

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Энергетический институт

Направление подготовки 13.03.02«Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электромеханических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ЭКМ

(Подпись) _____ (Дата) Гарганеев А.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Г2В	Резепову Максиму Эдуардовичу

Тема работы:

Разработка силового кабеля с термическим барьером для повышения максимальной допустимой токовой нагрузки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	25.01.2016 №343/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Учебные пособия $U_H=10\text{кВ}$ $P=200\text{кВт}$
--------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Собрать и изучить материал по теме дипломной работы; 2. Рассмотреть конструкцию и материалы силового кабеля из сшитого полиэтилена; 3. Проанализировать уравнение теплового баланса; 4. Выявить потери в силовых кабелях, приводящие к их нагреву; 5. Обосновать возможности и целесообразности применения «термических барьеров»; 6. Рассмотреть возможности использования композиционных материалов в качестве «термических барьеров» в силовых кабелях; 7. Рассчитать диэлектрические характеристики композитов для термических барьеров. 8. Произвести электрический расчёт; 9. Сделать тепловой расчёт (прокладка в земле треугольником, $U_N = 10 \text{ KB}$, $P = 200 \text{ KBT}$).
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	Презентация выполненная в редакторе «Microsoft Power Point 2010»
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры менеджмента Трофимова Маргарита Николаевна
Социальная ответственность	Доцент кафедры ЭБЖ Дашковский Анатолий Григорьевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шуликин Сергей Николаевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г2В	Резепов Максим Эдуардович		

ВВЕДЕНИЕ

Кабельные изделия предназначены для передачи электрической энергии или информации на расстояние, т.е. для создания самых разнообразных электрических, электронных, радиотехнических и волоконно-оптических схем и цепей. Ни одно современное техническое устройство, работа которого связана с использованием электрических и электронных схем, не может работать без кабелей и проводов, которые образуют системы электроснабжения, информатики и управления работой этого устройства.

Технический прогресс в различных отраслях народного хозяйства вызвал рост потребности в кабельной продукции и необходимость создания новых типов кабелей и проводов с более высокими характеристиками.

Современная кабельная техника характеризуется применением высоких напряжений и высоких частот, увеличением передаваемых мощностей, созданием кабелей и проводов для работы в условиях высоких и низких температур, высокой влажности окружающей среды, воздействия радиации и химически активных веществ, наличия вибрации и т.п. Повышенные требования к свойствам кабелей и проводов ограничивают возможность их удовлетворения с использованием существующих электроизоляционных материалов и вызывают необходимость создания новых, более совершенных материалов. Без применения специальных материалов невозможно создание новых типов кабелей и проводов для различных отраслей народного хозяйства.

В современности термическому барьеру нашли новое применение в кабельной технике, а именно увеличение передаваемой мощности, за счет удержания тепла внутри изоляции. В дипломной работе систематизирована информация по данной теме. При передаче токов выше допустимых кабель начинает сильно перегреваться и изоляция разрушаться, но термический барьер наложенный поверх токопроводящей жилы препятствует этому разрушению. Тепло выделяемое при перегрузке остается внутри изоляции и не оказывает на нее влияние. Таким образом увеличивая максимальную

допустимую мощность. Данная тема **актуальна** в современном мире потому что, благодаря этой технологии происходит большая экономия денежных средств и ресурсов за счет уменьшения сечения ТПЖ.

Цель дипломной работы – рассмотреть конструкцию и технические характеристики силового кабеля с термическим барьером для повышения максимальной допустимой токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

1. Собрать и изучить материал по теме дипломной работы;
2. Рассмотреть конструкцию и материалы силового кабеля из сшитого полиэтилена;
3. Проанализировать уравнение теплового баланса;
4. Выявить потери в силовых кабелях, приводящие к их нагреву;
5. Обосновать возможности и целесообразности применения «термических барьеров»;
6. Рассмотреть возможности использования композиционных материалов в качестве «термических барьеров» в силовых кабелях;
7. Рассчитать диэлектрические характеристики композитов для термических барьеров.
8. Произвести электрический расчёт;
9. Сделать тепловой расчёт (прокладка в земле треугольником, $U_H = 10 \text{ кВ}$, $P = 200 \text{ кВт}$).

В процессе написания дипломной работы были использованы труды специалистов: Привезенцев В. А., Ларина Э. Т. и других.

ГЛАВА I СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

1.1 Конструкции

Мировые тенденции развития кабельных энергораспределительных сетей среднего напряжения в течение последних десятилетий направлены на внедрение кабелей с теплостойкой экструдированной изоляцией (сшитый полиэтилен) и замену ими кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. В настоящее время в промышленно развитых странах Европы и Америки практически 100% рынка силовых кабелей занимают кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена обладают рядом преимуществ перед кабелями с бумажной пропитанной изоляцией:

- повышенная рабочая температура, что позволяет увеличить пропускную способность;
- повышенная стойкость при работе в условиях перегрузок и коротких замыканий;
- возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней;
- не содержат масла, битума, свинца, что упрощает монтаж, эксплуатацию и устраняет экологически неблагоприятные факторы;
- более надежны в эксплуатации и требуют меньших расходов на реконструкцию и содержание кабельных линий;
- меньший вес и допустимый радиус изгиба;
- возможность изготовления кабелей большой строительной длины;
- одножильные и трехжильные кабели с оболочкой из полиэтилена.

Повышенная термическая и механическая стойкость сшитого полиэтилена обусловлена созданием новых молекулярных связей в процессе вулканизации ("сшивки") изоляции.

В настоящее время на российском рынке кабельно-проводниковой продукции наблюдается стабильное увеличение производства-потребления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Российское обозначение этих кабелей СПЭ, английское — XLPE, немецкое — VPE, шведское — PEX.

Отметим основные преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабелей) перед кабелями с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ-кабелями): в зависимости от условий прокладки пропускная способность СПЭ-кабелей в 1,2—1,3 раза больше благодаря более высокой допустимой длительной температуре, термическая стойкость СПЭ-кабелей при токах короткого замыкания (КЗ) выше благодаря большей предельной температуре, удельная повреждаемость СПЭ-кабелей в 10—15 раз ниже, чем у БПИ-кабелей,

большой срок службы СПЭ-кабеля (поданным заводов-изготовителей более 50 лет), более легкие условия монтажа СПЭ-кабелей, обусловленные меньшими массой, диаметром, радиусом изгиба, отсутствием тяжелой свинцовой (или алюминиевой) оболочки, СПЭ-кабели можно прокладывать при отрицательных температурах (до -20 °С) без предварительного подогрева благодаря использованию полимерных материалов для изоляции и оболочки, отсутствие в конструкции СПЭ-кабелей жидких компонентов уменьшает время и снижает стоимость монтажа, СПЭ-кабели высоко экологичны благодаря отсутствию утечки масла и загрязнения окружающей среды при повреждении, гигроскопичность конструктивных элементов СПЭ-кабеля значительно меньше, чем БПИ-кабеля, высокие диэлектрические свойства изоляции, СПЭ-кабели не имеют ограничений по разности уровней кабельной трассы.

Основной особенностью СПЭ-кабелей является их принципиально новая изоляция —сшитый полиэтилен. Полиэтилен как изоляция известен достаточно давно. Но обычному термопластичному полиэтилену присущи серьезные недостатки, главным из которых является резкое ухудшение характеристик при температурах, близких к температуре плавления.

Изоляция из термопластичного полиэтилена начинает терять форму, электрические и механические характеристики уже при температуре 85 °С. Изоляция из сшитого полиэтилена сохраняет форму, электрические и механические характеристики даже при температуре 130 °С. Термин «сшивка» или «вулканизация» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур.

В мировой кабельной промышленности при производстве силовых кабелей используются две технологии сшивки, принципиальное различие которых заключается в реагенте, с помощью которого происходит процесс сшивки полиэтилена. Наибольшее распространение получила технология пероксидной сшивки, когда сшивка полиэтилена происходит с использованием специальных химических веществ — пероксидов в среде нейтрального газа при определенных температуре и давлении. Такая технология позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции и обеспечить отсутствие воздушных включений. Помимо хороших диэлектрических свойств, это и больший, чем у других кабельных изоляционных материалов, диапазон рабочих температур, и отличные механические характеристики. Пероксидная технология применяется при производстве кабелей среднего и высокого напряжений. Менее распространенной является сила-нольная сшивка, при которой в полиэтилен добавляются специальные смеси (силаны) для обеспечения сшивки при более низкой температуре. Сектор применения этой более дешевой технологии охватывает кабели низкого и среднего напряжений.

Существуют два варианта исполнения СПЭ-кабелей — трехжильный и одножильный. В основном СПЭ-кабели выпускаются в одножильном исполнении (рис. 2). Внешний вид одножильного СПЭ-кабеля: 1 — круглая

многопроволочная уплотненная токопроводящая жила, 2 — экран по жиле из полупроводящего сшитого полиэтилена, 3 — изоляция из сшитого полиэтилена, 4 — экран по изоляции из полупроводящего сшитого полиэтилена, 5 — разделительный слой из полупроводящей ленты или полупроводящей водоблокирующей ленты, 6 — экран из медных проволок, скрепленных медной лентой, 7 — разделительный слой из двух лент крепированной бумаги, прорезиненной ткани, полимерной ленты или водоблокирующей ленты, 8 — разделительный слой из алюмополиэтиленовой или слюдосодержащей ленты, 9 — оболочка из полиэтилена, ПВХ-пластиката.

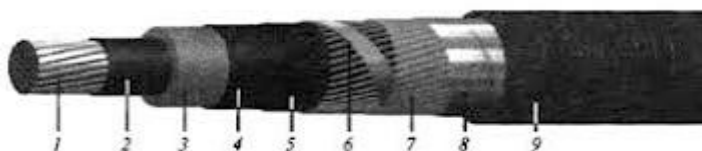


Рисунок 1: Одножильный СПЭ-кабель

Отличительной особенностью трехжильного исполнения СПЭ-кабеля является наличие экструдированного междуфазного наполнителя из полиэтилена или поливинилхлоридного (ПВХ) пластиката.



Рисунок 2: Трехжильный СПЭ-кабель

Применение одножильных СПЭ-кабелей позволяет обеспечить прежде всего повышенную надежность электроснабжения за счет резкого снижения вероятности междуфазных коротких замыканий. Вероятность одновременного разрушения в одном месте изоляции двух конструктивно не связанных между собой одножильных кабелей (соединительных или концевых муфт) соответствует вероятности междуфазных повреждений ошиновки с изолированными шинами, т.е. очень мала. Вероятность однофазных замыканий на землю при применении одножильных кабелей с

изоляция из сшитого полиэтилена намного меньше, чем при использовании трехжильных БПИ-кабелей. Это достигается как самой конструкцией одножильных СПЭ-кабелей, так и лучшими диэлектрическими свойствами изоляции. Одножильное исполнение СПЭ-кабелей позволяет выполнять сечения токоведущих жил до 800 мм. Кабели с таким сечением способны успешно конкурировать с токопроводами, применяемыми в системах электроснабжения энергоемких предприятий.

Экранирование элементов кабеля необходимо для электромагнитной совместимости кабеля с различными внешними цепями и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жилы кабеля и, следовательно, для создания более благоприятных условий работы изоляции. Внутренние экраны выполняются из полупроводящей пластмассы, внешний экран — из медных проволок и лент.

Наружная защитная оболочка предохраняет внутренние элементы кабеля от попадания влаги и механических повреждений при его монтаже и эксплуатации. Наружные оболочки СПЭ-кабелей изготавливаются из полиэтилена или ПВХ-пластиката повышенной прочности.

Условные буквенно-цифровые обозначения (маркировка) кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена:

А — алюминиевая токоведущая жила, нет обозначения — медная токоведущая жила,

Пв — материал изоляции — сшитый (вулканизированный) полиэтилен,

П или В — оболочка из полиэтилена или ПВХ-пластиката,

у — усиленная полиэтиленовая оболочка увеличенной толщины,

нг — оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести,

нгд — оболочка из ПВХ-пластиката пониженного дымогазовыделения,

г — продольная герметизация экрана водоблокирующими лентами,

1 или 3 — количество токоведущих жил,

50—800 — сечение токоведущей жилы, мм²,

гж — герметизация токоведущей жилы, 2 16—35 — сечение экрана, мм,

1—500 — номинальное напряжение, кВ.

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.

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена используются при строительстве кабельных линий электропередачи под землей, в траншеях, в кабельной канализации, под дну рек и озер, а также в грунтах различных категорий. Кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при номинальном напряжении 10 кВ частоты 50 Гц в трехфазных сетях с заземленной нейтралью и прямой связью с воздушной линией или без нее на трассах с неограниченной разностью уровней.

Конструкция:

Многопроволочная, круглая, уплотненная токопроводящая жила, алюминиевая или медная, класс гибкости жилы 1. Жилы сечением 1000 мм² и 1200 мм² – сегментированные, скрученные по системе «Милликен».

Внутренний экструдированный электропроводящий слой

Изоляция из пероксидносшитого полиэтилена

Внешний экструдированный электропроводящий слой. Слой обмотки электропроводящей полимерной лентой или электропроводящей бумагой, или электропроводящей водоблокирующей лентой (кабели с индексом «г» или «2г»)

Экран из медных проволок. Возможно введение в экран распределенного оптического датчика температуры

Медная лента

Алюмополимерная лента для кабелей с индексом «2г»

Наружная оболочка из полиэтилена, ПВХ-пластиката или пластиката пониженной горючести, не содержащей галогенов (кабели с индексом «нг(А)», «HF»).

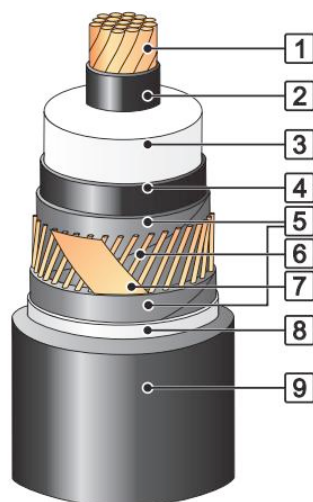


Рисунок 3: конструкция кабеля СПЭ

Наложение внутреннего полупроводящего слоя, изоляции и внешнего полупроводящего слоя поверх проводника из меди или алюминия производится в один технологический процесс, что обеспечивает ровные поверхности раздела и отсутствие загрязнений. Эти три слоя в сочетании с жилой образуют сердечник кабеля. Сердечник кабеля окружен медным проволочным экраном, который защищает кабель во время прокладки, поддерживает нулевой потенциал на поверхности кабеля, несет зарядные токи, отводит токи при коротких замыканиях. Зона экрана из медных проволок обеспечивается продольной водонепроницаемостью с помощью водонабухающего материала так, чтобы вода не могла проникнуть в кабель при повреждении внешней оболочки. Двойная герметизация экрана обеспечивается алюминиевой лентой с полимерным покрытием, которая сварена с наружной полиэтиленовой оболочкой. Внешняя оболочка выполняется из износостойкого светостабилизированного полиэтилена высокой плотности, или ПВХ пластиката.

1.2 Материалы

Своими уникальными свойствами кабели с изоляцией из СПЭ обязаны применяемому изоляционному материалу. Полиэтилен в настоящее время является одним из наиболее применяемых изоляционных материалов при

производстве кабелей. Но изначально термопластичному полиэтилену присущи серьезные недостатки, главным из которых является резкое ухудшение механических свойств при температурах, близких к температуре плавления. Решением этой проблемы стало применение сшитого полиэтилена.

Термин «сшивка» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур.

Исходным сырьем для сшитого полиэтилена служит полиэтилен высокой плотности и повышенной прочности с обычной линейной структурой. Сшивка заключается в том, что при высоких температуре и давлении, а также под воздействием облучения электронами, и при добавлении определенных химических соединений происходит объединение молекулярных цепочек полиэтилена в единую трехмерную структуру.

Помимо повышенных ударной прочности и ударной вязкости, сшитый полиэтилен обладает чрезвычайно полезными свойствами, недостижимыми для других материалов, которые и определяют основные области его применения.

При прокладке в земле применяется оболочка из полиэтилена высокой плотности, обеспечивающая необходимую защиту кабеля от механических повреждений, как при прокладке, так и в процессе эксплуатации. Если необходима герметизация экрана, используется два разделительных слоя водоблокирующих лент под и поверх медного экрана, накладываемых с перекрытием. При прокладке кабеля в кабельных сооружениях применяется оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести.

Сшитый полиэтилен может производиться по разным технологиям при изменениях температуры, давления проходящей реакции, а также

сопутствующих веществ. При этом получают материалы, которые несколько отличаются по своим свойствам. В электроизоляционной промышленности используются:

1. РЕХб — полиэтилен, «сшитый» химическим силановым (или силанольным) способом. В его производстве используются вещества кремневодороды, которые с повышением температуры до 80-90 °С участвуют в гидролизе, связывая боковые ответвления полимерных макромолекул. Сравнительно дешевый метод, дает около 65 % сшивки. Был очень распространен на начальном этапе использования полиэтилена в качестве кабельной изоляции, но давал неравномерность распределения свойств по всему объему.
2. РЕХа «сшивается» в присутствии перекиси водорода, из-за чего называется «пероксидным», при повышении температуры до 400 °С и давления 8-9 атм. Такой метод модификации полиэтилена более сложный и дорогой, но дает до 80 % сшитых молекул и сравнительно равномерное распределение показателей по объему материала. Получил наибольшее применение как высоковольтная изоляция большой толщины.

Изоляция РЕХб разрешена только для кабелей, рассчитанных на напряжение не более 1 кВ. При большем напряжении она имеет меньшую электростойкость, часто дает пробой и быстро приходит в негодность. Для изоляции провода в 10-35 кВ и более используется только материал РЕХа.

Изоляция из сшитых образцов полиэтилена используется в производстве одножильного и трехжильного кабеля, применяемых как в однолинейной, так и в групповой прокладке на открытых местах, в кабельных конструкциях, под землей. Толщина изоляции варьируется от 3,4 до 35 мм при сечении кабеля от 35-ти до 3000 мм² и протекании тока напряжением до 550 кВ.

Сравнительные данные изоляционных материалов

Параметр/материал	СПЭ	ПВХ	БПИ
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3	5	3,5
$\operatorname{tg} \delta$, при 20 °С	0,0004	0,07	0,003
Удельное объемное сопротивление, при 20 °С, Ом*см	10^{16}	10^{12}	10^{13}
Длительно допустимая рабочая температура, °С	90	70	70–80
Максимальная температура п.т.ж. при коротком замыкании, °С	250	160	150
Сопротивление к деформации, при 150 °С	Хорошее	Плохое	Хорошее

ГЛАВА II СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ПО КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

2.1 Анализ уравнения теплового баланса

Рассмотрим изолированную (нет обмена энергией с окружающей средой) систему тел (твердых или жидких), в которой теплообмен может совершаться только между телами, входящими в эту систему, то в результате этого процесса в системе установится тепловое равновесие. Температуры всех тел станут одинаковыми и равными некоторому значению.

В процессе теплообмена тела, начальные температуры которых больше («горячие» тела), будут отдавать свою энергию, а тела, у которых начальные температуры меньше, — получать энергию.

Из закона сохранения энергии (т. к. система изолированная) следует, что количество теплоты, потерянное телами с более высокой температурой,

будет равно количеству теплоты, приобретенному телами с более низкими температурами.

Уравнение теплового баланса:

$Q_{отд} = Q_{получ}$, где $Q_{отд}$ — количество теплоты, отданное «горячими» телами, $Q_{получ}$ — количество теплоты, полученное «холодными» телами.

$$\Delta t = P_{ж} * (S_{т.б} + S_{из} + S_{э.и} + S_{в.л} + S_{об} + S_3) + P_{э} * (S_{э.и} + S_{в.л} + S_{об} + S_3)$$

Факт того, что количество теплоты, потерянное «горячими» телами, равно количеству теплоты, приобретенному «холодными» телами, называется **законом теплообмена**.

2.2 Потери в силовых кабелях, приводящие к его нагреву

На рисунке 4 упрощенно показана конструкция однофазного силового кабеля, включающего жилу, экран, главную изоляцию (между жилой и экраном), а также оболочку экрана.

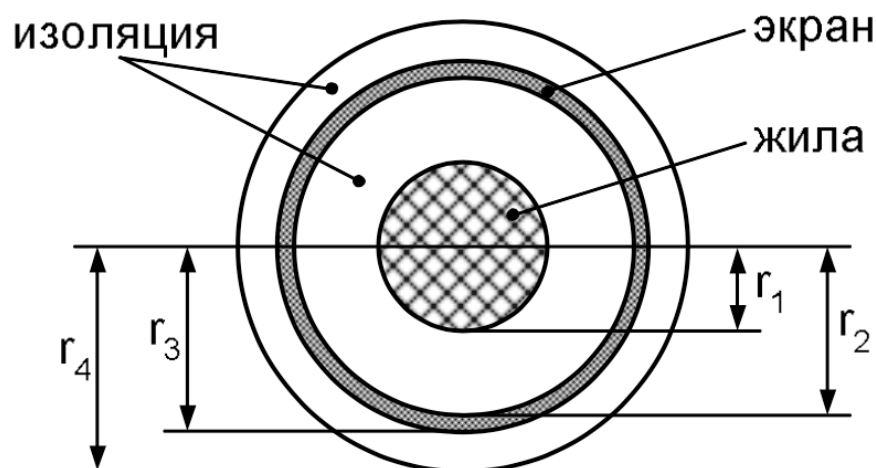


Рисунок 4: Силовой однофазный кабель СПЭ 10кВ.

Активные сопротивления жилы $R_{ж}$ и экрана $R_{э}$:

$$R_{ж} = L_k * r_{ж} / F_{ж}$$

$$R_{э} = L_k * r_{э} / F_{э}$$

L_k — длина кабеля, $r_{э}$ и $r_{ж}$ — удельное сопротивление материала жилы и экрана, $F_{ж}$ и $F_{э}$ — сечение жилы и экрана.

Суммарные потери в однофазном кабеле могут быть оценены из выражения:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{ж}} + P_{\text{э}} + P_{\text{диэл.}}$$

Главной формулой, описывающей процесс преобразования электрической энергии в тепловую, является закон Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t,$$

где

· Q – количество теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока по проводнику,

- I – сила тока,
- R – электрическое сопротивление проводника,
- t – время прохождения электрического тока по проводнику.

Таким образом, нагрев электрического провода будет больше при увеличении нагрузки и более высоком значении сопротивления. Кроме этого, величина выделяемой теплоты прямо пропорциональна времени прохождения тока. Что касается скорости нагрева, то она напрямую зависит от действующей электрической мощности, которая определяется произведением напряжения и силы тока ($P=UI$). Другими словами, чем больше мощность подключенных к проводу потребителей, тем сильнее и интенсивней он будет нагреваться. Эти формулы позволяют определить параметры, которые мы можем изменять для управления величиной и скоростью нагрева проводов. Сила тока зависит от номинальной мощности всех подключенных проводников. Это значение, от которого можно отталкиваться в расчетах. Главным параметром, значение которого может изменяться, является электрическое сопротивление. Его величину определяют свойства металла проводника и сечение кабеля. Именно поэтому необходимо выбирать сечение кабеля по мощности. Это позволяет уменьшить электрическое сопротивление провода, что в свою очередь дает возможность сократить нагрев до допустимых пределов.

3.1 Возможности использования композиционных материалов в качестве «термических барьеров» в силовых кабелях.

Термические барьеры это слюдосодержащие композиционные материалы в кабельной линии, которые накладываются поверх токопроводящей жилы для увеличения максимальнодопустимой токовой нагрузки. Термические барьеры должны соответствовать следующим требованиям: хорошей стойкостью к высокой температуре, большую устойчивость к расслоению и обладать хорошей гибкостью. К ним относятся миканит, стекломиканит, микалента, стекломикалента, слюдопласт, слюдинит, слюдинитовая лента, микалекс.

Миканиты

Стекломиканиты гибкие (ГФС-Т, ГФС-ТТ, ГФК-Т, ГФК-ТТ, ГФЭ-ТТ) - ГОСТ 8727-78 изготавливаются толщиной от 0,20 до 0,60 мм путем ручной клейки слюды на подложке из стеклоткани с одной или двух сторон с кремнийорганическим и глифталевым связующим с последующей горячей подпрессовкой. Применяются в качестве изоляции обмоток электрических машин при напряжении до 700 В переменного тока и до 1000 В постоянного тока, а также для пазовой изоляции электрических машин.

Длительно допустимая рабочая температура (130-180)°С.

Микалента (ЛМЧ-ББ, ЛФЧ-ББ, ЛМК-ТТ, ЛФК-ТТ, ЛФС-ТТ) - ГОСТ 4268-75 представляет собой ролики электроизоляционного материала шириной от 10 до 30 мм и толщиной от 0,10 до 0,21 мм, изготовленные методом ручной клейки слюды на подложках из стеклоткани или микалентной бумаги с последующей печной или воздушной сушкой.

Применяется в качестве обмоточного электроизоляционного материала в электрических машинах и аппаратах (ЛМЧ-ББ - для корпусной изоляции обмоток электрических машин при напряжении переменного тока до 15 кВ).

Длительно допустимая рабочая температура до 130°С.

Слюдиниты гибкие листовые представляют собой прессованную композицию из слюдяной бумаги и стеклоткани, пропитанных и склеенных

между собой кремнийорганическим лаком. Слюдаиниты гибкие применяются в качестве электроизоляционного материала в электрических машинах и аппаратах в системе изоляции класса нагревостойкости F (155°C) - Г1СК, Г2СК и 300°C - Г1СКН.

2. Размеры

Слюдаиниты поставляются в листах размером не менее 500х600мм.

Слюдопласт ЭЛМИКА 615-01, ЭЛМИКА 625-01

ТУ ОЯД 503.119-95

1. Характеристики материала

Элмика 615-01 представляет собой прессованный материал, состоящий из слюдаинитовой бумаги, пропитанной и склеенной между собой кремнийорганическим связующим. Применяется в качестве жёстких изоляционных прокладок в высокотемпературных нагревательных элементах бытового назначения. Допускается контакт с пищевыми продуктами. Рассчитан на длительную эксплуатацию при температуре 500°C (кратковременно 800°C).

Элмика 625-01 представляет собой прессованный материал, состоящий из слюдопластовой бумаги, пропитанной и склеенной между собой кремнийорганическим связующим. Применяется в качестве мягких изоляционных прокладок в высокотемпературных нагревательных элементах бытового назначения. Допускается контакт с пищевыми продуктами. Рассчитан на длительную эксплуатацию при температуре 700°C (кратковременно 900°C).

2. Размеры

Поставляется в листах. Ширина листа от 215 до 580мм. Длина от 465 до 880мм.

Слюдопласт гибкий: Элмикафлекс 4430, 44309, 4450, 44509, ТУ 3492-027-50157149-2001

Элмикафлекс 4430 и 4450 представляет собой электроизоляционный материал, состоящий из слоев слюдопластовой бумаги, пропитанных

склеенных между собой связующим веществом. Элмикафлекс 44309 и 44509 - электроизоляционный материал, состоящий из слоев слюдопластовой бумаги, пропитанных склеенных между собой связующим веществом, армированный изнутри слоем ткани из стекловолокна. Элмикафлекс предназначен для использования в качестве электроизоляционного материала в электрических машинах и аппаратах с системами изоляции класса нагреваемости F (Элмикафлекс 4430, 44309) и класса нагреваемости H (Элмикафлекс 4450, 44509). Элмикафлекс может использоваться для замены асбесодержащих материалов. Элмикафлекс 4430 и 44309 относятся к типу 423 по ГОСТ 26103. Элмикафлекс 4450 и 44509 относятся к типу 425 по ГОСТ 26103.

Формовочные слюдопласты

Элмикаформ 323Пл, 323Т, 325Т

Ту 3492-008-00214639-97

1. Характеристики материала

Формовочные слюдопласты представляют собой прессованный электроизоляционный материал, состоящий из слюдопластовой бумаги и стеклоткани (Элмикаформ 323Т и Элмикаформ 325Т) или из слюдопластовой бумаги и полиэтилентерефталатной плёнки (Элмикаформ 323Пл), склеенных между собой полиэфирным (Элмикаформ 323Т и Элмикаформ 323Пл) или кремнийорганическим (Элмикаформ 325Т) связующим. Формуются в нагретом состоянии.

Слюдопласты применяются для изготовления коллекторных манжет и фасонных изоляционных деталей электрических машин и аппаратов класса нагревостойкости F(155°C) - Элмикаформ 323Т, Элмикаформ 323Пл и H(180°C) - Элмикаформ 325Т.

2. Размеры

Слюдопласты поставляются в листах размером от 580 до 880мм.

Лента слюдинитовая непропитанная

ЛСКО-180Т, ЛСКН-135СПл, ЛСКН-160ТТ

1. Характеристики материала

Лента слюдинитовая непропитанная ЛСКО-180Т представляет собой слоистую композицию, состоящую из слюдяной бумаги, стеклоткани, склеенных связующим на основе каучука и лакированной кремнийорганическим лаком (может вводиться ускоритель полимеризации эпоксидных составов).

Лента применяется для корпусной изоляции высоковольтных электрических машин и тяговых электродвигателей в системе изоляции классов нагревостойкости В (130°C) и F(155°C) по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки. Изолирование обмоток осуществляется на лентоизолировочных станках, обеспечивающих равномерное натяжение ленты.

Лента слюдинитовая непропитанная ЛСКН-135СПл представляет собой слоистую композицию, состоящую из слюдяной бумаги, склеенной с одной стороны со стеклотканью, с другой стороны - с полиэфирной плёнкой связующим на основе каучука лаком (может вводиться ускоритель полимеризации эпоксидных составов).

Лента применяется для корпусной изоляции высоковольтных электрических машин и тяговых электродвигателей в системе изоляции классов нагревостойкости В (130°C) и F(155°C) по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки. Изолирование обмоток осуществляется на лентоизолировочных станках, обеспечивающих равномерное натяжение ленты.

Лента слюдинитовая непропитанная ЛСКН-160Т представляет собой слоистую композицию, состоящую из слюдяной бумаги, оклеенной с двух сторон стеклотканью связующим на основе каучука лаком (может вводиться ускоритель полимеризации эпоксидных составов).

Лента применяется для корпусной изоляции высоковольтных электрических машин и тяговых электродвигателей в системе изоляции

классов нагревостойкости В (130°C) и F(155°C) по технологии вакуумно-нагнетательной пропитки. Изолирование обмоток осуществляется на лентоизолировочных станках, обеспечивающих равномерное натяжение ленты. Допускается изолирование обмоток вручную.

2. Размеры

Ленты поставляются в роликах диаметром 110-150мм и рулонах диаметром от 80 до 160мм шириной от 15 до 880мм, намотанными на жёсткую втулку с внутренним диаметром 36 ± 1 мм или 55 ± 1 мм.

Ленты слюдинитовые пропитанные

ЛСК-110ТТ, ЛСК-110СТ,

ЛСК-110ТПл, ЛСК-110СПл,

ЛСЭК-5ТПл, ЛСЭК-5СПл

ТУ 16-91 И02.0168.001ТУ

1. Характеристики материала

Ленты слюдинитовые пропитанные ЛСК-110ТТ, ЛСК-110СТ представляют собой композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги, стеклоткани, пропитанных электроизоляционным компаундом.

Ленты применяются для корпусной изоляции катушечных и стерневых обмоток высоковольтных (6кВ) электрических машин и генераторов в системе изоляции класса нагревостойкости В (130°C). Режим отверждения: 16 часов при температуре 160°C. Лента гибкая в условиях комнатной среды. Пригодна для ручной и механизированной намотки.

Ленты слюдинитовые пропитанные ЛСК-110ТПл, ЛСК-110СПл представляют собой композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги, и полиэтилентерефталатной плёнки, пропитанных электроизоляционным компаундом.

Ленты применяются для корпусной и витковой изоляции катушечных обмоток высоковольтных (6кВ) и низковольтных электрических машин в системе изоляции класса нагревостойкости В (130°C). Режим отверждения:

10-16 часов при температуре 160°C. Лента гибкая в условиях комнатной среды. Пригодна для ручной и механизированной намотки.

Ленты слюдинитовые пропитанные ЛСЭК-5ТПл, ЛСЭК-5СПл представляют собой композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги, и полиэтилентерефталатной плёнки, пропитанных электроизоляционным компаундом.

Ленты применяются для корпусной и витковой изоляции катушечных обмоток высоковольтных (6кВ) и низковольтных электрических машин в системе изоляции класса нагревостойкости F (155°C). Режим отверждения: 10-16 часов при температуре 160°C. Лента гибкая в условиях комнатной среды. Пригодна для ручной и механизированной намотки.

2. Размеры

Ленты поставляются в роликах диаметром 100±10мм, шириной от 15 до 870мм, намотанными плёнкой наружу на жёсткую втулку с внутренним диаметром 36±1мм.

Лента слюдинитовая пропитанная

ЛСЭП-934ТПл(СПл)

ТУ 16-91 ИЗ7.0168.006ТУ

1. Характеристики материала

Лента слюдинитовая пропитанная ЛСЭП-934ТПл(СПл) представляет собой композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги и полиэтилентерефталатной плёнки, пропитанных эпоксидно-полиэфирным связующим.

Лента применяется для корпусной и витковой изоляции тяговых электрических машин и крупных высоковольтных электрических машин напряжением до 6кВ класса нагревостойкости F (155°C). Лента гибкая в условиях комнатной среды. Пригодна для ручной и механизированной намотки. Заменяет микаленты класса нагревостойкости В и F. Режим отверждения: 10-16 часов при температуре 160°C.

2. Размеры

Лента поставляется в роликах диаметром 100 ± 10 мм, шириной от 15 до 870 мм, намотанной плёнкой наружу на жёсткую втулку с внутренним диаметром 36 ± 1 мм.

Лента слюдинитовая пропитанная

ЛСУ - ТУ 16-90 И79.0168.002 ТУ

ЛСМ - ТУ 16-88 И79.0168.001 ТУ

ЛСПМ - ТУ 16-91 И79.0168.003 ТУ

1. Характеристики материала

Лента слюдинитовая пропитанная ЛСУ (ТУ 16-90 И79.0168.002 ТУ) представляет собой трёхслойную композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги и полиэфирной плёнки, пропитанных и склеенных между собой эпоксидно-полиэфирным связующим. Лента применяется для корпусной и витковой изоляции в электрических машинах напряжением до 6 кВ в системах изоляции класса нагревостойкости F (155°C). Режим отверждения: 16 часов при температуре $(160-180)^{\circ}\text{C}$. Лента гибкая в условиях комнатной среды. Пригодна для ручной и механизированной намотки. Заменяет микаленты класса нагревостойкости В и F.

Лента слюдинитовая пропитанная ЛСМ (ТУ 16-88 И79.0168.001 ТУ) представляет собой трёхслойную композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги и полиэфирной плёнки, пропитанных и склеенных между собой модифицированным эпоксисовлачным связующим. Лента применяется для корпусной изоляции в электрических машинах напряжением до 13,8 кВ. Режим отверждения: 3 - 5 часов при температуре 160°C . Рекомендуется наматывать ленту механизированным способом, предварительно подогрев её до температуры $50-70^{\circ}\text{C}$.

Лента слюдинитовая пропитанная ЛСПМ (ТУ 16-91 И79.0168.003 ТУ) представляет собой трёхслойную композицию из стеклоткани, слюдяной бумаги и полиимидной плёнки, пропитанных и склеенных между собой эпоксидно-полиэфирным связующим. Лента применяется для изоляции низковольтных электрических машин в системе изоляции класса

нагревостойкости Н (180°C). Пригодна для ручной и механизированной намотки. Режим отверждения: 16 часов при температуре (160-180)°C.

2. Размеры

Ленты поставляются в роликах или в рулонах диаметром 100±10мм, шириной от 15 до 870мм, намотанные плёнкой наружу на жёсткую втулку с внутренним диаметром 36±1мм.

3.2 Расчёт диэлектрических характеристик композитов «термических барьеров»

Параметр/материал	СПЭ
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3
$\operatorname{tg} \delta$, при 20 °C	0,0004
Удельное объемное сопротивление, при 20 °C, Ом*см	10^{-16}
Длительно допустимая рабочая температура, °C	90
Максимальная температура п.т.ж. при коротком замыкании, °C	250
Радиус жилы r_0 , мм	13,45
Радиус термического барьера по жиле, r_1 , мм	18,45
Радиус по изоляции, r_2 , мм	35,25
Расстояние между осями жил, мм	88,4
Диэлектрическая проницаемость изоляции	$8,85 \cdot 10^{-12}$
Сопротивление к деформации, при 150 °C	Хорошее

Сопротивление изоляции кабеля:

$$R_{из} = \frac{\rho_v}{2\pi l} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

где ρ_v , Ом·м - удельное объёмное сопротивление изоляции,

r_1 – радиус термического барьера по жиле, мм

r_2 – радиус по изоляции, мм

l – длина кабеля, м

$$R_{uz} := \frac{\rho_v}{2 \pi \cdot l} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) = 1.03 \cdot 10^{-17} \quad \text{ОМ}$$

Электрическая емкость кабеля:

$$C = \frac{2 \pi \varepsilon \varepsilon_0 L}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная, L – длина кабеля.

$$C := \frac{2 \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} = 1.976 \cdot 10^{-10} \quad \text{нФ.}$$

Индуктивность жилы при замкнутых оболочках на землю:

$$L = \frac{\mu_0}{2 \pi} \left(\ln \frac{S}{r_0} + \frac{1}{2} \right)$$

S – расстояние между осями жил, мм

r_0 – радиус жилы, мм

Кабели расположены треугольником и касаются друг друга:

$S = D_K = 78,4$ мм, где D_K – диаметр кабеля

$$L := \frac{\mu_0}{2 \pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{s_0}{r_0} \right) + 0.5 \right) = 4.763 \cdot 10^{-7} \quad \text{мкГн}$$

Диэлектрические потери в изоляции:

$$P_\delta = U_\phi^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс диэлектрических потерь изоляции

U_ϕ – фазное напряжение, В

C – емкость изоляции, Ф/м

$$P_{uz} := U_\phi^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = 4.005 \cdot 10^{-7} \quad \text{Вт/м.}$$

4.1 Электрический расчёт

Расчет сечения экрана провода необходимо производить затем, чтобы убедиться, что выбранный провод соответствует всем требованиям надежности и безопасной эксплуатации электропроводки.

Определяем минимально допустимое сечение экрана (мм²) с учетом времени срабатывания защиты в голове кабельной линии (t).

$$S_s = \frac{I_s}{227 \times \sqrt{A}} = 5,5 I_s \times \sqrt{\frac{t}{I}}.$$

Пример расчета

Исходные данные: по ТУ проектируемая ТП (типа 2БКТП–10/0,4 кВ – 1000 кВА) должна быть запитана от существующей РТП. Для этого от РТП до ТП необходимо проложить РКЛ–10 кВ в земле. РКЛ выполняется одножильными кабелями ПвСЭП2Г– 10 кВ 3(1×500/50). Длина РКЛ – 160 м. Время отключения защиты t=0,9 с. Расчет: определяем реактивное сопротивление эл. системы при двойном КЗ на землю, Ом:

$$X_{2c} = \frac{1,05 \times 2 \times 10,5}{\sqrt{3} \times 15} = 0,849$$

Определяем удельное сопротивление: жилы – 0,156 мОм/км и экрана – 0,42 мОм/км. Затем определяем сопротивление кабельной линии, Ом:

$$R_k = \left(R_{ж} + \frac{m \times R_s}{3} \right) \times \ell = \left(0,156 + \frac{0,9 \times 0,42}{3} \right) \times 0,4 = 0,113 \text{ Ом}$$

Определяем ток двойного замыкания на землю, кА:

$$I_{2к} = \frac{K_{н.н.}}{\sqrt{X_{2c}^2 + R_k^2}} = \frac{1,05 \times 10,5}{\sqrt{0,849^2 + 0,113^2}} = 12,1 \text{ кА}$$

Ток в экране при двойном КЗ на землю, кА:

$$I_s = \frac{m \times I_{2\kappa}}{3} = \frac{0,9 \times 12,1}{3} = 3,63 \text{ кА}$$

Определяем минимальное сечение экрана, при котором обеспечивается термическая стойкость при двойном КЗ на землю, мм²:

$$S_s = 5,5 \times I_s \times \sqrt{\frac{t}{\ell}} = 5,5 \times 3,63 \times \sqrt{\frac{0,9}{0,4}} = 30 \text{ мм}^2$$

Вывод из расчета: экран кабеля 500 мм² отвечает требованиям термической устойчивости. Согласно Указанию МКС МЭ №143 от 03.07.2004 г.

Сопrotивление токопроводящей жилы постоянному и переменному току

Сопrotивление токопроводящей жилы постоянному току:

$$R_{\text{ж}} = \frac{\rho_{20} l}{S_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{\text{ж}} - 20)] \cdot k_{\delta}$$

где $\rho_{20} = 0,0172, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – удельное сопротивление меди при 20° С,

l – длина жилы;

S_0 – сечение жилы, мм²

$\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^{\circ}\text{С}$ – температурный коэффициент сопротивления,

$T_{\text{ж}}$ – максимальная допустимая рабочая температура 90, увеличиваем на 35 С

k_{γ} – коэффициент укрутки.

$$R_{\text{ж}} := \frac{\rho_{20} \cdot l}{S_{\text{ж}}} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{\text{ж}} - 20)) \cdot k_{\gamma} = 4.981 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Сопrotивление жилы переменному току:

$$R_{\text{ж}\sim} = R_{\text{ж}} \cdot [1 + 1(y_n + y_{\delta})],$$

где $y_n = f(x)$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект

$y_{\delta} = f(x)$ – коэффициент, учитывающий эффект близости:

$$y_{\Pi} = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4}, \quad y_6 = y_{\Pi} \left(\frac{d_{\text{ж}}}{h} \right)^2 \left[\frac{1,18}{y_{\Pi} + 0,27} + 0,312 \left(\frac{d_{\text{ж}}}{h} \right)^2 \right],$$

где h – расстояние между осями кабелей, $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы.

Приближенные формулы справедливы для $x < 2,8$.

$$x = \sqrt{\frac{2f \mu \mu_0}{R_{\text{ж}}}} k$$

где $f = 50$ Гц – частота переменного тока

$k=1$ – коэффициент, зависящий от конструкции ТПЖ,

$$x := \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot \mu_0}{R_{\text{ж}}}} \cdot k_y = 1.608$$

$$y_n := \frac{x^4}{192 + 0.8 \cdot x^4} = 0.034$$

где $r_{\text{к}}$ радиус кабеля, мм

$$y_6 := y_n \cdot \left(\frac{d_{\text{ж}}}{s_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{1.18}{y_n + 0.27} + 0.312 \cdot \left(\frac{d_{\text{ж}}}{s_0} \right)^2 \right) = 0.012$$

$$R_{\text{ж.пер.}} := R_{\text{ж}} \cdot (1 + 1 \cdot (y_n + y_6)) = 5.211 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Допустимый ток нагрузки при прокладки кабеля в земле

Тепловое сопротивление земли:

$$S_3 := \frac{\sigma_3}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l_3}{2 \cdot r_{\text{к}} \cdot 10^{-3}} \right) = 0.696$$

σ_3 – , °C · м / Вт

L – глубина прокладки кабеля в земле, м

$r_{\text{к}}$ – радиус кабеля.

Согласно руководству по эксплуатации, прокладке и монтажу кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ:

$$1,2^{\circ}\text{C}\cdot\text{м} / \text{Вт},$$

$$L_3=0.75 \text{ м},$$

Тепловая схема замещения кабеля при прокладке в земле

Тепловой закон Ома:

$$\theta = PS$$

Составим уравнение для тепловой схемы замещения, используя тепловой закон:

$$T_{\text{ж}} - T_0 = P_{\text{ж}} \left(S_{\text{э.ж}} + \frac{S_{\text{уз}}}{2} \right) + (P_{\text{ж}} + P_{\phi}) \left(\frac{S_{\text{уз}}}{2} + S_{\text{э.л1}} + S_{\text{э.л2}} \right) + (P_{\text{ж}} + P_{\phi} + P_{\text{з}}) (S_{\text{об}} + S_{\text{з}})$$

$$P_{\text{ж}} = I^2 \cdot R_{\text{ж.~}}$$

$$P_{\text{з}} = y_{\text{з}} \cdot P_{\text{ж}}$$

где $P_{\text{ж}}$ – количество теплоты, выделяющееся в жиле, Вт/м

$D_{\text{д}}$ – диэлектрические потери в изоляции, Вт/м

$D_{\text{м}}$ – потери в металлическом экране, Вт/м

I – допустимый ток нагрузки, А

$R_{\text{э.~}}$ – сопротивление токопроводящей жилы переменному току, Ом

$$T_{\text{ж}} - T_0 = P_{\text{ж}} \left(S_{\text{э.ж}} + S_{\text{уз}} + S_{\text{э.л1}} + S_{\text{э.л2}} + (1 + y_{\text{з}}) (S_{\text{об}} + S_{\text{з}}) \right) + P_{\phi} \left(\frac{S_{\text{уз}}}{2} + S_{\text{э.л1}} + S_{\text{э.л2}} + S_{\text{об}} + S_{\text{з}} \right)$$

Допустимый ток нагрузки при прокладке кабеля в земле:

$$I := \sqrt{\frac{T_{\text{ж}} - T_0 - P_{\text{уз}} \cdot \left(\frac{S_{\text{уз}}}{2} + S_{\text{э.л1}} + S_{\text{э.л2}} + S_{\text{об.}} + S_{\text{з}} \right)}{R_{\text{ж.пер.}} \cdot (S_{\text{э.ж}} + S_{\text{уз}} + S_{\text{э.л1}} + (1 + y_{\text{з}}) \cdot (S_{\text{э.л2}} + S_{\text{об.}} + S_{\text{з}}))}} = 1.103 \cdot 10^3$$

4.2 Тепловой расчёт (прокладка в земле треугольником,

$$U_{\text{Н}} = 10 \text{ кВ}, P = 200 \text{ кВт})$$

Тепловое сопротивление термического барьера по жиле:

$$S_{э.ж} = \frac{\sigma_{э.ж}}{2\pi L} \ln \frac{r_1}{r_{ж}}$$

где $\sigma_{э.ж} = 11$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление слюдопласа элмика,

$r_{ж}$ – радиус жилы.

r_1 – радиус кабеля по экрану жилы, мм

$$S_{э.ж} := \frac{\sigma_{э.ж}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r1}{r0} \right) = 0.553 \quad ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Тепловое сопротивление изоляции:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

где $\sigma_{из} = 3,5$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление сшитого полиэтилена

r_2 – радиус кабеля по изоляции, мм

$$S_{из} := \frac{\sigma_{из}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r2}{r1} \right) = 0.361 \quad ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$$

Тепловое сопротивление экрана по изоляции:

$$S_{э.и} = \frac{\sigma_{э.и}}{2\pi L} \ln \frac{r_3}{r_2}$$

r_3 – радиус по экрану изоляции.

где $\sigma_{э.и} = 3,5$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление сшитого полиэтилена

$$S_{э.и} := \frac{\sigma_{э.и}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r3}{r2} \right) = 0.043 \quad ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Тепловое сопротивление полупроводящей водонабухающей ленты:

$$S_{с.л} = \frac{\sigma_{с.л}}{2\pi L} \ln \frac{r_4}{r_3}$$

где $\sigma_{в.л} = 6$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление полупроводящей водонабухающей ленты

r_4 – радиус по полупроводящей водонабухающей ленте.

$$S_{\varepsilon.л1} := \frac{\sigma_{\varepsilon.л}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) = 0.007 \quad ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Медный экран имеет тепловое сопротивление $S_{\text{эк}}$, которое много меньше, чем тепловые сопротивления иных элементов конструкции кабеля, поэтому не учитывается.

Тепловое сопротивление водонабухающей ленты:

$$S_{\varepsilon.л2} = \frac{\sigma_{\varepsilon.л}}{2\pi L} \ln \frac{r_6}{r_5}$$

где $\sigma_{в.л} = 6$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление водонабухающей ленты

r_5 – радиус по металлическому экрану.

r_6 – радиус по водонабухающей ленте.

$$S_{\varepsilon.л2} := \frac{\sigma_{\varepsilon.л}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_6}{r_5} \right) = 0.008 \quad ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

Тепловое сопротивление оболочки:

$$S_{\text{ф.д}} = \frac{\sigma_{\text{ф.д}}}{2\pi L} \ln \frac{r_7}{r_6}$$

r_7 – радиус по наружной оболочке (радиус кабеля)

$$S_{\text{об.}} := \frac{\sigma_{\text{об.}}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_7}{r_6} \right) = 0.053 \quad ^{\circ}\text{C} \cdot \text{м} / \text{Вт}$$

$\sigma_{\text{ф.д}} = 3,5$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$) – удельное термическое сопротивление полиэтилена

Тепловое сопротивление кабеля:

$$S_{\text{КЗ}} = S_{\text{з.ж}} + S_{\text{из}} + S_{\text{з.и}} + S_{\varepsilon.л1} + S_{\varepsilon.л2} + S_{\text{об}} + S_{\text{з}}$$

$$S_{каб} := S_{э.ж} + S_{уз} + S_{э.л} + S_{в.л1} + S_{в.л2} + S_{об.} + S_3 = 1.721 \quad ^\circ\text{C} / \text{Вт}$$

Расчет распределения температуры в кабеле

Кабель проложен в земле.

I – допустимый ток нагрузки при прокладки кабеля в земле, А

Вычислим потери:

$$P_{ж} := I^2 \cdot R_{ж.пер.} = 63.42 \quad \text{Вт/м}$$

$$P_{э} := y_{э} \cdot P_{ж} = 1.1 \quad \text{Вт/м}$$

Вычислим температуры:

$$T_1 := T_0 + (P_{ж} + P_{уз} + P_{э}) \cdot S_3 = 59.91$$

$$T_2 := T_1 + (P_{ж} + P_{уз} + P_{э}) \cdot S_{об.} = 63.319$$

$$T_3 := T_2 + (P_{ж} + P_{уз} + P_{э}) \cdot S_{в.л2} = 63.858$$

$$T_4 := T_3 + (P_{ж} + P_{уз}) \cdot S_{в.л1} = 64.334$$

$$T_5 := T_4 + (P_{ж} + P_{уз}) \cdot S_{э.л} = 67.034$$

$$T_6 := T_5 + \left(P_{ж} + \frac{P_{уз}}{2} \right) \cdot S_{уз} = 89.905$$

$$T_{ж} := T_6 + P_{ж} \cdot S_{э.ж} = 125 \quad ^\circ\text{C}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом можно сделать вывод о том, что термическому барьеру нашли новое применение в кабельной технике, а именно увеличение передаваемой мощности, за счет удержания тепла внутри изоляции информации и исследований по этой работе проводилось еще недостаточно что бы хорошо разобраться в этом вопросе. В дипломной работе систематизирована информация по данной теме. При передаче токов выше допустимых кабель начинает сильно перегреваться и изоляция разрушаться, но термический барьер наложенный поверх токопроводящей жилы препятствует этому разрушению. Тепло выделяемое при перегрузке остается внутри изоляции и не оказывает на нее влияние. Таким образом увеличивая максимальную допустимую мощность.

Данная тема **актуальна** в современном мире потому что, благодаря этой технологии происходит большая экономия денежных средств и ресурсов изза уменьшения сечения ТПЖ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ларина Э.Т.** Силовые кабели и кабельные линии: Учеб. Пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 368 с
2. **Миллер В.В.** Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и кабельная арматура к ним. Технология сшивки, производство и контроль качества поставляемой продукции. Реконструкция и строительство кабельных сетей в городских условиях. - XIX-е заседание Ассоциации электроснабжения городов России «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО», тез. докл., Ханты-Мансийск, 2013.
3. **ГОСТ Р 55025-2012** Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия.
4. **Доклад** по силовым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 1-10 кВ. - Департамент топливно-энергетических ресурсов г.Москвы, 2005
5. **Боев А.** Сравнение кабелей с БПИ и СПЭ-изоляцией // Кабель-NEWS. - 2010. - № 11.
6. **ГОСТ Р МЭК 60287-2011** Кабели электрические расчет номинальной токовой нагрузки
7. **Ларина, Э. Т.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учебник для вузов / Э. Т. Ларина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.: ил.
8. **Привезенцев, В. А.** Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии [Text] : учеб. пособие для энергет. и электротехн. вузов / В. А. Привезенцев, Э. Т. Ларина; ред. В. А. Привезенцев. - Москва: Энергия, 1970.