

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

Энергетический институт

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электротехнических комплексов и материалов (ЭКМ)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Повышение эксплуатационной надежности силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

УДК 621.315.211.9.016.2.004-19

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5В	Естаев Е.Т.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭКМ	Леонов А.П.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По расчетно-аналитическому разделу

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шуликин С.Н.			

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В.Ф.	Д.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав.кафедрой ЭКМ профессор	Гарганеев А.Г.	Д.Т.Н.		

Томск – 2017 г.

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении коллективом</i> , использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

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

Институт - Энергетический
 Направление – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
 Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой
 _____ Гарганеев А.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5В	Естаев Ерсултан Тимурулы

Тема работы:

Повышение эксплуатационной надежности силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования: • Кабели из сшитого полиэтилена различной конфигурации
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	В магистерской диссертации проведены: Обзор литературных и патентных источников, обзор технических решений. Основные неисправности и причины выхода силового трансформатора из строя. Разработка классификация дефектов в трансформаторе и модели их развития. Расчет эксплуатационной надежности силовых трансформаторов. Экономическая обоснованность. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	Презентация по защите магистерской диссертации
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Основной обший и специальный разделы ВКР	Научный руководитель <i>Леонов А.П.</i>
Экономическая часть ВКР	<i>Кузьмина Н.Г.</i>
Раздел экология и техника безопасности	<i>Панин В.Ф.</i>
Раздел на иностранном языке	<i>Соколова Э.Я.</i>

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
<i>Основная и специальная части, «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность» – русский язык</i>
<i>На иностранном языке выполнены следующие разделы диссертации:</i>
<i>1. Analytical investigation of the magnetic field action on insulation</i>

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭКМ	Леонов А.П.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5В	Естаев Е.Т.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
5ГМ5В		Естаев Ерсултан Тимурулы	
Институт	Энергетический	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Кабельная техника
Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:			
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>		<i>Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости рынка; Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ (количество исполнителей - 2 человека)</i>	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>		<i>15 % доплаты и надбавки; 12-15 % дополнительная заработная плата; 30% районный коэффициент; 16% накладные расходы</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>		<i>Отчисления по страховым взносам составляют 30,2 % от ФОТ на 2016 год</i>	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:			
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>		<i>Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТУ)</i>	
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>		<i>Не разрабатывается</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>		<i>1. Планирование этапов разработки проекта; 2. Смета затрат на проект; 3. Смета затрат на оборудование</i>	
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>		<i>Определить ресурсную и экономическую эффективность проекта.</i>	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику			

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5В	Естаев Ерсултан Тимурулы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ5В	Естаеву Ерсултану Тимурулы

Институт	ИНК	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Кабельная техника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера) 	<p>Рабочим местом является кабинет. Работа производится сидя, основная часть за ПЭВМ.</p> <p>На рабочем месте возможно повышение уровня шума, несоответствующие микроклиматические параметры, недостаточная освещенность рабочего места, поражение электрическим током, повышение статического электричества.</p> <p>Наиболее возможная чрезвычайная ситуация на рабочем месте – пожар.</p> <p>Имеется воздействие на литосферу в виде отходов, возникших, вследствие выхода из строя ПЭВМ и других приборов, а так же замены офисной мебели.</p>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>СанПиН 2.2.4.548-96; СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; ГОСТ 12.0.003 – 74, СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03, ГОСТ 12.1.005 – 88, СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96, ГОСТ 12.1.003 – 83. СанПиН 2.2.2.542 – 96.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>К вредным факторам рабочего места можно отнести электромагнитное излучение от ПЭВМ, повышенный уровень шума, несоответствующие параметры микроклимата и освещенности помещения.</p> <p>Данные факторы приводят к снижению работоспособности или заболеванию.</p> <p>Для предотвращения вредного воздействия необходимо соблюдать правила работы: время работы, оптимальное расположение, как оборудования, так и сотрудника. Использовать средства защиты, корректировать параметры освещенности и микроклимата</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); 	<p>К опасным факторам рабочего места относится повышение статического электричества, поражение электрическим током, взрыв, пожар.</p> <p>Поражение электрическим током возможно от неисправных приборов, незаизолированных проводов, неисправных розеток</p> <p>Статическое электричество на рабочем месте возникает при прикосновении к любому элементу ПЭВМ.</p>

– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	
3. Экологическая безопасность: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	При данном виде деятельности имеется воздействие на литосферу в виде отходов, возникших при поломке ПЭВМ и других электроприборов, офисной мебели. Для обеспечения экологической безопасности необходимо сдавать негодное оборудование и мебель на переработку.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Наиболее вероятны – пожары вследствие замыкания электрической проводки, возгорания неисправного ПЭВМ, несоблюдения правил пожарной безопасности. Для предупреждения о возникновении пожара установлены речевые системы оповещения.
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	Трудовой кодекс РФ регулирует отношения между организацией и работниками, касающиеся заработной платы, выходных дней, предоставления отпуска, нормы продолжительности рабочего времени, особенности регулирования труда отдельных категорий граждан и др. Для решения организационных вопросов, необходимо обеспечить оптимальные условия для работы за ПЭВМ. Соблюдать все требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В.Ф.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5В	Естаев Е.Т.		

Оглавление

	стр.
Введение	10
1. Основные факторы, влияющие на надежность кабельных линий	12
1.1. Эксплуатационные факторы, влияющие на изоляцию	12
1.1.1. Старение изоляции вследствие ионизационных процессов	14
1.1.2. Тепловое старение изоляции	15
1.2. Энергетический баланс кабельной линии	16
1.3. Влияние собственного магнитного поля на потери в кабельной линии	18
2. Аналитическое исследование действия магнитного поля на изоляцию	20
2.1. Электромеханические процессы в кабельной линии	21
2.2. Определение напряжённости внешнего магнитного поля	25
2.2.1. Напряжённость магнитного поля при прокладке в плоскости	25
2.2.2. Напряжённость магнитного поля при расположении жил треугольником	27
2.3. Определение потерь от вихревых токов	33
3. Исследование влияния на изоляцию электродинамических усилий в силовом кабеле	40
3.1. Воздействия радиального, тангенциального и общего механических усилий на изоляцию	41
3.2. Определение общей электродинамической силы при симметричной токовой нагрузке	46
3.3. Определение мощности потерь по перемещению жил	49
3.3.1. Механическая мощность от радиальных составляющих электродинамических сил	50
3.3.2. Механическая мощность от тангенциальных	54

составляющих электродинамических сил	
4. Оценка удельных величин нагрузок на изоляцию силового кабеля	64
4.1. Механическое воздействие на изоляцию	64
4.1.1. Удельные силы при механической нагрузке	64
4.1.2. Зависимость удельной механической нагрузки на фазную изоляцию от диаметра кабеля	67
4.2. Тепловое воздействие на изоляцию	70
4.3. Оценка ресурса изоляции	74
4.3.1. Оценка степени дополнительного старения изоляции от действия собственного магнитного поля	78
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	82
5.1 Планирование научно-исследовательских работ	82
5.2 Смета затрат на проект	84
5.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы	87
5.4 Экономическая эффективность проекта	88
6 Социальная ответственность	91
6.1 Производственная безопасность	94
6.2 Экологическая безопасность	104
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.	106
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	111
Заключение	114
Список использованных источников	116
Приложение А	124

Введение

В последнее время происходит непрерывное увеличение количества подстанций и протяженности кабельных линий электропередачи (КЛ) 6 -10 кВ. Причиной до 80-90% отключений потребителей являются повреждения изоляции, поэтому исследования причин отказов с учетом анализа аварийности в целом для повышения надежности электроснабжения определено требованием времени. Электробезопасность – это система организационных мероприятий и средств, которые обеспечивают защиту людей от опасного воздействия электрических полей, дуги, электромагнитного поля и статического электричества. При этом характеристики изоляции в большей степени влияют на надёжность электроснабжения потребителей электрической энергии. В процессе длительной эксплуатации происходит старение изоляции, которое выражается в ухудшении её электрофизических характеристик. Несмотря на замену «старых» кабелей современными, например, с изоляцией из сшитого полиэтилена воздействие на изоляцию факторов, которые сокращают срок службы кабеля, останется прежними. Что в свою очередь и определяет необходимость изучения механизма воздействия на изоляцию факторов, обусловленных действием тока нагрузки КЛ.

При протекании электрического тока по токопроводящим жилам кабелей на изоляцию действуют не только электрические нагрузки, приводящие к потерям, но и механические силы, обусловленные законом Ампера.

Для качественной и количественной оценки остаточного ресурса изоляции необходимо применять методы математического моделирования работы КЛ под нагрузкой, что позволит учесть комплексное воздействие эксплуатационных и режимных факторов на изоляцию кабеля на этапах проектирования и испытания кабельной изоляции, и как следствие, позволит увеличить ресурс кабельных линий, снизить риск аварийных ситуаций.

Поэтому для оценки старения изоляции необходимо проведение исследований, направленных на рассмотрение КЛ как единого электромеханического объекта, подверженного действию собственных электрического и магнитного полей.

Цель работы – повышение эксплуатационной надежности силовых кабелей при рассмотрении кабельной линии как единого электромеханического объекта.

Задачи исследования

Цель работы диктует необходимость изучения вопросов старения изоляции под действием собственного магнитного поля, возникающего от тока нагрузки. Такое изучение даст практическую пользу – возможность предложить и обосновать методики расчёта активных потерь, входящих в единое уравнение энергетического баланса и разрушающих изоляцию кабеля посредством теплового потока, электрического и магнитного полей. Полученные расчётные соотношения позволят моделировать воздействие на изоляцию кабеля собственного магнитного поля на этапах проектирования и диагностики кабельной изоляции, что в свою очередь позволит увеличить надежность и ресурс кабельных линий и снизить риск аварийных ситуаций.

В связи с этим ставятся следующие основные задачи:

1. Выполнить аналитическое исследование магнитного поля, создаваемого трёхфазной кабельной линией при симметричной нагрузке и установить зависимость дополнительного старения изоляции кабеля от действия собственного магнитного поля по сравнению с токами утечки от электрического поля.

2. Установить аналитическую зависимость между токовой нагрузкой и механическими потерями от сил Ампера в изоляции силовых кабельных линий, с учётом геометрических размеров жил и их взаимного расположения.

3. Установить аналитическую зависимость величины удельной механической нагрузки на изоляцию трёхжильного кабеля от его геометрических размеров и величины тока нагрузки.

1 Основные факторы, влияющие на надежность кабельных линий

Электрическая изоляция, являясь одним из основных конструктивных материалов, обеспечивает как надежность электрооборудования, так и безопасное потребление электроэнергии. Исследования вопросов надежности изоляции показывают, что она является наиболее слабым элементом изделия [8].

Большинство эксплуатируемых в России кабельных линий (КЛ) на напряжение 6-10 кВ в настоящее время выполнены на основе трехжильных кабелей с бумажной попинанной изоляцией (БПИ) с общей металлической оболочкой. Современные КЛ организуются на основе трехжильных кабелей с изоляцией на основе сшитого полиэтилена либо трех одножильных кабелей, образующих трехфазную группу, располагающуюся в «плоскости» либо «треугольником».

При протекании по токопроводящим жилам (ТПЖ) кабельных линий тока возникает единое электромагнитное поле, которое имеет электрическую и магнитную составляющую. Магнитные поля являются причинами различного вида электрофизических явлений, которые приводят к потерям передаваемой энергии и оказывающих существенное влияние на работу кабельных линий [16,17,21,29,59,60]. Явления, такие как: потери в металлических не токоведущих элементах конструкций кабелей, электродинамические силы, приводящие к механическим воздействиям на кабели, прямое воздействие магнитных полей на токи утечки изоляции. Данные процессы, приводят к дополнительным активным потерям, обусловленным физическими явлениями, связанные с преобразованиями энергии, и в различной интенсивностью влияют на старение изоляции [2,30,31,32]. Таким образом, для увеличения ресурса работы изоляции необходимо рассматривать комбинированное воздействие различных факторов, как тепловых, так и механических.

1.1 Эксплуатационные факторы, влияющие на изоляцию

Электропроводность технических диэлектриков изоляции кабельных линий, обусловлена наличием небольшого количества свободных носителей зарядов, обусловленных наличием примесей, либо за счет химической, термической, радиационной, механической, электрической деструкции и фотодеструкции, возникающих в результате нагрева в процессе эксплуатации. В связи с чем передачу электрической мощности по КЛ сопровождаю процессы, приводящие к старению изоляции кабелей, которые носят многофакторный характер, обусловленный действием эксплуатационных факторов КЛ как тепловых, так и разнообразных растягивающих, сжимающих, раздавливающих, скручивающих и вибрационных механических нагрузок [38,41,42].

В процессе эксплуатации изоляция можно выделить следующие воздействующие факторы [1,5]:

электрические:

- длительно действующее рабочее напряжение при номинальных условиях;
- внутренние перенапряжения;
- грозовые перенапряжения;

тепловые:

- длительный нагрев (рабочий режим);
- перегрев (аварийный режим);

механические:

- длительные статические и переменные нагрузки (рабочий режим);
- вибрация;
- ударные механические нагрузки (аварийный режим);

окружающей среды:

- температура, влажность, давление;
- атмосферные осадки;

- агрессивные агенты окружающей среды или продуктов, образовавшихся в компонентах электрической изоляции (окислы азота, озон, хлористые и фтористые соединения и т.п.);

Данные воздействия в изоляции приводят к сложным процессам, приводящим к ухудшению свойств изоляции (уменьшению кратковременной электрической прочности, и ухудшению электрических характеристик и механических характеристик), т.е. её старение. Изменения свойств изоляции носят в большинстве случаев необратимый характер и завершаются пробоем.

Различают электрическое, тепловое и механическое старение изоляции. Основными причинами электрического и теплового старения изоляции являются:

- ионизационные процессы;
- тепловое старение.

1.1.1 Старение изоляции вследствие ионизационных процессов

Старение изоляции при воздействии электрического поля большой напряжённости происходит за счет развития частичных разрядов. Они представляют собой пробой отдельных слоёв или участков изоляции, толщина которых много меньше толщины изоляции.

Частичные разряды могут возникать в газовых включениях в толще изоляции. Это объясняется тем, что электрическая прочность газовых включений ниже, чем прочность жидкого или твёрдого диэлектрика, а напряжённость электрического поля в них при переменном напряжении выше, чем в твёрдом или жидком диэлектрике.

При частичных разрядах в твёрдых и жидких диэлектриках в отсутствие газовых включений особую роль приобретает эмиссия электронов с поверхности изолированной жилы. При этом в диэлектрик инжектируется заряд, приводящий к возникновению весьма высоких локальных напряжённостей. В области этих высоких напряжённостей порядка $5 \cdot 10^5$ В/см и

выше может, что приводит к частичному пробоям, приводящему к локальному разрушению изоляции жилы. Данные процессы в твёрдых диэлектриках приводят к возникновению древовидных триингов (дендритов), развитие которых в последующем происходит за счёт частичных разрядов в микротрещинах, заполненных газовой фазой [26].

Для повышения экономической эффективности использования материалов кабеля необходимо повышать максимальную допустимую рабочую температуру жилы. Возможность увеличения температуры ограничивается термостойкими свойствами изоляции, так как с повышением температуры ускоряются процессы термического старения и последующего её разрушения. Для органической изоляции термическое старение проявляется в ряде химических процессов: окислении, деструкции, полимеризации и поликонденсации т.д.. В результате этих реакций снижается механическая прочность и гибкость изоляционных материалов, возникают трещины, что приводит к ионизационным процессам и необратимому снижению длительной электрической прочности изоляции [3].

Повышение температуры не только существенно увеличивает скорость протекания ионизационных процессов, но и является самостоятельным фактором, влияющим на старение изоляции.

1.1.2 Тепловое старение изоляции

При нагреве в изоляции протекают различные химические реакции, которые приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов и, как следствие, к ухудшению свойств изоляции в целом. Эти процессы определяют тепловое старение [5].

Тепловое разрушение диэлектрика происходит по двум основным механизмам.

- в результате нарушения условия «теплового баланса», т.е. равновесия между теплом, выделяющимся в объёме изоляции, и теплом,

отводимым в окружающую среду. Нарушение равновесия приводит к повышению температуры диэлектрика и заканчивается его термическим разрушением - пробоем.

- при устойчивом равновесии между выделенным и отведенным теплом, возможен значительный перегрев локальных областей изоляции, в результате чего возникает местное термическое разрушение материала изоляции [23].

Увеличение температуры катализирует окислительные процессы, в результате чего образуются органические кислоты, альдегиды, смолы и кетоны. Проводимость и диэлектрические потери изоляции увеличиваются, а электрическая прочность снижается. Рост диэлектрических потерь приводит к дополнительному нагреву изоляции и увеличению темпов старения [33].

Повышение температуры выше допустимых значений ведет к значительному снижению ее механической прочности, т.е. изоляция кабеля становится хрупкой и при механических воздействиях легко повреждается, в результате чего может произойти ее пробой [9].

1.2 Энергетический баланс кабельной линии

При передаче электроэнергии по КЛ в кабеле возникают активные потери, обусловленные физическими процессами, связанными с преобразованиями энергии, которая может быть двух видов: механическая и тепловая. При воздействии на микрочастицы рассматривается только механическая энергия.

Мощность – это изменение энергии в единицу времени. На диаграмме (рисунок 1) указаны активные мощности, которые определяют эффективность передачи электроэнергии:

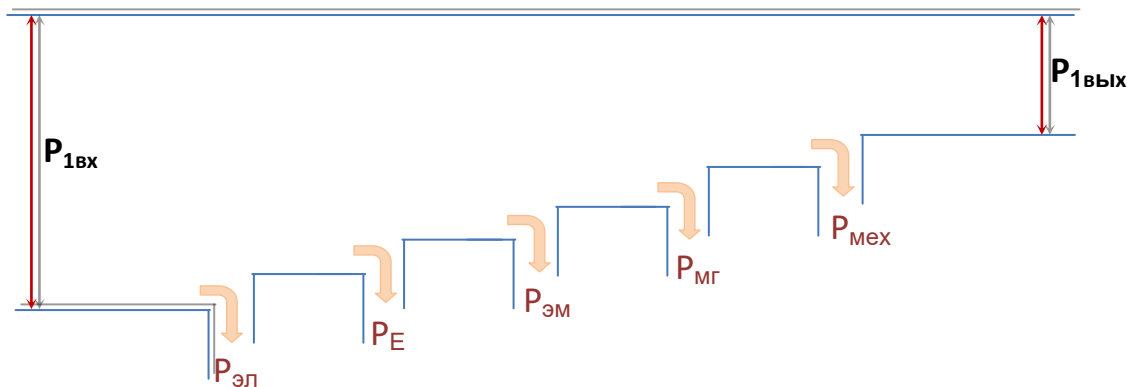


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма потерь в кабеле

$P_{1вх}$ - входная активная мощность, потребляемая кабелем от источника питания; $P_{эл}$ - мощность, выделяющаяся в ТПЖ; P_E - мощность диэлектрических потерь, обусловленная емкостными токами утечки и процессами поляризации; $P_{эм}$ - электромагнитная мощность, обусловленная действием магнитного поля на токи утечки, отклоняющую частицы от прямолинейного движения и заставляющую их совершать спиралевидное движение с общим направлением перемещения вдоль силовых линий электрического поля; $P_{мг}$ - мощность магнитных потерь в металлических не токоведущих частях кабеля: защитной оболочке, броне, проволочном экране; $P_{мех}$ - механическая мощность, обусловленная электродинамическими силами жил кабеля от токов нагрузки и воздействующая на изоляцию кабеля в виде вибраций.

Все потери являются активными и в различной степени влияют на старение кабельной изоляции.

Мощность потерь в ТПЖ:

$$P_{эл} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

преобразуется в тепловой поток [45, 90]

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{h} \cdot S \cdot t \quad (2)$$

изменение которого в единицу времени представляет собой активную мощность:

$$P_Q = \frac{dQ}{dt} \quad (3)$$

Здесь Q - количество теплоты, переданное через конструктивный элемент толщиной h , с площадью S при создании разности температур ΔT за время t , λ - коэффициент теплопроводности материала.

Процессы теплового старения изоляции подробно исследованы, например, в [18,41,42,48,49,53], но необходимо отметить, что физические процессы старения изоляции под действием теплового поля и механических сил различны.

1.3 Влияние собственного магнитного поля на потери в кабельной линии

Под действием переменного магнитного поля кабеля в металлической оболочке (проволочном экране) возникают дополнительные (магнитные) потери $P_{об}$, которые оцениваются через коэффициент потерь ($Y_{об}$) - отношение указанных потерь к электрическим потерям в жиле $P_{ж}$ [15]:

$$P_{мг} = P_{ж} \cdot Y_{об} \quad (4)$$

Коэффициент рассчитывается по выражению:

$$Y_{об} = \frac{R_{об}}{R_{ж}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{об}}{X}\right)} \quad (5)$$

где $R_{об}$ - электрическое сопротивление металлической оболочки (проволочного экрана) кабеля на единицу длины; $R_{ж}$ - активное сопротивление токопроводящей жилы на единицу длины; X - сопротивление взаимной индукции на единицу длины оболочки, определяемое по формуле:

$$X = 0.029 \cdot f \cdot \ln \left(\frac{2a}{D_{об}} \right) \quad (6)$$

Здесь a - расстояние между центрами ТПЖ; $D_{об}$ - диаметр оболочки (экрана); f - частота тока в жиле.

Для определения влияния механических колебаний от электродинамических усилий $P_{мех}$ на ресурс изоляции можно воспользоваться

теорией Старка и Гордона [51]: пробой полимеров вызывается электростатическими силами сжатия, под действием которых упругий полимерный диэлектрик сдавливается электродом с удельной силой на единицу поверхности. Данная сила определяется выражением:

$$F_{y0} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma^2}{8\pi \cdot d_1^2} \quad (7)$$

Здесь ε - относительная продольная деформация; σ - механическое напряжение; d_1 - уменьшенная (равновесная) толщина диэлектрика.

За счёт действия силы F_{y0} толщина диэлектрика уменьшается настолько, что происходит чисто электрический пробой, когда будет достигнута критическая напряжённость поля. В соответствии с законом Гука для больших напряжений критерием разрушения будет являться условие:

$$\frac{\varepsilon \cdot \sigma^2}{8\pi \cdot d_1^2} = Y \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d_1}\right) \quad (8)$$

где d_0 - начальная толщина изоляции; Y - модуль Юнга.

Решая уравнение (8) относительно d_1 , определяется, максимальное значение произведения $d_1^2 \cdot \ln(d_0/d_1)$:

$$\frac{d_0}{d_1} = \exp(-0.5) = 0.6 \quad (9)$$

При значении $d_1 < 0.6 \cdot d_0$ толщина изоляции не стабильна, наступает старение материала из-за механической деформации (продавливания). В месте продавливания, напряжённость электрического поля резко возрастает и происходит развитие разряда за счёт ударной ионизации. Напряжённость поля, отвечающая данному условию равна:

$$E_B = 3 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{4\pi \cdot Y}{\varepsilon}\right)^{0.5} \quad (10)$$

Кажущаяся напряженность электрического поля без учета деформации:

$$E_A = \frac{U}{d_0} = E_B \cdot \exp(-0.5) \quad (11)$$

В кабельных линиях вместо электростатической силы сжатия, определяемой уравнением (7) действует электромагнитная сила, определяемая законом Ампера, под действием которой изменяется состояние как фазной, так

и поясной изоляций. Магнитное поле кабеля связано как с взаимным расположением жил относительно друг друга, так и с параметрами токовой нагрузки, поэтому необходимо рассматривать эксплуатационные и режимные факторы, влияющие на состояние изоляции.

2 Аналитическое исследование действия магнитного поля на изоляцию

Особенности характера электрического поля и его напряжённости в различных точках трёхфазного кабеля достаточно хорошо исследованы [16,22]. Известно, что данное поле не радиальное, вращается и напряжённость поля на поверхности жилы изменяется от точки к точке. Сила электрического поля, действующая на свободные заряды в различных точках трёхфазного силового кабеля, обусловлена величиной напряжения, толщиной изоляции и конфигурацией электрических проводящих поверхностей, между которыми проходят силовые линии электрического поля. Действие электрического поля на свободные носители зарядов в изоляции приводит к возникновению токов утечки [14,15], а поляризационные процессы смещения связанных зарядов до момента установления равновесного состояния - к появлению токов смещения, которые обусловлены изменением потока вектора электрического смещения и определяются состоянием электрического поля.

Вид и интенсивность магнитного поля существенно зависят от геометрического расположения проводников кабельной линии и магнитных свойств пространства, в котором существует это поле.

Для трёхжильных силовых кабелей в общей металлической оболочке (с общим проволочным экраном) или имеющих ленточную стальную броню. За счет взаимной компенсации магнитных полей от токов в трёхфазной системе, равных по значению и сдвинутых по фазе на 120 градусов, потери в броне или экране сравнительно невелики. Сумма мгновенных значений магнитных потоков, создаваемых токами жил, в любой момент времени равна нулю.

Полная компенсация магнитных наблюдается при совпадении в одной точке осей всех трёх проводников, что в реальных конструкциях невозможно. Однако в целом эти потери для указанных случаев незначительны.

Рассмотрим далее воздействие магнитного поля на изоляцию кабеля с учётом характера магнитного поля, создаваемого жилами трёхфазного силового кабеля.

Для примера проведения сравнительных расчётов влияния магнитного поля на изоляцию силовых кабелей рассмотрены три типа кабельных линий на напряжение 10 кВ и сечением жилы 240 мм²:

A2XSEY 3×240RM/25-10 трёхжильный силовой кабель с круглыми многопроволочными медными ТПЖ, изоляция из сшитого полиэтилена с общим медным проволочным экраном сечением 25мм² [47];

АПвП 1×240/25-10 одножильный силовой кабель с круглыми многопроволочными медными ТПЖ, изоляция из сшитого полиэтилена с медным проволочным экраном сечением 25мм² [46];

ААШв 3×240-10 трёхжильный силовой кабель с секторными медными ТПЖ, изоляция БПИ и общей алюминиевой оболочкой [16].

2.1 Электромеханические процессы в кабельной линии

Согласно [20,25,59], электромеханический преобразователь энергии - устройство, осуществляющее взаимное преобразование электрической и механической энергии. Это преобразование происходит через поле, существующее в среде; которая заполняет пространство между взаимодействующими частями преобразователя. Средой является воздух или вещество с заданными магнитными или электрическими свойствами как, например, электротехническая сталь в электрической машине [20, 25]. С этой точки зрения трёхжильный кабель, жилы которого подвержены воздействию сил Ампера, относится к электромеханическому преобразователю,

осуществляющему частичное преобразование энергии, потребляемой из сети, в механические колебания жил.

При передаче электроэнергии в силовом кабеле возникают активные потери, обусловленные физическими процессами, связанными с преобразованиями энергии. Энергия может быть двух видов: механическая и тепловая.

При выводе основных расчётных соотношений, связывающих тепловые и механические параметры, в уравнении энергетического баланса [59,49], целесообразно принять следующее упрощающее допущение: полная мощность, потребляемая кабелем от источника питания ($P_{вх}$) делится на мощность, передаваемую потребителю ($P_{1вых}$), выделяемую в ТПЖ ($P_{эл}$) на активном сопротивлении жилы, механическую мощность ($P_{мех}$), обусловленную электродинамическими усилиями и мощность, связанная с изменением энергии магнитного поля (P_{ω}).

Суммарная активная мощность, обусловленная действием электрического поля (P_E) и мощность, обусловленную действием магнитного поля на токи утечки ($P_{эм}$) и на магнитные потери в металлической оболочке (экране) кабеля ($P_{мг}$). Суммарная мощность рассматривается как дополнительные потери в жиле ($P_{дон}$), обусловленные дополнительным эквивалентным активным сопротивлением ($R_{экв}$), так как эти потери не связаны с изменением индуктивности жилы при протекании тока нагрузки.

Схема замещения одножильного кабеля либо изолированной ТПЖ трехжильного кабеля по пути протекания тока нагрузки, может быть представлена в виде (Рисунок 2):

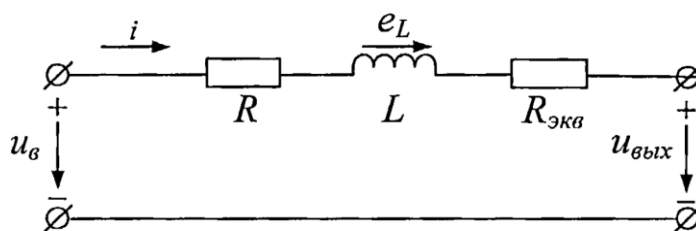


Рисунок – 2 Схема замещения кабеля (изолированной ТПЖ)

Для данной схемы замещения выражение в мгновенных значениях имеет вид:

$$e_L = -u_g + i \cdot (R + R_{\text{экв}}) + u_{\text{вых}} \quad (11)$$

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} \quad (12)$$

$\frac{d\psi}{dt}$ – изменение потокосцепления во времени, обусловленное индуктивностью ТПЖ; u_g – входное напряжение; $i \cdot R$ – падение напряжения на активном сопротивлении ТПЖ; $i \cdot R_{\text{экв}}$ – падение напряжения на эквивалентном сопротивлении; $u_{\text{вых}}$ – напряжение на нагрузке

Потокосцепление равно произведению полной индуктивности ТПЖ L и тока нагрузки i :

$$\psi = L \cdot i \quad (13)$$

Электромагнитный момент, возникающий при изменении энергии магнитного поля, определяется выражением:

$$M = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (14)$$

$\frac{dL}{d\theta}$ – изменение полной индуктивности ТПЖ при отклонении её на угол θ от нейтрального положения, при гармонических колебаниях, за счет сил Ампера.

Учитывая выражение 13 производная потокосцепления по времени имеет вид:

$$\frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (15)$$

Тогда уравнение 11 с учетом 15 и 12 примет вид:

$$u_{\text{вых}} - u_g = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} + i \cdot R + i \cdot R_{\text{экв}} \quad (16)$$

или

$$\Delta u = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} i \cdot \frac{dL}{dt} + i^2 \cdot R + i^2 \cdot R_{\text{экв}} \quad (17)$$

Угловая частота колебаний ТПЖ определяется через угол отклонения жилы от нейтрального положения:

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad (18)$$

Тогда уравнение (17) примет вид:

$$i \cdot \Delta u = i \cdot L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} \omega_m \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} + i^2 \cdot R + i^2 \cdot R_{экр} \quad (19)$$

или

$$\Delta P = P_{мех} + P_{эл} + P_{\omega} + P_{дон} \quad (20)$$

Здесь

$\Delta p = i \cdot \Delta u$ - изменение полной мощности одной жилы;

$P_{мех} = \frac{1}{2} \omega_m \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}$ - мгновенное значение механической мощности

жилы, обусловленной электродинамическими силами от токов нагрузки;

$P_{эл} = i^2 \cdot R$ - мгновенное значение мощности, выделяемой на активном сопротивлении жилы;

$P_{\omega} = i \cdot L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt}$ - мгновенное значение мощности, связанной с изменением энергии магнитного поля;

$P_{дон} = i^2 \cdot R_{экр} = (P_E + P_{эм} + P_{мг})$ - мгновенное значение мощности, дополнительных потерь, обусловленных действием электрического и магнитного полей на токи утечки и вихревые токи.

Мощность P_{ω} необходима для поддержания магнитного поля в индуктивно связанных жилах кабеля при протекании переменного тока с учётом изменяющейся индуктивности. Учитывая гармонический характер изменения тока и индуктивности жил, данная мощность является мерой интенсивности обмена энергией между жилой и источником питания.

Механические и дополнительные потери от действия магнитного поля на токи утечки, а также магнитные потери в оболочке (экране) входят в единое уравнение энергетического баланса (20) и при определении эффективности передачи электрической энергии от источника к потребителю поэтому рассматриваются совместно, несмотря на различный характер физического воздействия на изоляцию.

Процесс поляризации в изоляции необходимо рассматривать с учётом собственного магнитного поля от тока нагрузки, которое увеличивает активные потери, обусловленные током утечки через изоляцию силового кабеля и

приводит к дополнительному старению изоляции кабеля от действия собственного магнитного поля по сравнению со старением от токов утечки, обусловленных действием электрического поля на свободные заряды в диэлектрике. А так же необходимо учитывать изменение магнитного поля вне кабеля при различном взаимном расположении жил (кабелей в КЛ).

2.2 Определение напряжённости внешнего магнитного поля

Индукция магнитного поля связана с напряжённостью через магнитную постоянную μ_a (для не магнитной среды μ_o) [13, 51]. Поэтому при определении значений магнитного поля рассматривается параметр напряжённости поля от токов в жилах кабеля. Одножильные кабели могут располагаться в КЛ треугольником или в плоскости [57].

2.2.1 Напряжённость магнитного поля при прокладке в плоскости

Напряжённость магнитного поля в произвольной точке, расположенной над жилой фазы В при расположении жил кабелей в плоскости, как показано на (Рисунок 3).

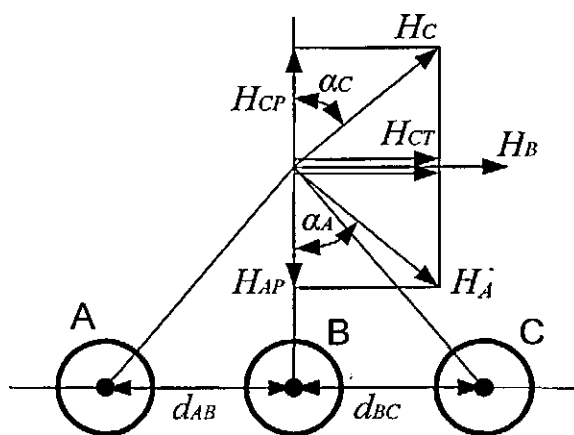


Рисунок - 3 Векторная диаграмма напряжённостей магнитного поля в произвольной точке пространства над средней жилой В при расположении жил в плоскости

Определение напряженности (H) осуществляется исходя из закона полного тока [13,51] и принципа суперпозиции полей, создаваемых проводниками с током, расположенными в линейной, в магнитном отношении, среде. То есть напряжённость поля, в точке, удаленной на расстоянии x от центра проводника, по которому протекает ток, можно определить по формуле:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot x} \quad (21)$$

При расчёте напряжённости поля используются следующие обозначения:

$R_A(R_B, R_C)$ - расстояние от жилы фазы А (В, С) до точки пространства, в которой определяется напряжённость поля;

$d_{AB}(d_{BC})$ - расстояние между осями жил фаз А и В (В и С);

$\alpha_A(\alpha_C)$ - угол между линиями, на одной из которых находятся оси жил фаз А, В и С, а другая соединяет ось жилы фазы А (С) с точкой, в которой определяется напряжённость поля.

Вектор напряжённости поля совпадает с вектором магнитной индукции и направлен по касательной к линии магнитного поля, поэтому при выбранном положительном направлении токов в жилах, вектора напряжённостей поля в произвольной точке расположенной над жилой фазы В будут направлены так, как показано на рисунке 3 и для углов будут выполняться соотношения:

$$tg\alpha_A = \frac{R_B}{d_{AB}}; \quad (22)$$

$$tg\alpha_C = \frac{R_B}{d_{BC}} \quad (23)$$

Откуда

$$\alpha_A = arctg\left(\frac{R_B}{d_{AB}}\right); \quad (24)$$

$$\alpha_C = arctg\left(\frac{R_B}{d_{BC}}\right) \quad (25)$$

Для определения общего вектора напряжённости поля необходимо определить радиальную составляющую суммы проекций всех векторов напряжённостей поля на ось, соединяющую жилу фазы В с исследуемой

точкой, и тангенциальную составляющую проекций этих векторов на ось, перпендикулярную радиальной оси.

Радиальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы С:

$$H_{Crad} = H_C \cdot \cos(\alpha_C) \quad (26)$$

Радиальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы А:

$$H_{Arad} = H_A \cdot \cos(\alpha_A) \quad (27)$$

Сумма радиальных составляющих векторов напряжённости поля в исследуемой точке:

$$H_{рад} = H_{Cрад} - H_{Aрад} \quad (28)$$

Положительное значение общей радиальной составляющей от жилы фазы В к внешней стороне кабеля.

Тангенциальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы С:

$$H_{Cтан} = H_C \cdot \sin(\alpha_C) \quad (29)$$

Тангенциальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы А:

$$H_{Атан} = H_A \cdot \sin(\alpha_A) \quad (30)$$

Сумма тангенциальных составляющих векторов напряжённости поля в исследуемой точке:

$$H_{тан} = H_{Cтан} + H_{Атан} + H_B \quad (31)$$

Общий вектор напряжённости поля в точке определяется как корень квадратный из суммы квадратов радиальной и тангенциальной составляющих векторов:

$$H = \pm \sqrt{H_{рад}^2 + H_{тан}^2} \quad (32)$$

2.2.2 Напряжённость магнитного поля при расположении жил треугольником

Жилы трёхфазного силового кабеля могут располагаться по углам равностороннего треугольника. Для расчёта напряжённости магнитного поля в произвольной точке использован принцип наложения и закон полного тока.

Напряжённость магнитного поля в произвольной точке, расположенной над жилой фазы В при расположении жил силового кабеля по углам равностороннего треугольника, как показано на рисунке 4.

При расчёте напряжённости поля от трёх жил кабеля, расположенных по углам равностороннего треугольника дополнительно к принятым выше примем следующие обозначения:

R_m - расстояние от центра кабеля до точки пространства, в которой определяется напряжённость поля;

O_1 - расстояние от центра кабеля до линии, соединяющей центры соседних жил фаз А и С;

$\alpha_A(\alpha_C)$ - угол между линиями, на одной из которых находятся оси жил фаз А и С, а другая соединяет ось жилы фазы А (С) с точкой, в которой определяется напряжённость поля.

R - расстояние от центра кабеля до центра жилы.

Вектор напряжённости поля совпадает с вектором магнитной индукции и направлен по касательной к линии магнитного поля, поэтому при выбранном положительном направлении токов в жилах, вектора напряжённостей поля в произвольной точке расположенной над жилой фазы В будут направлены так, как показано на рисунке 4 и для углов будут выполняться соотношения:

$$tg\alpha_A = \frac{R_m + O_1}{d_{AB}}; \quad (33)$$

$$tg\alpha_C = \frac{R_m + O_1}{d_{BC}}. \quad (34)$$

Откуда

$$\alpha_A = arctg\left(\frac{R_m + O_1}{d_{AB}}\right); \quad (35)$$

$$\alpha_C = arctg\left(\frac{R_m + O_1}{d_{BC}}\right). \quad (36)$$

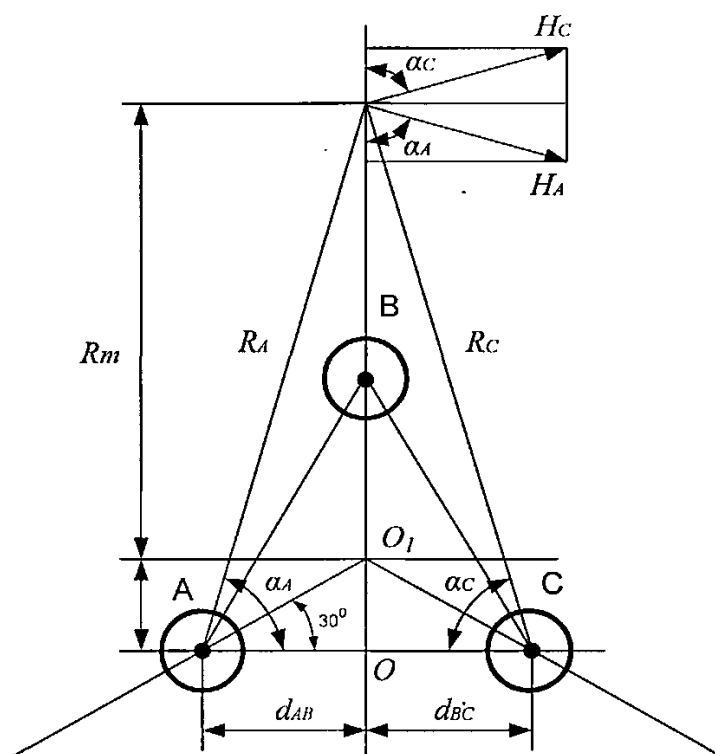


Рисунок - 4 Векторная диаграмма напряжённостей магнитного поля в произвольной точке пространства над жилой фазы В при расположении жил по углам равностороннего треугольника.

Расстояние от центра кабеля до линии, соединяющей центры соседних жил и расстояние между осями жил, рассчитывается по формулам:

$$O_1 = R \cdot \sin(30^\circ); \quad (37)$$

$$d_{AB} = d_{BC} = R \cdot \cos(30^\circ). \quad (38)$$

Расстояние от каждой жилы до точки пространства, в которой определяется напряжённость поля:

$$R_A = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_A)}; \quad (39)$$

$$R_B = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_B)}; \quad (40)$$

$$R_C = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_C)}. \quad (41)$$

Для определения общего вектора напряжённости поля необходимо определить радиальную составляющую суммы проекций всех векторов напряжённостей поля на ось, соединяющую жилу фазы В с исследуемой точкой, и тангенциальную составляющую проекций этих векторов на ось, перпендикулярную радиальной оси.

Радиальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы А:

$$H_{Arad} = H_A \cdot \cos(\alpha_A) \quad (42)$$

Радиальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы С:

$$H_{Crad} = H_C \cdot \cos(\alpha_C) \quad (43)$$

Радиальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы В равна нулю.

Сумма радиальных составляющих векторов напряжённости поля в исследуемой точке:

$$H_{rad} = H_{Crad} - H_{Arad} \quad (44)$$

Положительное значение общей радиальной составляющей от жилы фазы В к внешней стороне.

Тангенциальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы С:

$$H_{Ctan} = H_C \cdot \sin(\alpha_C) \quad (45)$$

Тангенциальная составляющая напряжённости поля от тока жилы фазы А:

$$H_{Atan} = H_A \cdot \sin(\alpha_A) \quad (46)$$

Сумма тангенциальных составляющих векторов напряжённости поля в исследуемой точке:

$$H_{tan} = H_{Ctan} + H_{Atan} + H_B \quad (47)$$

Общий вектор напряжённости поля в точке определяется как корень квадратный из суммы квадратов радиальной и тангенциальной составляющих векторов по формуле (32).

Расчёты напряжённости магнитного поля для различных типов кабельных линий, представлены зависимости от расстояния до исследуемой точки (рисунок 6 и рисунок 7) и в зависимости от тока нагрузки на удалении от центра кабеля 500 мм (рисунок 8). В качестве номинальной токовой нагрузки для всех трёх типов кабелей принимается 300 А - длительно допустимая

токовая нагрузка в земле для кабеля марки ААШв 3×240-10 [22]. В расчётах, в соответствии с требованиями ТУ по условиям охлаждения, принято расположение одножильных кабелей марки АПвП 1×240/25-10 вплотную при прокладке треугольником (треуг), и с расстоянием между поверхностями жил, равным диаметру кабеля при прокладке в плоскости (ряд).

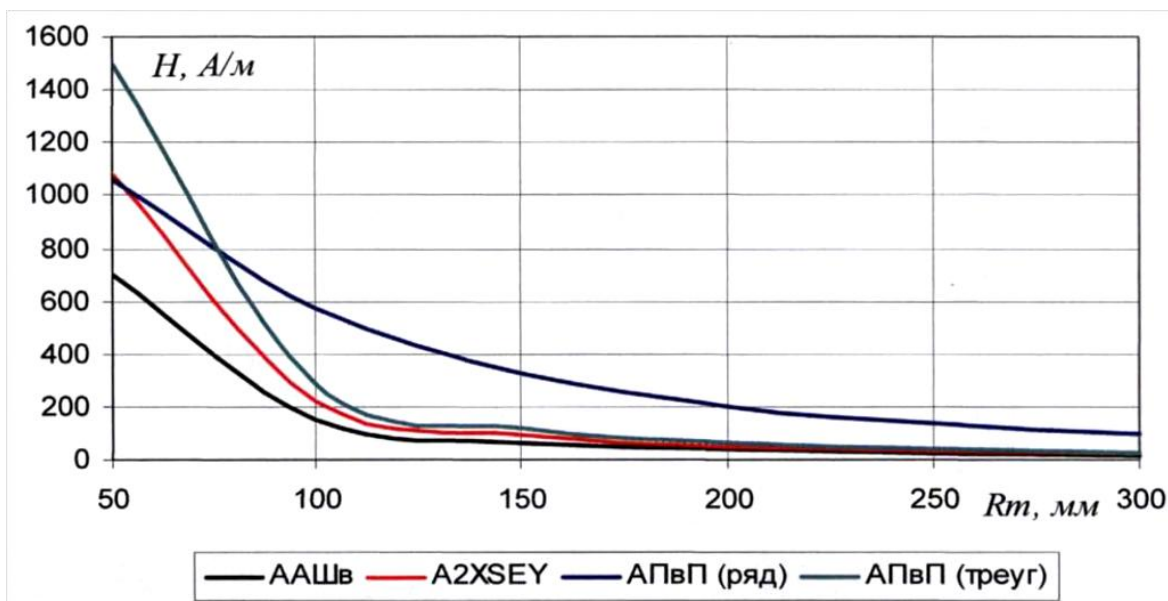


Рисунок - 6 Напряжённость магнитного поля при токе в жиле 300 А для различных типов кабельных линий в зависимости от расстояния до центра кабеля в диапазоне 50-300 мм

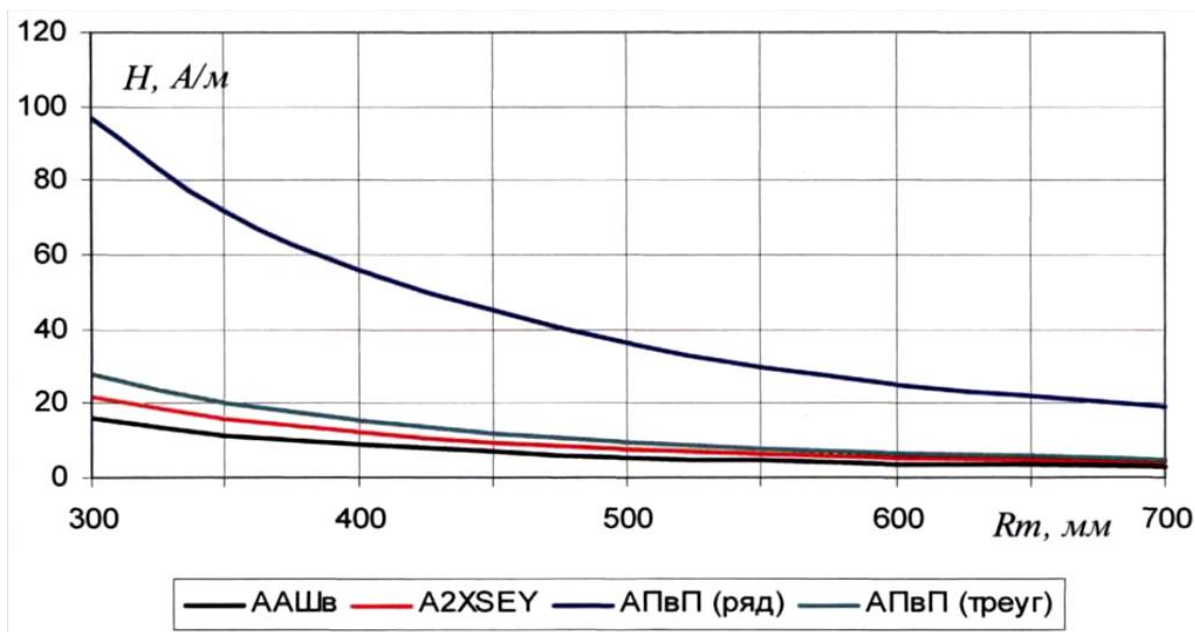


Рисунок - 7 Напряжённость магнитного поля при токе в жиле 300 А для различных типов кабельных линий в зависимости от расстояния от центра кабеля в диапазоне 300-700 мм

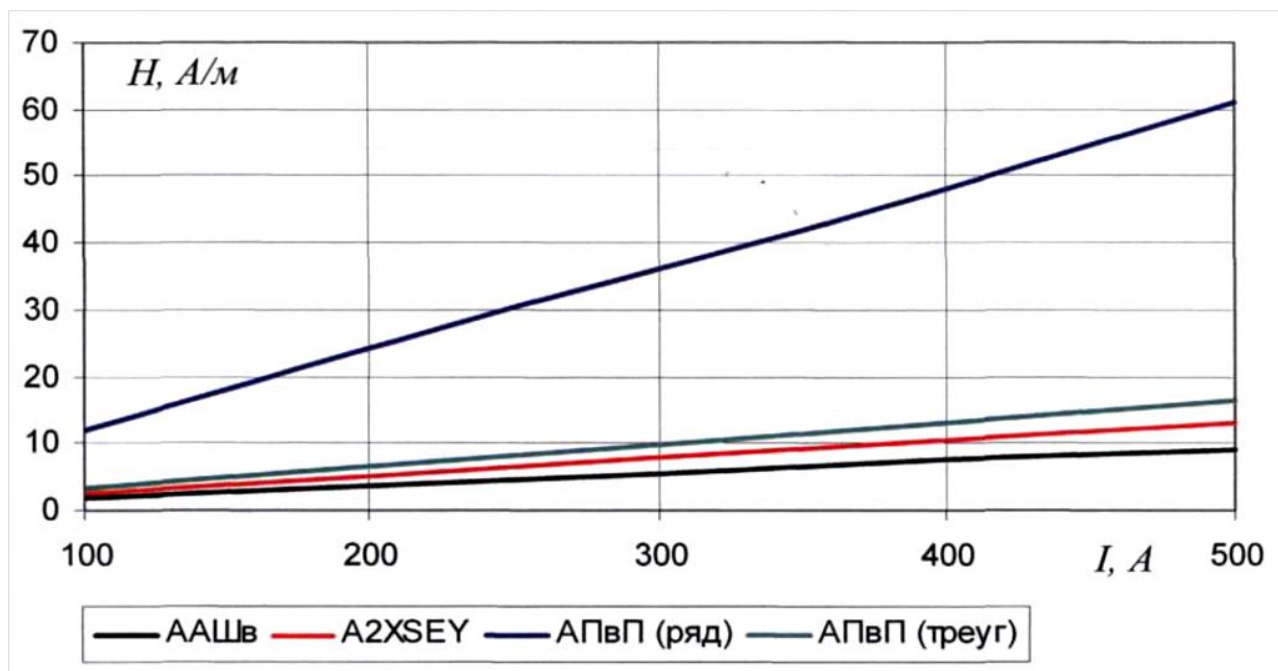


Рисунок - 8 Напряжённость магнитного поля для различных типов кабельных линий в зависимости от тока в жиле на удалении 500 мм до центра кабеля

Предельно допустимые уровни напряжённости периодического (синусоидального) магнитного поля установлены в [65] для условий общего и локального воздействия.

Сравнение результатов расчётов напряжённости магнитного поля с нормативными данными показало, что на удалении 500 мм от центра кабеля, соответствующему минимальной глубине укладки кабеля, все три типа кабельных линий укладываются в требования ПДУ по длительному воздействию. Однако, при нагрузке 300 А, на расстоянии 150 мм все рассмотренные в примере кабельные линии создают напряжённость магнитного поля выше минимально допустимого уровня 80 А/м. При этом, наихудшие показатели в отношении ПДУ наблюдаются при укладке одножильных кабельных линий марки АПвП проложенных в плоскости. Напряжённость магнитного поля такой кабельной линии при допустимой нагрузке будет превышать предельно допустимую норму при длительном воздействии (больше

8 часов) на расстоянии от 330 мм и менее от центра кабеля. Это объясняется снижением взаимной компенсации магнитных полей соседних жил при расположении последних в ряд.

Таким образом, прокладку кабельных линий для обеспечения минимальной напряженности магнитного поля рекомендовано выполнять прокладку треугольником. При прокладке в плоскости напряжённость внешнего магнитного поля возрастает в несколько раз. Для одножильного кабеля марки АПвП 1×240/25-10 при номинальном токе 300 А напряжённость магнитного поля при прокладке в плоскости на удалении 100 мм от центральной жилы кабеля будет в 2 раза выше, чем при прокладке треугольником. А на удалении 700 мм, при той же нагрузке, - в 3.8 раза выше.

2.3. Определение потерь от вихревых токов

Процесс возникновения магнитных потерь в оболочке кабеля от действия магнитного поля, обусловлен электрическим полем и связан с действием определённого вида поля на свободные заряды в металлической оболочке кабеля.

Для исследования процесса возникновения магнитных потерь в оболочке кабеля, входящих в состав дополнительных потерь в схеме замещения рисунок 1, необходимо рассмотреть контур замыкания силовых линий магнитного поля, проходящих через центр кабеля и вдоль средней части металлической оболочки (экрана).

Проходящий вдоль указанного направления переменный магнитный поток, в соответствии с законом Ленца создаёт вихревые токи, суммарный магнитный поток которых препятствует изменению основного потока. Направление замыкания контура вихревого тока должно быть таким, чтобы создаваемый им магнитный поток был направлен соосно с основным потоком (рисунок 9).

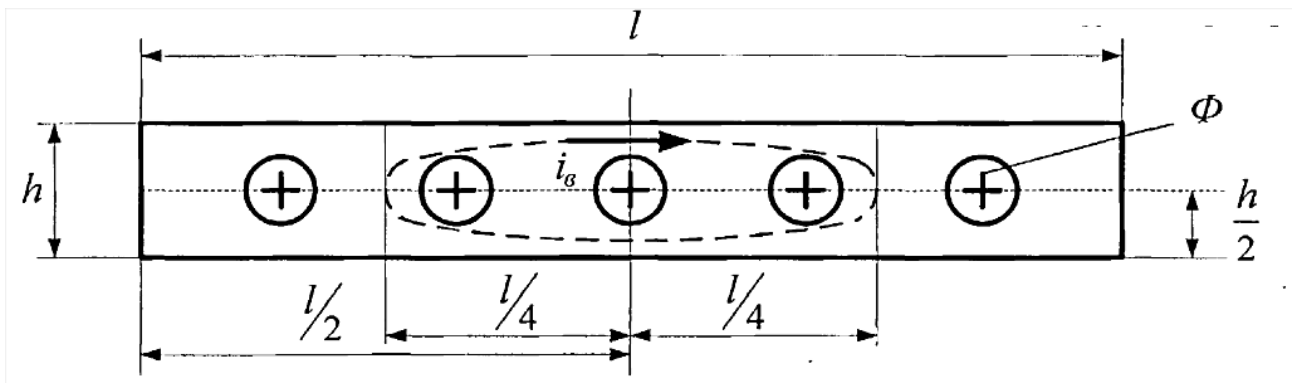


Рисунок - 9 Контур замыкания вихревого тока в оболочке (экране) кабеля

Таким образом, вихревые токи замыкаются внутри металлической оболочки (экрана) по контуру вдоль оси кабеля. Для расчёта вихревых токов необходимо уточнить значение индукции в оболочке кабеля, обусловленной магнитным потоком.

Магнитная проводимость среды по линии замыкания магнитного потока:

$$\Lambda_{\delta} = \mu\mu_0 \cdot \frac{S}{l_{cp}} \quad (48)$$

где Λ_{δ} - магнитная проводимость среды по контуру замыкания средней силовой линии магнитного поля; S — площадь поперечного сечения контура замыкания магнитного потока; $\mu\mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость; l_{cp} — длина средней силовой линии, проходящей по замкнутому контуру через центр кабеля и вдоль средней части металлической оболочки (экрана) длиной l (рисунок 9).

По закону Ома, для магнитных цепей амплитудное значение магнитного потока в сечении оболочки:

$$\Phi_m = F_{m3} \cdot \Lambda_{\delta} \quad (49)$$

Среднее значение полуволны магнитного потока при синусоидальном перемагничивании определяется выражением [14]:

$$\Phi_{cp} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \Phi_m \quad (50)$$

В соответствии с [20], действующее значение электродвижущей силы (ЭДС) в контуре замыкания элементарного витка:

$$E_B = 4.44 \cdot f \cdot \Phi_{cp} \quad (51)$$

f – частота перемагничивания.

Среднее значение индукции в сечении оболочки:

$$B_{cp} = \Phi_{cp} \cdot S \quad (52)$$

Определение магнитных потерь от вихревых токов правомерно выполнять по средней силовой линии магнитного потока.

Расчёт контура замыкания вихревого тока i_B (рисунок 9) по средней длине элементарного проводника, по которому протекает вихревой ток определяется выражением:

$$i_B = 2 \left(\frac{l}{4} + \frac{l}{4} \right) = l \quad (53)$$

Площадь сечения элементарного проводника:

$$S_{эл} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\pi D_{cp}}{2} \quad (54)$$

где D_{cp} – средний диаметр оболочки кабеля, определяется как полуразность наружного и внутреннего диаметров оболочки (экрана).

Активное сопротивление элементарного витка, рассчитанное по средней длине контура замыкания вихревого тока:

$$R_B = \rho_{Me} \cdot \frac{l}{S_{эл}} \quad (55)$$

где ρ_{Me} – удельное электрическое сопротивление материала оболочки (экрана)

Суммарный ток, протекающий по оболочке в результате действия ЭДС элементарного витка E_B :

$$I_B = \frac{E_B}{R_B} \quad (56)$$

Магнитные потери от вихревого тока в половине оболочки

$$P_{мг} = I_B^2 \cdot R_B \quad (57)$$

Расчёт магнитных потерь в медном проволочном экране кабеля, создаваемых вихревыми токами от вращающегося магнитного поля показывает,

что для кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 при нагрузке 300 А, средние значения полувольт магнитного потока и магнитной индукции в сечении оболочки составят 13.5мВб и 4.6мТл, соответственно. При этих же данных индукция в поясной изоляции составляет 5.1мТл, а действующее значение тока, протекающего в экране кабеля А2ХСЕУ в результате действия ЭДС вихревых токов, составит 14.7А. При этом магнитные потери в экране – 79.4Вт.

Расчётная величина магнитных потерь по данной методике в зависимости от длительно допустимого тока нагрузки для кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 представлена на рисунке 10

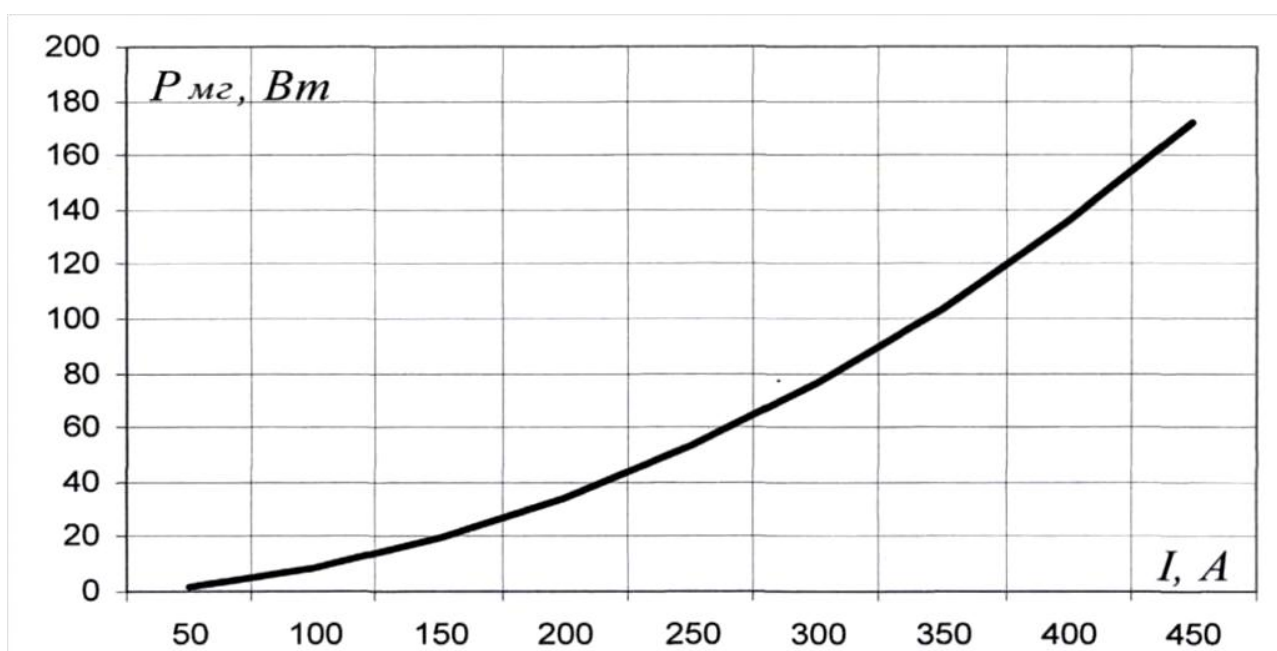


Рисунок – 10 Зависимость магнитных потерь в проволочном экране кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 от длительно допустимого тока нагрузки

Для допустимых условий кратковременной перегрузки кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 по данным [47] в таблице 1 представлены расчётные данные магнитных потерь и отношение этих потерь к потерям от токов утечки под действием электрического поля.

Таблица 1 Магнитные потери кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 при кратковременной перегрузке

Наименование параметра	Значение параметра				
Допустимый ток, А	4000	8000	12000	16000	20000
Расчётные магнитные потери, кВт	13.6	54.3	122.1	217	339.1
Нормативное время воздействия, с	26.42	6.60	2.94	1.65	1.06
Отношение магнитных потерь к потерям от токов утечки ($P_E = 130 \text{ Вт}$)	107	424	954	1695	2649
Расчётные магнитные потери при нормативном времени воздействия, кВт×час	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

При нагрузке 300А для кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 потери в медном проволочном экране составляют 60% от потерь токов утечки. А при кратковременных перегрузках превышают их в несколько раз.

Самая напряжённая точка в магнитном отношении находится, между жилами кабеля. Для определения магнитного потока в этой точке применение методики расчёта по средней силовой линии может привести к значительным погрешностям, так как вся среда является изотропной в магнитном отношении и определение средней силовой линии является затруднительным. Поэтому для расчёта магнитного потока в наиболее напряжённой точке воспользуемся рекомендациями [90].

Индуктивность длинной двухпроводной линии на единицу длины можно приблизительно рассчитать по формуле [50]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{d_o - R_{жс}}{R_{жс}} \right) \quad (58)$$

где d_o - расстояние между осями ТПЖ; $R_{жс}$ - радиус ТПЖ.

Для рассмотренного выше кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 при радиусе сечения круглого провода – 8.75 мм, расстоянии между центрами жил - 23 мм, индуктивность L составит 0.193 мГн/км.

Среднее значение магнитного потока между жилами кабеля, в общем случае, создаваемого магнитодвижущей силой трёх жил, можно определить по формуле, полученной с учётом выражений (49) и (50):

$$\Phi_{ср} = \frac{2}{\pi} \cdot F_{тз} \cdot \Lambda \cdot l_{жс} \quad (59)$$

где $l_{жс}$ - длина ТПЖ.

Здесь полная проводимость магнитной цепи Λ для потока, протекающего между двумя жилами на единицу длины, будет равна индуктивности, рассчитанной по формуле (58).

Для рассчитанной индуктивности на 1 км длины кабеля при токе 300А, среднее значение магнитного потока между жилами составит 79 мВб.

Среднее значение магнитной индукции при расстоянии между поверхностями соседних жил $l_э$, рассчитывается по формуле:

$$B_{ср} = \frac{\Phi_{ср}}{l_э \cdot l_{жс}} \quad (60)$$

При расчётном среднем значении магнитного потока и расстоянии между жилами равном двойному значению фазовой изоляции – 3.5 мм, среднее значение магнитной индукции составит 16 мТл.

Полученная величина магнитной индукции между жилами является средней за полуволну синусоиды и её размерность соответствует размерности индукции, полученной при расчёте по методу средней силовой линии магнитного потока, что косвенно подтверждает достоверность полученных результатов расчёта индукции в оболочке и в поясной кабельной изоляции.

Выводы

1. С точки зрения процесса создания магнитного поля, работу трёх жил в кабеле под нагрузкой можно рассматривать как действие трёх одновитковых катушек, подключенных к сети переменного тока, по каждой из которых протекает ток равный половине тока в жиле.

2. Показано, что при протекании в кабеле трёхфазного переменного тока по жилам, расположенным по углам равностороннего треугольника, внутри кабеля создаётся круговое вращающееся поле аналогичное полю, создаваемому в электрических машинах переменного тока. Его форму можно представить изображающим суммарным вектором, вращающимся относительно центра кабеля в направлении, обусловленном порядком чередования фаз.

3. Расчёт магнитных потерь в оболочке кабеля, создаваемых вихревыми токами от вращающегося магнитного поля показывает, что для кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 и нагрузки 300 А, величина магнитных потерь (79 Вт) составляет 32 % от потерь токов утечки. А при кратковременных перегрузках (например, 4000 А) потери в проволочном экране превышают потери от токов утечки в 57 раз. Такие потери обусловлены степенной зависимостью активных потерь от наведённых токов в оболочке (экране) кабеля. Самая напряжённая точка в магнитном отношении находится между жилами кабеля.

4. Наличие магнитного поля увеличивает износ изоляции в рабочих режимах на несколько процентов, по сравнению с износом от действия электрического поля. При этом, за время действия устройств релейной защиты при протекании токов двух и трёхфазного короткого замыкания, кабель будет испытывать разрушающее воздействие от магнитного поля, соизмеримое с действием электрического поля. При протекании тока перегрузки (4000 А) в кабеле А2ХСЕУ 3×240/25-10, доля активных потерь в диэлектрике от действия магнитного поля по сравнению с электрическим полем составит 59 %.

3 Исследование влияния на изоляцию электродинамических усилий в силовом кабеле

Известно [12,51], что под влиянием тока, протекающего по жилам кабеля, между ними появляется сила, которая стремится оттолкнуть их друг от друга в том случае, когда направление токов обеих жилах одинаковое, и сблизить, когда токи в жилах текут в противоположных направлениях. Эта сила обусловлена действием закона Ампера для магнитного взаимодействия двух проводников с токами. Исследования [17,63,64] показали, что данная сила зависит как от силы тока в кабеле, так и от взаимного геометрического положения жил.

В соответствии с законом Ампера [45, 60], сила, действующая на участок прямолинейного проводника с током i_1 длиной $l_{жс}$ со стороны длинного прямолинейного проводника с током i_2 , расположенного параллельно первому на расстоянии d от него, равна:

$$F = \mu_0 \mu \cdot i_1 \cdot i_2 \frac{l_{жс}}{2\pi d} \quad (61)$$

где

μ – относительная магнитная проницаемость среды;

Уравнение электродинамической силы можно представить в виде:

$$F_{1,2} = C \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (62)$$

Здесь постоянная величина $C = \mu_0 \mu \cdot \frac{l_{жс}}{2\pi d}$ [Гн/м].

В случае трехфазного кабеля с расположением жил по углам равностороннего треугольника, при протекании тока нагрузки между жилами возникают электродинамические силы, подчиняющиеся гармоническому закону, обусловленному временными характеристиками распределения трехфазного тока и пространственным распределением векторов упомянутых сил. Покажем, что механические колебания жил кабеля от электродинамических усилий вызывают активные потери $F_{мех}$, входящие в

общий энергетический баланс кабельной линии (19) и зависящие от геометрического положения жил.

Определение аналитических зависимостей для расчёта механических потерь в изоляции силовых кабельных линий от электродинамических усилий, обусловленных силами Ампера, выполнено при допущениях:

- плотность среды, в которой происходят колебания жил, принимается равной плотности воздуха (не учитывается упругость среды при механических колебаниях);
- действие индивидуальных экранов жил не влияет на электромеханическое взаимодействие между жилами, так как наведённые токи в экранах меньше токов в жилах;
- нагрузка в жилах кабеля симметрична;
- плотность тока в жиле равномерна по всему сечению проводника.

Под действием симметричного трёхфазного тока, протекающего по жилам кабеля, появляются радиальные силы, сумма которых создает вращающийся общий вектор силы с постоянной амплитудой, действие которого направлено от центра кабеля к оболочке. При этом общие механические потери от колебаний трёх жил представляют собой сумму потерь от тангенциальных колебаний каждой жилы и колебаний от общего вращающегося вектора радиальной силы.

3.1 Воздействия радиального, тангенциального и общего механических усилий на изоляцию

Известны уравнения тангенциальной и радиальной составляющих электродинамической силы, действующей на одну жилу кабеля со стороны соседних жил при протекании по ним трёхфазного переменного тока [12]. Учитывая, что в основе теоретического обоснования механических потерь от электродинамических усилий лежат уравнения сил Ампера, необходимо установить зависимости данных сил, действующих на каждую жилу, от

параметров тока и взаимного положения жил в кабеле при выбранных положительных направлениях векторов сил и угле фазового смещения токов в жилах.

Положительные направления действия сил на каждую жилу приняты от центра кабеля к оболочке (экрану) и от последующей жилы к предыдущей. Направление чередования фаз приняты по часовой стрелке. Положительные направления векторов суммарных сил, действующих на вторую жилу со стороны первой F_{21} и третьей F_{23} , а также вектора сил, действующих на третью жилу со стороны первой F_{31} и второй F_{32} .

Учитывая принятые положительные направления действия сил, будут выполняться соотношения:

$$F_{13} = F_{31}; F_{12} = F_{21}; F_{32} = F_{23}; \quad (63)$$

Рассмотрение усилий, которые будут действовать вдоль радиальных осей, проходящих от центра кабеля к оболочке (экрану) через центры каждой жилы в зависимости от фазового угла ωt показывает, как изменяется сила сжатия изоляции между жилой и оболочкой (экраном) при протекании в кабеле трехфазного переменного тока.

Общий вектор радиального усилия, действующего на каждую фазу, будет складываться из проекций на радиальную ось векторов сил, действующих от соседних жил.

В общем случае, суммарный вектор радиальной силы, действующей на первую жилу F_{p1} будет складываться из суммы проекций векторов сил, действующих на первую жилу со стороны второй F_{12} со стороны третьей F_{13} жил:

$$F_{p1} = F_{12} \cdot \cos(30^\circ) + F_{13} \cdot \cos(30^\circ) \quad (64)$$

Аналогичные соотношения можно записать для суммарных векторов сил, действующих на вторую и третью жилы - F_{p2} и F_{p3} , соответственно.

Учитывая синусоидальный характер токов в фазах и симметричное расположение жил, рассмотрено действие электродинамических усилий

носящих гармонический характер. При этом положительный полупериод действия радиальных сил F_{p1} , F_{p2} и F_{p3} , будет указывать на процесс сжатия изоляции между каждой жилой и оболочкой кабеля.

Зависимость сил, действующих вдоль основных радиальных осей от фазового угла ωt определяется путем введения в уравнения электродинамических сил мгновенных значений токов:

$$F_{p1} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t); \quad (65)$$

$$F_{p2} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \left(\sin(\omega t) - \sqrt{3}\cos(\omega t)\right)^2; \quad (66)$$

$$F_{p3} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \left(\sin(\omega t) + \sqrt{3}\cos(\omega t)\right)^2 \quad (67)$$

Электродинамические усилия, действующие между жилами, имеют не только радиальную, но и тангенциальную составляющую, обусловленную проекцией основных сил на оси, перпендикулярные радиальным осям.

За положительные направления действия основных сил между жилами приняты те же направления, что и при рассмотрении радиальных усилий. Общий вектор тангенциальной силы, действующей на каждую фазу, будет складываться из проекций на тангенциальную ось векторов сил, от соседних жил.

В общем случае, суммарный вектор тангенциальной силы, действующей на первую жилу F_{m1} , складывается из суммы проекций векторов сил, действующих на первую жилу со стороны второй F_{12} и со стороны третьей F_{13} жил:

$$F_{1m} = (F_{12} - F_{13}) \cdot \cos(60^\circ); \quad (68)$$

Аналогичные соотношения можно записать для суммарных векторов сил, действующих на вторую и третью жилы.

Для сил, действующих вдоль тангенциальных направлений, проходящих перпендикулярно радиальным осям жил 1, 2, 3 после подстановки выражений токов в каждой фазе и последующих тригонометрических преобразований, получим уравнения:

$$F_{m1} = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \sin(2\omega t); \quad (69)$$

$$F_{m2} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot (\sin(2\omega t) - \sqrt{3}\cos(2\omega t)); \quad (70)$$

$$F_{m3} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot (\sin(2\omega t) - \sqrt{3}\cos(2\omega t)). \quad (71)$$

Радиальная и тангенциальная составляющие представляют собой проекции на взаимно перпендикулярные оси общей силы, действующей на каждую жилу со стороны соседних жил при протекании тока нагрузки. Вектор общей силы, в общем случае, будет равен квадратному корню из суммы квадратов проекций на радиальную и тангенциальную оси:

$$F_{об} = \sqrt{F_p^2 + F_m^2} \quad (72)$$

После подстановки значений проекций и проведения тригонометрических преобразований, получены уравнения для общих сил, действующих на каждую жилу со стороны соседних жил:

$$F_{1об} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \sin(\omega t); \quad (73)$$

$$F_{2об} = -\frac{\sqrt{3}}{4} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot (\sqrt{3}\cos(\omega t) - \sin(\omega t)); \quad (74)$$

$$F_{3об} = -\frac{\sqrt{3}}{4} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot (\sqrt{3}\cos(\omega t) + \sin(\omega t)). \quad (75)$$

В качестве примера, на рисунке 11 представлены графики радиальной, тангенциальной составляющих и общей силы для первой жилы, рассчитанные по приведенным выше формулам для нагрузки 300А на 1км длины кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10.

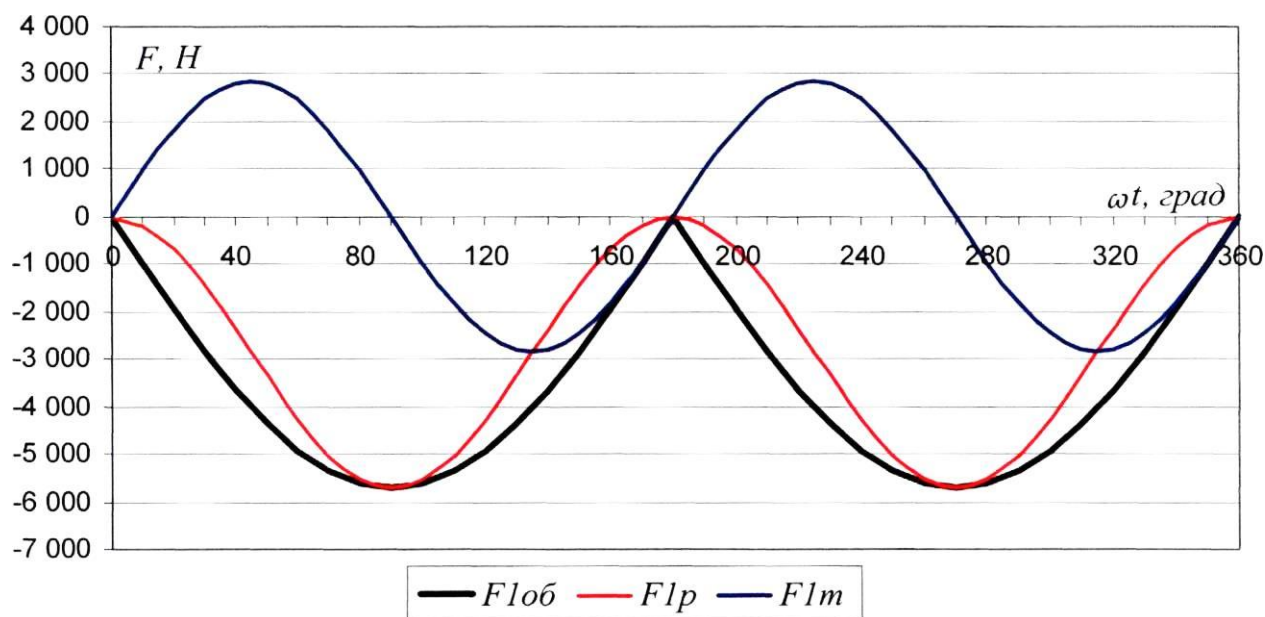


Рисунок - 11 Радиальная (красный цвет), тангенциальная (синий цвет) составляющие и общее усилие (чёрный цвет), действующее на жилу «1» в зависимости от фазового угла тока нагрузки

На рисунке 12 представлены графики общих усилий, действующих на все три жилы кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 при той же нагрузке.

Таким образом, каждая жила кабеля, при принятых допущениях, подвержена воздействию общей силы, направленной внутрь кабельной линии. При этом, тангенциальные силы носят строго гармонический характер, а радиальные силы действуют на жилы совместно, под углом 120 град и имеют временной фазовый сдвиг. Радиальные силы, действуя совместно, создают общую силу, направленную от центра кабеля к его внешней оболочке, вектор которой вращается в направлении, обусловленном чередованием фаз.

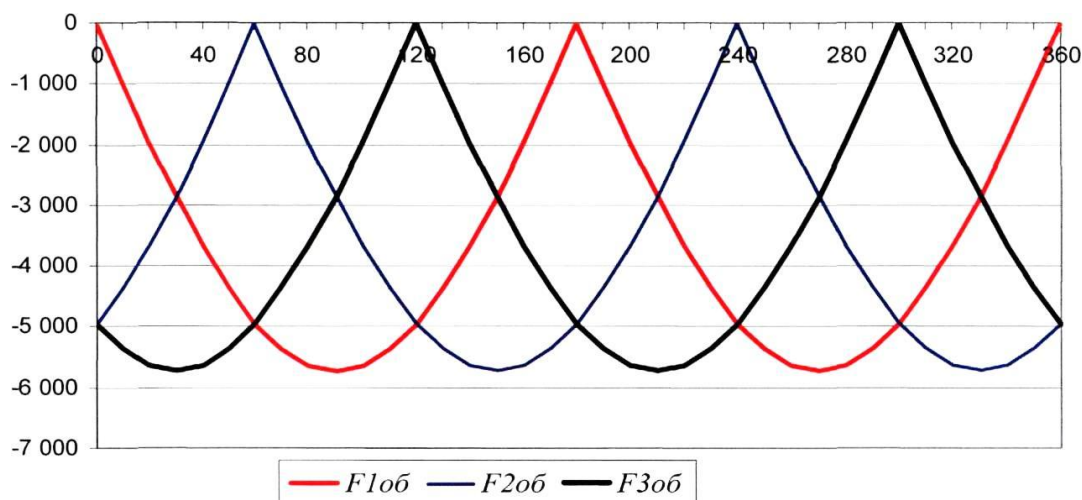


Рисунок - 12 Общие усилия, действующие на первую (красный цвет), вторую (синий цвет) и третью (чёрный цвет) жилы кабеля в зависимости от фазового угла тока нагрузки

3.2 Определение общей электродинамической силы при симметричной токовой нагрузке

Согласно уравнений радиальных проекций сил (73-75), радиальные воздействия каждой жилы направлены к центру кабеля. Для оценки одновременного воздействия радиальных усилий всех трех жил при протекании по ним тока нагрузки необходимо рассмотреть общее радиальное усилие от действий трёх жил в зависимости от пространственного угла развёртки кабеля. Необходимо выполнить сложение векторов радиальных усилий отдельных жил для различных значений фазового угла тока нагрузки от 0° до 150° с шагом 30° .

При этих значениях уравнения радиальных усилий примут вид

1. $\omega t = 0^\circ, \sin(\omega t) = 0, \cos(\omega t) = 1$ (рисунок 13а)

$$F_{p1} = 0; F_{p2} = -\frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p3} = -\frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2. \quad (76)$$

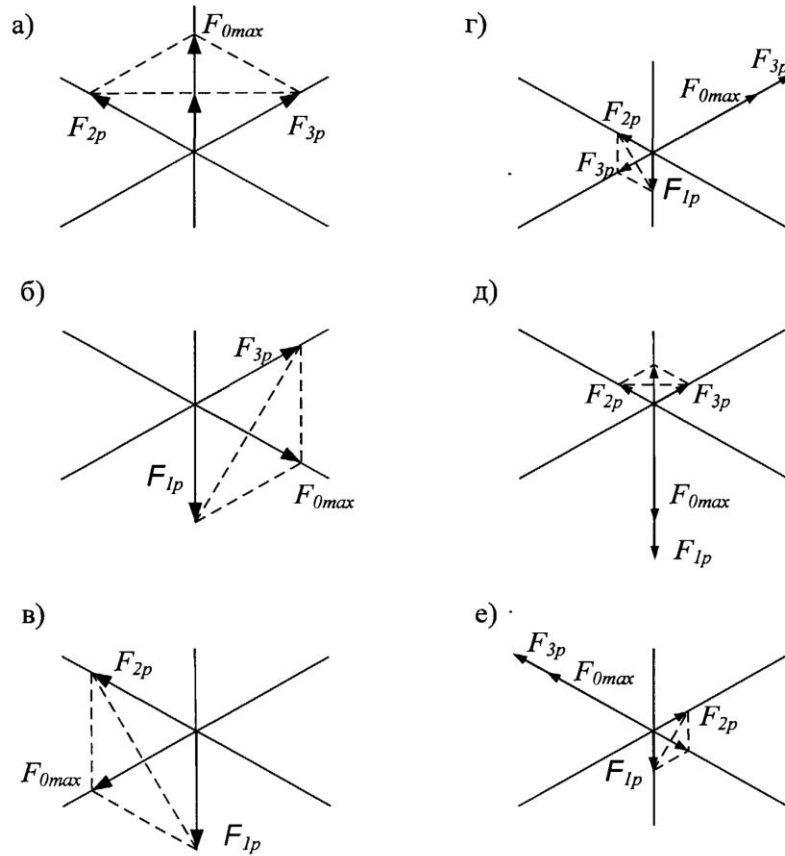


Рисунок - 13 Направление суммы векторов радиальных усилий в зависимости от фазового угла тока нагрузки

2. $\omega t = 30^\circ, \sin(\omega t) = 0.5, \cos(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{2}$ (рисунок 13Г)

$$F_{p1} = \frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p2} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p3} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2. \quad (77)$$

Учитывая, что силы F_{p1} и F_{p2} равны и направлены к центру кабеля, то их равнодействующая сила будет направлена вдоль оси жилы «3» и противоположна силе F_{p3} по знаку. Сумма векторов радиальных составляющих всех трех жил равна:

$$F_{o_max} = -(F_{p1} - F_{p2}) \cdot \cos(60^\circ) + F_{p3} \quad (78)$$

и направлена вдоль оси жилы «3» от центра кабеля к оболочке (экрану).

Угол вектора суммарной силы оси жилы «1» составляет 60° .

3. $\omega t = 60^\circ, \sin(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{2}, \cos(\omega t) = \frac{1}{2}$ (рисунок 13б)

$$F_{p1} = -\frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p2} = 0; F_{p3} = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2. \quad (79)$$

4. $\omega t = 90^\circ, \sin(\omega t) = 1, \cos(\omega t) = 0$ (рисунок 13д)

$$F_{p1} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p2} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p3} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2. \quad (80)$$

Учитывая, что силы F_{p1} и F_{p3} равны и направлены к центру кабеля, то их равнодействующая сила будет направлена вдоль оси жилы «3» и противоположна силе F_{p2} по знаку. Сумма векторов радиальных составляющих всех трех жил равна

$$F_{o_max} = F_{p1} - (F_{p2} + F_{p3}) \cdot \cos(60^\circ) \quad (81)$$

и направлена вдоль оси жилы «3» от центра кабеля к оболочке. Угол вектора суммарной силы относительно оси жилы «1» составляет 180° .

5. $\omega t = 120^\circ, \sin(\omega t) = \frac{\sqrt{3}}{2}, \cos(\omega t) = -\frac{1}{2}$ (рисунок 13в)

$$F_{p1} = -\frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p2} = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p3} = 0. \quad (82)$$

6. $\omega t = 150^\circ, \sin(\omega t) = \frac{1}{2}, \cos(\omega t) = -\frac{\sqrt{3}}{2}$ (рисунок 13е)

$$F_{p1} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot C \cdot I_m^2; F_{p3} = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2. \quad (83)$$

Учитывая, что силы F_{p1} и F_{p3} равны и направлены к центру кабеля, то их равнодействующая сила будет направлена вдоль оси жилы «2» и противоположна силе F_{p2} по знаку.

Сумма векторов радиальных составляющих всех трех жил равна

$$F_{o_max} = F_{p2} - (F_{p1} + F_{p3}) \cdot \cos(60^\circ) \quad (84)$$

и направлена вдоль оси жилы «2» от центра кабеля к оболочке. Угол вектора относительно точки отсчета оси жилы «1» будет составлять 300° .

В первом случае сумма векторов радиальных сил второй и третьей жил будет направлена по оси жилы «1» в сторону от центра кабеля через центр жилы к оболочке (рисунок 13а). Значение суммы:

$$F_{o_max} = (F_{p2} + F_{p3}) \cdot \cos(60^\circ) \quad (85)$$

Так как в первом случае $F_{p2} = F_{p3}$, а $\cos(60^\circ) = 0.5$, то

$$F_{o_max} = \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \quad (86)$$

Такое же значение суммы векторов радиальных сил будет в третьем и в пятом случаях. Однако, в третьем случае вектор F_{o_max} будет направлен по оси жилы «2» (рисунок 13б), а в пятом случае - по оси жилы «3» (рисунок 13в) по направлению от центра кабеля через центр соответствующей жилы к оболочке.

Таким образом, при каждом значении фазового угла ωt вектор F_{o_max} занимает определенное пространственное положение.

Проекция вращающегося вектора на ось жилы «1»:

$$F_p = F_{o_max} \cdot \cos(2\omega t) \quad (87)$$

С учётом выражения силы F_{o_max} из (86), суммарное радиальное усилие, действующее на жилу кабеля со стороны всех жил при симметричной нагрузке, определяется через амплитудное значение тока I_m и его фазовый угол ωt по формуле:

$$F_p = \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \cos(2\omega t) \quad (88)$$

Постоянная величина C , входящая в формулу, представлена выше, при исследовании тангенциальных сил.

При протекании тока нагрузки каждая жила подвергается воздействию радиальных, тангенциальных и общих сил, действующих по направлению к центру кабеля. Сумма радиальных сил создаёт вращающийся суммарный вектор с постоянной амплитудой F_{o_max} , действие которого направлено от центра кабеля к оболочке, а частота вращения равна удвоенной частоте тока. Кроме того, от совместного действия трёх жил на фазную изоляцию, между жилами кабеля действуют силы сжатия, деформирующие изоляцию в радиальном направлении к металлической оболочке. Одновременно сила F_p будет сжимать изоляцию, деформируя ее между жилами и оболочкой кабеля.

3.3 Определение мощности потерь по перемещению жил

Под действием электродинамических сил жилы кабеля совершают колебательные движения. Для установления влияния на процесс старения

изоляции силового кабеля от электродинамических усилий необходимо определить количественную оценку активной мощности, выделяемой при гармонических колебаниях жил.

Известно [50], что возможны два качественно различных способа передачи движения и соответствующей ему энергии от одного макроскопического тела к другому - в форме работы и в форме теплоты (путем теплообмена).

Передача энергии в форме работы производится в процессе силового взаимодействия тел, т.е. работы сил, приложенных к этому телу со стороны всех других (внешних) тел, с которыми оно взаимодействует. Работа, совершаемая над телом, может непосредственно пойти на увеличение любого вида энергии этого тела.

3.3.1 Механическая мощность от радиальных составляющих электродинамических сил

Из второго закона Ньютона для линейного перемещения следует, что ускорение, возникающее при перемещении жилы кабеля под воздействием радиальной составляющей электродинамической силы F_p определяется через значение этой силы и массы жилы m по формуле:

$$a = \frac{F_p}{m} \quad (89)$$

Ускорение характеризует быстроту изменения во времени вектора скорости перемещения жил:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (90)$$

а линейная скорость быстроту изменения расстояния между жилами:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (91)$$

Здесь v - линейная скорость перемещения каждой жилы вдоль радиальной оси; s - расстояние, на которое отклоняется жила при воздействии

на неё радиальной составляющей электродинамической силы, относительно её положения в нейтральном состоянии (рисунок 14).

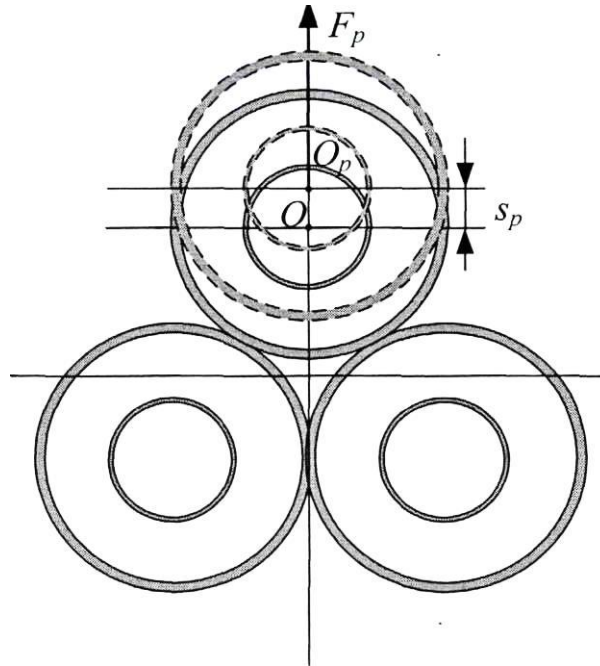


Рисунок - 14 Положительное направление отклонения жилы «1» от нейтрального состояния под действием радиальной силы

Из уравнения ускорения (90) следует:

$$v = \int a \cdot dt \quad (92)$$

Тогда, с учетом выражения (89), уравнение линейной скорости перемещения жилы под действием радиальной силы:

$$v = \frac{1}{m} \int F_p \cdot dt \quad (93)$$

Подставив уравнение (88) радиальной силы в выражение скорости (92) и проведя интегрирование с учетом преобразования:

$$\int \cos(2\omega t) \cdot dt = \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t) \quad (94)$$

уравнение скорости перемещения жилы вдоль радиальной оси кабеля под действием суммарной радиальной силы от трёх жил:

$$v = \frac{3\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{1}{\omega \cdot m} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \sin(2\omega t) \quad (95)$$

В общем случае, расстояние s_p , на которое жила перемещается в радиальном направлении под действием переменной составляющей радиальной силы определяется по формуле

$$s_p = \int v_n \cdot dt \quad (96)$$

С учетом (85) расстояние s_p :

$$s_p = -\frac{3\sqrt{3}}{32} \cdot \frac{1}{\omega^2 \cdot m} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \cos(2\omega t) \quad (97)$$

Мощность силы электромагнитного воздействия при линейном перемещении жилы, в соответствии с [45], определяется произведением силы на скорость перемещения:

$$P_p = F_p \cdot v_n \quad (98)$$

Выражение мощности (98) подставляется в (85) с учетом уравнения радиального усилия (88), мгновенное значение мощности, выделяемой при совершении работы по перемещению жилы под действием общей радиальной силы:

$$F_p = 0.211 \cdot \frac{1}{\omega \cdot m} \cdot C^2 \cdot I_m^4 \cdot \sin(2\omega t) \cdot \cos(2\omega t) \quad (99)$$

После преобразований с учетом рекомендаций [71]:

$$2 \cdot \sin(2\omega t) \cdot \cos(2\omega t) = \sin(4\omega t) \quad (100)$$

выражение мощности:

$$P_p = 0.105 \cdot \frac{1}{\omega \cdot m} \cdot C^2 \cdot I_m^4 \cdot \sin(4\omega t) \quad (101)$$

В качестве примера рассмотрим влияние радиальных электродинамических сил на изоляцию кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10. Для симметричной нагрузки жил 300А скорость перемещения первой жилы, величина отклонения s_p и механическая мощность P_p , обусловленная радиальной вибрацией трёх жил кабеля в зависимости от фазового угла тока нагрузки будут такими как показано на рисунок 15 и рисунок 16.

Таким образом, радиальные колебания, обусловленные суммарным радиальным вращающимся вектором электромагнитных сил кабеля вызывают

механические потери, значение которых в номинальных режимах составляет 10% от действия электрического поля на токи утечки (240Вт). В режимах кратковременных перегрузок, например, 4000А при допустимом времени воздействия 26,4 секунды, мощность радиальных перемещений достигает значений 517 кВт на 1км длины кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10, что может привести к механическому разрушению кабельной изоляции.

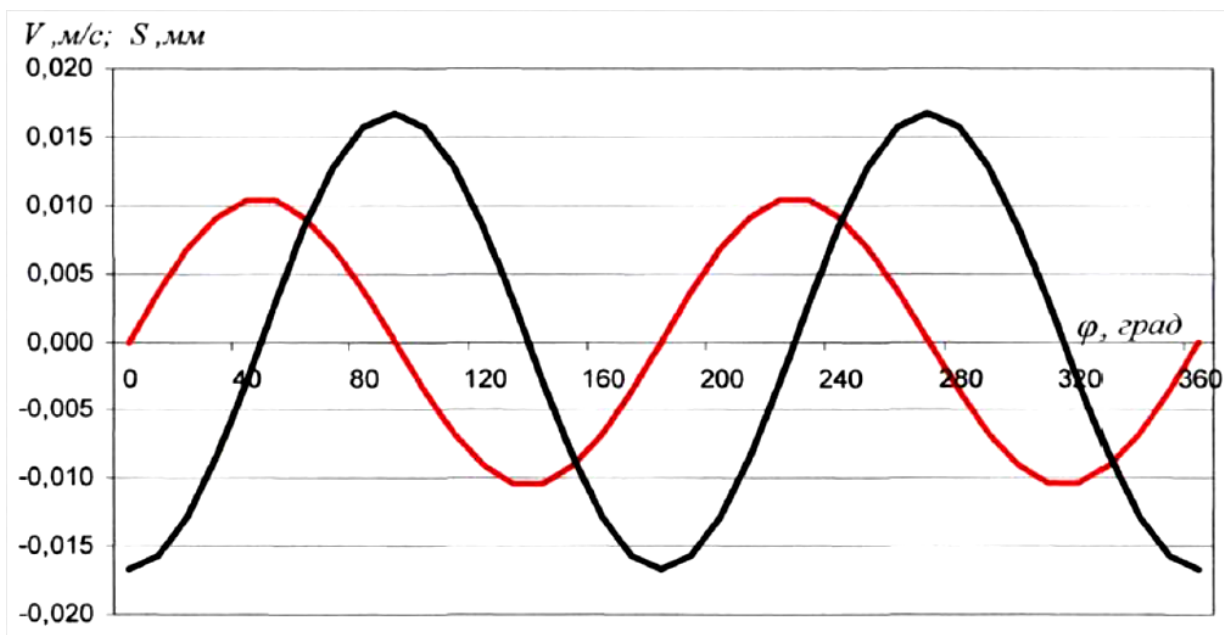


Рисунок - 15 Скорость перемещения (красный цвет) и расстояние радиального отклонения жил от нейтрального состояния (чёрный цвет) в зависимости от фазового угла тока нагрузки 300А кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10

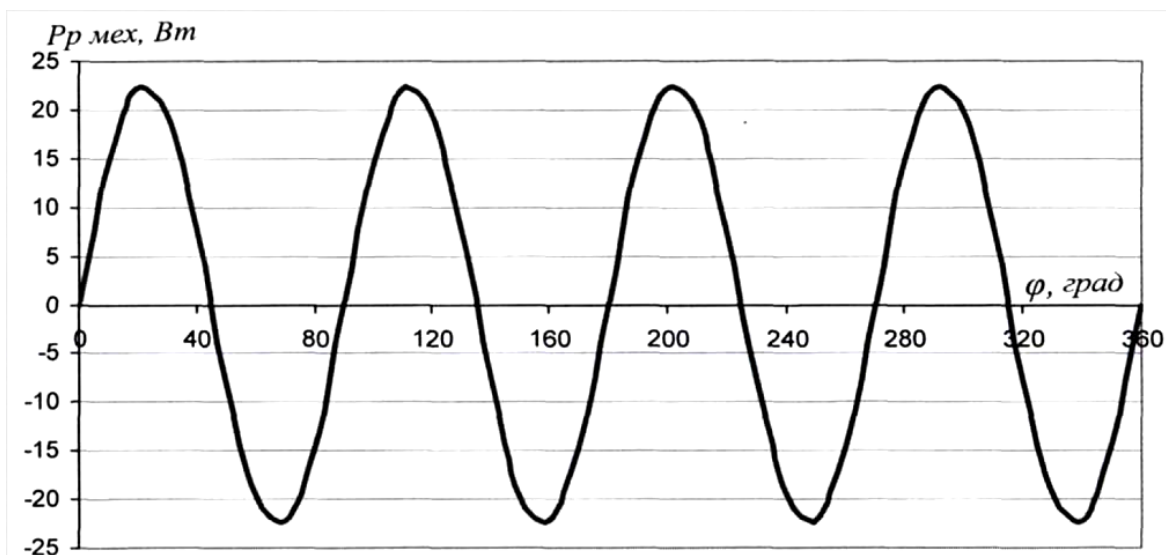


Рисунок - 16 Мощность механических потерь от суммарных радиальных усилий жил в зависимости от фазового угла тока нагрузки 300А кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10

Для сравнения рассчитаны аналогичные показатели для кабеля марки АПвП 1×240/25-10: мощность механических потерь от радиальных колебаний составляет 3,3Вт на 1км длины кабеля при 300А. При 4000А мощность радиальных колебаний составит 76кВт. Снижение механических потерь связано с увеличением расстояния между соседними жилами.

3.3.2 Механическая мощность от тангенциальных составляющих электродинамических сил

Одновременно с общим радиальным усилием от трёх жил, каждая жила совершает колебательные движения, перпендикулярные радиальному направлению. Эта тангенциальная составляющая колебательного движения каждой жилы вызывает собственные механические потери, которые складываются с общими потерями от радиальных колебаний.

Угловое ускорение, возникающее при колебании жилы кабеля под воздействием тангенциальной составляющей электродинамической силы P_m согласно второго закона Ньютона для вращательного движения [45] позволяет

определить ε через вращающий момент M и момент инерции жилы кабеля J по формуле:

$$\varepsilon = \frac{M}{J} \quad (102)$$

Вращающий момент, возникающий от воздействия тангенциальной силы F_m относительно центра кабеля:

$$M = F_m \cdot R_u \quad (103)$$

где R_u - расстояние между центром кабеля и центром жилы.

Момент инерции жилы относительно оси кабеля определяется, по известному моменту инерции жилы относительно параллельной ей оси, проходящему через центр тяжести жилы J_o , масса тела m и расстояние между осями R_u в соответствии с [45]:

$$J = J_o + m \cdot R_u^2 \quad (104)$$

Момент инерции круглой жилы относительно оси, перпендикулярной плоскости сечения и проходящей через ее центр рассчитывается по формуле:

$$J_o = m \cdot \frac{r_{жк}^2}{2} \quad (105)$$

Угловое ускорение характеризует быстроту изменения во времени вектора угловой скорости. При вращении вокруг неподвижной оси:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\beta}{dt^2} \quad (106)$$

Здесь ω - угловая скорость перемещения жилы относительно центральной оси кабеля; β - угол отклонения жилы относительно оси, проходящей через центр кабеля и центр жилы, находящейся в нейтральном состоянии без воздействия электродинамических усилий (рисунок 17).

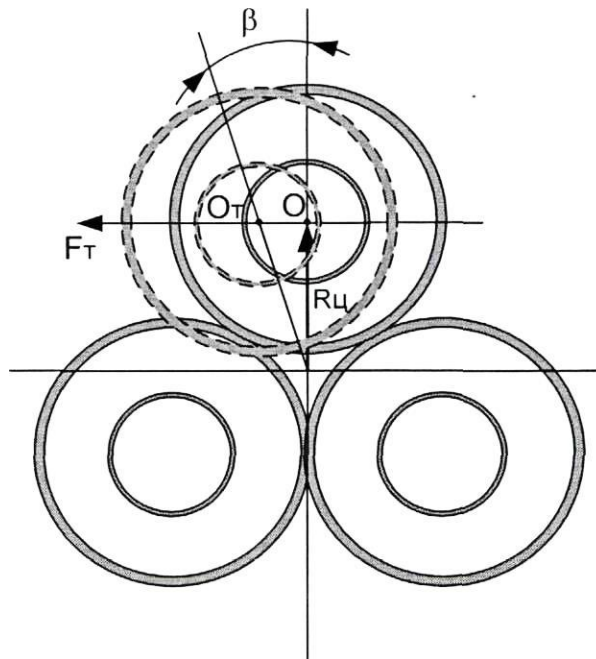


Рисунок - 17 Положительное направление отклонения жилы «1» от нейтрального состояния под действием тангенциальной силы

Из (106) следует:

$$\omega_{\epsilon} = \int \epsilon \cdot dt \quad (107)$$

С учетом выражений (102) и (103):

$$\omega_{\epsilon} = \frac{R_{\psi}}{J} \int F_m \cdot dt \quad (108)$$

Тангенциальная составляющая электродинамического усилия, воздействующая на первую жилу кабеля, определяется через амплитудные значения токов в жилах, и фазовый угол ωt по формуле (69). Уравнение угловой скорости с учётом (69) уравнение (108):

$$\omega_{\epsilon} = \frac{R_{\psi}}{J} f_1 \quad (109)$$

Здесь f_1 - результат интегрирования F_m

$$f_1 = \int F_m \cdot dt \quad (110)$$

Уравнение (110) с учетом (69):

$$f_1 = \int \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot C \cdot I_{m1}^2 \cdot \sin(2\omega t) \cdot dt; \quad (111)$$

$$\int \sin(2\omega t) \cdot dt = -\frac{1}{2\omega} \cos(2\omega t) \quad (112)$$

Частота колебаний первой составляющей тангенциальной силы:

$$f_1 = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot C \cdot I_{m1}^2 \cdot \cos(2\omega t) \quad (113)$$

Уравнение угловой скорости (108) с учетом (113):

$$\omega_\epsilon = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{R_y}{\omega \cdot J} \cdot C \cdot I_{m1}^2 \cdot \cos(2\omega t) \quad (113)$$

Угол β отклонения жилы от нейтральной согласно (106):

$$\beta = \int \omega_\epsilon \cdot dt \quad (114)$$

Или

$$\beta = \int C_\omega \cdot \omega_{\epsilon 2} \cdot dt \quad (115)$$

С учетом выражения угловой скорости (113):

$$C_\omega = -\frac{\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{R_y}{\omega \cdot J} \cdot C \cdot I_{m1}^2; \quad (115)$$

$$\omega_{\epsilon 2} = \cos(2\omega t); \quad (116)$$

Интегрирование составляющих уравнения (116), позволяет определить угол отклонения жилы «1» в тангенциальном направлении в случае симметричной токовой нагрузки:

$$\beta = -\frac{\sqrt{3}}{16} \cdot \frac{R_y}{\omega^2 \cdot J} \cdot C \cdot I_m^2 \cdot \sin(2\omega t) \quad (117)$$

По значению угла отклонения, определяется расстояние, на которое отклоняется жила от нейтральной оси под действием тангенциальных усилий, обусловленных током нагрузки:

$$S_m = R_y \cdot \operatorname{tg}(\beta) \quad (118)$$

При малых углах справедливо равенство $\operatorname{tg}(\beta) = \sin(\beta)$, тогда:

$$S_m = R_y \cdot \sin(\beta) \quad (119)$$

Мощность силы или системы сил, вызывающих вращательное движение абсолютно твердого тела, равна произведению результирующего момента этих сил относительно оси вращения на угловую скорость тела [90]:

$$P = \omega_\epsilon \cdot M \quad (120)$$

С учетом выражения момента (103):

$$P = \omega_\epsilon \cdot F_m \cdot R_y \quad (121)$$

Для определения активной мощности, выделяемой при совершении работы тангенциальной составляющей принимаются выражение силы в виде (69) и скорости (113). Выражение тангенциальной составляющей активной мощности:

$$P = -\frac{3}{64} \cdot \frac{R_u^2}{\omega \cdot J} \cdot C^2 \cdot I_m^4 \cdot \sin(4\omega t) \quad (122)$$

Выражение момента инерции содержит массу жилы кабеля m , которая определяется через объем жилы $V_{жс}$ и её плотность $\gamma_{жс}$:

$$m = V_{жс} \cdot \gamma_{жс} \quad (123)$$

При расчете момента инерции сегментной формы жилы выполняется переход к круглой форме из условия равенства площадей сечений $S_{жс}$ исходной и круглой жил:

$$r_{жс} = \sqrt{\frac{S_{жс}}{\pi}} \quad (124)$$

Расстояние между центром кабеля и центром жилы рассчитывается по формуле:

$$R_u = \frac{D_g}{2} - h_n - h_{жс} - r_{жс} \quad (125)$$

В качестве примера рассмотрим влияние тангенциальных электродинамических сил на изоляцию кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10.

При указанных симметричной нагрузки жил 300А величина тангенциального отклонения и механическая мощность, обусловленная вибрацией трёх жил кабеля, представлены на рисунке 18 и 19.

Таким образом, тангенциальные колебания трёх жил сдвинуты по фазе на 60° и создают симметричную систему векторов, сумма которых в любой момент времени равна нулю. То есть, система векторов тангенциальных сил не создаёт общего вращающегося вектора, как радиальные силы, а связана с колебаниями каждой жилы индивидуально. Поэтому расчёт мощности колебаний от тангенциальных сил проводится индивидуально по каждой жиле,

а общая мощность потерь от указанных сил определяется суммированием мощностей тангенциальных потерь отдельных жил.

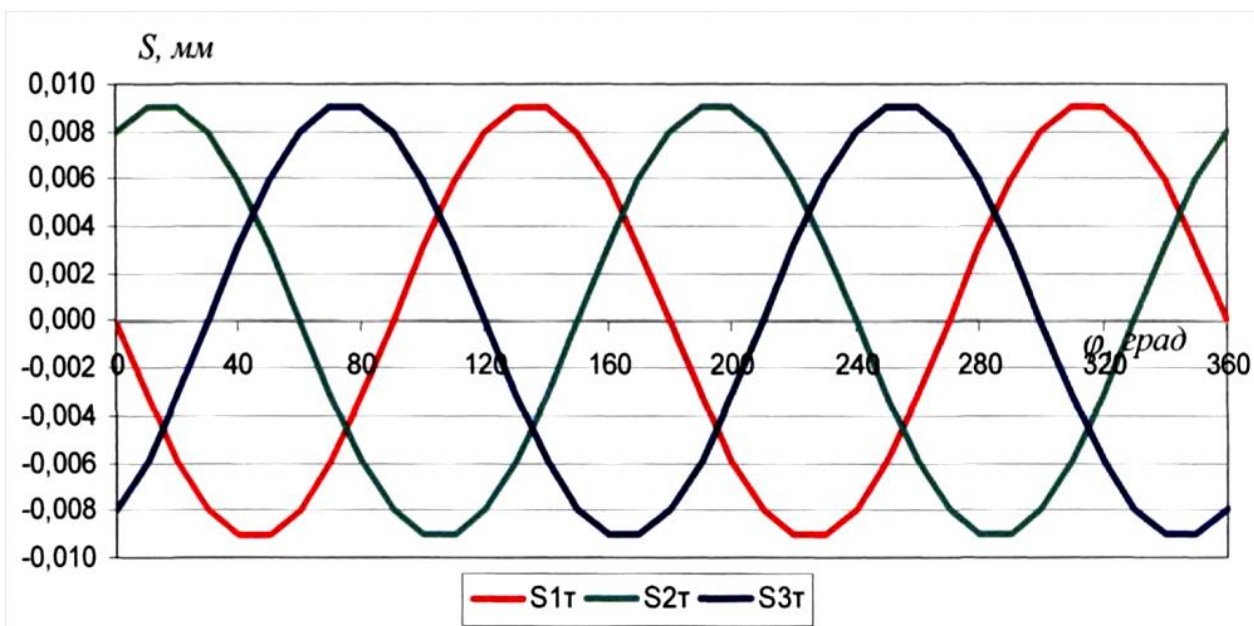


Рисунок - 18 График тангенциального отклонения жил «1» (красный цвет), «2» (зелёный) и «3» (синий) от нейтрального состояния в зависимости от фазового угла тока нагрузки кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10

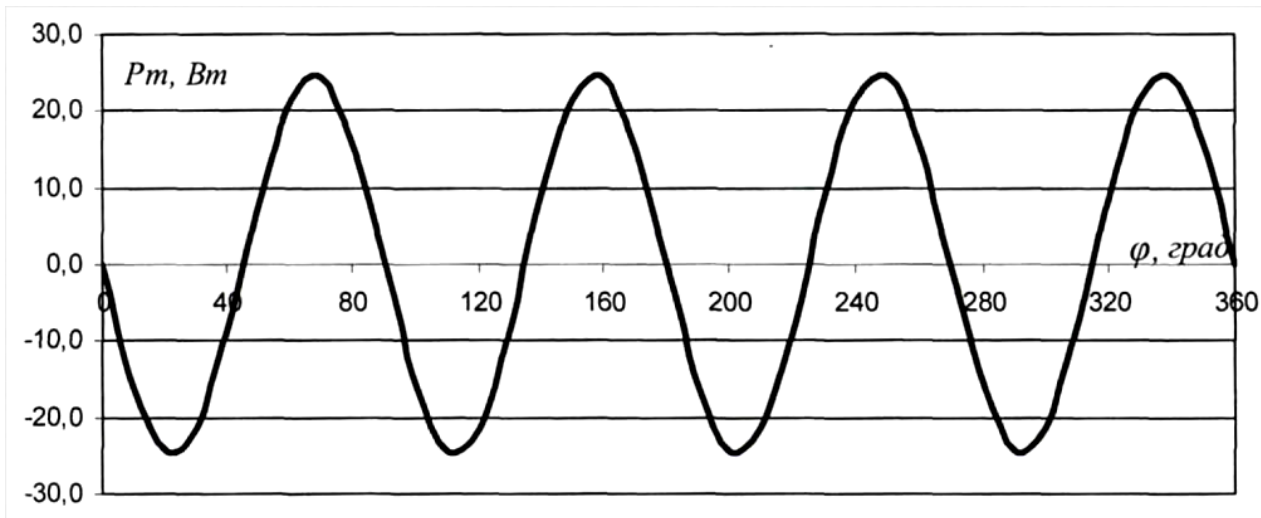


Рисунок - 19 Зависимость мощности тангенциальных колебаний трёх жил кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 от фазового угла тока нагрузки

Амплитудные значения величин, представленных на рисунках 18 и 19:

- тангенциальное отклонение жилы от нейтральной оси $S = 0.009$ мм;

- механические потери от тангенциальных колебаний трёх жил

$$P_{3ж} = 27 Вт.$$

Для сравнения рассчитаны аналогичные показатели для КЛ, состоящей из трёх одножильных кабелей марки АПвП 1×240/25-10 [77], уложенных в треугольник:

- тангенциальное отклонение жилы от нейтральной оси

$$S = 0.0031 \text{ мм};$$

- механические потери от колебаний трех жил $P_{3ж} = 6.5 \text{ Вт}.$

Разница между показателями сравниваемых кабельных линий обусловлена различным расстоянием между поверхностями соседних жил. Для рассматриваемого кабеля марки А2ХСЕУ это расстояние 3,5мм, а для кабеля АПвП - 23,1мм.

Из расчётов следует, что тангенциальные колебания трёх жил создают активные потери по значению аналогичные потерям от суммарного радиального усилия. В режиме перегрузки 4000А (нормативная длительность 26,4с) расчётная мощность тангенциальных колебаний достигает 624 кВт.

На рисунке 20 представлен характер изменения некоторых видов активных потерь, входящих в энергетическую диаграмму и уравнение мощностей кабеля, в зависимости от тока нагрузки для кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10.

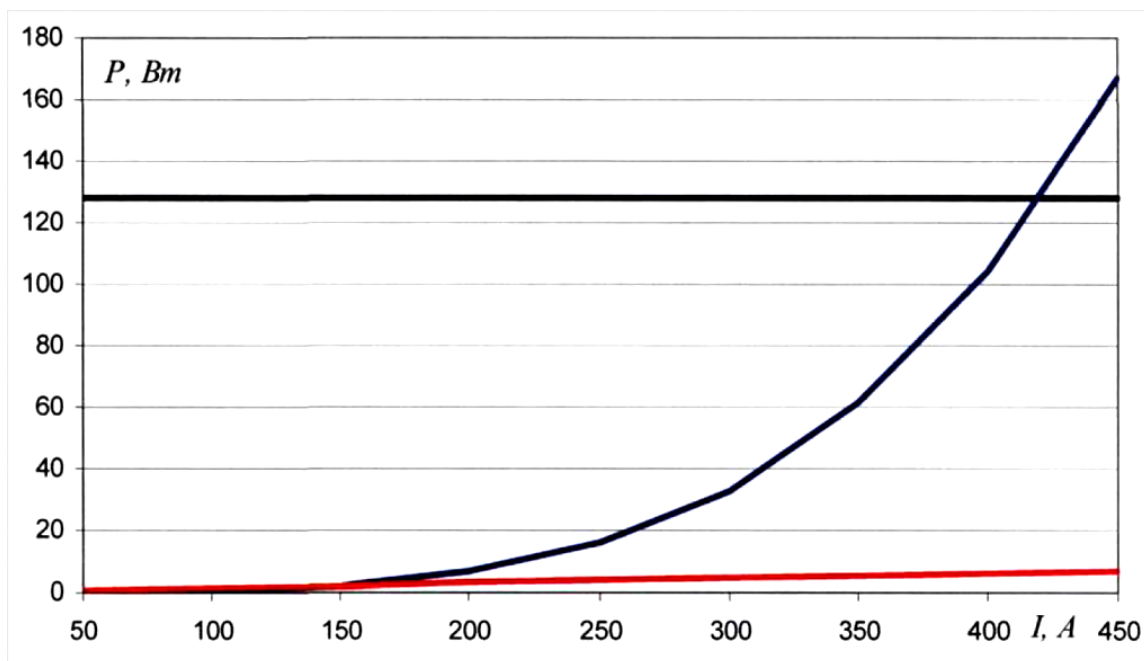


Рисунок - 20 Зависимости действующих значений мощностей от тока нагрузки кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10: P_E – диэлектрические потери (чёрный цвет); $P_{эм}$ – потери от действия маг. поля на токи утечки (красный цвет); $P_{мех}$ – сумма механических потерь от вибраций жил (синий цвет).

Из сравнения активных потерь, изображённых на рисунке 20 следует, что механические потери носят нелинейный характер и в номинальном режиме работы кабельной линии по значению сравнимы с потерями от электрического поля, а в режимах перегрузки значительно превышают последние. Совместное воздействие рассматриваемых потерь будет связано с одновременным изменением расстояний между жилами под механическим воздействием, изменением токов утечки при изменении межфазных расстояний и изменением влияния сил Ампера на токи утечки в связи с изменением их величины и расстояний. Это же относится и к токам утечки между жилой и оболочкой кабеля.

Выводы

- По результатам анализа факторов, влияющих на величину электродинамических усилий, обусловленных силами Ампера, выявлено, что:
 - силы имеют радиальную и тангенциальную составляющие, носящие гармонический характер. Тангенциальная

составляющая силы имеет двойную частоту колебаний по отношению к частоте тока в сети, а радиальная составляющая силы, от тока в каждой жиле, направлена к центру кабеля с частотой равной частоте сети.

- совместное действие радиальных составляющих сил трёх жил приводит к появлению одной общей силы, вектор которой вращается и направлен от центра кабеля наружу, что приводит к увеличению расстояния между незакреплёнными жилами кабеля в индивидуальной полиэтиленовой изоляции.

2. Получены аналитические уравнения расстояния и скорости смещения жил кабеля в зависимости от их расположения и тока нагрузки.

3. Показано, что:

- тангенциальная составляющая силы приводит к появлению угловых колебаний двойной частоты относительно центральной оси кабеля;

- угол отклонения жилы от центральной оси зависит от массы m и геометрических размеров жил ($l_{жс}$, $r_{жс}$), их взаимного расположения (d , R_u), магнитной проницаемости (μ) и пропорционален току во второй степени:

$$\beta \equiv \frac{l_{жс}}{d} \cdot \frac{I_m^2 \cdot \mu}{\omega^2 \cdot m \cdot \left(\frac{r_{жс}^2}{2} + R_u\right)}$$

4. Показано, что:

- радиальная составляющая силы приводит к появлению радиальных колебаний двойной частоты относительно нейтрального состояния;

- расстояние отклонения жилы от нейтральной оси зависит от её массы m , длины $l_{жс}$, магнитной проницаемости (μ), взаимного расположения жил (d) и пропорционален току во второй степени:

$$s \equiv \frac{l_{жс}}{d} \cdot \frac{I_m^2}{\omega^2 \cdot m}$$

5. Предложена и обоснована методика расчета активных потерь, вызванных действием собственного магнитного поля кабельной линии на электродинамические силы между жилами кабеля.

6. Показано, что в результате радиальных и тангенциальных колебаний жил кабеля выделяются активные мощности (соответственно P_p и P_m), носящие гармонический характер, зависящие от геометрических размеров и взаимного положения жил, и пропорциональные току в четвёртой степени:

$$P_m \equiv \left(\frac{l_{жс}}{d}\right)^2 \cdot \frac{I_m^4 \cdot \mu^2}{\omega \cdot m \cdot \left(\frac{r_{жс}^2}{2} + R_u\right)}$$

$$P_p \equiv \left(\frac{l_{жс}}{d}\right)^2 \cdot \frac{I_m^4 \cdot \mu^2}{\omega \cdot m}$$

7. Показано, что величина механических потерь соизмерима с активными потерями, возникающими в кабельных линиях от емкостных токов утечки. Механические потери от тангенциальных и радиальных колебаний трех жил для трёхжильного кабеля А2ХСЕУ 3×240/25-10 длиной 1000м при токе 300А составляют 65 Вт. При этом активные потери от токов утечки составляют 126 Вт.

8. Установлено, что кабели из с большей толщиной изоляции менее подвержены влиянию механических нагрузок, обусловленных вибрацией от электродинамических усилий. Для кабеля АААШв 3×240-10 механические потери от радиальных колебаний трех жил $P_{3жс} = 32Вт$, для кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10с - $P_{3жс} = 27Вт$; для КЛ, состоящей из трех одножильных кабелей АПвП 1×240/25-10, уложенных в треугольник $P_{3жс} = 6.5 Вт$.

4 Оценка удельных величин нагрузок на изоляцию силового кабеля

При протекании в жилах кабеля тока нагрузки изоляция кабеля подвергается старению со стороны активной мощности, выделяемой при совершении работы по перемещению жилы под действием электродинамических сил. Эта мощность носит гармонический характер, обусловленный взаимодействием переменной силы, отклоняющей жилы кабеля от нейтрального состояния. Данные утверждения позволяют рассматривать кабельную изоляцию с точки зрения комплексного воздействия со стороны протекающего тока.

Постоянные гармонические колебания жил кабеля, обусловленные электродинамическими силами, приводят к изменению структуры изоляции, появлению микротрещин и, в конечном итоге, сокращению срока службы кабеля.

Полученные уравнения связи между током и между жилными усилиями позволяют предположить, что существует нелинейная зависимость удельных механических нагрузок от геометрических размеров кабельных линий, т.е. удельные тепловая и механическая нагрузки на изоляцию кабеля возрастают с увеличением сечения жилы при постоянной плотности тока. При этом для определения удельной механической нагрузки на фазную изоляцию необходимо рассматривать силы Ампера, действующие по линии, соединяющей центры жил, а для определения удельного давления на поясную изоляцию, общую радиальную силу.

4.1 Механическое воздействие на изоляцию

4.1.1 Удельные силы при механической нагрузке

Площадь фазной изоляции трёхжильного кабеля много меньше площади жил, поэтому правомерно рассматривать трёхжильный кабель как кабель,

который состоит только из ТПЖ, общая площадь которых, соответствует реальной.

Для алюминиевых секторных жил с общим металлическим экраном площадь трех жил:

$$S_{3жс} = 3 \cdot Q_{жс} \quad (126)$$

Радиус окружности, состоящей только из жил кабеля:

$$R_c = \sqrt{\frac{S_{3жс}}{\pi}} \quad (127)$$

Расчётная площадь поверхности сектора, которая осуществляет давление на фазную изоляцию:

$$S_{pc} = \frac{2\pi}{3} \cdot R_c \cdot l_{жс} \quad (128)$$

В соответствии с законом Ампера, сила электромагнитного взаимодействия между жилами определяется в соответствии с уравнениями (61) или (62). Мгновенные значения токов в жилах определяются уравнениями:

$$i_1 = I_m \cdot \sin(\omega t); \quad (129)$$

$$i_2 = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (130)$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right).$$

(131)

Удельное давление сил Ампера на изоляцию между первой и второй жилами для кабеля с секторными жилами:

$$P_{12_{уд}} = \frac{F_{12}}{S_{pc}}. \quad (132)$$

Параметры магнитного поля и удельные электродинамические усилия между жилами, возникающие при протекании тока нагрузки определяются по известным геометрическим размерам и взаимному расположению жил кабеля.

Расчет удельных сил давления на фазную изоляцию для кабелей с круглой формой жилы выполняется для эквивалентного шестиугольного сечения, выполняется переход от сферических поверхностей взаимодействия

соседних жил при круглой форме жил к плоскопараллельным поверхностям при шестиугольной форме.

Расстояние между сторонами соседних жил при эквивалентном шестиугольном сечении:

$$d_6 = 2 \cdot (h_{из} + 0.048 \cdot r_{жс}) \quad (133)$$

$h_{из}$ – толщина изоляции.

При сечении жилы 240 мм² расчётный диаметр круглой жилы равен 17.5мм. Расчётное расстояние между поверхностями круглых жил кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 составляет 14.4мм, расчётное расстояние между теми же поверхностями шестиугольного сечения – 15.3мм. Погрешность в расчетах сил составляет 5 %, что допустимо при инженерных расчётах.

В таблице 2 представлены амплитудные значения удельных сил, действующих на фазную изоляцию с частотой 100Гц для трёхфазных кабелей различных типов, с одинаковым сечением жил: марки ААШв 3×240-10, трехжильный кабель, сегментная форма жилам, алюминиевая оболочка; А2ХСЕУ 3×240/25-10, трехжильный кабель, круглая жила, общий проволочный медный экран; АПвП 1×240/25-10 одножильный кабель, круглая жила, индивидуальный проволочный медный экран. Электродинамические силы рассчитаны при оригинальной конфигурации жил.

Таблица 2 Удельные силы давления (амплитудные значения) на фазную изоляцию для кабелей различных типов при длительном воздействии.

ААШв 3×240-10									
Ток, [А]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Удельная сила, [мкН/мм ²]	9,0	36,3	81,7	145,3	227,0	326,8	444,9	581,1	735,0
А2ХСЕУ 3×240/25-10									
Ток, [А]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Удельная сила, [мкН/мм ²]	5	22	49	87	136	196	267	349	441
3×АПвП 1×240/25-10									
Ток, [А]	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Удельная сила, [мкН/мм ²]	14	57	128	228	356	512	697	911	1153

Таблица 3 Удельные силы давления (амплитудные значения) на фазную изоляцию для кабелей различных типов при кратковременном допустимом воздействии

A2XSEY 3×240/25-10				
Ток, [А]	4000	8000	12000	16000
Длительность воздействия, [с]	26,4	6,6	2,94	1,65
Удельная сила, [Н/мм ²]	0,058	0,232	0,523	0,930
3×АПвП 1×240/25-10				
Ток, [А]	4000	8000	12000	16000
Длительность воздействия, [с]	32,21	8,05	3,58	2,01
Удельная сила, [Н/мм ²]	0,023	0,091	0,205	0,364

Таким образом, максимальным удельным воздействиям на фазную изоляцию подвергается кабель марки A2XSEY 3×240/25-10. Это обусловлено минимальным расстоянием между жилами кабеля (3,5мм). С увеличением расстояния между жилами, например, для КЛ из трех одножильных кабелей (3×АПвП), сила взаимного давления на изоляцию снижается. При увеличении расстояния между жилами уменьшается взаимная компенсация магнитных полей соседних жил и увеличивается напряженность магнитного поля в удалённой точке.

4.1.2 Зависимость удельной механической нагрузки на фазную изоляцию от диаметра кабеля

Зависимость удельной механической нагрузки, действующей на фазную изоляцию кабеля от диаметра кабеля на примере трехжильного кабеля с круглыми жилами.

Произведение токов в первой и второй жилах определяются выражением:

$$i_1 \cdot i_2 = I_m^2 \cdot K_{3n} \quad (134)$$

$$\text{где } K_{3n} = \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

После тригонометрических преобразований уравнение коэффициента K_{zn} :

$$K_{zn} = -\frac{1}{4} \left(1 + 2 \cos \left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (135)$$

Мгновенное значение силы Ампера, действующей на фазную изоляцию со стороны жил «1» и «2»:

$$F_{жс} = F_{12} = C_{\mu} \cdot I_m^2 \cdot \frac{l_{жс}}{d} \cdot K_{zn} \quad (136)$$

$$C_{\mu} = \frac{\mu_o \mu}{2\pi} \quad (137)$$

С учётом уравнений силы (61), C_{μ} из уравнения (136) и расчётной площади сегмента из (127), после преобразований получим:

$$F_{уд_{жс}} = C_{\mu} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{d \cdot R_c} \quad (138)$$

Уравнение удельной силы через коэффициент K_{zn} :

$$F_{уд_{жс}} = C_{\mu} \cdot I_m^2 \cdot \frac{K_{zn}}{d \cdot R_c} \quad (139)$$

Амплитуда плотности тока в жиле:

$$J_m = \frac{I_m}{Q_{жс}}; \quad (140)$$

$$Q_{жс} = \frac{\pi R_c^2}{3}. \quad (141)$$

Амплитуда плотности тока:

$$J_m = \frac{3I_m}{\pi R_c^2}. \quad (142)$$

Амплитуда тока в жиле через плотность:

$$I_m = \frac{\pi R_c^2 \cdot J_m}{3} \quad (143)$$

Уравнение удельной силы, действующей на фазную изоляцию кабеля с учетом (143):

$$F_{уд_{жс}} = C_{\mu} \cdot \frac{\pi^2}{9} \cdot R_c^3 \cdot \frac{J_m^2}{d} \cdot K_{zn} \quad (144)$$

С учётом выражения коэффициента K_{zn} уравнение примет вид:

$$F_{уд_{жс}} = -C_{\mu} \cdot \frac{\pi^2}{36} \cdot R_c^3 \cdot \frac{J_m^2}{d} \cdot \left(1 + 2 \cos \left(2\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (145)$$

Коэффициент K_{zn} имеет постоянную и переменную составляющие, следовательно удельная сила сжатия фазной изоляции также имеет постоянную и переменную составляющие. Значение силы пропорционально стороне сектора жилы (стороне поверхности сжатия для круглых жил) в третьей степени, что эквивалентно, диаметру трехжильного кабеля в третьей степени.

Таким образом, из уравнения (145) следует, что в кабельных линиях больших сечений износ фазной изоляции от механических воздействий больше, чем в кабельных линиях меньших сечений при одинаковой плотности тока.

На рисунке 21 представлен график зависимости удельной силы, действующей на фазную изоляцию кабеля марки A2XSEY 3×240/25-10, от плотности тока, в диапазоне значений тока в жиле от 50 А до 400 А, расстояние между поверхностями голых жил - 5.5мм. Значение амплитуды плотности тока 1.78 А/мм соответствует действующему значению тока в жиле 300 А.

В таблице 4 представлены расчётные значения удельных сил сжатия фазной и поясной изоляций кабеля марки A2XSEY 3×240/25-10 в зависимости от сечения жил при постоянной плотности тока 1.78 А/мм.

Таблица 4 Удельные силы давления (амплитудные значения)

Сечение жилы, [мм ²]	95	120	240
Удельная сила сжатия фазной изоляции, [мкН/мм ²]	80.7	115.3	324.1
Удельная сила сжатия поясной изоляции, [мкН/мм ²]	33.4	47.7	134.1

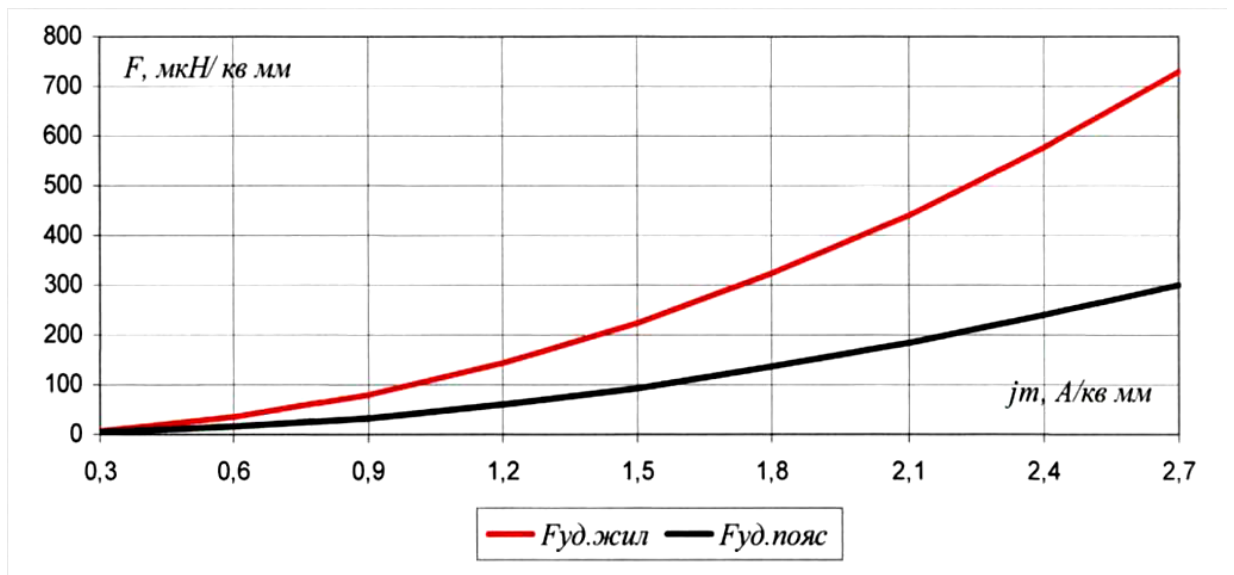


Рисунок - 21 Графики зависимости удельных сил [$\times 10^{-6}, \text{Н/мм}^2$], действующих на фазную и поясную изоляцию кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 от амплитуды плотности тока [А/мм^2] при постоянном сечении жил.

По данным таблицы 4 на рисунке 22 представлены графики удельных сил давления на фазную (красный цвет) и поясную (чёрный цвет) изоляцию кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 в зависимости от сечения жил при постоянной плотности тока.

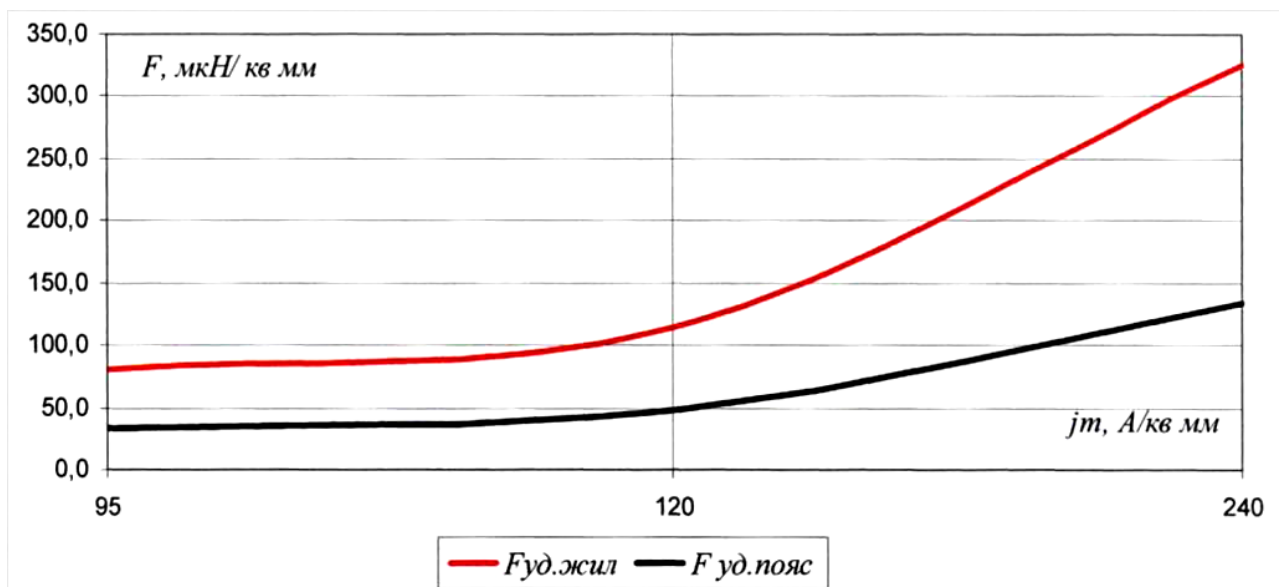


Рисунок - 22 Графики удельных сил сжатия фазной (красный цвет) и поясной (чёрный цвет) изоляции кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 в зависимости от сечения жилы при постоянной плотности тока $1,78 \text{ А/мм}^2$

Таким образом, в кабельных линиях больших сечений износ как изоляции от механических воздействий больше, чем в кабельных линиях меньших сечений при одинаковой плотности тока. При одинаковой механической нагрузке на изоляцию, кабели с большим сечением должны нагружаться током меньшей плотности. При этом, фазная изоляция испытывает в 2.4 раза большие механические нагрузки, чем поясная изоляция.

4.2 Тепловое воздействие на изоляцию

Нагрев кабеля определяется как условиями теплоотдачи с различных поверхностей жилы кабеля, так и активными потерями, выделяемыми в жиле. Преобладающими активными потерями в жиле являются электрические потери.

Наибольшая температура возникает между жилами кабеля вследствие наименьшей теплоотдачи. Поэтому рассмотрен случай распределения удельных электрических потерь на единицу внутренней поверхности жилы.

Удельные электрические потери на единицу внутренней поверхности жилы:

$$F_{эл,уд} = \frac{P_{эл}}{S_n} \quad (146)$$

Электрическое сопротивление жилы:

$$R_{эл} = \frac{3\rho \cdot l_{ж}}{(\pi R_c^2)} \quad (146)$$

Здесь ρ - удельное электрическое сопротивление материалы жилы.

Удельные электрические потери на единицу внутренней поверхности жилы:

$$P_{эл,уд} = \frac{F_{эл}}{(S_c)} = \frac{P_{эл}}{R_c \cdot l_{ж}} \quad (147)$$

Удельные электрические потери через составляющие активного сопротивления:

$$P_{эл,уд} = \frac{I^2 \cdot R_{эл}}{R_c \cdot l_{ж}} \quad (148)$$

Уравнение удельных электрических потерь на единицу внутренней поверхности жилы, полученное с учётом выражения электрического сопротивления:

$$P_{эл,уд} = 3 \cdot \frac{I^2 \cdot \rho}{\pi R_c^3}; \quad (149)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad (150)$$

$$P_{эл,уд} = 3 \cdot \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{\pi R_c^3} \quad (151)$$

Уравнение связи удельных электрических потерь на единицу внутренней поверхности жилы с радиусом жилы и плотностью тока:

$$P_{эл,уд} = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \cdot R_c \cdot J_m^2 \quad (152)$$

По полученному уравнению проведены расчёты и на рисунке 23 представлен график удельных электрических потерь для кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 в зависимости от амплитуды плотности тока при постоянном сечении жилы (240 мм²).

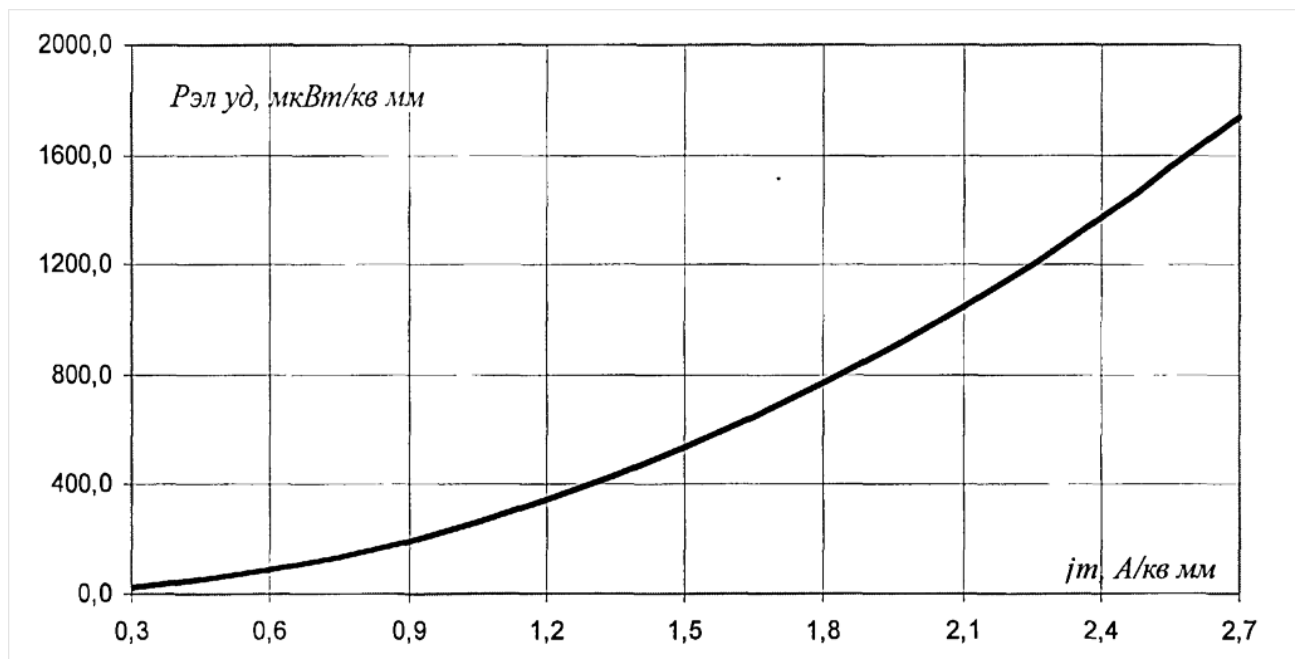


Рисунок - 23 Зависимость удельных электрических потерь на единицу внутренней поверхности жилы [$\times 10^{-6}$ Вт/ мм²] кабеля марки А2ХСЕУ 3×240/25-10 от амплитуды плотности тока, при постоянном сечении жилы 240мм²

На рисунке 24 представлен график зависимости удельных электрических потерь от сечения жилы разных марок кабеля А2ХСЕУ при постоянной плотности тока 1.78 А/мм^2 .

Таблица 5 Удельные диэлектрические потери при различных сечениях жил для постоянной плотности тока, [мкВт/мм²]

Сечение жилы, мм ²	95	120	240
Удельные электрические потери, мкВт/мм ²	486.7	546.9	771.8

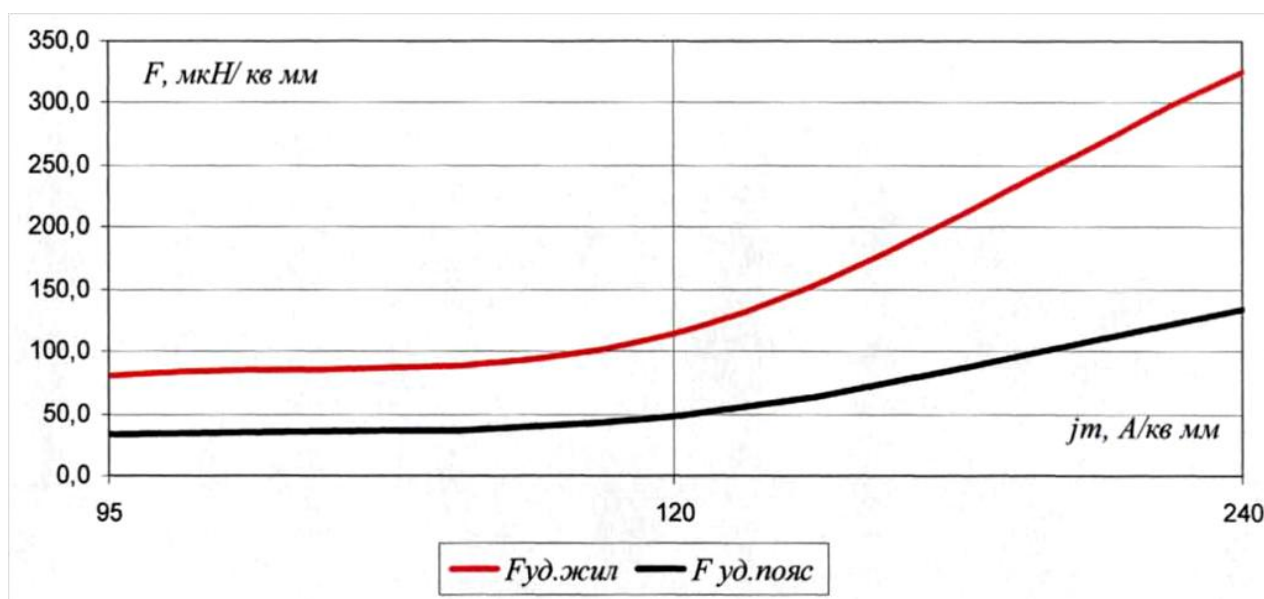


Рисунок – 24 Зависимость удельных электрических потерь от сечения жилы кабеля А2ХСЕУ при постоянной плотности тока 1.78 А/мм^2

При одинаковой плотности тока изоляция кабелей большего сечения подвергается большему комплексному воздействию тепловой и механической нагрузок, приводящему к старению изоляции, чем изоляция кабелей меньшего сечения.

Для сравнительной оценки старения изоляции кабелей марки от действия тепловой и механической нагрузок при максимально допустимых длительных токах в жилах результаты расчетов сведены в таблицу 6.

Таблица 6 Воздействие на изоляцию кабеля АААШв при максимально допустимой токовой нагрузке, прокладка в земле

Наименование параметра	Сечение ТПЖ, мм ²		
	95	120	240
Наружный диаметр кабеля, мм	43	48	59
Толщина фазной изоляции, мм	2,75	2,75	2,75
Толщина поясной изоляции, мм	1,25	1,25	1,25
Сторона сектора жилы, мм	9,5	10,7	15,1
Максимально допустимый ток, А	192	218	314
Амплитуда плотности тока, А/мм ²	2,87	2,58	1,86
Удельная нагрузка на фазную изоляцию, [мкН/мм ²]	211	244	355
Удельная нагрузка на поясную изоляцию, [мкН/мм ²]	87,3	101	147
Удельные электрические потери, [мкВт/мм ²]	1269	1155	846

Максимальное воздействие, приводящее к ускорению старения изоляции, наблюдается при максимальном допустимых токах: по механическому воздействию для кабелей с сечением жилы 240 мм², а по тепловому воздействию - 95мм². При этом кратность удельных электрических потерь между максимальным и минимальным воздействиями составила 1.5, а по механическому воздействию – 1.7.

Аналогичные расчёты проведены для трёхжильного кабеля А2ХСЕУ. Результаты расчётов сведены в таблицу 7.

Таблица 7 Воздействия на изоляцию кабеля А2ХСЕУ при максимально допустимой токовой нагрузке, прокладка в земле

Наименование параметра	Сечение ТПЖ, мм ²		
	95	120	240
Наружный диаметр кабеля, мм	58	62	75
Толщина фазной изоляции, мм	6,75	6,9	7,22
Толщина поясной изоляции, мм	2,6	2,8	3,1
Сторона сектора жилы, мм	242	276	408
Максимально допустимый ток, А	3,617	3,266	2,414
Амплитуда плотности тока, А/мм ²	217	246	363
Удельная нагрузка на фазную изоляцию, [мкН/мм ²]	2017	1852	1428

В данном случае кратность удельных электрических потерь между максимальным и минимальным воздействиями составила 1.4, а по механическому воздействию - 1.6. При повышении сечения кабелей сохраняется нормативная тенденция снижения плотности тока при одинаковой кратности снижения удельных электрических потерь в 1.5 раза. Но при этом, во

столько же раз возрастает механическое воздействие на изоляцию, приводящее к её старению.

4.3 Оценка ресурса изоляции

Надежность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки [17].

Способность объекта выполнять требуемые функции оценивается несколькими состояниями, в пределах которых параметры объекта остаются постоянными.

При рассмотрении надежности объекта - предмет определенного целевого назначения, в жизненном цикле которого выделяют стадии проектирования, изготовления и эксплуатации, как способности сохранять свои параметры в процессе эксплуатации возникает необходимость оценивать стабильность этих параметров на разных этапах эксплуатации. Поэтому надежность является сложным, комплексным свойством и включает ряд более простых свойств (в отдельности или в определенном сочетании):

- безотказность - свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени;
- долговечность - свойство объекта сохранять работоспособность объекта до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- ремонтпригодность - приспособленность к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов (повреждений), к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов;

- сохраняемость - свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности во время хранения или транспортировки;
- устойчивость - способность объекта переходить при различных возмущениях от одного устойчивого режима к другому;
- живучесть- свойство системы противостоять крупным возмущениям, не допуская развития аварий.

Количественное описание группы данных о безотказности возможно с помощью следующего минимального состава показателей: вероятность безотказной работы ($P(t)$) в течение некоторого времени " t " ($t_{min} < t < t_{max}$), интенсивность отказов ($\lambda(t)$) и средняя наработка до первого отказа.

Вероятность безотказной работы - вероятность того, что в пределах заданного времени (наработки) не возникнет отказа. Математическая запись этого показателя соответствует вероятности того, что продолжительность безотказной работы « T » будет больше заданного времени " t " – $p(t) = P(T > t)$. Вероятность безотказной работы (ВБР) является численной мерой объективной возможности успешной работы объекта в течение интересующего нас периода времени " t_i ".

Аналитическая связь между основными параметрами надежности (основной закон надежности):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, f(t) = \frac{dP(t)}{dt}; \quad (153)$$

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{dt} = - \int_0^t \lambda(t) dt; P(t) = \exp\left(- \int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (154)$$

Для расчета надежности рассмотрена оценка ВБР. На практике различают конструктивную и эксплуатационную надежность. Конструктивная характеризует свойства объекта, заложенные при его проектировании и изготовлении. Эти свойства иногда называют номинальной надежностью, которая определяет способность к стабильному функционированию в типовых (номинальных) условиях эксплуатации.

Под эксплуатационной λ понимается надежность, λ наблюдаемая в условиях λ эксплуатации с учетом λ всей совокупности λ воздействий: дестабилизирующие λ факторы окружающей λ среды, реальные λ режимы использования, качество технического обслуживания и ремонтов.

Интенсивность отказов характеризует λ стабильность свойств λ объекта и показывает скорость снижения вероятности безотказной работы.

Существуют два λ основных метода λ определения надежности: λ экспериментальный и коэффициентный. Экспериментальный λ метод применяется λ при определении λ надежности нового λ оборудования, а коэффициентный λ метод применяется λ при определении λ надежности уже λ работающего оборудования [18].

Согласно «коэффициентному λ методу», главной λ задачей теории λ эксплуатации энергетического оборудования является λ определение надежности его элементов λ и систем в конкретных λ условиях эксплуатации λ при известных λ показателях конструктивной надежности. Объект изучения при решении такой λ задачи представляется λ как устройство λ преобразования конструктивной λ интенсивности отказов элемента или λ системы (λ_k) в эксплуатационную (λ_3) под λ действием двух λ групп факторов: дестабилизирующих и компенсирующих. В λ первой группе λ основными и хорошо λ изученными являются λ воздействия энергосистемы (факторы λU), окружающей λ среды (факторы λC) и режимов использования (факторы λV). Во второй λ группе учитываются λ положительные воздействия λ электротехнического персонала λ за счет проведения λ технических обслуживания λ и ремонтов (факторы $\lambda \Pi$) и устройств защиты λ от аварийных режимов (факторы λZ). Обобщенная математическая модель имеет вид:

$$\lambda_3 = \lambda_k f(U, V, C, \Pi, Z) \quad (155)$$

Инженерный λ расчет основывается λ на использовании в модели λ коэффициентов надежности и влияния.

Коэффициент надежности λ представляет собой λ отношение интенсивности λ отказов изучаемого λ элемента λ_j к интенсивности λ отказов некоторого базового элемента λ_0 :

$$K_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_0} = const \quad (156)$$

За базовый элемент принимают резистор типа ОМЛТ с номиналом от 1 до 10 кОм, мощностью 0.25 Вт. Для него $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ 1/ч. [32].

Коэффициенты влияния (K_{ei}) показывают, как изменяется интенсивность отказов изучаемого элемента, при изменении дестабилизирующих или компенсирующих факторов. При номинальных условиях эксплуатации $K_{ei} = 1$ т.е. эксплуатационная и конструктивная интенсивность отказов равны. Для других условий $0 < K_{ei} < 1$

С учетом изложенных положений расчетная формула для обобщенной модели (155):

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot K_j \cdot K_{e1} \cdot K_{e2} \cdot \dots \cdot K_{en} \quad (157)$$

где n - число учитываемых факторов.

Коэффициенты влияния определяются по универсальной формуле:

$$K_{ei} = \alpha_i^{\rho_i} \quad (158)$$

где α - фактическое значение учитываемого фактора в долях от номинального;

ρ_i - коэффициент чувствительности интенсивности отказов к изменению фактора (показывает, во сколько раз изменяется интенсивность при изменении значения фактора на 1%).

Следовательно, для расчета интенсивности отказов коэффициентным методом необходимо определить коэффициент надежности и коэффициенты влияния, а затем вычислить искомую эксплуатационную надежность.

4.3.1 Оценка степени дополнительного старения изоляции от действия собственного магнитного поля

Определение степени воздействия магнитного поля на старение изоляции по сравнению с электрическим полем в различных режимах работы кабеля выполнено через сравнение выделяемых активных мощностей, как

основополагающих в развитие пробоя диэлектрика, и характеризующих рассеивание энергии электрического и магнитного полей в диэлектрике.

Мощность, выделяемая при совершении работы по перемещению свободных зарядов под действием магнитного поля:

$$P_A = I_{жс} \cdot f \cdot F_A \quad (159)$$

где F_A – сила Ампера

Следовательно, мощность, выделяемая при совершении работы по перемещению свободных зарядов под действием магнитного поля, равна произведению длины перемещения, частоты сети и силы воздействующей на заряды.

Электрические потери косвенным образом, через увеличение температуры, воздействуют на диэлектрические свойства изоляции. Так как мощность, выделяемая при воздействии на диэлектрик магнитного поля, соизмерима с мощностью выделяемой в диэлектрике от электрического поля, и связана с непосредственным разрушающим воздействием на диэлектрик свободных зарядов, то его длительное постоянное воздействие приводит к старению изоляции сопоставимому с электрохимическими процессам от электрического поля и от воздействия электрических потерь в жилах кабеля от тока нагрузки.

Степень дополнительного воздействия на диэлектрик от магнитного поля, созданного активной нагрузкой, определяется через коэффициент пропорциональности потерь, связанных с действием электрического и магнитного полей:

$$K_p = \frac{P_A}{P_E} = \frac{I_{жс} \cdot f \cdot F_A}{U \cdot I_y \cdot \operatorname{tg}(\delta)} = \frac{I_{жс} \cdot l_y \cdot f \cdot B \cdot l}{U \cdot \operatorname{tg}(\delta)}$$

(160)

Коэффициент пропорциональности потерь характеризует соотношение активных мощностей, выделяемых в изоляции кабеля за счёт энергии магнитного и электрического полей, воздействующей на свободные заряды в диэлектрике.

Для кабелей проложенных в плоскости при линейном напряжении 10кВ, и токе нагрузки 300А, на 1 км длины кабеля и тангенсе угла потерь 0.008, доля старения изоляции от действия магнитного поля, при расчёте по средним значениям магнитного потока, по сравнению с действием электрического поля, составит:

$$K_p = \frac{0.082 \cdot 50}{10^4 \cdot 0.008} = 0.051 \quad (160)$$

Для максимального магнитного потока 0.124 мВб, доля старения изоляции от действия магнитного поля составит 0.08.

Магнитная система кабеля линейна, увеличение нагрузки приведёт к линейному увеличению магнитных потерь, коэффициента старения изоляции от действия магнитного поля по сравнению с действием электрического поля и, соответственно, к снижению срока службы изоляции.

Коэффициент пропорциональности потерь определяет так же фактическое значение учитываемого фактора в долях от номинального (α), т.е. позволяет рассчитать коэффициенты влияния ($K_{\beta 1}$), который в итоге используется для расчета ВБР.

Коэффициент пропорциональности мощности механических потерь, характеризует соотношение активных мощностей, выделяемых в изоляции кабеля за счёт энергии электрического поля и действия механических вибраций жил, определяется выражением:

$$K_{mex} = \frac{F_{уд.жил} \cdot l_{ж}}{P_E} = \frac{C_{\mu} \cdot I_m^2 \cdot K_{sn}}{d \cdot R_c \cdot U \cdot tg(\delta)} \quad (161)$$

Коэффициент пропорциональности мощности механических потерь определяет так же фактическое значение учитываемого фактора в долях от номинального (α), т.е. позволяет рассчитать коэффициенты влияния ($K_{\beta 2}$), который в итоге используется для расчета ВБР.

Таким образом, при протекании тока короткого замыкания в 4000А, доля старения изоляции от действия магнитного поля по сравнению с электрическим составит 49% и приведет к снижению ВБР на 0.15.

Выводы

Создана методика сравнительных расчётов удельных электромеханических воздействий на изоляцию, обусловленных силами Ампера для кабелей различных типов.

Получена зависимость удельной механической нагрузки на изоляцию от диаметра кабеля. Показано, что указанная нагрузка пропорциональна радиусу жилы в третьей степени, квадрату плотности тока и обратно пропорциональна расстоянию между жилами:

$$F_{y\partial} \equiv \frac{R_c^3 \cdot J_m^2}{d}$$

Удельная сила сжатия фазной изоляции имеет постоянную и переменную составляющие, обусловленные взаимодействием токов, сдвинутых по фазе.

Определена зависимость удельной тепловой нагрузки на изоляцию от диаметра кабеля. Показано, что удельная тепловая нагрузка, обусловленная электрическими потерями, пропорциональна радиусу жилы и квадрату плотности тока:

$$P_{эл,y\partial} \equiv R_c \cdot J_m^2$$

С ростом сечения жил кабеля возрастает удельные тепловая и механическая нагрузки на изоляцию при условии постоянной плотности тока в жилах.

Максимальным удельным воздействиям на фазную изоляцию подвергаются трехжильные кабели с меньшей толщиной изоляции, что обусловлено минимальным расстоянием между жилами кабеля. С увеличением расстояния между жилами сила взаимного давления на изоляцию снижается.

Показано, что при повышении сечения жил снижается удельная тепловая нагрузка, обусловленная электрическими потерями и во столько же раз возрастает механическая нагрузка на изоляцию.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Планирование научно-исследовательских работ

Структура составляется в рамках проведения научного исследования. Необходимо произвести распределение работ исполнителей по видам работ. Структура работ приведена в таблице 6:

Таблица 6 – Перечень работ и оценка времени их выполнения

№	Наименование работы	Количество исполнителей	Продолжительность, дн.
1	Составление и утверждение технического задания	Инженер НР	1
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	44
3	Выбор направления исследований	Инженер НР	3
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер	5
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	11
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Инженер	10
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер	17
8	Оценка эффективности полученных результатов	Инженер НР	6
9	Составление пояснительной записки	Инженер	25
10	Публикация полученных результатов	Инженер	2

Всего 124 дн., НР 10 дн. НР участвует в проекте 8%.

Календарный план-график построенный, для максимального, по длительности второго, варианта исполнения, работ в рамках, научно-исследовательского проекта приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Продолжительность выполнения работ														
			март		апрель			май			июнь			июль			
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель и инженер	█														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель и инженер	█														
3	Выбор направления исследований	Научный руководитель и инженер	█														
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер		█													
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер		█													
6	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Научный руководитель и инженер		█	█												
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными	Инженер				█											
8	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель и инженер						█									
9	Составление пояснительной записки	Инженер							█								
10	Публикация полученных результатов	Инженер								█							

5.2 Смета затрат на проект

Смета затрат на проект (K_{np}) включает в себя следующие элементы затрат: материальные затраты, амортизацию, затраты на заработную плату, на социальные нужды, прочие и накладные затраты.

$$K_{np} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з/пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл}, \quad (30)$$

где K_{mat} - материальные затраты;

$K_{ам}$ – амортизация;

$K_{з/пл}$ – затраты на заработную плату;

$K_{с.о.}$ – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$ – прочие затраты;

$K_{накл}$ – накладные затраты.

5.2.1 Материальные затраты

Материальные затраты (K_{mat}) – материальные затраты, отражают стоимость покупных материалов, используемых в процессе производства продукции, а также продукции на другие производственные и хозяйственные нужды для обеспечения нормального технологического процесса. Принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские товары.

5.2.2 Амортизация

Амортизация ($K_{ам}$) – амортизация, это процесс переноса стоимости основных средств на стоимость произведенной и проданной конечной продукции по мере их износа, как материального, так и морального.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot Ц_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad (31)$$

где $T_{исп.кт}$ – время использования компьютерной техники (40дней)

$T_{\text{кал}}$ – календарное время (365 дней)

$C_{\text{кт}}$ – цена компьютерной техники (14000 руб)

$T_{\text{сл}}$ – срок службы компьютерной техники (5 лет)

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{40}{365} \cdot 14000 \cdot \frac{1}{5} = 307 \text{ руб}$$

5.2.3 Затраты на заработную плату

Затраты на заработную плату ($K_{\text{з/пл}}$) – затраты на заработную плату. Вознаграждение за труд в зависимости от квалификации работника, сложности, количества, качества и условий выполняемой работы, а также компенсационные и стимулирующие выплаты, затраты на заработную плату (для инженера и НР) рассчитываем по формуле:

$$K_{\text{з/пл}} = \Phi_{\text{ЗП}} = \text{ЗПф.инж} + \text{ЗПф.нр} \quad (32)$$

где $\Phi_{\text{ЗП}}$ – фонд заработной платы;

ЗПф – фактическая заработная плата.

Фактическая заработная плата рассчитывается для научного руководителя и инженера, по формуле:

$$\text{ЗПф} = \frac{\text{ЗПмес}}{21} \cdot n, \quad (33)$$

где 21 – число рабочих дней в месяц

n – фактическое число дней в проекте.

Определяем месячную заработную плату по следующей формуле:

$$\text{ЗПмес} = \text{ЗПо} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2,$$

где κ_1 – коэффициент, учитывающий отпуск (1,1=10%)

κ_2 – районный коэффициент (1,3=30%)

ЗПо – месячный отклад (для НР = 30 т.р., для Инженера = 17 т.р.);

Для инженера:

$$\text{ЗПмес} = \text{ЗПо} \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ руб.},$$

$$ЗПф = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n = \frac{24310}{21} \cdot 124 = 143544 \text{ руб.}$$

Для научного руководителя:

$$ЗПмес = ЗПо \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 30000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 42900 \text{ руб.},$$

$$ЗПо = \frac{ЗПмес}{21} \cdot n = \frac{42900}{21} \cdot 10 = 20428 \text{ руб.}$$

Затраты на заработную плату для инженера и научного руководителя составляют:

$$Кз / пл = ФЗП = ЗПф.инж + ЗПф.нр = 143544 + 20428 = 163974 \text{ руб.}$$

5.2.4 Затраты на социальные нужды

Затраты на социальные нужды *Кс.о.* – затраты организации по обязательным и добровольным взносам в органы государственного страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, занятых в производстве продукции, работ, услуг в непромышленной сфере в соответствии с порядком, установленным законодательством. Затраты на социальные нужды (отчисления) берем 30% от *Кз/пл.*

$$Кс.о. = \frac{Кз / пл \cdot 30\%}{100\%} = \frac{163974 \cdot 30}{100} = 49192 \text{ руб.}$$

5.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты *Кпр*, принимаются в размере 10% от (*Кмат + Кам + Кз/пл + Кс.о.*)

$$Кпр = \frac{(Кмат + Кам + Кз / пл + Кс.о.) \cdot 10\%}{100\%} = \frac{(1000 + 307 + 163974 + 49192) \cdot 10}{100} = 21447 \text{ руб.}$$

5.2.6 Накладные затраты

Накладные затраты $K_{накл}$ – затраты, не связанные прямо с производством отдельного изделия или вида работы и относимые на весь выпуск продукции. К ним относятся: расходы на содержание, эксплуатацию и текущий ремонт зданий, сооружений и оборудования; отчисления на социальное страхование и другие обязательные платежи; содержание и заработную плату административно-управленческого персонала; расходы, связанные с потерями от брака и простоев и др. Накладные расходы, принимаются в размере 200% от $Kз/пл$.

$$K_{накл} = \frac{Kз / пл \cdot 200\%}{100\%} = \frac{67210 \cdot 200}{100} = 327948 \text{ руб.}$$

Таблица 8 – Результаты полученных данных

№	Элементы затрат	Стоимость, руб.
1	Материальные затраты	1000
2	Амортизация компьютерной техники	307
3	Затраты на заработную плату	163974
4	Затраты на социальные нужды	49192
5	Прочие затраты	21447
6	Накладные расходы	327948
	Итого:	563868

Смета затрат на проект ($K_{пр}$):

$$\begin{aligned} K_{пр} &= K_{мат} + K_{ам} + Kз / пл + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} = \\ &= 1000 + 307 + 163974 + 49192 + 21447 + 327948 = 563868 \text{ руб} \end{aligned}$$

5.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы

Расчет затрат на оборудование для научных (экспериментальных) работ включает все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для каждого исполнения. Расчеты необходимо проводить в трех исполнениях для сравнительного анализа

экономической эффективности проекта в различных исполнениях. В каждом исполнении подобрано различное оборудование для нахождения наиболее экономически эффективного исполнения. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Смета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования			Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	ПЛК	ПЛК	ПЛК	1	1	1	10000	14000	8000	10000	14000	8000
2.	Датчик	Датчик	Датчик	1	1	-	2200	2500	-	2500	2500	-
3.	Нагреватель	Нагреватель	Нагреватель	1	1	1	6000	8000	5000	6000	8000	5000
Итого:										18500	24500	13000

Чтобы посчитать монтажные работы ($M_{раб}$), берем 20% от стоимости оборудования.

$$M_{раб_1} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{18500 \cdot 20}{100} = 3700 \text{ руб.},$$

$$M_{раб_2} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{24500 \cdot 20}{100} = 4900 \text{ руб.},$$

$$M_{раб_3} = \frac{C_o \cdot 20\%}{100\%} = \frac{13000 \cdot 20}{100} = 2600 \text{ руб.},$$

где C_o – общая стоимость оборудования.

5.4 Экономическая эффективность проекта

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (34)$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Интегральный финансовый показатель

	$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$
Исполнение 1	0,755
Исполнение 2	1
Исполнение 3	0,531

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Повышение производительности труда пользователя	0,05	3	3	5

Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	5
Надежность	0,05	4	5	5
Безопасность	0,1	3	3	5
Простота эксплуатации	0,1	5	3	5
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	5
Уровень проникновения на рынок	0,2	5	3	4
Финансирование научной разработки	0,1	5	4	3
Наличие сертификации разработки	0,2	5	3	5
ИТОГО	1	39	33	42

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы 12

Таблица 12 – показатели ресурсоэффективности

	I_{pi}
Исполнение 1	4,45
Исполнение 2	3,3
Исполнение 3	4,4

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{иснi}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исн.1} = \frac{I_{p-исн1}}{I_{финр}}, I_{исн.2} = \frac{I_{p-исн2}}{I_{финр}}, I_{исн.3} = \frac{I_{p-исн3}}{I_{финр}}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{I_{исн.1}}{I_{исн.(2,3)}}; \mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{исн.2}}{I_{исн.(1,3)}}; \mathcal{E}_{cp3} = \frac{I_{исн.3}}{I_{исн.(1,2)}}$$

В таблице 13 приведена сравнительная эффективность разработки

Таблица 13 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1		Исп.2		Исп.3	
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,755		1		0,531	
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,45		3,3		4,4	
3	Интегральный показатель эффективности	9,28		3,3		17,7	
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	По отношению к исп.2	По отношению к исп.3	По отношению к исп.1	По отношению к исп.3	По отношению к исп.1	По отношению к исп.2
		2,65	0,52	0,37	0,19	1,95	5,05

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Наиболее эффективным оказался вариант 2 т.к. у него самый наименьший интегральный показатель.

6 Социальная ответственность

Аннотация

Представление понятия «Социальная ответственность» сформулировано в международном стандарте ISO CSR-08260008000 : 2011 «Социальная ответственность организации» [2].

Социальная ответственность – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность);
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность).

Введение

В данной выпускной квалификационной работе проведены теоретические исследования метода прогнозирования остаточного срока службы полиэтилена низкой плотности. Рабочим местом является кабинет. Работа производится сидя, основная часть за ПЭВМ.

Основные опасные и вредные факторы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Опасные и вредные факторы при анализе тенденций совершенствования нормативно-правовой базы Российской Федерации в области энергосбережения

Наименование работ	Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
		Вредные	Опасные	
1. Теоретическое исследование	1. Офисное помещение	1. Микроклимат; 2. Освещенность; 3. Шум; 4. Психофизиологические факторы; 5. Электромагнитное излучение.	1. Риск возникновения пожара; 2. Электрический ток;	1. СанПиН 2.2.4-548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; 2. СНиП 23-05-95 Нормы естественного и искусственного освещения предприятий; 3. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ Допустимые уровни шумов в производственных помещениях; 4. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы; 5. ППБ 01-03 Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	2. Офисная техника	1. Электромагнитное излучение; 2. Шум; 3. Психофизиологические факторы.	1. Риск возникновения пожара; 2. Электрический ток;	

На рабочем месте возможно повышение уровня шума, несоответствующие микроклиматические параметры, недостаточная освещенность рабочего места, поражение электрическим током, повышение статического электричества – согласно ГОСТ 12.0.003 – 74 «Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [62].

Наиболее возможная чрезвычайная ситуация на рабочем месте – пожар.

Имеется воздействие на литосферу в виде отходов, возникших вследствие выхода из строя ПЭВМ и других приборов.

К вредным факторам рабочего места можно отнести электромагнитное излучение от ПЭВМ, повышенный уровень шума, несоответствующие параметры микроклимата и освещенности помещения.

Данные факторы приводят к снижению работоспособности или заболеванию. Для предотвращения вредного воздействия необходимо соблюдать правила работы: время работы, оптимальное расположение, как оборудования, так и сотрудника. Использовать средства защиты, корректировать параметры освещенности и микроклимата

6.1 Производственная безопасность

6.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

Короткое замыкание, тлеющий пожар или возгорание кабеля, которые зачастую незаметно распространяются в скрытых кабельных шахтах, могут привести к опустошительным пожарам с человеческими жертвами. В августе 2000 года, по всей вероятности, расплавившийся в одном из передающих усилителей кабель вызвал большой пожар на Останкинской телебашне. В результате телевизионная башня ремонтировалась и долгие годы оставалась закрытой. Тот факт, что возгорание кабеля может быть причиной пожара, является лишь одной стороной проблемы. Не менее важен вопрос, как долго

в случае пожара электрический кабель сможет сохранять работоспособность, и обеспечивать полное функционирование систем спасения и эвакуации. Многочисленные пожары, произошедшие в России в последние годы, сделали тему пожарной защиты и вместе с ней применение огнестойких кабелей объектом пристального общественного внимания [63].

Причины загораний проводов и кабелей

1. Перегрев от короткого замыкания между жилами провода и жилами кабеля, их жилами и землей в результате:

- пробоя изоляции повышенным напряжением, в том числе от грозных перенапряжений;
- пробоя изоляции в месте образования микротрещин как заводского дефекта;
- пробоя изоляции в месте механического повреждения при эксплуатации;
- изоляции от старения; пробоя изоляции в месте локального внешнего или внутреннего перегрева; пробоя изоляции в месте локального повышения влажности или агрессивности среды;
- случайного соединения токопроводящих жил кабелей и проводов между собой или соединения токопроводящих жил на землю;
- умышленного соединения токопроводящих жил кабеля и проводников между собой или соединения их на землю.

2. Перегрев от токовой перегрузки в результате:

- подключения потребителя завышенной мощности;
- появления значительных токов утечки между токоведущими проводами, токоведущими проводами и землей (корпусом), в том числе на распределительных устройствах за счет снижения величины электроизоляции;
- увеличения окружающей температуры на участке или в одном месте, ухудшения теплоотвода, вентиляции.

3. Перегрев мест переходных соединений в результате:

– ослабления контактного давления в месте существующего соединения двух или более токопроводящих жил, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления;

– окисления в месте существующего соединения двух и более проводников, приводящего к значительному увеличению переходного сопротивления [64].

Основные профилактические противопожарные мероприятия при эксплуатации проводов и кабелей:

1. В процессе эксплуатации необходимо следить за равномерной нагрузкой по фазам однофазных электроприемников — освещения, электронагревательных приборов. Следует помнить, что при наличии однофазных электроприемников по рабочему нулевому проводу протекает ток, величина которого может достигать величины фазного тока. Поэтому сечение нулевого провода в осветительных установках с газоразрядными лампами должно быть равным сечению фазных проводов.

2. Основными методами повышения пожарной безопасности кабелей и проводов является их выполнение в соответствии с ПУЭ, правильный выбор защиты от коротких замыканий и перегрузок. Перегрузка проводов и кабелей сверх установленных норм не допускается. Контроль загрузки следует проводить по стационарным амперметрам или с помощью токоизмерительных клещей.

3. Все соединения, оконцевания и ответвления проводов и кабелей, осуществляемые в процессе эксплуатации, выполняются капитально — путем опрессовки, пайки, сварки, зажима под болт и т. п. Наброс проводов крючками и скрутка не допускаются.

4. В пожароопасных зонах производственных и складских помещений с наличием горючих материалов (бумага, хлопок, лен, каучук и др.), а также изделий в сгораемой упаковке светильники и электрооборудование должны иметь закрытое или защищенное исполнение. Вблизи проводов и кабелей недопустимо наличие легковоспламеняющихся предметов и материалов.

5. В соответствии с правилами технической эксплуатации нужно регулярно проводить измерения сопротивления изоляции проводов и кабелей. В сетях напряжением до 1000 В сопротивление изоляции каждого участка сети — не менее 0,5 Мом [65].

6.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.

Воздействие электромагнитного поля на оператора ПЭВМ

Электромагнитное поле (ЭМП) создается магнитными катушками отклоняющей системы, находящимися около цокольной части электроннолучевой трубки монитора. ЭМП обладает способностью биологического, специфического и теплового воздействия на организм человека.

Биологическое воздействие ЭМП зависит от длины волны, интенсивности, продолжительности режимов воздействия, размеров и анатомического строения органа, подвергающегося влиянию ЭМП. Механизм нарушений, происходящих в организме под влиянием ЭМП, обусловлен их специфическим и тепловым действием.

Специфическое воздействие ЭМП обусловлено биохимическими изменениями, происходящими в клетках и тканях. Наиболее чувствительными являются центральная и сердечно – сосудистая системы.

Тепловое воздействие ЭМП характеризуется повышением температуры тела, локальным избирательным нагревом тканей, органов, клеток вследствие перехода ЭМП в тепловую энергию. Интенсивность нагрева зависит от скорости оттока тепла от облучаемых участков тела.

Работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением и нервно – эмоциональной нагрузкой, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на мышцы рук при работе с клавиатурой ЭВМ. Большое значение имеет рациональная конструкция и

расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной работы.

В процессе работы с компьютером необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках, возможное повышение температуры тела. Некоторые органы и ткани человека, обладающие слабо выраженной терморегуляцией, более чувствительны к облучению (мозг, глаза, почки, кишечник).

Влияние электромагнитных излучений заключается не только в их тепловом воздействии. Микропроцессы, протекающие в организме под действием излучений, заключаются в поляризации макромолекул тканей и ориентации их параллельно электрическим силовым линиям, что может приводить к изменению свойств молекул; особенно для человеческого организма важна поляризация молекул воды.

Таким образом, степень воздействия ЭМП на организм человека зависит от интенсивности облучения, длительности воздействия и диапазона частот.

Длительное и систематическое воздействие на человека полей вызывает:

- повышенную утомляемость;
- головную боль;
- сонливость;
- гипертонию;
- боли в области сердца.

На территории Российской Федерации действуют СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы» [66], который устанавливает санитарно – эпидемиологические требования к персональным электронно – вычислительным машинам (ПЭВМ) и условиям труда.

Требования к уровням электромагнитных полей на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ приведены в таблице 4.1.

В соответствии с этим используются такие меры организационного характера:

1. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 – 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно – цифровых знаков и символов.

2. Работа на ЭВМ не более 6 часов в день с перерывами через 1 час.

Таблица 2 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену при работе с ПЭВМ устанавливается суммарное время регламентированных перерывов (таблице 4.2).

Виды трудовой деятельности разделяются на 3 группы: группа А – работа по считыванию информации с экрана ВДТ с предварительным запросом; группа Б – работа по вводу информации; группа В – творческая работа в режиме диалога с ПЭВМ. При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к разным видам трудовой деятельности, за основную работу с ПЭВМ следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Таблица 3 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПЭВМ

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин.	
	группа А, количество знаков	группа Б, количество знаков	группа В, ч	При 8 часовой смене	При 12 часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2	50	80
II	до 40 000	до 30 000	до 4	70	110
III	до 60 000	до 40 000	до 6	90	140

Для видов трудовой деятельности устанавливается 3 категории тяжести и напряженности работы с ПЭВМ, которые определяются: для группы А – по суммарному числу считываемых знаков за рабочую смену, но не более 60 000 знаков за смену; для группы Б – по суммарному числу считываемых или вводимых знаков за рабочую смену, но не более 40 000 знаков за смену; для группы В – по суммарному времени непосредственной работы с ПЭВМ за рабочую смену, но не более 6 ч за смену.

Офисное помещение по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности согласно ПУЭ 7 [13, п. 1.1.13].

Освещение

Одним из элементов, влияющих на комфортные условия работающих, является освещение. К нему предъявляются следующие требования:

- соответствие уровня освещенности рабочих мест характеру выполняемой работы;
- достаточно равномерное распределение яркости на рабочих поверхностях в окружающем пространстве;
- отсутствие резких теней, прямой и отраженной блескости;

- постоянство освещенности по времени;
- оптимальная направленность излучаемого светового потока осветительными приборами светового потока;
- долговечность, экономичность, электро – и пожаробезопасности, эстетичность, удобство и простота в эксплуатации.

В соответствии с задачами зрительной работы помещение относится к I группе, т. е. помещения, в которых производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения. Нормированное значение освещенности рабочей поверхности для данной группы составляет 300 лк – согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий» [67]. Это значение достигается применением совместного освещения, т.е. недостаточное естественное (через оконные проёмы) дополняется искусственным (с помощью люминесцентных ламп).

Естественное освещение – обуславливается световым потоком прямых солнечных лучей и диффузионным светом неба, т. е. многократным отражением солнечных лучей от мельчайших взвешенных в атмосфере частиц пыли и воды. Величина такого освещения изменяется как в течение года, так и в течение суток. Изменения в течение суток зависят от географических координат, расположения других зданий, месторасположения объекта, времени суток, прозрачности воздуха, облачности и других характеристик окружающей среды.

Естественное освещение характеризуется тем, что создаваемая освещенность изменяется в широких пределах, которые зависят от времени года, суток, метеорологических условий. Поэтому естественное освещение нельзя задать количественно. В качестве нормированной величины для естественного освещения используют коэффициент естественной освещенности (КЕО), который представляет собой отношение освещенности в данной точке внутри помещения к значению наружной освещенности, полностью открытого

небосвода. Нормирование этого коэффициента определяется по таблице с учетом характера зрительной работы, системы освещения, района расположения объекта. Кроме количественного показателя КЕО используют качественный показатель – неравномерность естественного освещения. Для естественного освещения с размером объекта 0,15 м естественное освещение находится в пределах 3 – 10 %.

В России нормируется еще один качественный показатель освещения – коэффициент пульсации освещенности. Нормирование этого показателя также потребовалось в связи с повсеместным внедрением газоразрядных источников света, так как у излучения ламп накаливания пульсации весьма незначительны и каких-либо неудобств от их существования люди не испытывали. Установлено, что глубина пульсации освещенности на рабочих местах не должна превышать 20 %, а для некоторых видов производства – 15 %.

Микроклимат помещения

Микроклимат помещений для лёгкой категории работ включает определённую температуру и влажность. Нормы метеорологических условий учитывают время года и характер производственного помещения. В таблице 4.3. приведены нормы метеоусловий для категорий работ по тяжести Ia в соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [68].

Метеорологические условия для рабочей зоны производственных помещений регламентируются ГОСТ 12.1.005 – 88 «Общие санитарно – гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [69] и СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [68].

Рассматривая вопросы охраны труда людей, работающих в компьютерной лаборатории, нельзя обойтись без рассмотрения вопроса вентиляции помещения. Вентиляция предназначена для создания на рабочем

месте нормальных , метеорологических и гигиенических , условий за счёт , организации правильного воздухообмена.

Таблица 4 – Нормы метеоусловий

Холодный период года $t_{нар}^{возд}$ ниже +10, °С						Тёплый период года $t_{нар}^{возд}$ +10, °С					
Оптимальные			Допустимые			Оптимальные			Допустимые		
Температура , воздуха, °С	Относительная , влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура , воздуха, °С	Относительная , влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура , воздуха, °С	Относительная , влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	Температура , воздуха, °С	Относительная , влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
22-24	40-60	0,1	19-26	15-75	0,1	23-25	40-60	0,1	20-29	15-75	0,1

Проанализировав имеющуюся в помещении вентиляцию , можно сказать , что:

1. По способу , перемещения воздуха , она является , естественной и неорганизованной.
2. По , назначению она , осуществляет удаление (вытяжку) воздуха , из помещения.
3. По месту действия она является общеобменной.

Количество , приточного воздуха , при естественном , проветривании должно , быть не менее 30 м³/ч , на одного человека, , при объёме , помещения приходящегося , на него менее 20 м³, , что не выполняется. Следовательно, , следует либо , применить другой , тип вентиляции, , например, принудительную, либо , устанавливать кондиционеры.

Кроме , того допустимые , нормы по запылённости , должны соответствовать , санитарным нормам , для ПДК , веществ 4 – ого , класса опасности, , и поддерживаются созданием , соответствующих устройств , вентиляции и влажной , ежедневной двухразовой , уборкой пола , в помещении

определяется ГН 2.2.5.1313 – 03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [70].

Источники шума

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения и центральная система вентиляции ЭВМ. Допустимый уровень шумов для помещений компьютерных залов 50 дБ определяется СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки» [71] по шкале А шумомера – согласно ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ «Шум. Общие требования безопасности» [72]. ПДУ шума для рабочей зоны приведены в таблице 5.

Таблица 5 – ПДУ шума рабочей зоны

Рабочее место	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ЭВМ	86	71	61	54	49	45	42	40	38	60

Защитой от шумов является заключение вентиляторов в защитный кожух и установка внутрь корпуса ЭВМ.

6.2 Экологическая безопасность

6.2.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду.

При использовании ПЭВМ могут возникнуть следующие виды негативного воздействия на окружающую среду:

- выбросы в атмосферу углекислого газа;
- загрязнение почвы при утилизации старого ПЭВМ.

ПК после завершения использования (срока эксплуатации) можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка такого рода отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования: кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы.

Пластмассовые части ПЭВМ утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. ПК может содержать: тяжелые металлы, печатные платы с замедлителями горения, которые при горении могут выделять опасные диоксиды. Для опасных отходов используют теплоту сжигания, то есть специальные печи, такой способ не исключает образования токсичных выбросов. Отходы, которые не подлежащие переработке, утилизации и вторичному использованию подлежат захоронению на полигонах или в почве согласно Постановлению Администрации г.Томска от 11.11.2009, N 1110 (с изменениями от 24.12.2014) "Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования "Город Томск".

Если уровень загрязнения не превышает установленных норм, то атмосферные осадки и любые воды организации сливаются в сеть канализаций. В другом случае вначале осуществляется локальная очистка с помощью решеток, отстойников и др., потом может использоваться биологическая очистка. Биологическое разрушение (окисление) загрязняющих органических веществ, производимое биоценозом, позволяет достичь высокого качества воды. В сравнении с химическими методами, биологическая очистка имеет меньшую стоимость. Организация проводит дезинфекцию запасов воды хлорированием согласно [73].

Действующая классификация помещений по опасности поражения электрическим током определяет объект к категории повышенной опасности при наличии в них одного из следующих условий:

- 1) сырость (помещения, с относительной влажностью больше 75 %);
- 2) токопроводящая пыль (постоянное образование пыли с токопроводящими свойствами);
- 3) помещения с токопроводящими полами (наличие железобетонных, металлических, кирпичных и иных типов токопроводящих напольных покрытий);
- 4) высокий уровень температуры (помещения в которых температура постоянно превышает +350С);
- 5) условия (возможность), когда человек может одновременно прикоснуться к металлическим корпусам электрооборудования и к заземленным металлоконструкциям зданий (из примеров можно привести случай, когда человек может взяться одной рукой за батарею отопления - второй за корпус станка).

Нормативы влажности воздуха и уровня температуры для помещений с повышенной опасностью прописаны в ПУЭ пункт 1.1.8 и пункт 1.1.10. Данный класс помещений включает в себя отапливаемые механические и электроремонтные цеха и мастерские, слесарно-ремонтные объекты и т.п.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

6.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.

Электробезопасность при работе на ПЭВМ

Электрические установки – это большая потенциальная опасность для человека.

Специфическая опасность электроустановок в следующем: токоведущие проводники, корпуса стоек ЭВМ и прочего оборудования оказавшегося под напряжением в результате повреждения изоляции, не подают каких – либо сигналов, которые предупреждали бы об опасности. Реакция человека на электрический ток возникает лишь при протекании тока через тело.

Для предотвращения электротравматизма большое значение имеет правильная организация обслуживания действующих установок.

Во время работ в электроустановках для предупреждения электротравматизма очень важно проводить соответствующие организационные и технические мероприятия.

Организационные мероприятия:

- оформление работ нарядом или устным распоряжением;
- допуск к работе;
- надзор во время работы;
- оформление перерыва в работе;
- переводов на другое рабочее место;
- окончания работы.

Технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ со снятием напряжения:

- отключение оборудования на участке, выделенном для производства работ и принятием мер против ошибочного или самопроизвольного включения;
- ограждение при необходимости рабочих мест и оставшихся под напряжением токоведущих частей;
- вывешивание предупреждающих плакатов и знаков безопасности;
- проверка отсутствия напряжения;
- наложение заземления.

Особые требования предъявляются к обеспечению электробезопасности пользователей, работающих на персональных компьютерах. К их числу относятся следующие:

- все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
- для отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит;
- все соединения ПЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

По способу защиты человека от поражения током оборудование относится к 1 классу электрических изделий, т. е. к изделиям, имеющим, по крайней мере, рабочую изоляцию и заземление, т. е. всё оборудование имеет защитную изоляцию, заземление – согласно ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» [74].

Пожарная безопасность

Пожар – это неконтролируемое горение во времени и пространстве; пожар наносит материальный ущерб и создает угрозу жизни и здоровью человека.

Причины возникновения пожара в компьютерной аудитории могут быть:

- халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов);
- неправильное устройство и неисправность вентиляционной системы;
- самовоспламенение и возгорание веществ;
- короткое замыкание;

– статическое электричество.

В современных ЭВМ очень высока плотность размещения электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, коммуникационные кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 80 – 100°C. При этом возможно оплавления изоляции соединительных проводов, их оголение и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением, которое ведет к недопустимой перегрузки элементов электронных схем. Они, перегреваясь, сгорают, разбрызгивая искры.

Следовательно, допускается работа только на исправных установках и приборах. К работе могут допускаться лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

Согласно нормам первичных средств пожаротушения ППБ 101 – 89 [75] с учётом наличия электроустановок напряжением до 1000 В, на 100 м² должны быть: один углекислотный огнетушитель типа ОУ – 2, ОУ – 5 или ОУ – 8. Категория по пожарной опасности – В – 4 так как имеются твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыль и волокна), способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом гореть.

Сотрудники лаборатории должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной клетки (рисунок 4.1).

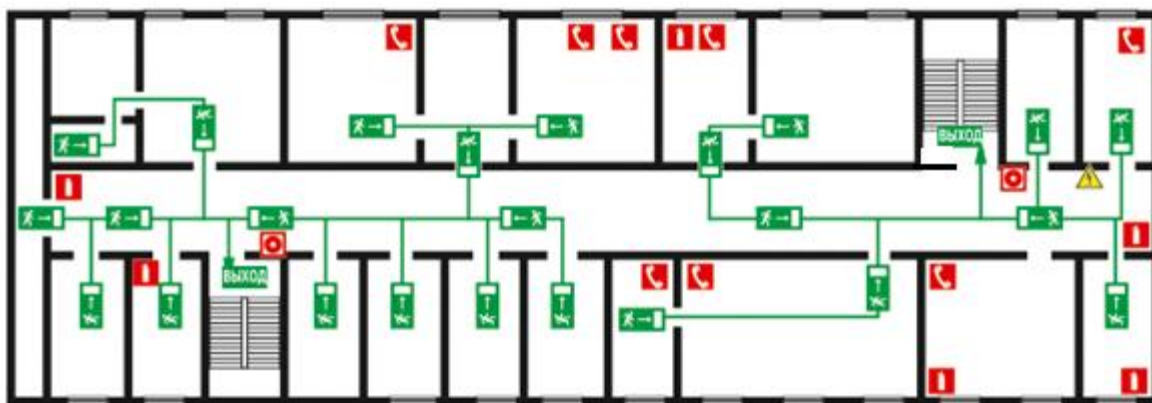


Рисунок 4.1 – План эвакуации людей при пожаре и других ЧС
(первый этаж)

Региональная безопасность

В помещении, в котором осуществляется процесс проектирования, используется офисная техника, в состав которой входят: компьютеры; принтеры; сканеры. Она относится к классу высокотехнологичных изделий.

При эксплуатации компьютерной техники к расходным материалам, не подлежащим восстановлению, относятся:

- манипулятор «мышь»;
- клавиатура.

Клавиатура и манипулятор более чем на 90 % состоят из пластика. Срок эксплуатации, по данным производителей, составляет примерно 5 лет.

При эксплуатации копировальной техники и принтеров остаются использованные картриджи, состоящие примерно на 90 % из пластика. Большинство моделей картриджей рассчитано на одноразовое использование и дополнительной заправке не подлежат. По окончании срока эксплуатации использованные картриджи должны передаваться на восстановление в специализированные предприятия, однако в реальной ситуации картриджи поступают в отходы.

В результате эксплуатации офиса образуются твердые бытовые отходы, в состав которых входит бумага, картон, пластик, люминесцентные лампы.

Разумным подходом к утилизации твердых бытовых отходов является организации вторичной переработки вместо вывоза аппаратуры на свалки.

Обращение с отходами регламентируется Постановлением администрации города Томска от 11.11.2009 N 1110 «Об организации сбора, вывоза, утилизации и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск».

Таким образом, удастся получить некоторое количество ценных материалов, пригодных для повторного использования в качестве сырья, исключая стадию их добычи или изготовления. Данный способ позволит сократить расходы производства и снизить нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения технологического цикла. Утилизация офисной техники с помощью профессионалов, позволяет обеспечить стабильное функционирование процессов производства с использованием вторичных материалов.

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

«Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 - 800 мм, при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПК, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 - 550 мм и углам наклона вперед до 15 град, и назад до 5 град.;
- высоту опорной поверхности спинки 300 плюс-минус 20 мм, ширину - не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах плюс-минус 30 градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260 - 400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной - 50 - 70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 плюс-минус 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350 - 500 мм.

Рабочее место пользователя ПК следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм [76].

Рекомендуется работать в помещении, где окна выходят на север или северо-восток. Местное освещение не должно создавать блики на поверхности экрана дисплея. Недопустим яркий нерассеянный верхний свет (с потолка).

Сдерживать поток избыточного света от окон следует с помощью жалюзи (или тканевых штор).

Заключение

В работе решена актуальная научно-техническая задача исследования кабельной линии как единого электромеханического объекта, имеющая существенное значение для определения степени влияния на изоляцию силового кабеля факторов, обусловленных магнитной составляющей собственного электромагнитного поля.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты и сделать выводы:

Установлено, что при протекании в кабеле трёхфазного переменного тока по жилам, расположенным по углам равностороннего треугольника, внутри кабеля создаётся круговое вращающееся поле. Его форму можно представить изображающим суммарным вектором МДС, вращающимся относительно центра кабеля в направлении, обусловленном порядком чередования фаз. Поле вызывает магнитные потери в оболочке кабеля и дополнительные потери в изоляции посредством воздействия на токи утечки, обусловленные электрическим полем.

Для учёта степени дополнительного воздействия на изоляцию магнитного поля, созданного активной нагрузкой, предложен коэффициент пропорциональности потерь, связанных с действием электрического и магнитного полей. Этот коэффициент характеризует соотношение активных мощностей, выделяемых в изоляции кабеля за счёт энергии магнитного и электрического полей, воздействующих на свободные заряды в диэлектрике.

Показано, что разрушающее воздействие на диэлектрик магнитного поля схоже и соизмеримо с действием электрического поля и, следовательно, связано с усилением электрохимических процессов, приводящих к изменениям в структуре диэлектрика и развитию пробоя.

Наличие магнитного поля увеличивает износ изоляции в рабочих режимах на несколько процентов по сравнению с износом от действия электрического поля. При этом за время действия устройств релейной защиты

при протекании токов двух- и трёхфазного короткого замыкания, кабель будет испытывать разрушающее воздействие от магнитного поля, соизмеримое с действием электрического поля.

Получены аналитические уравнения расстояния, скорости перемещения и активных потерь от механических колебаний жил кабеля в зависимости от расположения жил и тока нагрузки. Показано, что тангенциальная и радиальная составляющие электродинамической силы приводят к появлению угловых колебаний двойной частоты относительно центральной оси кабеля.

Доказано, что совместное действие радиальных составляющих сил трёх жил приводит к тому, что на каждую жилу действует переменная выталкивающая сила. Это может вызвать увеличение расстояния между незакреплёнными жилами кабеля в индивидуальной полиэтиленовой изоляции.

Установлена зависимость удельной механической нагрузки на изоляцию от диаметра кабеля. Показано, что указанная нагрузка пропорциональна радиусу жилы в третьей степени, квадрату плотности тока и обратно пропорциональна расстоянию между жилами.

Сделан вывод о том, что с ростом сечения жил кабеля возрастает механическая нагрузка от сил Ампера на изоляцию кабеля при условии постоянной плотности тока в жилах.

Полученные расчётные соотношения позволяют моделировать механическое воздействие на изоляцию кабеля на этапах проектирования и диагностики кабельной линии, что позволяет увеличить ресурс кабельных линий и снизить риск аварийных ситуаций.

Список использованных источников

1. Старение изоляции силового кабеля 6-10 кВ от действия собственного магнитного поля: дис. канд. техн. наук / Томашева Е.В. – Челябинск, 2006. – 130 с.
2. Анализ повреждений изоляции в распределительных электрических сетях / Н.А. Бендюк, Е.Б. Петрашева, М.Н. Хомутова, К.В. Лапченков и др., Безопасность жизнедеятельности: Сб. научн. трудов. - Челябинск: ЧГТУ, 1996. - с. 10-16.
3. Андреев, А.М. Исследование старения электроизоляционных материалов силовых кабелей и конденсаторов / А.М. Андреев, В.А. Канискин, Ю.А. Полонский, Электричество. - 1999. - №1. - с. 39 -44.
4. Баранов, Б.М. Сооружение и эксплуатация кабельных линий / Б.М. Баранов - Изд. 2-е, перераб. - М.: Энергия, 1974. - 215 с.
5. Бендюк, Н. А. Контроль изоляции на рабочем напряжении в электрических сетях 6-35 кВ сельскохозяйственного назначения: дис. канд. техн. наук / Н.А. Бендюк. - Челябинск, 1990. - 210 с.
6. Белорусов, Н.И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчёт и конструкции) / Н.И. Белорусов. - М.: Энергия, 1971. - 270 с.
7. Берман В.И., Феськов Е.М., Юркевич В.М. Измерение распределения напряженности электрического поля в кабельной муфте / В.И. Берман, Е.М., Феськов, В.М. Юркевич, Электротехника - 1998. - №5. - с.25-29
8. Бессонов Л.А., Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов - 7-е изд., перераб.и доп.- М.: Высшая школа, 1978 - 528 с.

9. Бессонов Л.А., Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле : учебник для студентов вузов - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш.школа, 1978 - 231 с.
10. Богородский, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородский, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев - Изд. 6-е, перераб. - Д.: Энергия, 1977 - 352 с.
11. Брагин, С.М. Электрический кабель / С.М. Брагин - М.; Д.: Госэнергоиздат, 1955 - 264 с.
12. Брагин, С.М. Электрический и тепловой расчёт кабеля / С.М. Брагин - М.: Госэнергоиздат, 1960. - 328 с.
13. Власов, А.Б. Тепловой метод прогнозирования срока службы кабелей с резиновой изоляцией / А.Б. Власов // Электрика. - 2003. - №1. - с. 27-31
14. Радин В. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е.; Под ред. И.П. Копылова - 3-е изд., перераб. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с.
15. Воробьев, Г.А. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов. - Томск: Изд-во ТПУ, 2003.- 115 с.
16. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия. - Введ. 1975 - 01 - 01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1973. - 27 с.
17. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. - Введ. 1990 - 07-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1990. - 38 с.
18. Золотарёв, В.М. К оценке максимальной тангенциальной напряженности электрического поля в трехжильном силовом кабеле с поясной изоляцией на напряжение 10кВ / В.М. Золотарёв, В.П. Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.А. Антонец, А.А. Науменко // Электротехника. - 1998. - №5. - С. 13-17

19. Изоляция установок высокого напряжения / Г.С. Кучинский, Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь; под ред. Г.С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-368 с.
20. Иерусалимов, М.Е. Многофакторная математическая модель термонапряженной электроизоляции / М.Е. Иерусалимов, С.А. Соколовский, С.Г. Радченко, Ю.В. Романенко, С.Н. Лапач // Электричество. - 1991. - №8. - с. 40-45 с.
21. Инкин, А.И. Электромагнитные поля и каскадные схемы замещения трёхфазных кабельных линий с проводящей оболочкой в несимметричных режимах работы / А.И. Инкин, Ю.А. Лавров, Е.А. Криворучко // Электричество. - 2007. - № 8. - с. 38-42
22. Канискин, В.А. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей / В.А. Канискин, А.А. Пугачёв, А.И. Таджибаев; под ред. А.И. Таджибаева. - С-Пб.: ПЭИПК, 2007. - 275 с.
23. Канискин, В.А. Неразрушенный метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации / В.А. Канискин, Э.М. Костенко, А.И. Таджибаев // Электричество. - 1995. - № 5. - с. 19 -23.
24. Кобыляков, А.А. Причины старения изоляции силовых кабелей электрических сетей 6-10 кВ /А.А. Кобыляков //Электробезопасность. - 2001. - № 4. - с. 47 -51.
25. Колечицкий, Е.С. Анализ условий работы однофазных кабелей на ГТУ / Е.С. Колечицкий, А.Г. Кострик, В.Н. Копаев // Сб. док. девятой Российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. ЭМС-2006. Санкт-Петербург: Изд-во ВИТУ. - 2006. - с. 48-51.
26. Коржов, А.В. Электродинамическое взаимодействие жил трёхфазного силового кабеля / Коржов . А.В., Томашева Е.В. // Ежеквартальный теоретический и научно-практический журнал «Электробезопасность». - 2006. - №3-4 - С. 15 - 24.

27. Коржов, А.В. Энергетическая диаграмма силового кабеля для анализа активных потерь, влияющих на состояние изоляции / А.В. Коржов, Е.В. Томашева // Вестник Ю-УрГУ. Серия «Энергетика». - Челябинск: Издательство ЮУрГУ. - 2008. - Вып. 9. - № 11 (111). - с. 29-31.
28. Коржов, А.В. Методика исследования распределения тепловых потоков внутри кабеля / А.В. Коржов, Е.В. Томашева // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Третья всерос. науч.- практич. конф. (с международным участием): сб. материалов. - Челябинск: Издательство ЗАО «Челябинская межрайонная типография», 2006. - с. 47-49.
29. Коржов, А.В. Уровни электромагнитного поля вблизи силовых кабельных линий напряжением 6-10 кВ / А.В. Коржов, Е.В. Томашева // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Всерос. науч.-технич. конф. 15-16 ноября 2007: сб. науч. трудов. - Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2007. - Т.2. - с. 223 - 229.
30. Коржов, А.В. Теоретическое и экспериментальное исследование уровней магнитных полей вблизи силовых кабельных линий, эксплуатирующихся в городских условиях [Текст] / А.В. Коржов,
31. Кошкин, Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. - изд. 6-е Наука, М.: - 1974 г. - 255 с.
32. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин : учебное пособие / Н.Л. Кузнецов. – М.: изд. Дом МЭИ, 2012. – 432с.
33. Куроедов, В.И. Влияние тепловых параметров грунта на перегрузочную способность силового кабеля / В.И. Куроедов, А.А. Лыков // Электрика. - 2004. - №10. - с. 21-27
34. Лапченков, К. В. Управление состоянием изоляции в распределительных электрических сетях: дис. канд. техн. наук ./ К.В. Лапченков. - Челябинск, 1998. - 120 с.

35. Ларионов, В.П. Техника высоких напряжений: учебник для техникумов / В.П. Ларионов, В.В. Базуткин, Ю.Г. Сергеев // Под ред. В.П. Ларионова - М.: Энергоиздат, 1982. - 296с.
36. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: учебник для вузов / Э.Т. Ларина - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1996. - 450 с.
37. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ: в 3т. / под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова - М.: Папирус Про, 2004. - Т. 3.
38. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. - СПб.: Питер, 2003.-462 с.
39. Леонов, В.М. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учебн. заведений / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный // Под ред. И.Б. Пешкова. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. - 432 с.
40. Оверин, Б.А. Электробезопасность на предприятиях цветной металлургии / Б.А. Оверин - М.: Металлургия, 1992. - 240 с.
41. Петров, О.А. Методика измерения емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях напряжением 6 - 10 кВ / О.А. Петров, А.И. Сидоров, А.А. Сельницын. - Челябинск, 1990 - 24 с.
42. Пешков, И.Б. Новые направления в разработке методов определения ресурса кабелей и проводов / И.Б. Пешков // Электричество. - 1985. - № 4. - с.20 - 22.
43. Привезенцев, В. А Основы кабельной техники / В. А. Привезенцев, И.И. Гроднев, С.Д. Холодный, И.Б. Рязанов // под ред. В.А. Привезенцева. - М.; Л.: Энергия, 1967 - 461 с.
44. СанПиН 2.2.4.1191-03. Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных

условиях. - М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003.

45. Сидоров, А.И. Определение сопротивления изоляции по отношению к земле сетей с изолированной нейтралью 6-35 кВ по режимным факторам / А.И. Сидоров, Н.А. Хусаинова, А.Л. Шестаков // Известия Челябинского Научного Центра, вып. 1, разд. «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности». - 2000. - с. 45 - 48

46. Жуловян В.В. Основы электромеханического преобразования энергии / В.В. Жуловян – Новосибирск: НГТУ, 2014 - 427 с.

47. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. - М.: Наука, 1979 - 832 с.

48. ТУ 16. К71-335-2005. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ. Технические условия ОАО «Севкабель». - Введ. 2005 -02 -02. - Спб: 2004.

49. ТУ 16. К71-300-2003. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10кВ. Технические условия компании «РЕКА-кабель». - Введ. 2003 - 02 - 02.

50. Уайт, Д.С. Электромеханическое преобразование энергии / Д.С. Уайт., Г.Х.Вудсон; пер с англ Н.Ф. Ильинского; [под ред. С.В. Страхова].- М.: - Л.: Энергия, 1964 - 528 с.

51. Федоров, А. А. Электроснабжение промышленных предприятий / А.А. Федоров, Э.М. Ристхейн. - М.: Энергия, 1981. - 360 с.

52. Холодный, С.Д. Нагревание и охлаждение кабеля, проложенного в земле / С.Д. Холодный // Электричество - 1964. - № 6 - с. 35 - 40.

53. Шувалов, М.Ю. О возможности построения флуктуационной теории электрической прочности / М.Ю. Шувалов //Электричество. - 1993,-№6 - с. 27-32

54. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф - М.: Наука, 1979. - 942 с.

55. Habiballah, I.O. Magnetic field measurement and simulation of A 230 kV substation / I.O. Habiballah, M.M. Dawoud, K. Al-Balawi, A.S. Farag // Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003) Electromagnetic Fields and Our Health. - 20-22 October 2003 - P. 10-22.
56. Bracken T.D. Magnetic Field Exposure Among Utility Workers / T.D. Bracken, et al // Bioelectromagnetics.-1995.- Vol 16.- P. 216-226.
57. Wertheimer N. Adult Cancer Related to Electrical Wires Near Home / N. Wertheimer, E. Leeper // American Journal of Epidemiology. - 1982.-Vol 11.-P. 345-355.
58. IEEE Magnetic Fields Task Force (PES/TD/CFE/ACFWG), October 1988, Magnetic Fields from Electric Power Lines. Theory and Comparison to Measurements, IEEE Trans, on Power Delivery, 3: 2127-2136.
59. Farag, A.S. Magnetic Field Measurements and Modeling of Substations / A.S. Farag, T.C. Cheng, P. Du, C. Zheng, S. Hu, J. Thompson, D. Fugate, B.Olsen // EPRI Electrical Systems Division - Magnetic Field Shielding Workshop Meeting.- Los Angeles., CA., USA. - Dec.6-7, 1993.
60. Durkin, C.J. Five Years of Magnetic Field Management / R. P. Fogarty, T.M. Halleran, Dr D.A. Mark, A. Mukhopadhy // IEEE Transaction on Power Delivery. - January 1995. - Vol.10. -No.1.
61. Habiballah, I.O. Underground Cable Magnetic Field Simulation and Measurement Using New Design Configuration / I.O. Habiballah, A.S. Farag, M.M. Dawoud, A.Firoz // Electric Power System Research — May, 1998.-Vol.3 -P. 141-148.
62. Riba J.R. Experimental behavior of a magnetic shield for an underground power line [Текст] / J.R. Riba, X. Alabern // International Conference on Renewable Energy and Power Quality. - Zaragoza. - 2005.
63. Ehrich M. Magnetic field reduction of power cables by multi-splitting of conductors and compensation effects / M. Ehrich, L.O. Fichte, M.

Luer // Environmental Electromagnetics, CEEM 2000. Proceedings. Asia-Pacific Conference - 2000. - P. 33-38

64. Olsen R.G. The performance of reduced magnetic field power lines theory and measurements on an operating line / R.G. Olsen, V.L. Chartier // IEEE/PES Seattle Summer Meeting, Seattle. July 12-16, 1992.

65. Xu X.B. Computation of magnetic fields generated by an underground pipe-cable / X.B. Xu, X Yang // IEEE Transactions on Power Delivery. - Vol.11, No.2. - April, 1996. - P.650-655

66. Moore T. Exploring the options for magnetic field management / T. Moore // EPRI Journal. - Vol.15. - No.6. - October/November 1990. - P.4-19.

Приложение А

Раздел 1

Analytical investigation of the magnetic field action on insulation

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ5В	Естаев Е.Т.		

Консультант кафедры электрических сетей и электротехники (ЭКМ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭКМ	Леонов А.П.	к.т.н.		

Консультант – лингвист кафедры иностранных языков энергетического института (ИЯЭИ):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я	к.п.н., доцент		

2. Analytical investigation of the magnetic field action on insulation

The characteristics of the electric field nature and its strength at various points of the three-phase cable have been investigated [16,22]. This field is non radial, when it rotates field intensity on the cores surface varies from point to point. The electric field strength acting on free charges at various points of the three-phase power cable is determined by the voltage magnitude, the insulation thickness and the configuration of the electrical conducting surfaces between which the electric field lines pass. The effect of an electric field on free carriers of charges in insulation leads to the appearance of leakage currents [14,15], and the polarization processes of displacement of bound charges to the moment of equilibrium state establishment to the appearance of bias currents, which are caused by a change in the electric displacement vector flow and are determined by the state of the electric field.

The form and intensity of the magnetic field depend on the cables geometric position line and the magnetic properties of the space in which this field exists.

For three-cores power cables in a common metal casing (with a common wire screen) or with tape steel armor. Due to mutual compensation of magnetic fields from currents in a three-phase system, equal in value and shifted in phase by 120 degrees, losses in casing or screen are relatively small. The sum of the instantaneous values of the magnetic fluxes created by the cores currents is zero at any time. Full compensation of magnetic fields is observed when all three conductors coincide at one point of the axes, which in real constructions is impossible. However, in general, these losses are insignificant for these cases.

Let us further consider the effect of the magnetic field on the cable insulation taking into account the nature of the magnetic field created by the cores of a three-phase power cable.

For an example of carrying out comparative calculations of the magnetic field effect on the insulation of power cables, three types of cable lines for a voltage of 10 kV and a section of the conductor of 240 mm² are considered:

2.1 Electromechanical processes in the cable line

According to [20, 25, 59], an electromechanical energy converter is a device that performs mutual conversion of electrical and mechanical energy. This transformation occurs through the field existing in the environment; Which fills the space between the interacting parts of the converter. The medium is air or a substance with predetermined magnetic or electrical properties, such as electrical steel in an electrical machine [20, 25]. From this point of view, a cores of the three-cores cable, are exposed to Ampère forces, refers to an electromechanical converter that performs partial conversion of the energy consumed from the network to mechanical vibrations of the cores.

When transmitting electricity in a power cable, there are active losses caused by physical processes associated with energy conversions. There are two types of energy: mechanical and thermal.

When deriving the basic calculation relationships connecting the thermal and mechanical parameters in the energy balance equation [59, 49], it is expedient to adopt the following simplifying assumption: the total power consumed by the cable from the power supply (P_{xx}) is divided by the power transferred to the consumer (P_{1out}), allocated in CC (P_{el}) on the active resistance of the cores, the mechanical power (P_{mech}), due to electrodynamic forces and the power associated with the change in the energy of the magnetic field (P_{ω}).

The total active power due to electric field action (P_E) and the power due to the action of the magnetic field on the leakage currents (P_{em}) and on the magnetic losses in the metal casing (screen) of the cable (P_{mag}). The total power is considered as additional losses in the cores (P_{add}) due to an additional equivalent active resistance (R_{eq}), since these losses are not related to a change in the cores inductance when the load current flows.

The scheme of substitution of a single-cores cable of a three-cores cable along the path of the load current can be represented in the form (Figure 2):

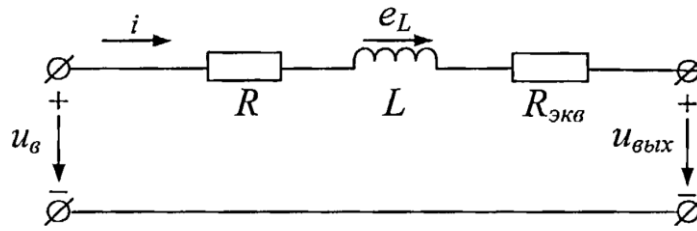


Figure - 2 Cable replacement scheme (isolated CC)

For this substitution scheme, the expression in instantaneous values has the following form:

$$e_L = -u_B + i \cdot (R + R_{eq}) + u_{out} \quad (11)$$

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} \quad (12)$$

$\frac{d\psi}{dt}$ – Change in flux linkage over time due to inductance CC; u_i – input voltage; $i \cdot R$ – Voltage drop on the active CC resistance; $i \cdot R_{eq}$ – Voltage drop at equivalent resistance; u_{out} – Load voltage

The flux coupling is equal to the total inductance product of the CC L and load current i :

$$\psi = L \cdot i \quad (13)$$

The electromagnetic moment that arises when the energy of the magnetic field changes is determined by the expression:

$$M = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (14)$$

$\frac{dL}{d\theta}$ – Change in the total inductance of the CC when it deviates by an angle θ from the neutral position, with harmonic oscillations, due to Ampère forces.

Taking into account expression 13, the time-flux derivative has the form:

$$\frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (15)$$

Then equation 11 taking into account 15 and 12 takes the following form:

$$u_{out} - u_B = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} + i \cdot R + i \cdot R_{eq} \quad (16)$$

or

$$\Delta u = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} i \cdot \frac{dL}{dt} + i^2 \cdot R + i^2 \cdot R_{eq} \quad (17)$$

The angular frequency of the oscillations of the CC is determined by the angle of the cores deviation from the neutral position:

$$\omega_m = \frac{d\theta}{dt} \quad (18)$$

Then equation (17) takes the form:

$$i \cdot \Delta u = i \cdot L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt} + \frac{1}{2} \omega_m \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} + i^2 \cdot R + i^2 \cdot R_{eqB} \quad (19)$$

or

$$\Delta P = P_{mech} + P_{el} + P_{\omega} + P_{add} \quad (20)$$

Here

$\Delta p = i \cdot \Delta u$ - change in the total power of one cores;

$P_{Mex} = \frac{1}{2} \omega_m \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}$ - the instantaneous value of the mechanical power of the cores, caused by electrodynamic forces from the load currents;

$P_{\text{эл}} = i^2 \cdot R$ - instantaneous value of the power allocated on the active resistance of the cores;

$P_{\omega} = i \cdot L \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{dt}$ - Instantaneous power value due to the change in the energy of the magnetic field;

$P_{add} = i^2 \cdot R_{equ} = (P_E + P_{EM} + P_{mag})$ - Instantaneous power value, additional losses due to the action of electric and magnetic fields on leakage currents and eddy currents.

Power P_{ω} is necessary to maintain the magnetic field in the inductively coupled wires of the cable when AC current flows, taking into account the varying inductance. Harmonic character of the current and inductance of the coress, this power is a measure of the intensity of energy exchange between the residential and power supply.

The mechanical and additional losses due to the effect of the magnetic field on leakage currents, as well as magnetic losses in the shell (screen), enter into a single equation of the energy balance (20) and in determining the efficiency of

electric power transmission from source to consumer. Therefore, they are considered together, despite the different nature of physical impact to isolation.

The polarization process in insulation must be considered taking into account the intrinsic magnetic field from the load current which increases the active losses caused by the leakage current through the insulation of the power cable and leads to additional aging of the cable insulation from the action of the intrinsic magnetic field as compared with aging from leakage currents caused by the action of the electric field on free charges in the dielectric. Also, it is necessary to take into account the variation of the magnetic field outside the cable with different mutual arrangement of the cores (cable in the CL).

2.2. Determination of the strength of an external magnetic field

The induction of the magnetic field is related to the intensity through the magnetic constant μ_a (for a non-magnetic medium μ_0) [13, 51]. Therefore, in determining the values of the magnetic field, the parameter of the field intensity from the currents in the cable cores is considered. Single-cores cables can be located in the CL by a triangle or in the plane [57].

2.2.1. The intensity of the magnetic field when laying in the plane

The intensity of the magnetic field at an arbitrary point located above the residential phase B when the conductors of the cables are in the plane, as shown in (Figure 3).

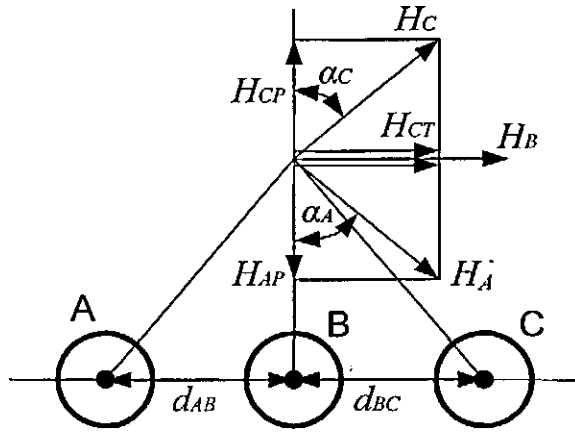


Figure - 3 Vector diagram of the magnetic field strengths at an arbitrary point in space above the average residential B at the location of the cores in the plane

The definition of the strength (H) is based on the law of total current [13,51] and the principle of superposition of fields created by conductors with current located in a linear, in a magnetic ratio, medium. That is, the intensity of the field, at a point removed at a distance x from the center of the conductor, along which the current flows, can be determined by the equation:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot x} \quad (21)$$

When calculating the intensity of the field, the following notation is used:

$R_A(R_B, R_C)$ - Distance from coress of phase A (B, C) to the point of space in which the field strength is determined;

$d_{AB}(d_{BC})$ - Distance between the axes of cores of phases A and B (B and C);

$\alpha_A(\alpha_C)$ - Angle between the lines, one of which is the axis of the cores of phases A, B and C, and the other connects the axis of the cores of phase A (C) to the point at which the field strength is determined.

The field intensity vector coincides with the magnetic induction vector and is directed along the tangent to the magnetic field line; therefore, for the chosen positive direction of the currents in the cores, the field strength vector at an arbitrary point above the cores phase B will be directed as shown in Fig. 3 and angles will be satisfied Relationship:

$$tg\alpha_A = \frac{R_B}{d_{AB}}; \quad (22)$$

$$\mathit{tg}\alpha_C = \frac{R_B}{d_{BC}} \quad (23)$$

Whence

$$\alpha_A = \mathit{arctg}\left(\frac{R_B}{d_{AB}}\right); \quad (24)$$

$$\alpha_C = \mathit{arctg}\left(\frac{R_B}{d_{BC}}\right) \quad (25)$$

To determine the general field strength vector, it is necessary to determine the radial component of the sum of the projections of all the field strength vectors per axis connecting the cores of phase B to the point under study and the tangential component of the projections of these vectors per axis perpendicular to the radial axis.

The radial component of the field strength from the current of the phase conductor C:

$$\mathbf{H}_{Crad} = \mathbf{H}_C \cdot \cos(\alpha_C) \quad (26)$$

The radial component of the field strength from the current of the phase A conductor:

$$\mathbf{H}_{Arad} = \mathbf{H}_A \cdot \cos(\alpha_A) \quad (27)$$

The sum of the radial components of the field strength vectors at the point under study:

$$\mathbf{H}_{rad} = \mathbf{H}_{Crad} - \mathbf{H}_{Arad} \quad (28)$$

The positive value of the total radial component from the phase conductor Bk to the outer side of the cable.

The tangential component of the field strength from the current of the phase conductor C:

$$\mathbf{H}_{Ctg} = \mathbf{H}_C \cdot \sin(\alpha_C) \quad (29)$$

The tangential component of the field strength from the current of the phase A conductor:

$$\mathbf{H}_{Atg} = \mathbf{H}_A \cdot \sin(\alpha_A) \quad (30)$$

The sum of the tangential components of the field strength vectors at the point under study:

$$\mathbf{H}_{tg} = \mathbf{H}_{ctg} + \mathbf{H}_{Atg} + \mathbf{H}_B \quad (31)$$

The general vector of the strength of the field at a point is defined as the square root of the sum of the squares of the radial and tangential components of the vectors:

$$\mathbf{H} = \pm \sqrt{\mathbf{H}_{rad}^2 + \mathbf{H}_{tg}^2} \quad (32)$$

2.2.2. The intensity of the magnetic field when the coress are arranged in a triangle

The coress of a three-phase power cable can be located at the corners of an equilateral triangle. To calculate the strength of the magnetic field at an arbitrary point, the superposition principle and the law of total current are used.

The intensity of the magnetic field at an arbitrary point located above the residential phase. In the arrangement of the wires of the power cable at the angles of an equilateral triangle, as shown in Fig. 4.

When calculating the strength of the field from the three cores of the cable located at the corners of an equilateral triangle, in addition to those adopted above, we take the following notation:

\mathbf{R}_m - Distance from the center of the cable to the point of space in which the field strength is determined;

\mathbf{O}_1 - Distance from the center of the cable to the line connecting the centers of neighboring cores of phases A and C;

$\alpha_A(\alpha_C)$ - Angle between the lines, one of which is the axis of the cores of phase A and C, and the other connects the axis of the cores of phase A (C) to the point at which the field strength is determined.

\mathbf{R} - The distance from the center of the cable to the center of the cores.

The field strength vector coincides with the magnetic induction vector and is directed along the tangent to the magnetic field line; therefore, for the chosen positive direction of the currents in the cores, the field strength vector at an arbitrary point above the cores phase B will be directed as shown in Fig. 4 and the angles will be satisfied Relationship

$$:tg\alpha_A = \frac{R_m + O_1}{d_{AB}}; \quad (33)$$

$$tg\alpha_C = \frac{R_m + O_1}{d_{BC}}. \quad (34)$$

Whence

$$\alpha_A = arctg\left(\frac{R_m + O_1}{d_{AB}}\right); \quad (35)$$

$$\alpha_C = arctg\left(\frac{R_m + O_1}{d_{BC}}\right). \quad (36)$$

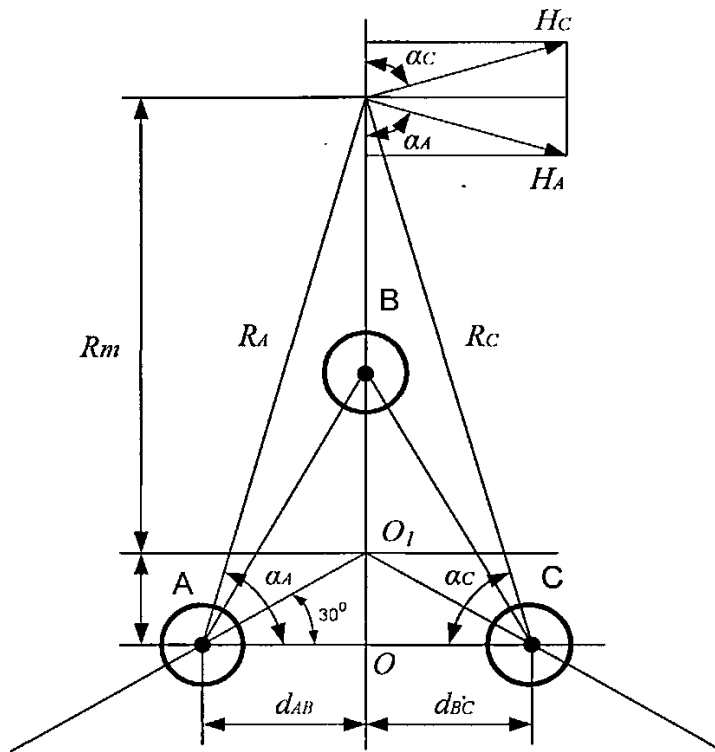


Figure - 4 Vector diagram of the magnetic field strengths at an arbitrary point in space above the residential phase B when the cores are arranged at the corners of an equilateral triangle.

The distance from the center of the cable to the line connecting the centers of neighboring cores and the distance between the axes of the conductors is calculated by the formulas:

$$\mathbf{O}_1 = R \cdot \sin(30^\circ); \quad (37)$$

$$\mathbf{d}_{AB} = \mathbf{d}_{BC} = R \cdot \cos(30^\circ). \quad (38)$$

The distance from each cores to the point of space in which the field strength is determined:

$$R_A = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_A)}; \quad (39)$$

$$R_B = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_B)}; \quad (40)$$

$$R_C = \frac{R_m + O_1}{\sin(\alpha_C)}. \quad (41)$$

To determine the general field strength vector, it is necessary to know the radial component of the sum of the projections of all the field strength vectors per axis connecting the cores of phase B to the point under study and the tangential component of the projections of these vectors per axis perpendicular to the radial axis.

The radial component of the field strength from the current of the phase A conductor:

$$\mathbf{H}_{Arad} = \mathbf{H}_A \cdot \cos(\alpha_A) \quad (42)$$

The radial component of the field strength from the current of the phase conductor C:

$$\mathbf{H}_{Crad} = \mathbf{H}_C \cdot \cos(\alpha_C) \quad (43)$$

The radial component of the field strength from the current of the cores of phase B is equal to zero.

The sum of the radial components of the field strength vectors at the point under study:

$$\mathbf{H}_{rad} = \mathbf{H}_{Crad} - \mathbf{H}_{Arad} \quad (44)$$

The positive value of the total radial component from the phase conductor Bk to the outer side.

The tangential component of the field strength from the current of the phase conductor C:

$$\mathbf{H}_{ctg} = \mathbf{H}_C \cdot \sin(\alpha_C) \quad (45)$$

The tangential component of the field strength from the current of the phase A conductor:

$$\mathbf{H}_{Atg} = \mathbf{H}_A \cdot \sin(\alpha_A) \quad (46)$$

The sum of the tangential components of the field strength vectors at the point under study:

$$\mathbf{H}_{tg} = \mathbf{H}_{ctg} + \mathbf{H}_{Atg} + \mathbf{H}_B \quad (47)$$

Calculations of the strength of the magnetic field for various types of cable lines are shown as a function of the distance to the point under study (Figure 6 and Figure 7) and depending on the load current at a distance from the cable center of 500 mm (Figure 8). As the rated current load for all three types of cables, 300 A is assumed - the long-term permissible current load in the ground for a cable [22]. In the calculations, in accordance with the requirements of the specifications for cooling conditions, the arrangement of single-cores cables is assumed to be close to the triangle (triple) installation, and with the distance between the wire surfaces equal to the cable diameter when laying in the plane (row).

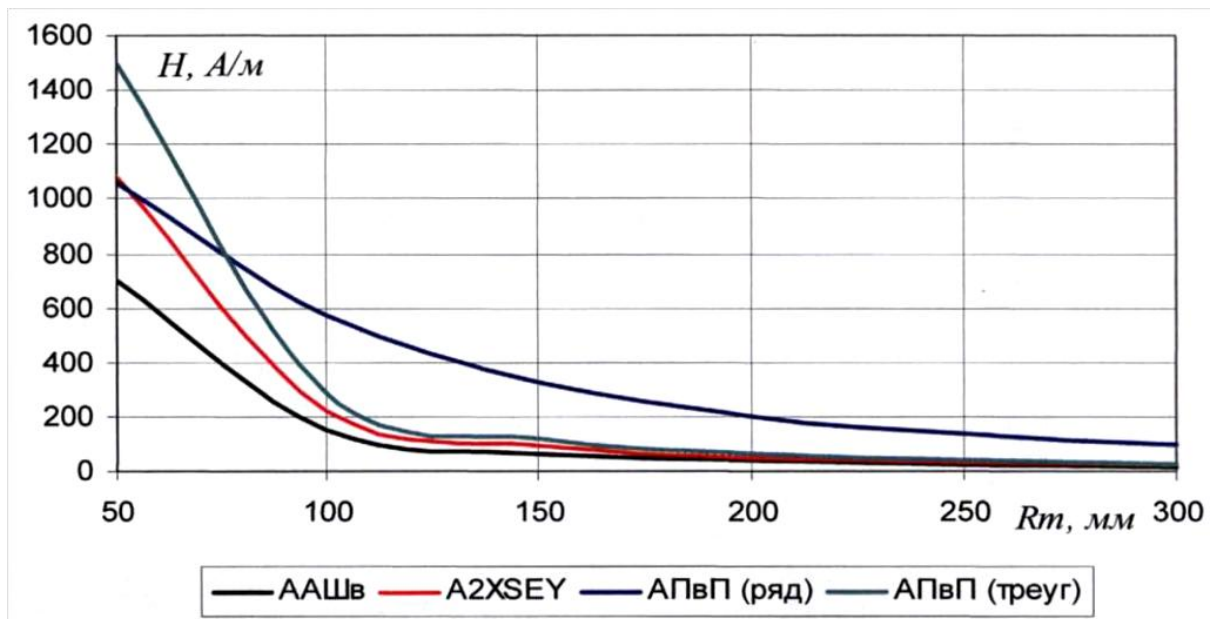


Figure -6 The intensity of the magnetic field at a current in the cores of 300 A for various types of cable lines, depending on the distance to the center cable in the range of 50-300 mm

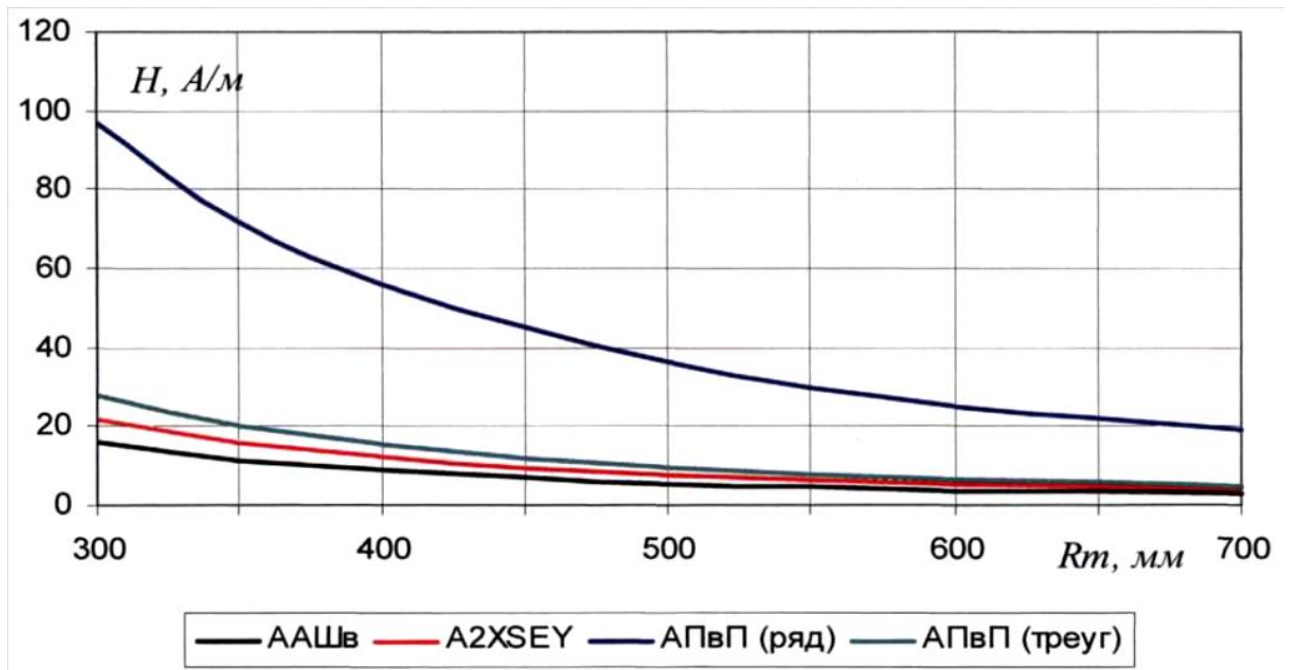


Figure -7 The intensity of the magnetic field at a current in the cores of 300 A for various types of cable lines, depending on the distance from the center cable in the range 300-700 mm

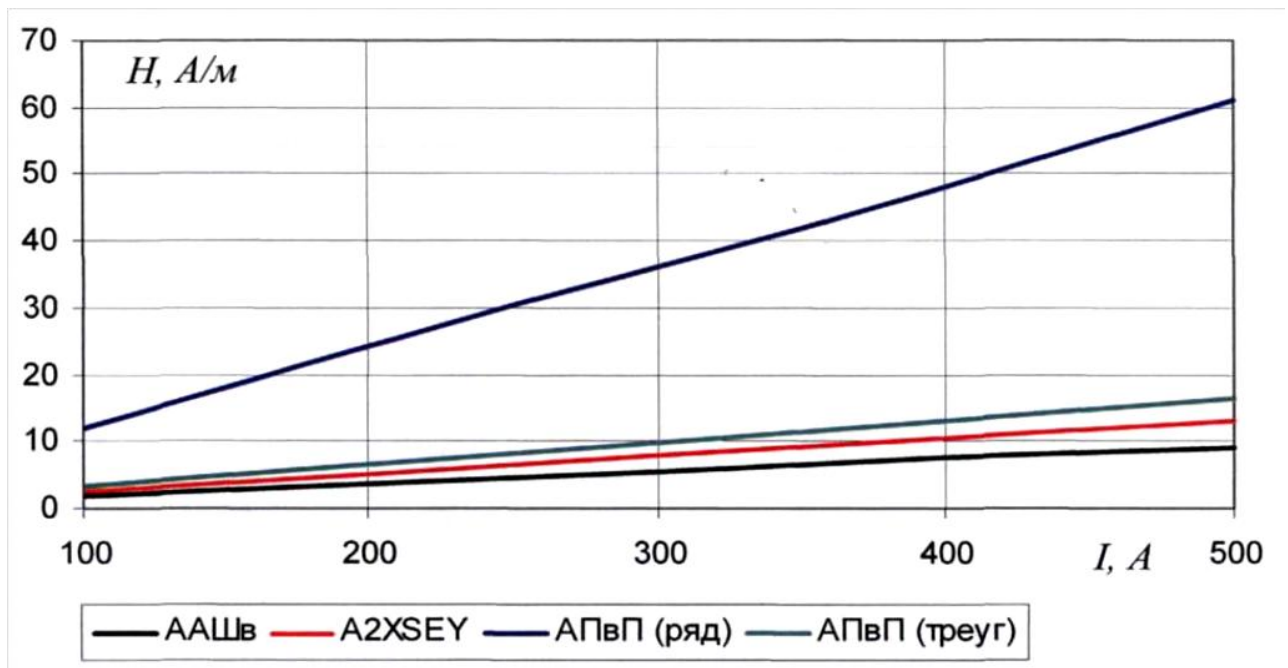


Figure - 8 The intensity of the magnetic field for various types of cable lines, depending on the current in the cores at a distance of 500 mm to the center of the cable

The maximum permissible levels of the intensity of the periodic (sinusoidal) magnetic field are established in [65] for the conditions of general and local effects.

Comparison of the results of magnetic field strength calculations with regulatory data showed that at a distance of 500 mm from the cable center, corresponding to the minimum depth of cable laying, all three types of cable lines fit into the requirements of the remote control for long-term exposure. However, at a load of 300 A, at a distance of 150 mm, all the cable lines considered in the example create a magnetic field strength above the minimum permissible level of 80 A / m. At the same time, the worst performance in remote control is observed when laying single-cores cable lines in the plane. The intensity of the magnetic field of such a cable line with an allowable load will exceed the permissible limit for long-term exposure (more than 8 hours) at a distance of 330 mm or less from the center of the cable. This is explained by a decrease in the mutual compensation of the magnetic fields of neighboring cores when the latter are arranged in a row.

When laying in the plane, the intensity of the external magnetic field increases several times. For single-cores cable at a rated current of 300 A, the

magnetic field strength for laying in a plane at a distance of 100 mm from the central cores of the cable will be 2 times higher than when laid with a triangle. And at a distance of 700 mm, at the same load - 3.8 times higher.