый ток односекундного короткого замыкания, кА
16	3,2
25	5,2

Сечение медного экрана	Допустимый ток односекундного короткого замыкания, кА
35	7,4
50	10,3
70	14,5
95	19,2

Длительно допустимые токи для одиночной кабельной линии электропередачи в зависимости от сечения алюминиевой (медной) токопроводящей жилы, напряжения и условий прокладки приведены в приложении А.

Для кабелей, проложенных в воздухе, длительно допустимые токи приняты для температуры окружающей среды 25 °С.

Для кабелей, проложенных в земле, длительно допустимые токи рассчитаны при глубине прокладки 0,7 м, удельном термическом сопротивлении почвы 1,2 (Км)/Вт и температуре окружающей среды 15 °С.

2.5. Требования к заземлению экранов

Экран кабеля должен быть заземлен на обоих концах линии. Заземляющие проводники должны быть термически устойчивы к токам короткого замыкания.

В местах соединения кабельной линии с воздушной посредством соединительной муфты, необходимо выполнить заземляющие устройства у кабельной муфты, при отсутствии таковых у самой опоры ЛЭП.

При наличии на ЛЭП кабельной вставки необходима установка ОПН с двух сторон кабеля. Экран кабеля должен быть соединен с корпусом соединительной муфты, заземляющими аппаратами по кратчайшему пути. Для соединения заземляющего аппарата с заземлителем необходимо использовать отдельный проводник.

2.6 Климат и условия окружающей среды при эксплуатации

Кабели с изоляцией из СПЭ выполнены по климатическому исполнению - У, УХЛ, категория размещения 1 и 2 по ГОСТ 15150-69.

Прокладку кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена можно выполнять в различные виды грунтов и почв.

В зависимости от типоразмера кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена можно использовать при прокладке, как в земле, так и в воде.

Также данный вид кабелей, рекомендуется применять в районах с повышенной сейсмической активностью.

Ограничений на уровень влажности воздуха в процессе эксплуатации кабеля нет.

3 ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ С СПЭ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В настоящее время в отечественной электроэнергетике физический износ кабельного парка находится на уровне 60–80%, а удельная повреждаемость КЛ в среднем составляет от 4,5 до 12 случаев на 100 км/год [8].

Например, по данным на 2010 год, для Москвы количество отказов всех кабельных линий 6-20 кВ находилось на уровне 11,7 случая на 100 км кабеля в год. Конечно, нужно отметить общий значительный износ кабельных линий, что, естественно, влияет на данные показатели [7].

Относительно высокая повреждаемость КЛ и значительная протяженность РКС (которая, например, для таких городов-мегаполисов, как Москва, Санкт-Петербург и Новосибирск, составляет соответственно около 57, 44 и 3 тыс. км) заставляет обслуживающий персонал работать в аварийно-восстановительном режиме эксплуатации КЛ. Это практически исключает проведение плановых профилактических испытаний по своевременному выявлению электрически ослабленных мест в изоляции кабельной системы. Эксплуатационный персонал в ущерб плановым испытаниям и своевременной диагностике технического состояния КЛ вынужден отвлекать материальные и людские ресурсы на трудоемкие аварийно-восстановительные работы (в основном в неудобный зимне-весенний период) по ликвидации повреждений КЛ.

Несколько облегчить ситуацию призваны кабели нового поколения, использующие в качестве изоляции сшитый полиэтилен, у которых есть как неоспоримые преимущества по отношению к кабелям с бумажной пропитанной изоляцией, так и свои недостатки.

3.1 Надежность

Какими бы преимуществами и На первый взгляд кажется странным поднимать вопрос о повышении надежности кабельных изделий с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими показателями. Ведь очевидно, что всё новое должно быть лучше предыдущего. Что же

касается электроэнергетики, то в этой достаточно ответственной и консервативной (в хорошем понимании этого слова) отрасли ко всему новому, как показала практика, следует подходить разумно и с осторожным оптимизмом.

На основании исследований по анализу условий эксплуатации КЛ среднего и высокого напряжения в сетях различного назначения кафедры техники и электрофизики высоких напряжений (ТЭВН) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), можно выделить тезис о необходимости системного подхода на стадиях проектирования, разработки конструкции кабеля и эксплуатации для обеспечения требуемой надежности, экономичности и экологичности закрытых линий электропередачи. В настоящей статье делается попытка показать одну из сторон такого системного подхода, который желательно принимать во внимание проектным и эксплуатирующим организациям при внедрении кабелей с СПЭ изоляцией на стадии сооружения новых и реконструкции существующих участков городских РКС.

К основным факторам, определяющим эксплуатационную надежность, можно отнести следующие:

- ресурс изоляционной системы кабеля;
- режим заземления нейтрали в РКС;
- уровни перенапряжений в РКС, возникающие при однофазных дуговых замыканиях (ОДЗ), грозовых перенапряжениях и коммутациях КЛ;
- температурный режим эксплуатации кабеля;
- необходимое сечение экрана;
- методы диагностики технического состояния изоляции;
- параметры испытаний и нормативно-техническая база по сооружению и эксплуатации кабелей с СПЭ изоляцией.

Рассмотрим кратко влияние каждого из выше отмеченных факторов на эксплуатационную надежность КПИ.

3.1.1 Ресурс изоляционной системы КПИ

Под изоляционной системой понимается совокупность изоляции и полимерных электропроводящих экранов, внутри которых замыкается электрическое поле кабеля (рисунок 10).

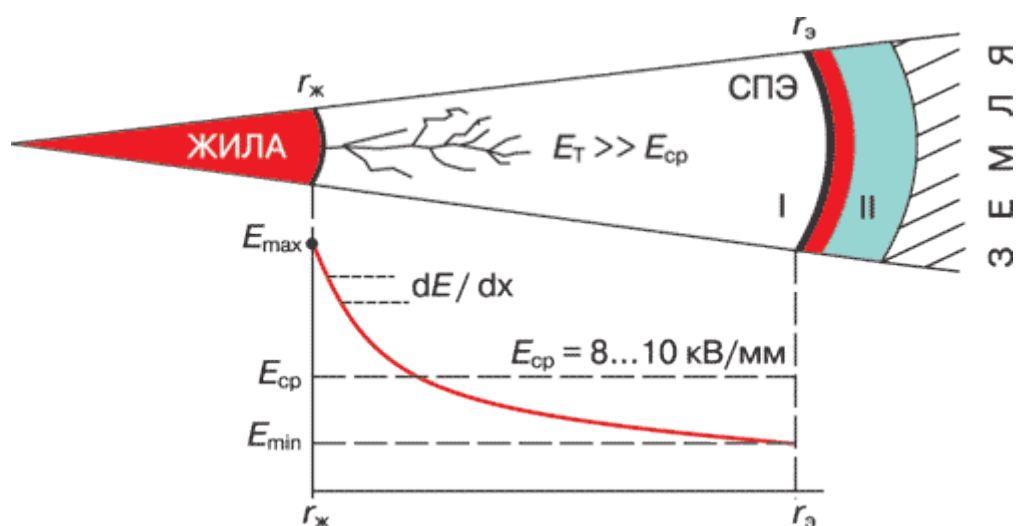


Рисунок 10 – Электрическая прочность изоляционной системы КПИ

Выбор допустимых средних напряженностей электрического поля в КПИ, исходя из длительно действующего рабочего напряжения, в первую очередь определяется процессом старения изоляции. Интенсивность деградации СПЭ-изоляции (под которой в дальнейшем будем понимать снижение электрической прочности изоляции при рабочем напряжении и перенапряжениях) определяет эксплуатационную надежность и срок службы КПИ.

Для кабелей различного конструктивного исполнения механизм старения изоляции различен и зависит от вида применяемого изоляционного материала. Например, одной из основных причин электрического старения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией могут быть частичные разряды (ЧР), разложение молекул масла и бумаги в результате ионизации и

электрохимических процессов. На электрическую прочность кабелей с изоляцией из СПЭ влияет существенно большее количество факторов, обусловленных как технологией изготовления, так и спецификой изменения физико-химических свойств СПЭ в процессе эксплуатации при термическом, механическом и электрическом воздействиях.

Монолитная полимерная изоляция в отличие от бумажной пропитанной изоляции является более чувствительной к разного рода посторонним микровключениям, пустотам, выступам на электропроводящих экранах и другим дефектам. Все эти дефекты повышают локальную напряженность электрического поля в толще твердого диэлектрика и создают предпосылки для образования триингов (проводящих каналов в СПЭ).

Электрическая прочность СПЭ изоляции на переменном и импульсном напряжениях зависит от различных взаимосвязанных факторов, которые условно можно разделить на две группы: технологически обусловленные и эксплуатационные факторы. К первой группе относятся технологические дефекты на стадии изготовления КПИ:

1. воздушные и инородные включения;
2. микровыступы проводящих элементов в изоляцию;
3. неоднородность структуры СПЭ;
4. внутренние (остаточные) механические напряжения в изоляции.

Ко второй группе относятся:

1. механические напряжения, которые могут появиться в СПЭ-изоляции на стадии монтажа кабеля;
2. термическое старение СПЭ-изоляции;
3. время зарождения и скорость развития триингов;
4. воздействие импульсных перенапряжений с крутыми фронтами.

Следует отметить, что в отличие от «мягкой» бумажной пропитанной изоляции СПЭ более чувствителен к воздействию высокочастотных перенапряжений. При резком вводе энергии в твердый диэлектрик происходит разрыв на молекулярном уровне связей между молекулами углерода и водорода

в местах повышенной напряженности электрического поля – например, на кончике триинга, где напряженность электрического поля на два-три порядка может превышать среднюю напряженность (рисунок 10). Это приводит к изменению структуры и физико-механических свойств СПЭ и возникновению внутри него новых микрополостей, которые способствуют дальнейшему развитию ЭТ в толще твердого диэлектрика в виде дендрита (древовидного образования, имеющего повышенную проводимость и приводящего к прогрессирующему разрушению диэлектрика).

Очевидно, что постоянное совершенствование технологии изготовления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также демпфирование влияния (за счет грамотного проектирования и эксплуатации) второй группы факторов позволят более «экономно расходовать» ресурс изоляционной системы кабеля и довести его фактическую наработку до нормативного срока службы (30 лет).

3.1.2 Режимы заземления нейтрали в РКС

При поэтапной замене кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на кабели с СПЭ изоляцией в распределительных кабельных сетях будут эксплуатироваться в одной электрически связанной схеме кабели с различными механизмами пробоя и деградации электрической изоляции. На рисунке 2 в качестве примера приведена потенциально возможная схема участка РКС при постепенной замене кабелей традиционного исполнения с большим сроком эксплуатации на кабели нового поколения.

В процессе эксплуатации КЛ, наряду с механическими и тепловыми воздействиями, подвергаются перенапряжениям с различными амплитудно-временными параметрами. За рубежом кабельные сети эксплуатируются в основном с заземленной нейтралью. И при возникновении режима ОЗЗ поврежденный фидер отключается с переводом потребителя на резервное электроснабжение, т.е. изоляционная система «здоровых» фаз КПИ не находится длительное время под линейным напряжением.

В зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю отечественные РКС эксплуатируются с неэффективно заземленной либо

изолированной нейтралью и при возникновении в них режима ОЗЗ изоляция «здоровых» фаз КПИ будет длительно (до 4–6 часов) подвергаться воздействию номинального напряжения. Учитывая этот фактор, конструкция отечественных КПИ была адаптирована к условиям эксплуатации в российских РКС за счет увеличения толщины изоляции, например, для кабеля номинальным напряжением 10 кВ с 3,4 мм до 4,0 мм. Таким образом, за счет снижения средней напряженности электрического поля в изоляционной системе КПИ несколько увеличили инкубационный период зарождения трингов и время его развития, которые, собственно, и определяют электрическую прочность и остаточный ресурс КПИ. Следует также обратить внимание на следующее. Согласно [1], в зависимости от значения емкостных токов замыкания на землю, возникшие в РКС режимы ОЗЗ на начальной стадии, вследствие заплывания канала электрического пробоя, могут самоустраняться через несколько периодов промышленной частоты либо перейти в режим устойчивого горения дуги длительностью в единицы и десятки секунд с последующим переходом в режим глухого металлического замыкания. На начальном этапе ОДЗ повторные пробои в дуговом промежутке происходят при напряжении 0,6–1,0 U_{фн} и в дальнейшем, с науглероживанием канала электрического пробоя, снижаются до 0,6–0,8 U_{фн}. Возникающие в переходном и установившемся режимах ОДЗ перенапряжения не превышают 2,3–2,5 U_{фн}.

Такие амплитудно-временные параметры перенапряжений в комбинированной РКС могут сопровождаться не только каскадным выходом из строя на участке электрически связанной сети нескольких КБПИ с ослабленной изоляцией, но и ускоренной деградацией СПЭ изоляции. Устранить этот неблагоприятный фактор можно при использовании в РКС низкоомного резистивного заземления нейтрали, когда при возможности обеспечения резервного питания поврежденный кабель практически сразу же отключается.

Следует отметить, что здесь акцент делается на низкоомное заземление нейтрали. Применение высокоомного заземления в РКС не актуально, поскольку перенапряжения в кабельных сетях при ОДЗ, как правило, не

превышают уровня $2,5 U_{фн}$, т.е. уровня, отвечающего первичному зажиганию дуги $2,3-2,5 U_{фн}$ при оснащении нейтрали сети резисторами, способствующими после погасания дуги разряду емкости сети и снижению напряжения на аварийной фазе к моменту возможного повторного зажигания до значения, не превышающего напряжения при первичном зажигании дуги.

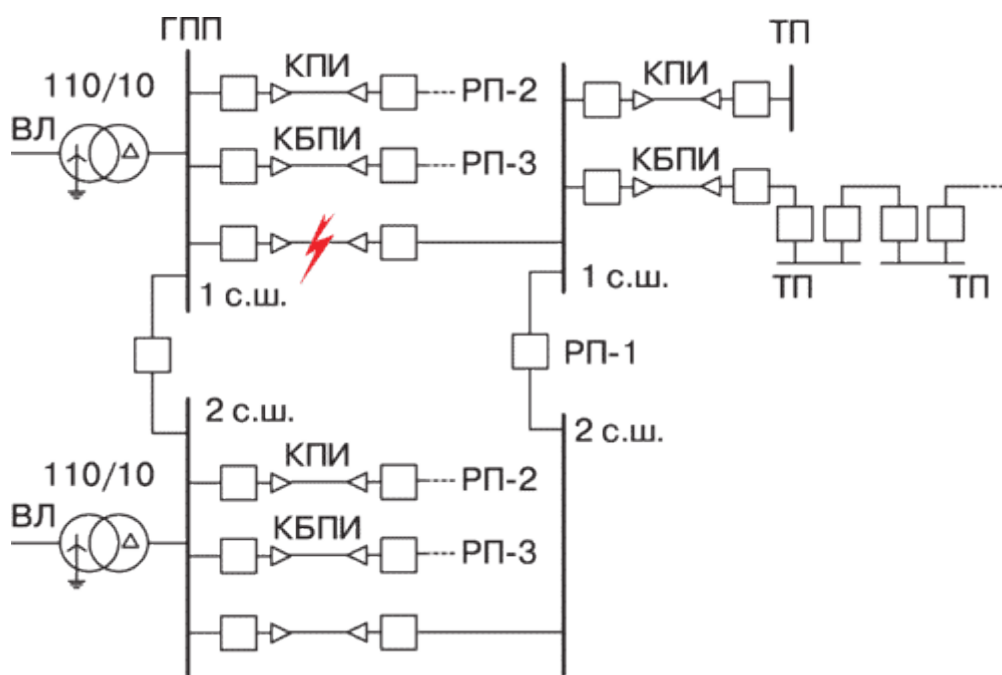


Рисунок 11 – Потенциально возможная схема участка РКС при постепенной замене кабелей традиционного исполнения с большим сроком эксплуатации на кабели нового поколения

Основным моментом при одновременной эксплуатации в комбинированной РКС кабелей с различной диэлектрической средой является не ограничение перенапряжений, а устранение самого факта длительного воздействия на фазную изоляцию КПИ линейного напряжения и перенапряжений при ОДЗ. В этом случае увеличивается наработка КПИ за счет более «экономного расхода» ресурса электрической прочности изоляционной системы кабеля.

В практике эксплуатации РКС резистивное заземление до настоящего времени широкого применения не нашло. Это обусловлено в том числе отсутствием общей методики по определению необходимых параметров резистора (величины сопротивления и его энергетических характеристик), принципов организации и функционирования релейной защиты для новых и реконструируемых участков сети. На современном этапе развития РКС при их постоянно расширяющейся конфигурации, внедрении кабелей с СПЭ-изоляцией с повышенной пропускной способностью, резервировании большинства потребителей, наличии большого количества исследований по различным режимам заземления нейтрали имеются хорошие перспективы для успешного внедрения резистивного заземления нейтрали. Не стоит сбрасывать со счета и применение нейтрали, заземленной через дугогасящий реактор (ДГР). Однако эксплуатация комбинированных кабельных сетей (содержащих КБПИ и КПИ) при оснащении их нейтралей ДГР может быть оправдана лишь при автоматическом регулировании степени компенсации емкостного тока ОЗЗ, когда при электрическом пробое кабелей с бумажной пропитанной изоляцией высока вероятность самоустранения горения дуги. В этом случае длительность перенапряжений минимальна, уровень перенапряжений отвечает первичному зажиганию дуги 2,4–2,5 Уфт, а переход перемежающегося характера горения дуги в металлическое замыкание практически невозможен.

При отсутствии такого регулирования неминуемо будет наблюдаться, во-первых, высокая аварийность физически изношенных КБПИ в основном из-за множественных повреждений при ОДЗ, во-вторых, при переходе ОДЗ в металлические замыкания «здоровые» фазы КПИ могут длительно (до нескольких часов) находиться под воздействием линейного напряжения. Последний фактор приводит к увеличению средней напряженности электрического поля в СПЭ-изоляции и созданию благоприятных условий для развития триингов в электрически ослабленных местах, локально распределенных по толщине изоляции и длине кабеля. Таким образом, при поэтапном внедрении в РКС кабелей с изоляцией из СПЭ нельзя чисто

механически заменять кабели традиционного исполнения на КПИ. Необходимо по возможности создавать для них более мягкие условия эксплуатации, связанные с уменьшением амплитудно-временных параметров перенапряжений при возникновении ОЗЗ и ОДЗ. В этом случае время зарождения и скорость роста водных или электрических триингов в СПЭ-изоляции будет снижена, а фактическая наработка КПИ увеличена.

3.1.3 Грозовые перенапряжения

Выше отмечалось, что электрическая прочность КПИ резко снижается при многократном воздействии высокочастотных перенапряжений. В городских РКС грозовые перенапряжения, воздействующие на кабели с СПЭ-изоляцией, могут иметь место лишь при воздействии грозовых волн на обмотку высшего напряжения трансформатора за счет емкостных и индуктивных связей между обмотками высшего (ВН) и низшего напряжения (НН) трансформатора.

Согласно [2] наиболее опасные воздействия на оборудование со стороны обмотки НН возникают при воздействии срезанных волн, когда первый (максимальный) пик трансформируемой грозовой волны определяется емкостными связями (емкостями обмоток ВН и НН, а также емкостью между этими обмотками). Для ВЛ 110 кВ практически все волны будут срезанными, для которых трансформатор, в сущности, представляет собой емкостный делитель с коэффициентом деления в диапазоне $K_T = 0,3-0,5$. Учитывая реальные амплитуды срезанных волн (отвечающих вольт-секундной характеристике линейной изоляции ВЛ), K_T и низкое эквивалентное волновое сопротивление кабелей, примыкающих к шинам главной понижающей подстанции (ГПП), уровни грозовых перенапряжений, воздействующих на КПИ, будут составлять единицы процентов от амплитуды воздействующей волны и не превышать 30–40% импульсной прочности КПИ. Очевидно, что при отсутствии связи КПИ с ВЛ посредством понижающего трансформатора грозовые перенапряжения на КПИ не будут воздействовать. Таким образом, при внедрении КПИ в РКС грозовые перенапряжения во внимание можно не принимать.

3.1.5 Коммутационные перенапряжения

Согласно [1] зарегистрированные в РКС перенапряжения, обусловленные коммутациями выключателями, имеют незначительный уровень – $2,1-2,3U_{фн}$. Однако в настоящее время на смену масляным выключателям приходит новая коммутационная техника, использующая в качестве дугогасительной среды элегаз или вакуум. Применение вакуумных выключателей, обладающих повышенным коммутационным ресурсом, для эксплуатационного персонала, несомненно, благое дело. Но при коммутациях КЛ с помощью ВВ в зависимости от параметров и конструктивного исполнения сети могут возникать высокочастотные перенапряжения за счет повторных зажиганий дуги в диэлектрическом промежутке между расходящимися контактами. Амплитуду таких перенапряжений можно ограничить с помощью нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), но убрать с помощью ОПН сам факт воздействия ВЧ-перенапряжений, снижающих ресурс электрической прочности КПИ, невозможно. Поэтому актуально при внедрении КПИ в принципе отстроиться от воздействия таких перенапряжений, которые также опасны для витковой изоляции электродвигателей (ЭД) и силовых трансформаторов.

В городских РКС основные коммутации приходится на кабельные линии, примыкающие к ГПП или РП. При их отключении с помощью ВВ на изоляцию КПИ могут воздействовать ВЧ-перенапряжения. При этом инициализация таких перенапряжений зависит от характеристик вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) ВВ и параметров сети. Вероятность повторных зажиганий между расходящимися контактами ВДК зависит от исхода «соревнования» после погасания дуги между растущей электрической прочностью межконтактного промежутка на размыкающихся контактах и переходным восстанавливающимся напряжением на контактах выключателя. Определяющей характеристикой коммутационной способности ВВ является начальная скорость восстановления электрической прочности межконтактного

промежутка, которая зависит от конкретного предприятия-изготовителя и находится в диапазоне:

$$U_{эл.пр.(t)} = k \cdot (t + t_0) \quad (1)$$

где $t_0 = 100 \dots 200$ мкс – время между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока промышленной частоты в ВВ через нулевое значение;

$k = 30 \dots 80$ кВ/мс – скорость роста электрической прочности межконтактного промежутка. Численные исследования показали, что для исключения повторных (многократных) зажиганий дуги между расходящимися контактами ВДК должны иметь скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в зависимости от схемы сети не менее 60–100 кВ/мс.

Следует отметить, что, если определяющая характеристика коммутационной способности ВВ (начальная СВЭП межконтактного промежутка) будет отвечать требованиям международного стандарта IEEE Std C37.013 и составлять не менее 425 кВ/мс, то при коммутации ВВ кабелей на них не будут воздействовать практически в любых схемах их эксплуатации ВЧ-перенапряжения, снижающие со временем электрическую прочность КПИ.

3.1.6 Тепловой режим эксплуатации

Пропускную способность КПИ определяет тепловой режим эксплуатации, который существенно зависит от условий прокладки кабелей по трассе, в частности:

- от удельного термического сопротивления окружающей среды (на воздухе или в земле);
- от способа прокладки отдельных фаз (горизонтальная с расстоянием между кабелями «в свету», равным диаметру кабелей, или треугольником вплотную);
- от наличия рядом расположенных соседних цепей КЛ и других факторов.

Выбор оптимального способа прокладки КПИ и обеспечение приемлемого теплового режима эксплуатации КЛ является довольно ответственным этапом на стадии сооружения кабельной линии.

В настоящее время в сетях среднего напряжения кабели нового поколения составляют примерно около 2% от всего кабельного парка отечественных РКС. Из-за малого опыта проектировщики иногда принимают недостаточно правильные решения на стадии сооружения КЛ по условиям их прокладки, что может привести к повреждению изоляции кабелей в самом начале эксплуатации.

Это обусловлено следующим обстоятельством. На практике наиболее распространенными конструкциями являются КПИ однофазного исполнения (ОИ), что предопределяет большие строительные длины, легкость монтажа и возможность выполнения кабелей с большими номинальными сечениями жилы. Однако однофазная конструкция КПИ накладывает определенные ограничения на способы их прокладки в отличие от кабелей традиционных трехфазных конструкций с бумажной пропитанной изоляцией. Например, в [2] оговариваются допустимые температурные условия эксплуатации кабеля при различных способах его прокладки, а в [3, 4, 5] подчеркиваются особенности прокладки подводных кабелей и прокладки КПИ в местах, требующих их механической защиты с помощью труб, – при пересечении инженерных сооружений, автомобильных дорог, при естественных препятствиях и т.п.

Невыполнение регламента прокладки КПИ в последних случаях может привести по крайней мере к двум негативным явлениям: к тепловому разрушению кабеля при его эксплуатации в номинальном режиме либо локальному снижению электрической прочности СПЭ-изоляции на участке кабеля, заключенного в защитную трубу из магнитного материала. Очевидно, что комбинированное воздействие электрического и нерасчетного теплового полей при наложении длительных и возможных ВЧ-перенапряжений может привести на особых участках прокладки КПИ к преждевременному развитию в СПЭ-изоляции электрически ослабленных мест. Анализ технологических

нарушений при прокладке КПИ показывает, что причиной теплового разрушения кабелей является их перегрев либо в местах пересечения с автодорогами, либо при проходе сквозь стены, т.е. на непротяженных участках трассы, где зачастую кабели прокладываются пофазно в защитных стальных трубах. В рассматриваемых случаях к теплу, выделяемому в жиле и экране, добавляется тепло, инициируемое вихревыми токами в стальной незаземленной трубе. Суммарное воздействие этих тепловых полей приводит к локальному разогреву кабеля и при длительном воздействии к разрушению защитной оболочки и снижению электрической прочности основной изоляции. Как показывают расчеты, в рассматриваемых случаях для предотвращения существенного повышения температуры кабелей необходимо снижать номинальный рабочий ток почти в два раза, что на практике неприемлемо. В [4] на основе экспериментальных данных и мультифизического численного моделирования было показано:

- пофазная прокладка КПИ ОИ в стальных трубах недопустима из-за появления дополнительного источника тепла в виде вихревых токов в стальной трубе, что приводит к увеличению температуры в конструкции выше допустимой и выходу кабеля из строя;

- если это не требуется по условиям механической прочности, то следует по возможности избегать прокладки кабелей в трубах из ферромагнитных материалов, а применять неметаллические трубы (например, асбоцементные или пластмассовые);

- при необходимости стальные трубы могут быть применены, но при условии расположения в них трех фаз одной цепи КЛ треугольником вплотную и расчета пропускной способности КЛ в целом, исходя из локально повышенного значения температуры кабелей в контейнере из магнитного материала.

3.1.7 Выбор сечения экранов

Вопрос термической устойчивости экранов остро стоял для КПИ первого поколения, в конструкции которых экраны представляли собой медную

ленту толщиной 0,15–0,25 мм. В электрических сетях номинальным напряжением 110 кВ и выше (с эффективно заземленной нейтралью) при электрическом пробое КПИ в зависимости от мощности подстанции по экрану кабеля протекали токи КЗ в десятки кА, которые приводили к повреждению (выгоранию) экрана на значительной длине. Для локализации места повреждения экрана предлагалось использовать дополнительный проводник, который располагался в непосредственной близости от трех фаз КЛ (например, в центре фаз, расположенных треугольником вплотную), а необходимое сечение проводника определялось мощностью подстанции и временем отключения короткого замыкания в конкретной сети [6, 7]. Очевидно, что эксплуатация КПИ с дополнительным проводником была связана с определенными трудностями. В конструкциях КПИ второго поколения наряду с совершенствованием в технологии изготовления изоляционной системы было увеличено сечение экрана, который выполнялся уже из определенного количества медных проволок, поверх которых навивалась медная лента.

В сетях среднего напряжения (с неэффективно заземленной нейтралью) при пробое КПИ по экрану кабеля протекает емкостной ток замыкания на землю, составляющий в зависимости от конфигурации сети и степени компенсации единицы ампер. В рассматриваемом случае вопрос термической стойкости экранов не стоит. Проблема сохранения целостности экранов может иметь место при возникновении двух однофазных коротких замыканий, когда в контур протекания токов КЗ включаются экраны. В этом случае расчетным путем увеличивают сечение экрана до необходимой величины.

В настоящее время номенклатурный ряд сечений жил КПИ, выпускаемых отечественными предприятиями-производителями, находится в интервале 50–800 мм² с соответствующим интервалом сечений экранов 16–50 мм². По специальному заказу производители могут изготовить КПИ с увеличенным до 70–95 мм² сечением экрана. На практике имеют место случаи, когда выбирают необоснованно высокие значения сечений экранов, что может привести к необоснованному удорожанию строительства КЛ. Таким образом,

уже на стадии проектирования себестоимость строительства КЛ для заказчика может увеличиться. Это свидетельствует о необходимости тщательного определения расчетным путем для конкретной проектируемой схемы величин токов КЗ, протекающих по экранам кабелей, и далее по номограммам, приведенным в каталогах предприятий-изготовителей КПИ, следует определить требуемое сечение экрана.

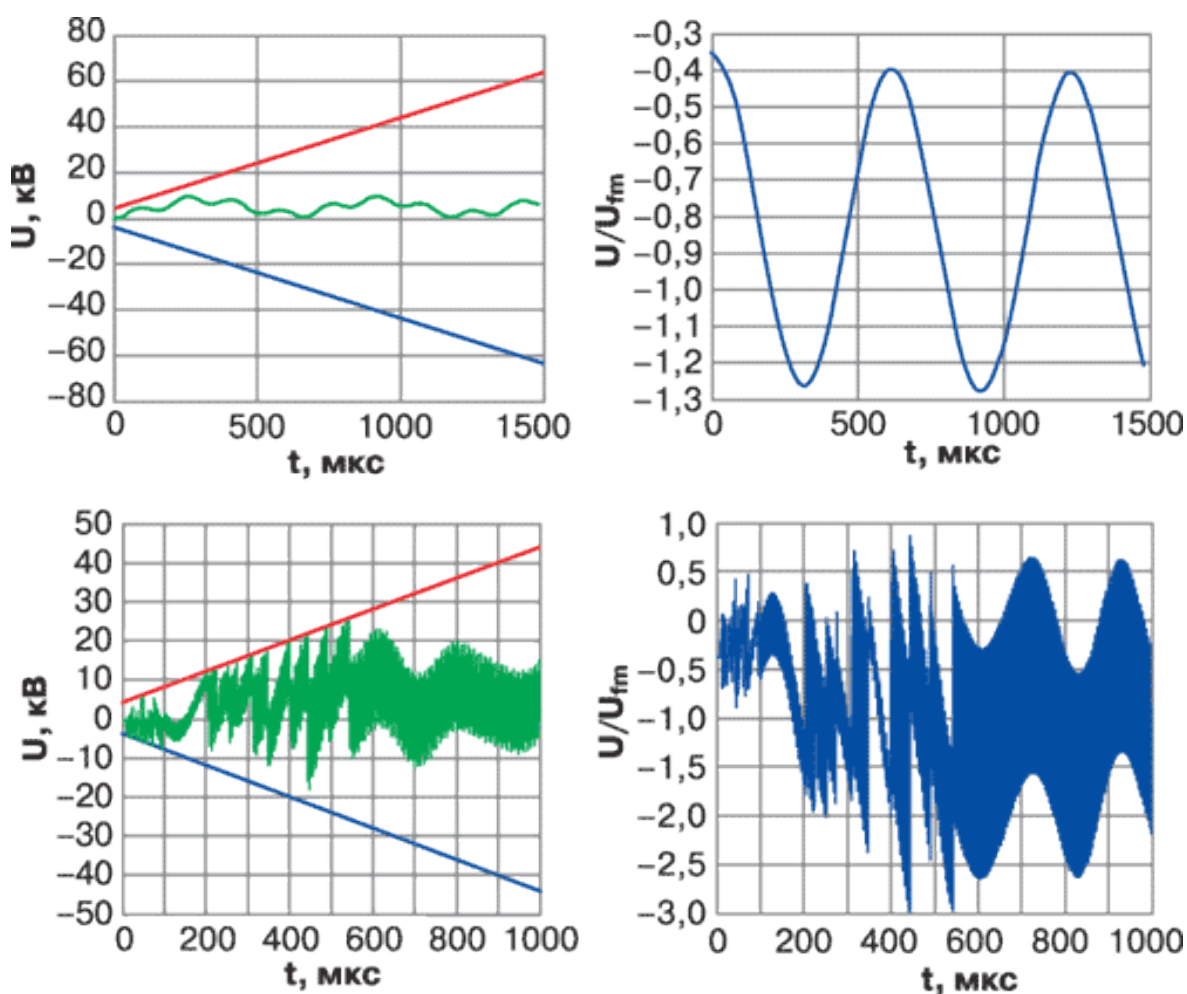


Рисунок 12 – Кривые скорости восстановления электрической прочности на межконтактном промежутке (а, в) и уровни перенапряжений на КПИ (б, г) при отключении КЛ вакуумным выключателем со стороны ПНС–11: СВЭП – 40 кВ/мс, длина КПИ 2,95 км (а, б) и 0,295 км (в, г)

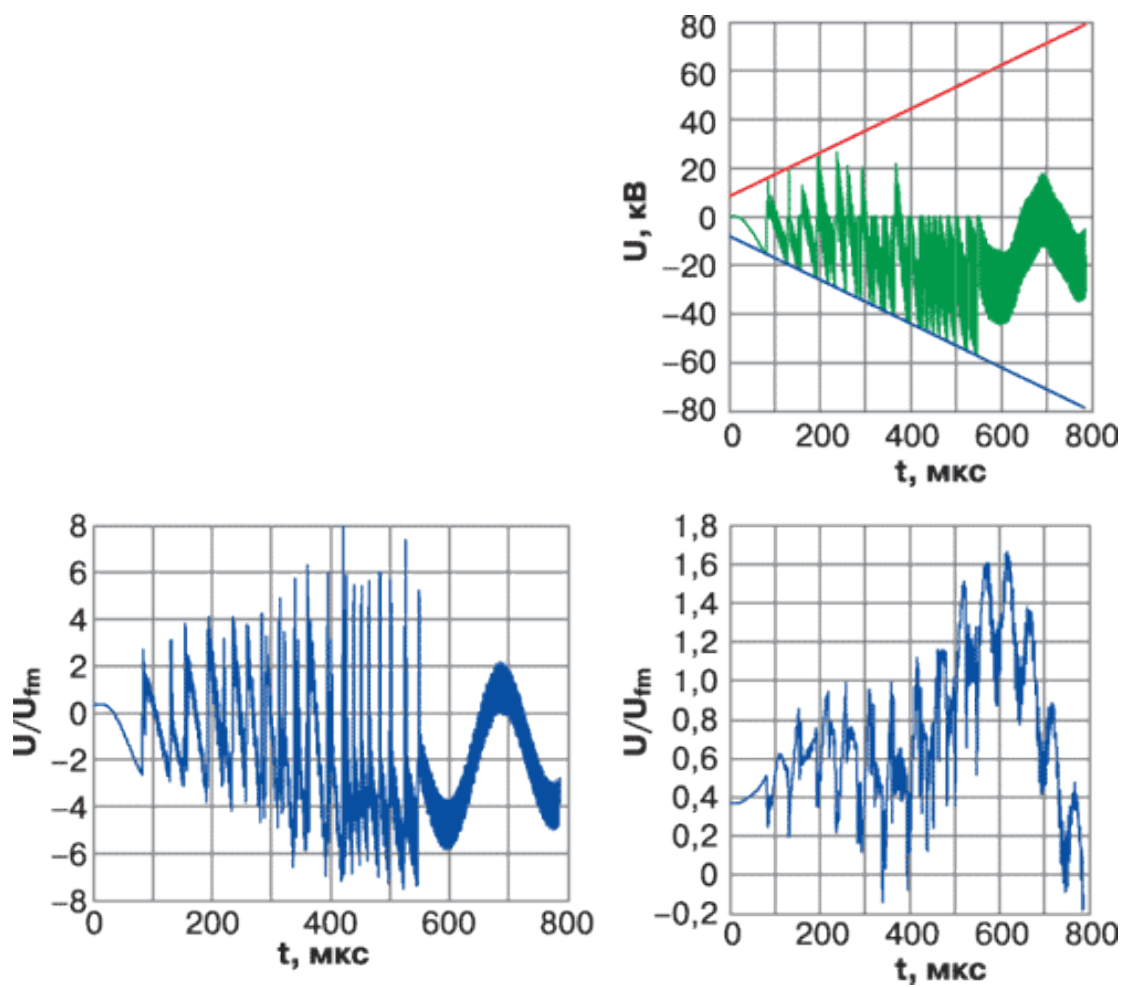


Рисунок 13 – Процессы на ВДК (а), двигателе (б) и КПИ (в) при отключении ВВ электродвигателя (ОПН установлен в ячейке, $L_{\text{каб}} = 65$ м, СВЭП – 90 кВ/мс)

3.1.8 Комплексная диагностика

Учитывая отсутствие эффекта самозалечивания изоляционной системы КПИ, представляется актуальным своевременное выявление электрически ослабленных мест.

После диагностического обследования и всестороннего анализа основных количественных характеристик диагностируемых параметров (напряжения зажигания частичных разрядов, выделяемая ЧР энергия, $\text{tg}\delta$ и т.д.) эксплуатационному персоналу необходимо выдать следующую информацию:

1. максимально достоверный прогноз остаточного ресурса кабеля;

2. рекомендации по дальнейшим условиям эксплуатации кабеля;
3. сроки проведения последующего диагностического обследования;
4. какие в будущем должны быть параметры профилактических испытаний диагностируемого кабеля.

При каждом электрическом пробое изоляции кабеля возникает аварийный режим эксплуатации и необходимость монтажа соединительной муфты, поэтому для КПИ особенно важно отслеживать динамику деградации изоляции и своевременно предупреждать их выход из строя. В настоящее время применительно к КПИ нет единой точки зрения на алгоритм и методику проведения неразрушающих методов профилактических испытаний и диагностического обследования. Актуально применение для КПИ щадящих методов профилактики и диагностики, поскольку использование «жестких» методов может усугубить фактическое состояние СПЭ-изоляции и снизить его наработку.

Сегодня у эксплуатационного персонала РКС появляется уникальная возможность осуществлять мониторинг «текущего здоровья» КПИ с самого начала его ввода в эксплуатацию. Зарубежный и относительно небольшой отечественный опыт эксплуатации КПИ среднего напряжения показал, что снижение электрической прочности СПЭ-изоляции зависит не только от исходного качества кабелей (которое может несколько отличаться у разных предприятий-изготовителей), но и от конкретных условий эксплуатации (квалификации монтажного персонала; способа прокладки кабеля в специальных местах; амплитудно-временных параметров воздействующих перенапряжений; режима заземления нейтрали, параметров диагностических и профилактических испытаний).

Таким образом, имея, с одной стороны, на основе постоянного мониторинга информацию о том, каким эксплуатационным воздействиям подвергается кабель с самого начала его эксплуатации, а с другой стороны, на основе диагностического обследования информацию о фактическом состоянии

его «здоровья», можно с достаточным основанием прогнозировать реальный остаточный ресурс кабеля.

Следует отметить, что определение остаточного ресурса КПИ, работающего в полевых условиях, задача достаточно сложная и не имеющая однозначного решения. Это связано с многообразием эксплуатационных факторов, воздействующих на КПИ, и определенными трудностями по выявлению наиболее информативных параметров, адекватно отражающих процессы деградации СПЭ-изоляции. Очевидно, что только при комплексном подходе, аккумулирующем все информационно-значимые факторы, возможно достоверно оценить оставшийся ресурс электрической прочности КПИ.

Современное развитие микропроцессорной техники создает хорошие предпосылки для соединения в единый автоматизированный комплекс системы мониторинга аварийных событий и online-диагностики, который позволит по сравнению с периодическими обследованиями оперативно получать информацию о состоянии изоляционной системы КПИ, своевременно реагировать и давать возможность эксплуатационному персоналу превентивно принимать меры по предотвращению выхода кабеля из строя. К сожалению, эффективное использование online-диагностики ограничено недостаточно полными разработками по определению критериев признаков дефектов, их пороговых (количественных) значений, а также алгоритмов по оценке динамики развития выявленных дефектов. Вместе с тем научный прогресс в области выявления основных факторов деградации СПЭ-изоляции позволяет надеяться, что в ближайшем будущем будут разработаны формализованные критерии оценки фактического состояния изоляционной системы КПИ, представляющие собой физико-математические модели исправного, дефектного (но работоспособного) и аварийного (требующего замены) кабеля.

3.1.9 Испытания

В настоящее время для КПИ нет четко прописанных рекомендаций по испытанию кабелей после монтажа и проведению профилактических испытаний в процессе эксплуатации кабелей. Тем не менее, в каталогах и

инструкциях по эксплуатации отечественных и зарубежных предприятий-изготовителей даются рекомендации по испытанию КЛ после их монтажа.

Например, в инструкции Кольчугинского завода «Электрокабель» сказано, что токоведущие жилы необходимо испытывать относительно экрана следующим испытательным переменным напряжением:

- $3U_0$ частотой 0,1 (Гц) в течение 1 часа;
- U_0 промышленной частотой 50 (Гц) в течение 24 часов (1 сутки);
- $2U_0$ промышленной частотой 50 (Гц) в течение 1 часа;

При проведении испытаний остальные жилы и экраны кабеля должны быть обязательно заземлены.

Хочется обратить внимание, что U_0 — это фазное напряжение, т.е. напряжение между фазой и «землей» (заземленной нейтралью). Из-за недопонимания многие путаются уже на этом этапе и допускают ошибки, которые приводят к преждевременному выходу кабеля СПЭ именно при испытаниях.

Помимо основной изоляции, необходимо испытывать и оболочку кабеля, но при условии, что кабель проложен в земле. Это испытание проводится постоянным (выпрямленным) напряжением 10 (кВ) в течение 1 минуты. Испытательное напряжение прикладывается между экраном и «землей» (заземляющим устройством). После испытаний экран кабеля необходимо заземлить на время не менее 1 часа.

В инструкции совместной разработки ОАО «ВНИИКП» и ОАО «Фирма ОРГРЭС» требования к испытаниям несколько отличаются:

- $5U_0$ частотой 0,1 (Гц) в течение 15 минут
- U_0 промышленной частотой 50 (Гц) в течение 24 часов (1 сутки)

Но, как альтернатива испытанию переменным напряжением, предлагается испытание кабеля проводить постоянным (выпрямленным) напряжением $4U_0$ в течение 15 минут. Таким образом, кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 10 (кВ) допускается испытывать постоянным (выпрямленным) напряжением 24 (кВ) в течение 15 минут.

Требования по испытанию оболочек кабеля в этой инструкции аналогичны, только постоянное (выпрямленное) напряжение 10 (кВ) должно быть приложено между экраном и заземлителем на время 10 минут, вместо 1 минуты.

Согласно ГОСТ Р 55025-2012, п.10.6, кабели после прокладки и монтажа испытываются следующим образом:

- $3U_0$ частотой 0,1 (Гц) в течение 1 часа
- U_0 промышленной частотой 50 (Гц) в течение 24 часов (1 сутки)
- $2U_0$ промышленной частотой 50 (Гц) в течение 1 часа

Как видите, нормы испытаний кабелей из сшитого полиэтилена, по сравнению с инструкцией Кольчугинского завода «Электрокабель», ни чем не отличаются.

Но в данном ГОСТе есть небольшое дополнение о том, что допускается испытывать кабели постоянным (выпрямленным) напряжением $4U_0$ в течение 15 минут, аналогично, как и по инструкции совместной разработки ОАО «ВНИИКП» и ОАО «Фирма ОРГРЭС».

Таким образом, кабель СПЭ напряжением 10 (кВ) допускается испытывать постоянным (выпрямленным) напряжением 24 (кВ) в течение 15 минут.

В международном стандарте МЭК (IEC) 60502-2, п.20.2 сказано, что после монтажа кабеля и арматуры рекомендуется испытывать его следующим образом:

- $2U_0$ промышленной частотой 50 (Гц) в течение 5 минут
- $2U_0$ промышленной частотой 50 (Гц) в течение 24 часов (1 сутки)

Как видите, нормы испытаний, по сравнению с перечисленными выше инструкциями и ГОСТ, немного отличаются. Также в данном стандарте нет указаний про испытания изоляции кабеля сверхнизкой частотой 0,1 (Гц), а также испытание оболочек кабеля.

Но в этом международном стандарте предлагается альтернатива испытанию переменным напряжением, т.е. допускается испытывать кабели постоянным (выпрямленным) напряжением $4U_0$ в течение 15 минут. Но при этом ниже имеется примечание, что данный вид испытаний может привести к пробую изоляции кабеля.

Также хочется сказать, что основным назначением испытания кабеля повышенным выпрямленным напряжением является доведение ослабленного места в них до пробоя с целью предотвращения аварийного выхода КЛ в процессе эксплуатации. Согласно [8] в процессе эксплуатации длительность приложения полного испытательного напряжения составляет 5 минут, а периодичность проведения профилактических испытаний и уровень испытательных выпрямленных напряжений зависят от времени эксплуатации и технического состояния кабеля.

3.1.10 Нормативно-техническая база

Нормативно-техническая документация (НТД) по кабельным линиям на основе кабелей с бумажной пропитанной изоляцией (КБПИ) имеет довольно хорошую проработку. Что нельзя сказать про кабели с СПЭ изоляцией в силу их относительной новизны. Но в этом направлении ведется работа. На данный момент уже разработаны:

1. ГОСТ Р 55025-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия

2. СТО 56947007-29.060.20.103-2011 Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

3. СТО 56947007-29.060.20.103-2011 Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого

полиэтиленаремонтными, строительно-монтажными и наладочными организациями.

3.1.11 Выводы

На основании всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. В условиях рыночных отношений, а также физического и морального износа отечественного кабельного парка одной из главных задач системы электроснабжения потребителей является сохранение ее устойчивого функционирования. Эта задача может быть решена при техническом перевооружении РКС на основе внедрения современных видов электрооборудования и кабелей нового поколения с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими показателями.

2. При поэтапном внедрении в РКС кабелей новых конструкций нельзя чисто механически подходить к замене кабелей с бумажной пропитанной изоляцией на кабели с пластмассовой изоляцией. Повышение эксплуатационной надежности КПИ должно рассматриваться с позиций системного подхода, когда на стадии проектирования и эксплуатации новых и реконструкции существующих электросетевых объектов следует учитывать основные факторы, определяющие эксплуатационную надежность КПИ. В частности, необходимо обратить внимание на:

- оптимальный выбор режима заземления нейтрали;
- предотвращение возникновений в сети высокочастотных перенапряжений при коммутациях вакуумными выключателями;
- рациональный выбор способов прокладки КПИ и сечения экранов;
- необходимость комплексной диагностики технического состояния КПИ и выбор оптимальных (неразрушающих) параметров профилактических испытаний.

4 ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАБЕЛЕЙ С СПЭ ИЗОЛЯЦИЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Как было выяснено ранее, надежность кабелей в процессе длительной эксплуатации во многом связана с интенсивностью старения полимерной изоляции. На скорость старения изоляции, как было установлено, в большей мере влияют неоднородности в структуре твердого диэлектрика. Данные неоднородности возникают при несоблюдении технологического процесса производства и попадания внутрь структуры сшитого полиэтилена посторонних примесей. В месте неоднородности под воздействием электрического поля начинают развиваться проводящие каналы. Со временем они разрастаются и принимают вид древовидных образований. При достижении ими критического размера, диэлектрические свойства сшитого полиэтилена нарушаются и происходит пробой изоляции. Данные проводящие каналы в структуре сшитого полиэтилена получили название триинги.

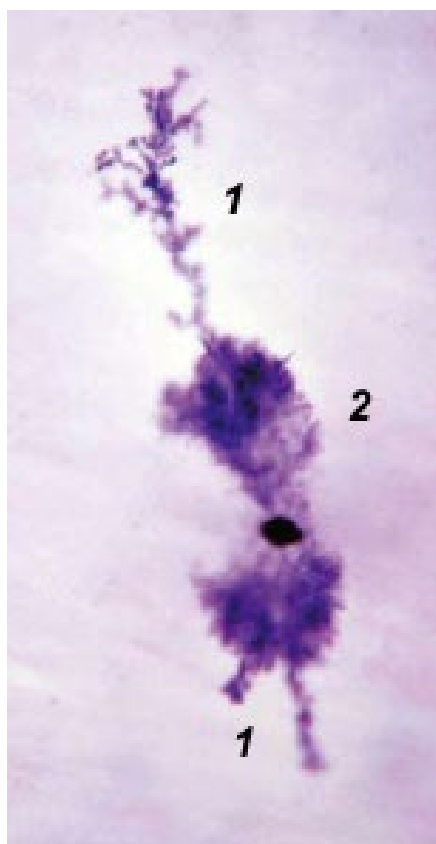


Рисунок 14 - Триингообразования в полимерной изоляции (1 – электрический триинг зародившийся на 2 –водном триинге)

4.1. Причины возникновения триингов и их типы.

При исследовании старения полимерной изоляции кабеля было обнаружено два вида триингов (Рисунок 14):

1. Электрические;
2. Электрохимические.

Первый вид триингов может возникать и развиваться в структуре сшитого полиэтилена, только под воздействием электрического поля переменного тока, а также импульсного при очень высоких напряжениях. В местах со слабой структурой, например при наличии в структуре газового включения, в этом месте происходит концентрация электрического поля. Газовое включение начинает ионизироваться, вследствие чего внутри структуры сшитого полиэтилена начинается медленный рост триинга. При данных процессах не происходит мгновенного пробоя изоляции. Данный вид триингов развивается очень медленно, и они не оказывают на работоспособность кабеля особого влияния.

При развитии электрических триингов, в изоляции кабеля наблюдается увеличение количества частичных разрядов. Однако частичные разряды возникают при только в местах с определенным размером пустот в изоляции.

Например для КЛ на номинальное напряжение 110 кВ для возникновения частичных разрядов необходимы пустоты размером от 50 мкм.

Также на основании проведенных экспериментов можно считать, что на диэлектрическую прочность сшитого полиэтилена влияет не только размер, но расположение самих полостей в структуре изоляции из сшитого полиэтилена.

Электрохимические триинги образуются при попадании в изоляцию воды. Из-за этого электрохимические триинги еще называются водными.

В неоднородностях структуры сшитого полиэтилена происходит концентрация молекул воды, которые попали в нее в процессе сшивки или в процессе эксплуатации. В месте скопления влаги начинает развиваться водный

триинг, скорость роста которого значительно выше, чем у электрического. При развитии водных триингов происходит ухудшение изоляционных свойств диэлектрика, происходит преждевременный пробой изоляции кабеля. Также влага проникает в изоляцию в результате процесса диффузии, как через пласт-массовую оболочку, так и через дефекты в оболочке и изоляции под действием электрического поля. Установлено, что в целом проникновение воды в полимер зависит от температуры, электрического поля и типа и количества ионов, содержащихся в воде. Изменение температуры приводит к конденсации воды в микро-пустотах изоляции кабеля, загрязнениях или неровностях экранов. Дальнейший рост триинга связан с образованием дополнительных микропустот, располагающихся рядом с местом зарождения триинга. Считается, что расширение зоны триингообразования обуславливается проникновением молекул в микротрещины материала в результате таких явлений, как электрофорез, диэлектрофорез и силы Максвелла, связанных с наличием электрического поля. На скорость возникновения и роста триингов электрохимического происхождения влияют удельное сопротивление изоляции, молекулярная и микрофизическая структура материала и наличие наполнителей.

При развитии триингов электрохимического происхождения не наблюдается увеличения частичных разрядов или значительного увеличения $\text{tg}\delta$, однако сопротивление изоляции заметно снижается. Внешний вид триингов электрохимического происхождения отличается от триингообразований электрического происхождения. Их каналы значительно меньше, и сами триинги имеют характерные формы и даже окраску. Если каналы образуются водой, то они имеют белую окраску, если в воде присутствуют продукты коррозии меди или железа, то темную или голубоватую.



Рисунок 15 – Водный триинг типа «бант»

Скорость образования электрохимического триинга снижается со временем, что объясняется разветвлением канала и созданием экранирующего эффекта, ослабляющего напряженность электрического поля у концов канала. Иногда даже после полного развития канала электрическая прочность изоляции превышает 2 МВ/м, так как размеры каналов в первое время очень малы (менее 1 мкм). Однако со временем размеры каналов увеличиваются и их электрическая прочность снижается, что в конце концов приводит к пробое кабелей. Если при развитии триингов кабель подвергается значительным перенапряжениям, то это может привести к переходу канала электрохимического происхождения в канал электрического происхождения и последующему пробое кабелей.

Разветвленные древовидные образования начинают развиваться на поверхности изоляции, в основном на участке, в котором существует неоднородность структуры изоляции на границе с электропроводящими экранами по жиле или изоляции (Рисунок 16). Триинги такого типа могут иметь длину до нескольких миллиметров.



Рисунок 16 – Водный триинг типа «веер»

Образование триингов приводит к местным концентрациям электрического поля в изоляции кабелей, так как заполненные водой микропустоты образуют диэлектрик с более высокой диэлектрической проницаемостью, чем у основного изоляционного материала. Кроме того, в области триингообразования, где имеются микропустоты, заполненные водой, возникают механические напряжения, способствующие снижению напряженности электрического поля, при которой развивается водный триинг.

Существует также точка зрения, что область изоляции с триингом подвергается со временем более быстрому окислению, быстрее стареет и в результате наступает пробой изоляции.

Необходимость свести к минимуму или подавить процесс триингообразования учитывается при конструировании кабелей с полимерной изоляцией и разработке технологии их изготовления. Главным фактором, влияющим на возникновение и рост каналов, являются местные увеличения

напряженности электрического поля в кабеле, которые вызываются неоднородностью поверхности электропроводящих экранов и наличием пустот и загрязнений в изоляции. Поэтому в конструкции кабелей для увеличения однородности поверхности полупроводящих экранов предусматривают обычно уплотненную жилу и замену ленточных экранов на экструдированные.

Применяемая наружная оболочка должна препятствовать проникновению влаги в изоляцию. Это достигается либо увеличением толщины полиэтиленового шланга, либо использованием дополнительного слоя металлической или металлопластмассовой ленты, либо применением в качестве материала оболочки металла.

При производстве кабелей с пластмассовой изоляцией должна обеспечиваться максимальная чистота применяемых изоляционных и электропроводящих материалов. Разрабатываются специальные изоляционные компаунды с повышенной стойкостью к образованию водных триингов. Возможно применение специальных стабилизаторов.

Технологические линии для изготовления кабелей с пластмассовой изоляцией должны обеспечивать наложение экранов и изоляции, по возможности не содержащих пустот, включений и т.п. Причиной образования пустот и загрязнений может быть недостаточная чистота загружаемых в пресс полиэтиленовых гранул, неверно выбранный температурный режим в прессе и охлаждающих устройствах, а также неплотное прилегание экрана к изоляции. Дополнительные требования выдвигаются к оборудованию для наложения сшитого полиэтилена. До недавнего времени был широко распространен способ вулканизации полиэтилена в среде пара. Как показали исследования, при таком способе происходят диффузия пара в изоляцию с образованием микрополостей, в которых при охлаждении конденсируются мельчайшие капельки воды. При достаточно высокой рабочей напряженности поля в изоляции эта влага будет сокращать срок службы кабеля. Поэтому для изготовления кабелей высокого напряжения с изоляцией из сшитого

полиэтилена вулканизация должна производиться в беспаровой среде, например в среде инертного газа.

Основные мероприятия, которые необходимо осуществить при организации выпуска кабелей высокого напряжения с пластмассовой изоляцией, сводятся к следующему:

- исключение попадания пыли в полиэтилен как при его изготовлении, так и при транспортировке, загрузке и экструзии;

- обеспечение наложения экранов и изоляции на токопроводящую жилу в один проход через экструдер, для чего следует использовать экструдеры сдвоенного типа (при этом уменьшается количество пустот между изоляцией и экранами);

- использование для сшивки полиэтилена беспаровой среды;

- обеспечение достаточно плавного охлаждения кабеля, выходящего из пресса; наименьшее количество полостей в изоляции получается при охлаждении кабеля под давлением.

4.2 Анализ влияния производственных факторов на возникновении триингов в процессе эксплуатации.

Как было выяснено ранее полимерная изоляция кабелей, в отличие от пропитанной бумажной изоляции, является более чувствительной к разного рода посторонним включениям, пустотам и другим дефектам, которые повышают локальную напряженность электрического поля, снижают пробивные напряжения и создают предпосылки для образования водных триингов при эксплуатации кабелей в условиях влажной среды.

На основании замеров (таблица 7) проведенных в лаборатории ОАО "ВНИИКП" под руководством д-ра техн. наук М.Ю. Шувалова для трех разных кабелей проведем анализ полученных значений пробивных напряжений.

Таблица 7 – Экспериментальные данные по импульсной прочности кабелей

n _i	Импульсные пробивные напряжения, кВ			
	P(U _{пр})	Выборка по кабелю №1	Выборка по кабелю №2	Выборка по кабелю №3
1	0,091	345 кВ	385 кВ	385 кВ
2	0,182	345 кВ	405 кВ	385 кВ
3	0,273	385 кВ	425 кВ	385 кВ
4	0,364	405 кВ	445 кВ	385 кВ
5	0,455	405 кВ	465 кВ	405 кВ
6	0,545	405 кВ	465 кВ	445 кВ
7	0,636	405 кВ	485 кВ	445 кВ
8	0,727	425 кВ	485 кВ	465 кВ
9	0,818	425 кВ	485 кВ	465 кВ
10	0,909	425 кВ	485 кВ	505 кВ

В эксперименте принимали образцы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на номинальное напряжение 10 кВ:

- кабель № 1 - опытный кабель, изготовленный по технологии силановой сшивки. Необходимые меры по чистоте технологического процесса к периоду пуска не были выполнены, и в изоляции опытного образца обнаружены волокнистые и другие загрязнения, попавшие из атмосферы цехового воздуха;

- кабель № 2 - образцы взяты от промышленной партии кабелей после осуществления мероприятий по обеспечению чистоты технологического процесса (фильтрация цехового воздуха при вакуумном заборе гранулята, соблюдение регламента по чистке экструзионного оборудования и другие меры);

- кабель № 3 - промышленный кабель, изготовленный по технологии пероксидной сшивки (газовая вулканизация).

Каждая выборка кабелей №1-3 состояла из 10 образцов с длиной активной части по 10 м и оконцеваний длиной по 2 м. В результатах испытаний учитывались только пробои кабелей, происходившие в активной части образцов.

Кабели испытывались импульсным напряжением полной волны при стандартной форме импульса и нормальной температуре окружающей среды. Начальное испытательное напряжение 105 кВ по 10 импульсов положительной и отрицательной полярности (нормированный уровень импульсной прочности) с дальнейшим ступенчатым подъемом напряжения отрицательной полярности по 3 удара на ступень до пробоя. Величина ступени подъема напряжения составляла 20 кВ.

На основе полученных данных построим вероятностные характеристики максимальных пробивных напряжений (рисунок 17).

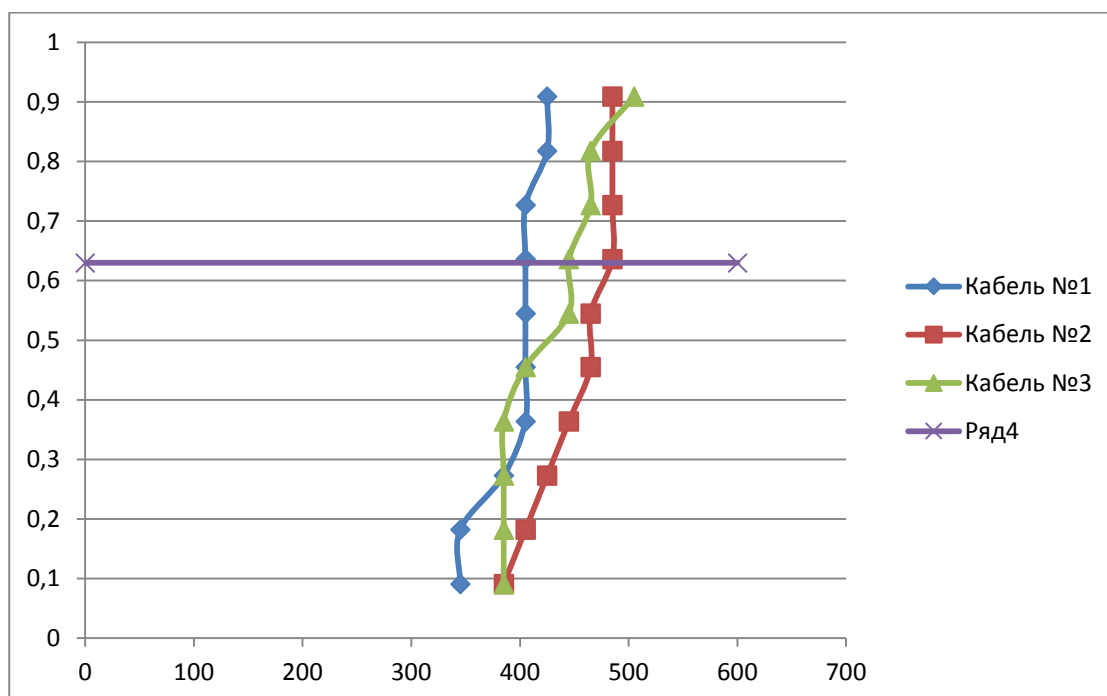


Рисунок 17 – Вероятностные характеристики максимальных пробивных напряженностей

В соответствии ГОСТ Р 55025-2012 кабель считают выдержавшим испытание, если все образцы имеют значение пробивного напряжения не менее $25U_0$ или значение пробивного напряжения, определяемое статистической обработкой результатов испытаний пяти образцов на основе распределения Вейбулла при вероятности 0,632, не менее $30U_0$.

Получается, что:

$$30U_0 \leq U_{0п} \quad (2)$$

где $U_{0п}$ – значение пробивного напряжения при вероятности 0,632;

U_0 – в данном случае $10,5 \text{ кВ} / 1,73 = 6,07 \text{ кВ}$

Отсюда получаем:

$$30 \cdot 6,07 \leq U_{0п}$$

$$182,1 \text{ кВ} \leq U_{0п}$$

Значение пробивного напряжения при вероятности 0,632:

- Кабель №1 $U_{0п} = 403 \text{ кВ}$;

$$182,1 \text{ кВ} \leq 403 \text{ кВ}$$

- Кабель №2 $U_{0п} = 482 \text{ кВ}$;

$$182,1 \text{ кВ} \leq 482 \text{ кВ}$$

- Кабель №3 $U_{0п} = 444 \text{ кВ}$;

$$182,1 \text{ кВ} \leq 444 \text{ кВ}$$

Из полученных расчётов получаем, что значение пробивного напряжения всех кабелей соответствует ГОСТ.

Теперь для каждой выборки при помощи ПО MS Excel рассчитаем коэффициенты корреляции:

- Кабель №1 $r = 0,883$;

- Кабель №2 $r = 0,939$;

- Кабель №3 $r = 0,95$;

Для выборки кабеля № 1 коэффициент корреляции получен недостаточно высокий (0,88). Поэтому по всем трем выборкам кабелей для сравнения определены и параметры нормального распределения - среднее значение пробивного напряжения и среднеквадратичное отклонение.

Среднее значение выборки оценивается по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)}{n} \quad (3)$$

Где \bar{x} – среднее значение выборки

n – объем выборки

x_i – i -ый элемент выборки

Для получения этого показателя по выборке используют формулу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n}} \quad (4)$$

Данные расчёты приведены в Приложении А.

На основании проведенных расчётов и анализе полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В месте попадания в СПЭ изоляцию инородных частиц происходит образование триингов, которые в процессе эксплуатации начинают расти и приводят к своевременной пробое изоляции, что соответственно сокращает эксплуатационный ресурс кабеля.

2. Образование триингов в структуре СПЭ изоляции приводят к снижению уровня пробивного напряжения.

3. На примере испытаний кабеля №1 можно с уверенностью утверждать, что на диэлектрические свойства СПЭ изоляции влияет соблюдение технологического процесса производства кабеля, соблюдение норм и правил при производстве. Должна соблюдаться чистота, как в самом производственно цехе, так и чистота самих материалов используемых для производства СПЭ изоляции.

4. При соблюдении все необходимых мер и требований при производстве кабелей с СПЭ изоляцией полученной путем силановой сшивки, их характеристики не сильно уступают кабелей с СПЭ изоляцией полученной путем пероксидной сшивки.

5. Статистическая оценка качества кабелей, основанная на определении импульсной прочности в сочетании с оптическими методами, позволяет контролировать дефектность изоляционной системы и, соответственно, уровень технологии в различные периоды производства (сравнение данных по кабелям №1 и №2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя анализ опыта эксплуатации кабелей из сшитого полиэтилена можно сказать, что они имеют как свои существенные плюсы, так и свои существенные минусы перед кабелями с масляной изоляцией.

К плюсам можно отнести использование их при строительстве ЛЭП в труднодоступных местах, а так же в местах с экстремальными условиями эксплуатации, благодаря своему низкому весу, меньшему диаметру по сравнению с кабелями с БПИ, а также большому радиусу изгиба. Например, при строительстве энергомота в Крым, при прокладке по дну Керченского пролива использовался кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена в трехфазном исполнении. Также к плюсам можно отнести высокую пропускную способность за счет увеличения максимальной рабочей температуры токопроводящей жилы

К существенным минусам можно отнести отсутствие эффекта самозалечивания СПЭ изоляции, так как она является твердым диэлектриком, в отличие от кабелей с БПИ. И при пробое изоляции в сети будет наблюдаться устойчивый аварийный режим.

В ходе выполнения работы было установлено, что в процессе эксплуатации в структуре сшитого полиэтилена образуются триинги, которые при своем разрастании приводят к пробое изоляции кабеля, как следствие влияют на эксплуатационный срок кабеля и его безаварийное время работы.

На основании проведенных расчётов и анализе полученных данных об импульсном пробивном напряжении трех образцов кабеля, были сделаны выводы о влиянии условий и технологии производства на диэлектрические качества СПЭ изоляции, а также на возникновении в ней триингов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 СТО 56947007-29.240.10.028-2009. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ / ОАО «ФСК ЕЭС» 2009. – 96 с.
- 2 Плис А.И., Сливина Н.А. Mathcad: математический практикум для экономистов и инженеров: учебное пособие. – М., 1999. – 656 с.
- 3 Электротехнический справочник. Том 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / — Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский дом МЭИ, 2009.— 964 с.
- 4 Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 276 с.
- 5 Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – М.: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002. – 488 с.
- 6 Свистунов А.С «Схема электроснабжения города Москвы на период до 2020 года (распределительные кабельные сети 6-20 кВ) // Доклад на научно-практическом семинаре в рамках выставки САВЕХ 2011.
- 7 Лавров Ю.А., к.т.н, заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений НГТУ. Преимущества и недостатки изоляции из сшитого полиэтилена // <http://www.newchemistry.ru>
- 8 Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.В. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11.
- 9 Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ. Технические условия. ТУ 16.К71-335-2004. (ОАО ВНИИКП).
- 10 Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лавров Ю.А. Подводные кабельные линии. Экологические аспекты проектирования // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 4.

11 Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Кандаков С.А. К вопросу об условиях прокладки кабелей с пластмассовой изоляцией в электрических сетях среднего напряжения // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6.

12 Инструкция по прокладке кабелей силовых с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20 и 35 кВ. RUKAB/ID 23-2-019 (ABB-Москабель).

13 Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Хорошева О.М. Анализ эффективности мер по ограничению токов в экранах при коротких замыканиях высоковольтных кабелей с пластмассовой изоляцией // Электротехника. – 1988. – № 12.

14 Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Хорошева О.М. Анализ величин токов, протекающих по экранам кабелей высокого напряжения с пластмассовой изоляцией в нормальных и аварийных режимах // Электротехника. – 1989. – № 1.

15 СО 34.45.-51.300-97 (РД 34.45-51.300-97) Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002 г.

16 ГОСТ Р 55025-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия

17 СТО 56947007-29.060.20.103-2011 Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

18 СТО 56947007-29.060.20.103-2011 Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110 – 500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтиленаремонтными, строительно-монтажными и наладочными организациями.

19 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации // Минэнерго России – 2003.

20 Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей // Минэнерго России – 2003.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет вероятностных характеристик в MS Office Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	n	Кабель 1		Кабель 2		Кабель 3		
2	1	0,091	345	0,091	385	0,091	385	
3	2	0,182	345	0,182	405	0,182	385	
4	3	0,273	385	0,273	425	0,273	385	
5	4	0,364	405	0,364	445	0,364	385	
6	5	0,455	405	0,455	465	0,455	405	
7	6	0,545	405	0,545	465	0,545	445	
8	7	0,636	405	0,636	485	0,636	445	
9	8	0,727	405	0,727	485	0,727	465	
10	9	0,818	425	0,818	485	0,818	465	
11	10	0,909	425	0,909	485	0,909	505	
12	Коэффициент корреляции	0,883		0,939		0,950		
13	Среднее значение	395		453		427		
14	Среднеквадратичное отклонение	28,67441756		36,75746334		43,66539438		
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								