

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

Институт: Энергетический
Направление подготовки: 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Кафедра: Электротехнических комплексов и материалов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

УДК 621.315.61-192

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Бекк Павел Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭКМ	Дудкин Анатолий Николаевич	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭКМ	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н., профессор		

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Знать и владеть методами решения научных и производственных проблем работодателя.
P2	Уметь использовать современное научное и технологическое оборудование для решения проблем предприятия.
P3	Владеть пакетом программ по компьютерному моделированию кабельных изделий, электроизоляционных систем и наноматериалов.
P4	Владеть практическими навыками проектирования, монтажа и эксплуатации кабельных линий.
P5	Владеть основами маркетинга в кабельной отрасли.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P6	Обладать способностью формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
P7	Обладать способностью применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
P9	Обладать способностью использовать иностранный язык в профессиональной сфере
P10	Обладать способностью использовать углубленные теоретические и практические знания, которые находятся на передовом рубеже науки и техники в области профессиональной деятельности

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

Институт: Энергетический
Направление подготовки: 13.04.02 – «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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Бекк Павлу Андреевичу

Тема работы:

Определение показателей надежности систем межвитковой изоляции	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22.01.16, №273/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования является межвитковая изоляция низковольтных асинхронных электродвигателей.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор отечественных и зарубежных литературных источников с целью выявления достижений мировой науки и техники в области надежности электроизоляционных систем низковольтных электрических машин. Постановка задачи исследования: оценка показателей надежности и долговечности (ВБР) межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных электродвигателей, выполненных из вновь разработанных материалов и компонентов.

	<p>Провести анализ влияния свойств материалов, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на величину ВБР. Обсуждение результатов работы.</p> <p>Дополнительные разделы: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность», раздел на иностранном языке.</p>
--	---

Перечень графического материала	Презентация
--	-------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко Аркадий Альбертович
Социальная ответственность	Романцов Игорь Иванович
Приложение М	Федоринова Зоя Владимировна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

1.1. Описание системы изоляции электрических машин
1.2. Электроизоляционные материалы применяемы для изготовления систем изоляции низковольтных электродвигателей
1.3. Факторы воздействующие на систему изоляции низковольтных электрических машин

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.03.16
---	----------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭКМ	Дудкин Анатолий Николаевич	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Бекк Павел Андреевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Бекк Павлу Андреевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>В научном исследовании были задействованы 3 человека (научный руководитель, лаборант, инженер), а также материальные ресурсы и специальное оборудование</i>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<p><i>В данном разделе:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <i>1. Был проведен анализ потенциальных потребителей результатов исследования.</i> <i>2. Был проведен анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.</i> <i>3. Был проведен функционально-стоимостной анализ.</i> <i>4. Был проведен анализ и формирование причинно-следственных связей.</i> <i>5. Был проведен SWOT-анализ.</i> <i>6. Была проведена оценка готовности проекта к коммерциализации.</i> <i>7. Была проведен анализ методов коммерциализации результатов научно-технического исследования.</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<p><i>В данном разделе:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <i>1. Были определены цели проекта и критерии их достижения.</i> <i>2. Была определена организационная структура проекта.</i> <i>3. Была проведена оценка ограничений и допущений проекта.</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<p><i>В данном разделе:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <i>1. Была установлена иерархическая структура работ проекта.</i> <i>2. Были определены контрольные события проекта.</i>

	<ul style="list-style-type: none"> 3. Был определен план проекта. 4. Был определен бюджет научного исследования. 5. Был составлен план управления коммуникациями проекта. 6. Был составлен реестр рисков проекта.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	<p>В данном разделе:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Была проведена оценка сравнительной эффективности исследований.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
<ul style="list-style-type: none"> 1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Диаграмма FAST 4. Диаграмма Исикава 5. Матрица SWOT 6. Иерархическая структура работ проекта 7. График проведения и бюджет НИИ 8. Потенциальные риски 9. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Бекк Павел Андреевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Бекк Павлу Андреевичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p><i>1. Описание рабочего места</i></p>	<p><i>Учебно-лабораторный стенд для проведения высоковольтных и испытаний изоляции обмоточных проводов и систем изоляции обмотки на стойкость воздействию испытательного напряжения.</i></p> <p><i>1) Проявление вредных факторов производственной среды: выделение озона, шум, влияние микроклимата, недостаточная освещенность рабочей зоны;</i></p> <p><i>2) Проявление опасных факторов производственной среды: поражение электрическим током, термический ожог.</i></p>
<p><i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p><i>1) ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.</i></p> <p><i>2) ГН 2.2.5.1313. – 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы. Минздрав России, 1998.</i></p> <p><i>3) Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96. "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений"</i></p> <p><i>4) СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.</i></p> <p><i>5) ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.</i></p> <p><i>6) СНиП П-12-77. Защита от шума.</i></p> <p><i>7) ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.</i></p> <p><i>8) ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.</i></p> <p><i>9) ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.</i></p> <p><i>10) ГОСТ 12.1.030-81. Защитное заземление, зануление.</i></p> <p><i>11) ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.</i></p> <p><i>12) СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997. – с.12.</i></p> <p><i>13) Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69-ФЗ. О пожарной безопасности.</i></p> <p><i>14) СП 52.13330.2011. «Свод правил. Естественное и искусственное</i></p>

	<p>освещение». - М.: Минрегион РФ, 2010.</p> <p>15) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. М.: Минздрав России, 2003.</p> <p>16) НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной безопасности», ГУГПС МВД РФ, 1995.</p> <p>17) Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69-ФЗ. О пожарной безопасности.</p> <p>18) НПБ 166-97. Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации.</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<p>Физико-химические факторы:</p> <p>1 выделение озона;</p> <p>2 микроклимат;</p> <p>3 шум;</p> <p>4 освещение.</p>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<p>Электробезопасность: поражение электрическим током.</p> <p>Термические опасности: термический ожог.</p>
3. Охрана окружающей среды:	Воздействие озона на окружающую среду
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:	Требования пожарной безопасности
5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Окраска помещения в нейтральные тона (СанПиН 2.1.2.2631– 10. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения)

Перечень графического материала:

При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	План размещения светильников. План эвакуации.
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.03.16
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов Игорь Иванович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Бекк Павел Андреевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа объемом 208 страниц, содержит 20 рисунков, 28 таблиц, 63 использованных источника, 12 приложений.

Ключевые слова: вероятность безотказной работы, межвитковая изоляция.

Целью работы является оценка вероятности безотказной работы системы межвитковой изоляции, изготовленной из ранее неисследованной композиции материалов.

Объектом исследования является система межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного электродвигателя, изготовленная на основе эмальпровода ПЭТД–180 и пропиточного состава КП–50.

Исследования проводились согласно методике ОСТ 16 0.800.821–88. Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1кВт до 400кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения.

В результате исследований определены значения коэффициентов уравнения скорости дефектообразования для исследуемой системы. Получена ВБР межвитковой изоляции изготовленной на основе эмальпровода ПЭТД–180 и пропиточного состава КП–50. Установлены факторы, значительно влияющие на надежность исследуемой системы.

Значимость работы: использование полученных данных в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации асинхронного электродвигателя позволит провести оценку ВБР межвитковой изоляции, снизить вероятность появления отказов и добиться требуемых показателей надежности асинхронных электродвигателей мощностью от 1 кВт до 400 кВт,

Полученные результаты могут быть применены на электромашиностроительных и ремонтных предприятиях.

Работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2016, также была использована программа MathCad 14. Работа представлена на CD - диске.

Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы	14
1.1 Описание системы изоляции электрических машин	14
1.2 Электроизоляционные материалы используемые для изготовления систем изоляции низковольтных электродвигателей.....	16
1.2.1 Требования предъявляемые к электроизоляционным материалам	17
1.2.2 Обмоточные провода	22
1.2.3 Электроизоляционные пропиточные составы.....	22
1.2.4 Корпусная изоляция.....	24
1.3 Факторы воздействующие на систему изоляции низковольтных электрических машин	25
1.3.1 Воздействия на изоляцию в процессе изготовления электрических машин и их влияние надежность.....	25
1.3.2 Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность изоляции электрических машин.....	26
1.3.3 Условия окружающей среды климатического и промышленного происхождения. Влияние их на надежность изоляции электрических машин.....	32
1.4 Показатели надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей.....	36
1.5 Методики расчета ВБР межвитковой изоляции всыпных обмоток асинхронных электродвигателей.....	40
2 Выводы, постановка задач для исследования.....	51

3	Объект и методы исследования	53
6	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	67
6.1	Предпроектный анализ	67
6.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	67
6.1.2	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	68
6.1.3	FAST-анализ	71
6.1.4	Диаграмма Исикава.....	78
6.1.5	SWOT-анализ.....	79
6.1.6	Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	83
6.1.7	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	83
6.2	Инициация проекта	84
6.2.1	Устав проекта.....	84
6.2.1.1	Цели и результат проекта.....	84
6.2.2	Организационная структура проекта	85
6.2.3	Ограничения и допущения проекта.....	87
6.3	Планирование управления научно-техническим проектом.....	87
6.3.1	Иерархическая структура работ проекта.....	88
6.3.2	Контрольные события проекта	88
6.3.3	План проекта.....	89
6.3.4	Бюджет научного исследования	90

6.3.4.1	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).....	90
6.3.4.2	Специальное оборудование для экспериментальных работ.....	91
6.3.4.3	Основная заработная плата	92
6.3.4.4	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	95
6.3.4.5	Отчисление на социальные нужды	96
6.3.4.6	Накладные расходы	96
6.3.4.7	Группировка затрат по статьям	96
6.3.5	План управления коммуникациями проекта	96
6.3.6	Реестр рисков проекта	97
6.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	97
6.4.1	Оценка сравнительной эффективности исследования	98
7	Социальная ответственность	104
7.1	Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды	105
7.1.1	Выделение озона	105
7.1.2	Микроклимат	105
7.1.3	Шум	107
7.1.4	Освещение.....	108
7.2	Анализ опасных производственных факторов	114
7.2.1	Поражение электрическим током.....	114

7.2.2 Термический ожог	118
7.3 Охрана окружающей среды	119
7.3.1 Воздействие озона на окружающую среду	119
7.4 Защита в чрезвычайных ситуациях	120
7.4.1 Требования пожарной безопасности	120
7.5 Вывод по главе	123
Заключение	124
Список публикаций студента	125
Список использованных источников и литературы	126

Введение

Асинхронные электродвигатели – это одно из самых массовых изделий электротехнической промышленности, они широко используются во всех отраслях промышленности. Технический уровень производства любой отрасли в значительной степени определяется надежностью работы и электрических машин в процессе эксплуатации. В связи с этим вопрос об их качестве изготовления становится особенно важным.

Проблемам определения показателей надежности систем изоляции электрических машин посвящено множество работ. Наиболее подробно вопросы надежности изоляции электрических машин (в том числе асинхронных электродвигателей), описаны в работах Похолкова Ю.П., Гольдберг О.Д., Кузнецова Н.Л., и ряда других авторов. [14, 21, 22, 23]

Анализ отказов асинхронных электродвигателей показывает, что значительная их часть (93%) происходит в результате выхода из строя системы межвитковой изоляции.[21]

В связи с появлением новых электроизоляционных материалов, используемых в системах межвитковой изоляции, существует необходимость получить данные о их надежности.

1 Обзор литературы

1.1 Описание системы изоляции электрических машин

Под системой изоляции электрической машины понимают совокупность электроизоляционных материалов с учетом их взаимного расположения и совместимости ее отдельных компонентов.

Система изоляции низковольтных электрических машин включает в себя следующие элементы:

- Корпусная изоляция – отделяет проводники от магнитопровода. Подразделяется на высоковольтную и низковольтную;
- Изоляция межфазных зон соединения обмотки – разделяет различные фазы и концевые элементы обмотки, находящиеся в работе под разными потенциалами;
- Витковая изоляция – разделяет витки в одной секции или катушке обмотки;
- Изоляция элементарных проводников – разделяет проводники в одном витке или стержне;
- Вспомогательные электроизоляционные материалы (выводные провода, гибкие электроизоляционные трубки, бандажные ленты).

Схемы систем изоляции низковольтных электрических машин изображены на рисунках 1 и 2.

На рисунке 1 изображена схема паза статора с однослойной обмоткой

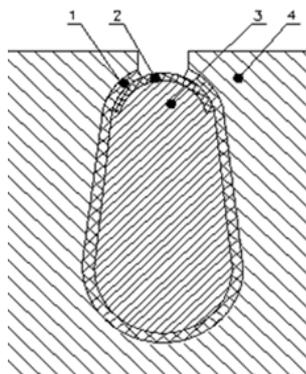


Рисунок 1 – Схема паза статора с однослойной обмоткой

где 1 – корпусная изоляция; 2 – пазовая крышка; 3 – обмотка; 4 – магнитопровод

На рисунке 2 изображена схема паза статора с двухслойной обмоткой

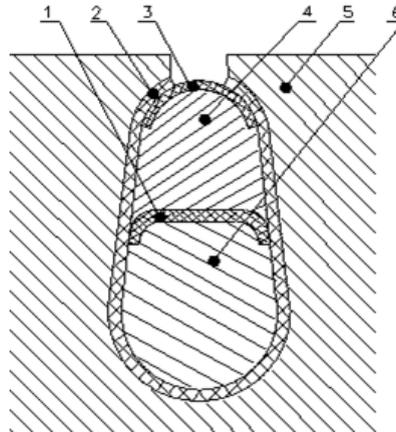


Рисунок 2 – Схема паза статора с двухслойной обмоткой

где 1 – межслойная изоляция; 2 – корпусная изоляция; 3 – пазовая крышка; 4 – обмоточный провод одного слоя; 5 – магнитопровод; 6 – обмоточный провод другого слоя

1.2 Электроизоляционные материалы используемые для изготовления систем изоляции низковольтных электродвигателей

Технико-экономические показатели низковольтных электрических машин в основном определяются свойствами и качествами используемых электроизоляционных материалов, а также конструкцией и технологией изготовления обмоток.

При расчете, конструировании и изготовлении низковольтных электродвигателей необходимо выбирать такую конструкцию обмотки и такие изоляционные материалы, которые бы обеспечивали при минимальной толщине хорошую технологичность, высокие электрическую и механическую прочности, хорошую теплопроводность, влагостойкость и стойкость к агрессивным средам.

1.2.1 Требования предъявляемы к электроизоляционным материалам

В процессе изготовления и эксплуатации изоляция подвергается механическим, температурным и химическим воздействиям, влиянию влаги, поверхностных загрязнений и электрического поля.

Изоляция электрических машин, выбранная с учетом указанных воздействий, должна обеспечивать их бесперебойную работу в течение установленного срока службы.

Электроизоляционные материалы должны обладать необходимыми для данной конструкции высокой электрической прочностью, термостойкостью и нагревостойкостью.

Термостойкость – это способность электроизоляционного материала сохранять свои функции при кратковременном нагреве. Термостойкость – условная характеристика, которая некоторым образом связанная с механическими свойствами материала.

Однако большая часть материалов может кратковременно выдерживать высокую температуру, но в случае длительной работы при повышенной температуре они быстро старятся – их свойства необратимо ухудшаются. Поэтому все электроизоляционные материалы характеризуются также нагревостойкостью – способностью электроизоляционного материала выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения свойств. Нагревостойкость электроизоляционных материалов определяется степенью их теплового старения при предельно допустимой для них температуре.

При старении, то есть необратимом изменении электрических и механических свойств с течением времени, изоляционные материалы перестают выполнять свои функции в конструкции. Условия, при которых работает изоляция, могут усилить или ослабить процессы старения.

Системы изоляции, у которых при одинаковых сроках службы значения рабочих температур примерно одинаковые, объединяют в один класс. Классы нагревостойкости конструкций определяют путем сравнительных испытаний на срок службы при трех температурах новых конструкций и конструкций, класс нагревостойкости которых известен. В результате испытаний находят максимально допустимую температуру эксплуатации, при которой обеспечивается определенный срок службы изоляции.

Так как характер старения каждого из материалов, входящих в систему изоляции, различен и в процессе старения материалы могут взаимодействовать, нагревостойкость их не может рассматриваться вне композиции. Поэтому выбирая материалы для конструкций, предназначенной для длительной работы при определенной температуре, необходимо изучить их взаимодействие в процессе старения и испытать электроизоляционную конструкцию на срок службы. При неудачном сочетании электроизоляционных материалов в процессе работы машины может произойти ускоренное разрушение одного материала под действием соседнего. [1]

В таблице 1 приведены классы нагревостойкости и соответствующие им температуры согласно [2].

Таблица 1 – Классы нагревостойкости и соответствующие им температуры.

Обозначение класса нагревостойкости	Температура,
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

Электроизоляционные материалы должны обладать и максимально высокой теплопроводностью, так как тепло от потерь в проводниках обычно отводится в окружающую среду через изоляцию.

Желательно, чтобы температурные коэффициенты расширения электроизоляционных материалов, входящих в системы изоляции и сопряженных с ними в конструкции металлов, различались мало.

Для обеспечения достаточной эксплуатационной надежности электрических машин электроизоляционные материалы должны также иметь высокие механические свойства, необходимые для сохранения электрической прочности при изготовлении машин и длительной их эксплуатации, когда изоляция обмоток подвергается воздействию вибраций, электродинамических усилий, ударных нагрузок, изгибающих усилий, истиранию и во вращающихся частях центробежным усилиям. Под

воздействием повторных нагрузок могут наступить усталость материала и его полное или частичное разрушение.

Изоляция обмоток должна обладать достаточной электрической прочностью в диапазоне рабочих температур. Для качественной изоляции нагрев от диэлектрических потерь, при номинальном напряжении незначителен, при испытании изоляции обмотки повышенным напряжением он может стать ощутимым. С ухудшением свойств материала при рабочем напряжении может возникнуть тепловой пробой, вероятность которого повышается при увлажнении. Ионизированные частицы могут вызвать эрозию материала. Озон, появляющийся при электрическом разряде в воздухе, взаимодействуя с азотом воздуха, образует окислы азота и далее в присутствии влаги азотную кислоту. Особенно велики энергия разрядов и эрозия изоляции в воздушных зазорах и у стенок паза.

Изоляционные материалы должны иметь достаточную влагостойкость – способность выдерживать воздействия атмосферы, близкой к состоянию насыщения водяным паром, без недопустимого снижения свойств, особенно для машин, работающих в условиях повышенной влажности.

Изоляционные материалы должны быть технологичными – давать возможность максимального снижения трудоемкости изготовления изоляционной конструкции при минимальном снижении электрической и механической прочности в процессе производства.

К электроизоляционным материалам, предназначенным для специальных условий эксплуатации, предъявляются некоторые дополнительные требования:

- тропикостойкость, в основном обеспечивается высокой влагостойкостью при повышенной температуре окружающего воздуха и высокой плеснестойкостью (в тропическом климате на электроизоляционных

материалах могут развиваться плесневые грибы, разрушающие изоляцию и создающие проводимость ее поверхности), поэтому применение материалов на основе целлюлозы для тропических условий недопустимо и необходима замена таких материалов материалами на основе стеклянных или синтетических волокон;

- хладостойкость – способность изоляции без повреждения и существенного ухудшения практически важных свойств выдерживать действия низкой температуры и быстрой смены температур (остывания до низкой температуры при отключении и нагрева до рабочей при включении);
- химостойкость – способность изоляции к надежной эксплуатации при контакте с химически агрессивными средами, например, парам кислот или щелочей.

Следует учитывать, что материалы, стойкие к воздействию одних сред, могут быть не стойкими к воздействию других.

В зависимости от условий работы машины, а также назначения материалов в электроизоляционной конструкции (выполнение основной или вспомогательной функции) выбираются материалы с преобладанием тех или иных свойств, помимо нагревостойкости, которая является основным свойством.

Для материалов несущих основную электрическую нагрузку (основной изоляции), требуется в первую очередь высокая электрическая прочность; для изоляции влагостойкого исполнения – высокая электрическая прочность и влагостойкость, для материалов, несущих вспомогательные функции, защищающих основную изоляцию от механических воздействий в процессе изготовления конструкции и при эксплуатации, требуется повышенная механическая прочность. [1]

1.2.2 Обмоточные провода

Обмоточные провода – это основной компонент в межвитковой изоляции, от которой зависит качество системы изоляции. Обмоточные провода, медные или алюминиевые, обычно изготавливают с эмалевой или волокнистой и реже с эмальволокнистой изоляцией. Класс нагревостойкости изоляции проводов обуславливается химическим составом эмалевого лака, природой волокнистого материала и свойствами подклеивающего состава [3]. Для изготовления низковольтных обмоток асинхронного двигателя следует особое внимание уделить применению коронстойких материалов. На сегодняшний день выпускается провод марки ПЭТД2–К–180, он сравнительно недавно стал применяется в электрических машинах, аппаратах и приборах с частотным регулированием[4]. Провод марки Samicashield, эмалированный провод с базовым покрытием из модифицированного полиэфиримида и внешним покрытием из полиамидимида, имеет дополнительную изоляцию из тонкой беспористой слюдяной ленты. Имеет стойкость к коронному разряду по сравнению со стандартными эмалями или эмалями с наполнителем. Существенно более продолжительный срок эксплуатации при использовании в низковольтных асинхронных двигателях. [5]

Обзор основных марок и свойств обмоточных проводов приведен в приложении А, таблица 1. [1, 4, 6]

1.2.3 Электроизоляционные пропиточные составы

Электроизоляционные пропиточные составы подразделяются на лаки и компаунды.

Лаки – это пропиточные и заливочные массы, состоящие из пленкообразующих веществ (основы), растворителя пленкообразующих веществ, сиккативов – веществ, ускоряющих процессы отверждения лаковой основы и пластификаторов, придающих гибкость лаковой пленке.

Лаки на основе синтетических смол обладают повышенными влаго-, кислото- и щелочестойкостью и хорошей цементирующей способностью. Они твердеют при сшивании молекул; после сушки пленка становится неплавкой и нерастворимой. Растворители, содержащиеся в лаках, при сушке улетучиваются, образуя поры и каналы, что снижает влаго- и нагревостойкость электроизоляционной конструкции. Многократные пропитки способствуют лучшему заполнению пустот лаковой основой. Однако даже при многократных пропитках не достигается такого заполнения пустот, как при пропитке компаундами.

Компаунды – это не содержащие растворителей пропиточные и заливочные массы, находящиеся в момент их применения в жидком состоянии и твердеющие в результате происходящих в них химических процессов. Компаунды делятся на терморезактивные, твердеющие в результате сшивания молекул, и термопластичные, твердеющие при охлаждении.

К компаундам предъявляются следующие требования: минимальное содержание летучих компонентов (не более одного процента), минимальная усадка при отверждении; низкая вязкость при пропитке, чтобы пропитка происходила достаточно глубоко; отсутствие вытекания термопластичного компаунда из обмоток при работе машины.

Кроме того, процесс пропитки и перехода компаунда в твердое состояние должен происходить быстро и при допустимых температурах (для каждого класса нагревостойкости изоляции); терморезактивные компаунды

при хранении и работе не должны резко повышать вязкость и загустевать (то есть должны иметь достаточный «срок жизни») и вместе с тем не должны вытекать при отверждении. Как и прочие пропиточные составы, компаунды должны иметь высокие электроизоляционные свойства и быть достаточно влаго- и нагревостойкими.[1]

Обзор основных марок и свойств пропиточных составов приведен в приложении Б, таблицы 1,2. [7, 8, 9, 10]

1.2.4 Корпусная изоляция

Корпусная изоляция применяется для изолирования витков от паза.

Корпусная изоляция разделяется на высоковольтную, длительно работающую при напряжениях, превышающих напряженности начала частичных разрядов, и низковольтную. К корпусной изоляции предъявляются высокие требования по электрическим свойствам, особенно по долговечности и стойкости к различным нагрузкам. На сегодняшний день для корпусной изоляции используются короностойкие материалы.[3]

В современных сериях двигателей широкое распространение получили композиционные материалы, которые представляют собой сочетание полимерных пленок с различными гибкими электроизоляционными материалами на основе синтетических органических или неорганических волокон, причем указанные компоненты связаны между собой клеящими составами [11]. Высокая механическая прочность этих материалов при небольших толщинах и наличие композиций классов нагревостойкости от Е до Н даёт возможность улучшить конструктивные параметры электрической машины, а также увеличить её надёжность.

Для корпусной изоляции применяются следующие материалы: Имидофлекс 292, Имидофлекс 929, Лавитерм I, II (Т, ТТ), Лента полиимидная композиционная Л-ПМК-Т, Л-ПМК-ТТ, Лента полиэтиленнафталатная композиционная ЛПНК-Т (л), ЛПНК-ТТ (л) Teonex, DuPont Teijin Films. [12, 13]

1.3 Факторы воздействующие на систему изоляции низковольтных электрических машин

1.3.1 Воздействия на изоляцию в процессе изготовления электрических машин и их влияние надежность

Наибольший процент отказов электрических машин, в период приработки, приходится на витковую изоляцию. Это объясняется выявлением в ней дефектов, возникших от технологических воздействий (растяжения провода при намотке и ударов при укладке), вследствие чего снижаются пробивное напряжение, механическая прочность, стойкость к растворителям при пропитке и сушке.

Примерами технологических воздействий, приводящих к появлению дефектов, могут служить:

- Увеличение скоростей намотки катушек приводит к дополнительной вытяжке проводов и ухудшению качества их изоляции.
- В наибольшей степени при намотке, даже при нормальных скоростях, снижается стойкость изоляции к истиранию.
- Витковая изоляция насыпных обмоток значительно повреждается и при укладке, особенно при применении металлического инструмента.

Также большое влияние на срок службы витковой изоляции оказывают пропиточные лаки. Так, «жесткие» пропиточные лаки обычно снижают сроки службы витковой изоляции пропитанных обмоток по сравнению с непропитанными, а более эластичные могут его увеличить. При пропитке водоземulsionными лаками дефекты, возникшие в изоляции эмалированных проводов, также снижают срок службы обмотки.

При разработке конструкции изоляции должно быть известно, как изменяются ее свойства после технологических воздействий в процессе производства и эксплуатации. Высокие показатели конструкции в исходном состоянии в какой-то степени могут свидетельствовать о том, что изоляция не выйдет из строя в период приработки, но в значительно меньшей степени могут служить для прогноза интенсивности ее старения и срока службы. [1]

1.3.2 Эксплуатационные факторы, влияющие на надежность изоляции электрических машин

В процессе эксплуатации на электрические машины воздействуют: тепловая энергия, электрическое напряжение, вибрации, влага. Кроме того, электродвигатели подвержены коммутационным перенапряжениям, динамическим усилиям при пусках (реверсах). Также стоит отметить, что электрические машины могут работать в химически агрессивных или других необычных средах.

Долгое время считалось, что единственным фактором, влияющим на надежность электрических машин, является тепловое старение. Чтобы установить срок службы электроизоляционных материалов, пользуются «правилом десяти градусов», которое гласит, что ресурс изоляции уменьшается вдвое при повышении рабочей температуры на 10°C. На этом правиле основаны многие предложения и расчеты, направленные на

повышение надежности электрических машин. Однако ряд примеров эксплуатации показывает, что тепло – главный, но не единственный фактор, определяющий надежность электрических машин.

Далее приведены результаты некоторых исследований по асинхронным двигателям, которые подтверждают этот вывод. По данным ряда исследований, средняя нагрузка асинхронных двигателей универсальных металлорежущих станков составляет 20% от номинальной. Однако среднее время безотказной работы электродвигателей на этих станках и других исполнительных механизмах, например, вентиляторах, при номинальной нагрузке примерно одинаково, даже на станках оно меньше из-за большей частоты пусков.

По данным об отказах асинхронных двигателей установлено, в частности, что на время безотказной работы электродвигателей существенно влияет влажность окружающей среды.

В изоляционных материалах происходят процессы адсорбции и сорбции влаги, что значительно снижает их электрическую прочность. Особенно существенно влияние влаги при недостаточной пропитке. Влага проникает в пространство, незаполненное пропиточным составом, а оттуда диффундирует в макро- и микропустоты изоляции.

Весьма существенно влияет на надежность электродвигателей частота их включений. При частых включениях или реверсах в обмотках возникают значительные динамические усилия от пусковых токов, а также коммутационные перенапряжения, достигающие значительной величины. Все это снижает надежность электродвигателей.

В таблице 2 приведены данные о частоте включений электродвигателей на различном оборудовании и процент их отказов за один год эксплуатации.

Таблица 2 – Частота включений и процент отказов электродвигателей за один год эксплуатации

Наименование оборудования	Средняя частота включений в один час	Число отказавших электродвигателей (из числа установленных на этом оборудовании), %
Намоточный станки	100	60,0
Транспортеры	6	31,0
Бегуны	1,25	17,6
Вентиляторы	0,05	12,7

Данные приведенные в таблице 2, свидетельствуют о снижении надежности электродвигателей при увеличении частоты их включения. [14]

Проводились исследования надежности обмоток четырех партий асинхронных двигателей, при воздействии различных факторов, результаты испытаний приведены в таблице 3.

Испытания показали, что существенное влияние на надежность оказывают описанные выше факторы. Так, при добавлении к тепловому старению вибрации средняя наработка на отказ уменьшилась в 4 раза. При добавлении к тепловому старению частых динамических усилий и перенапряжений при реверсах средняя наработка на отказ уменьшилась в 2,5 раза, а при одновременном воздействии всех перечисленных факторов средняя наработка на отказ уменьшилась в 30 раз. [14]

Таблица 3 – Результаты испытаний электродвигателей при воздействии различных факторов

Партии электродвигателей	Испытательный режим	Средняя наработка на отказ, ч
1	Тепловое старение при $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме искусственной нагрузки	1432
2	Старение при $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме искусственной нагрузки и вибрационного ускорения $a=1,5g$	330
3	Старение при $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме частых реверсов на холостом ходу при вибрационном ускорении $a=0,5g$	593
4	Старение при $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме частых и вибрационном ускорении $a=1,5g$	54

С развитием силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники стало возможным создание устройства частотного регулирования электроприводом (ЧРП). Данное устройство позволяет точно управлять моментом и скоростью электродвигателя по заданным параметрам, которые соответствуют характеру нагрузки.

К основным преимуществам применения ЧРП относятся следующие: высокая точность регулирования, экономия электрической энергии в случае переменной нагрузки (то есть работа электрического двигателя с неполной нагрузкой), повышенный ресурс оборудования, стабилизация скорости вращения при изменении нагрузки, плавный пуск двигателя, значительно уменьшающий его износ и многое другое. Все эти преимущества дают

возможность использования частотно-регулируемого привода во многих сферах деятельности, а именно: в конвейерных системах, в двигателях для нефтедобывающей промышленности (центробежные насосы), в системах вентиляции, кондиционирования и водоснабжения. [15]

Использование системы частотного управления позволило в значительной степени увеличить частоту коммутационных операций (до 20 кГц), минимизировать потери электроэнергии и улучшить производительность частотно-регулируемого привода [16]. Однако, повышение скорости коммутаций сократило время нарастания импульсов напряжения, которое негативно отразилось на протекании переходных процессов в цепи «частотный преобразователь – питающий кабель – двигатель». Рассогласование полных сопротивлений между инвертором, кабелем и двигателем возбудило волновые процессы в кабеле и явление отражения сигнала, что привело к перенапряжениям на клеммах двигателя. [17]

Перенапряжения оказывают незначительное влияние на главную систему изоляции двигателя между фазами и фазой и землей, которая сконструирована таким образом, чтобы выдерживать большие уровни перенапряжений. В то же время такие нагрузки приводят к ужесточению условий эксплуатации межвитковой изоляции и, прежде всего, между витками обмотки, расположенными произвольным образом, или концами обмотки. В этих местах в зависимости от параметров двигателя и обмотки электрическая нагрузка распределена неравномерно и может достигать величины равной 30-90% от величины перенапряжения. [18]

Это приводит к возникновению коронных разрядов в изоляции обмотки в процессе регулирования (изменения частоты) электрического привода, что в дальнейшем ведёт к быстрому старению изоляции,

сказывающееся на снижении надежности и срока службы электрической машины.

Кроме того, при применении асинхронного двигателя с частотно-регулируемым приводом тепловое старение часто переходит в электротепловое старение. Это связано с тем, что помимо теплового фактора, влияющего на изоляцию обмотки, начинает действовать электрический фактор, сопряжённый с действием электрического поля, вызванный перенапряжением на клеммах двигателя. В результате этого ухудшается изоляция, что, в свою очередь, ведет к сокращению срока эксплуатации электрической машины.

Для решения проблемы, связанной с повышением надёжности изоляционной системы двигателя, при использовании системы частотного управления, можно выделить два основных способа:

- Минимизация перенапряжения с преобразователя частоты:
- Использование фильтров.
- Применение многоступенчатых преобразователей.
- Применение коронстойких обмоточных проводов и электроизоляционных материалов:
 - Применение пропитки обмотки статора в вакууме и под давлением.
 - Использование слюдяных пленок для витковой изоляции и изоляции элементарных проводников.
 - Модифицирование лаков путем введения специальных наполнителей (оксидов металлов, керамических наполнителей, нанонаполнителей).

1.3.3 Условия окружающей среды климатического и промышленного происхождения. Влияние их на надежность изоляции электрических машин.

Для обеспечения установленных в стандартах или технических условиях показателей надежности, необходимо при выборе электродвигателей учитывать условия окружающей среды климатического и промышленного происхождения. Для этого целесообразно провести их классификацию.

В процессе эксплуатации на двигатель воздействуют самые разнообразные климатические факторы: температура, влажность, атмосферное давление, солнечная радиация, дождь, пыль, снег, соляной туман, иней, а также плесневые грибы и коррозионно-активные агенты, содержащиеся в воздухе.

Согласно ГОСТ 15150–69 макроклиматические районы подразделяются следующим образом:

- с умеренным климатом, в которых средняя из годовых абсолютных максимумов температуры воздуха равна или ниже $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя из годовых абсолютных минимумов температуры равна или выше $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- с холодным климатом, в которых средняя из годовых абсолютных минимумов температуры воздуха ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- с влажным тропическим климатом, в которых температура воздуха, равная или большая $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, сочетается с относительной влажностью, равной или большей 80 %, 12 ч или более в сутки непрерывно от 2 до 12 месяцев в году;

- с сухим тропическим климатом, в которых средняя из годовых абсолютных максимумов температуры воздуха выше +40 °С и которые не отнесены к районам с влажным тропическим климатом; районы с умеренно холодным морским климатом: моря, океаны, прибрежные территории в пределах непосредственного воздействия морской воды, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты;
- с тропическим морским климатом: моря, океаны, прибрежные территории в пределах непосредственного воздействия морской воды, расположенные между 30° северной широты и 30° южной широты.

Указанная классификация климатических районов распространяется на высоты до 1000 м над уровнем моря (нижнее рабочее значение атмосферного давления 850 Гпа, или 650 мм рт. ст.).[19]

На работу электрических машин также влияют факторы окружающей среды промышленного происхождения. Содержащиеся в воздухе взвешенные твердые частицы, агрессивные пары и газы разрушают изоляцию и защитные покрытия двигателя.

Наибольшее разрушающее воздействие на электрические машины оказывают мелкие частицы пыли до 15 мкм. Эти частицы проникают в пространство между движущимися частями, ограничивают их перемещение, увеличивают износ. Оседая на поверхности изоляции, пыль может образовать электропроводящие пути. Оседая на поверхности защитных покрытий, пыль в сочетании с влагой ускоряет протекание химических реакций, которые разрушают покрытия. Различают статическое и динамическое воздействия пыли на электрические машины. В основном для промышленности характерно статическое воздействие пыли. Для нормальных условий при статическом воздействии допускается

концентрация пыли до 10 мг/м^3 . Для электрических машин со степенью защиты IP56 допустимая концентрация составляет 200 мг/м^3 .

Агрессивные пары и газы разрушают изоляцию и защитные покрытия посредством химических реакций на поверхности этих материалов.

Основными факторами, влияющими на работу электрических машин, являются температура окружающей среды и высота над уровнем моря. Значения номинальной мощности, указанные в стандартах, справедливы для продолжительного режима работы электрической машины S_1 , когда работа машины происходит при неизменной нагрузке $P=\text{const}$ достаточно длительное время t_n , изображение приведено на рисунке 3, при температуре окружающей среды до $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ и высоте установки над уровнем моря до 1000 м.

Если температура окружающей среды более $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ или высота установки выше 1000 м то мощность должна быть снижена. При установке машины на высоте свыше 1000 м мощность может быть сохранена, если на каждые следующие 1000 м температура окружающей среды снижается на 10 %.

Зависимость допустимой мощности от температуры окружающей среды и высоты установки приведены в таблицах 4,5. [14]

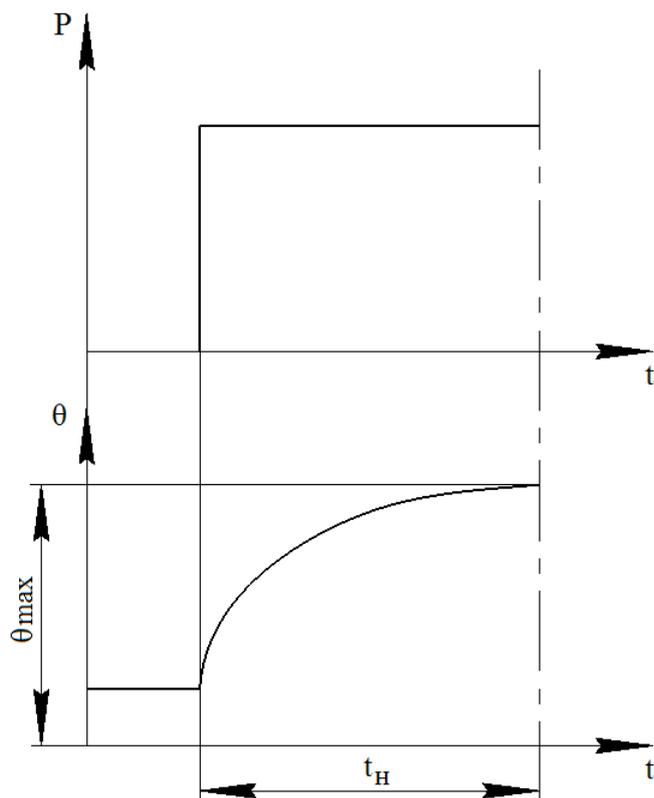


Рисунок 3 – Продолжительный режим работы S_1

где t_H – время работы двигателя; θ_{\max} – максимальная температура нагрева двигателя

Таблица 4 – Зависимость допустимой мощности от температуры окружающей среды

Температура окружающей среды, °C	Коэффициент пересчета мощности при классе нагревостойкости изоляции		
	Е	В	Ф
30	1,07	1,06	1,05
35	1,04	1,03	1,02
40	1,00	1,00	1,00
45	0,95	0,96	0,97
50	0,91	0,92	0,94
55	0,86	0,87	0,91
60	0,78	0,82	0,87

Если одновременно повышаются температура окружающей среды и высота установки, то для определения допустимой мощности следует перемножить коэффициенты, найденные в таблицах 4 и 5.

Таблица 5 – Зависимость допустимой мощности от высоты установки

Высота установки, м	Коэффициент пересчета мощности для класса нагревостойкости изоляции			Температура окружающей среды, при которой сохраняется номинальная мощность для класса нагревостойкости изоляции, °С		
	Е	В	Ф	Е	В	Ф
До 1000	1	1	1	40	40	40
1000...1500	0,98	0,98	0,98	36,5	36	33
1500...2000	0,96	0,97	0,97	32,5	32	29,5
2000...2500	0,93	0,93	0,94	29	–	–
2500...3000	0,92	0,92	0,93	25	–	–
3000...3500	0,88	0,89	0,90	–	–	–
3500...4000	0,86	0,87	0,88	–	–	–

1.4 Показатели надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей

Надежность как качественная характеристика всегда принималась во внимание при решении различных вопросов эксплуатации и технического обслуживания. Математической платформой теории надежности являются теория вероятностей и математическая статистика. Действительно, отказы в технических устройствах происходят случайным образом в неожиданные моменты времени. Это характерно даже для множества однотипных устройств, изготовленных на одном предприятии и поставленных на эксплуатацию в одно и то же время. Несмотря на единый проект и

одинаковую технологию производства – каждое из полученных устройств имеет индивидуальную способность сохранять свои первоначальные качества. Первоначально кажется, что никакой закономерности в появлении отказов нет. Тем не менее, такая закономерность существует. Проявляется она тогда, когда ведется наблюдение не за одним, а за многими техническими устройствами, находящимися в эксплуатации.

В качестве основной количественной меры надежности технических устройств, характеризующей закономерность появления отказов во времени, принята вероятность безотказной работы (ВБР).

Согласно ГОСТ Р 53480–2009 «Надежность в технике. Термины и определения», вероятность безотказной работы $R(t_1, t_2)$: Вероятность выполнить требуемую функцию при данных условиях в интервале времени (t_1, t_2) .

Примечание: обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие находится в работоспособном состоянии.[20]

Асинхронные двигатели являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения, однако их надежность недостаточна. В среднем в течение года капитальному ремонту подвергается около 20 % установленных асинхронных двигателей. После ремонта электродвигателей их время безотказной работы, как правило, существенно уменьшается. Это объясняется неудовлетворительным качеством ремонта и испытаний после ремонта. Ремонт обычно производится не на специализированных ремонтных заводах, а на предприятиях, эксплуатирующих электродвигатели.[14]

Основным видом отказа электродвигателей (85...95%), является повреждение его обмотки, что для электродвигателей со всыпной обмоткой требует полной перемотки или, как принято считать капитального ремонта. [21]

Отказы по характеру повреждения обмоток распределяются следующим образом:

- Межвитковые замыкания: 93%;
- Повреждение и пробой пазовой изоляции: 2%;
- Пробой межфазной изоляции: 5%.

С точки зрения надежности обмотку асинхронных двигателей можно рассматривать как систему, состоящую из элементов. Такими элементами являются межвитковая изоляция пар проводников, композиция пазовой изоляции, композиция межфазной изоляции (одной межфазной прокладки и композиция межсекционной изоляции (при двухслойной обмотке). Поскольку отказ любого перечисленного элемента приводит к отказу всей системы (обмотки), то вероятность безотказной работы обмотки может быть определена согласно теореме умножения вероятностей по формуле:

(1)

где

- ВБР межвитковой изоляции пары проводников;
- ВБР композиции пазовой изоляции в одном пазу;
- ВБР композиции межфазной изоляции;
- ВБР композиции межсекционной изоляции (при двухслойной обмотке).

В формуле 1 не все сомножители равноценны. Наименьшее значение имеет первый сомножитель , который в основном и определяет ВБР обмотки. Это обусловлено двумя факторами: относительно низкой

надежностью межвитковой изоляции и значительным числом пар проводников в асинхронных двигателях ($n=10^2 \dots 10^3$). ВБР композиции пазовой межфазной и межсекционной изоляций обычно достаточно высокая.

Математическое описание «кривой жизни» (периодов работы) асинхронных двигателей общепромышленного применения получено на основании статистических материалов об отказах двигателей мощностью от 10 до 500 кВт. Концепция, заложенная в полученной математической зависимости, несколько отличается от стандартной «кривой жизни» технических изделий (Рисунок 4). Стандартная зависимость $\lambda(t)$ содержит три периода: первый период приработки ($0, t_1$), который характеризуется отказами обусловленными несовершенствами технологии изготовления и конструкции; второй период нормальной эксплуатации (t_1, t_2), который характеризуется непредсказуемыми, случайными отказами; третий период старения и износа ($t > t_2$), когда отказы происходят из-за старения материала и износа конструкции.

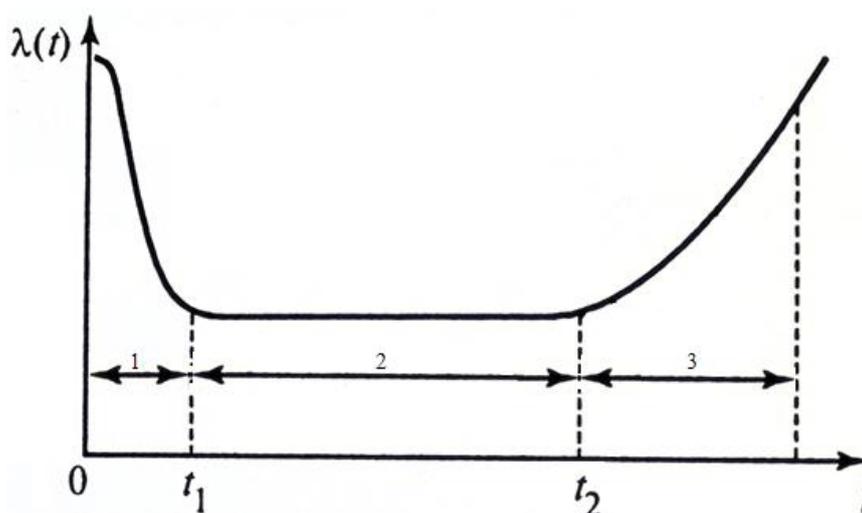


Рисунок 4 – Периоды работы технических изделий

где $\lambda(t)$ – Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа, определяется как отношение количества отказавших изделий к среднему числу изделий, работающих в данный отрезок времени.

В работе Кузнецова Н.Л., при разработке математического описания «кривой жизни» асинхронных двигателей общепромышленного применения был учтен следующий факт: случайные отказы происходят в течение всех периодов работы электрической машины. А это значит, что в период приработки отказы подчиняются суперпозиции экспоненциального закона и закона Вейбулла; в период нормальной эксплуатации отказы подчиняются экспоненциальному закону; в период старения и износа отказы подчиняются суперпозиции экспоненциального закона и закона Гаусса. Экспоненциальный закон (случайные, непредсказуемые отказы) существует в течение всех трех периодов работы.

Исходя из этой концепции, а также после математической обработки статистического материала получены зависимости интенсивности отказов, ВБР и частоты отказов для асинхронных двигателей от времени их работы. Полученные математические зависимости приближенные, однако они широко используются при разработке математических моделей и описывает физическую природу отказов в течение всего периода эксплуатации асинхронных двигателей. [21]

1.5 Методики расчета ВБР межвитковой изоляции всыпных обмоток асинхронных электродвигателей

Элементами математической модели надежности межвитковой изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей считаются два витка, расположенных рядом и разделенных межвитковой изоляцией. Отказ обмотки объясняется межвитковым замыканием, поэтому наиболее показательной характеристикой элемента, которая наиболее полно отражает его надежность, удобна для построения модели и может быть получена экспериментально, является пробивное напряжение межвитковой изоляции.

Для построения модели надежности межвитковой изоляции используется модель «слабейшего звена». На рисунке 5 дано графическое изображение модели. Применительно к модели надежности межвитковой изоляции кривая $g(U_c)$ характеризует плотность распределения рабочего напряжения, приложенного между витками, а кривая $f(U_B)$ плотность распределения пробивных напряжений, показывающих электрическую прочность межвитковой изоляции.

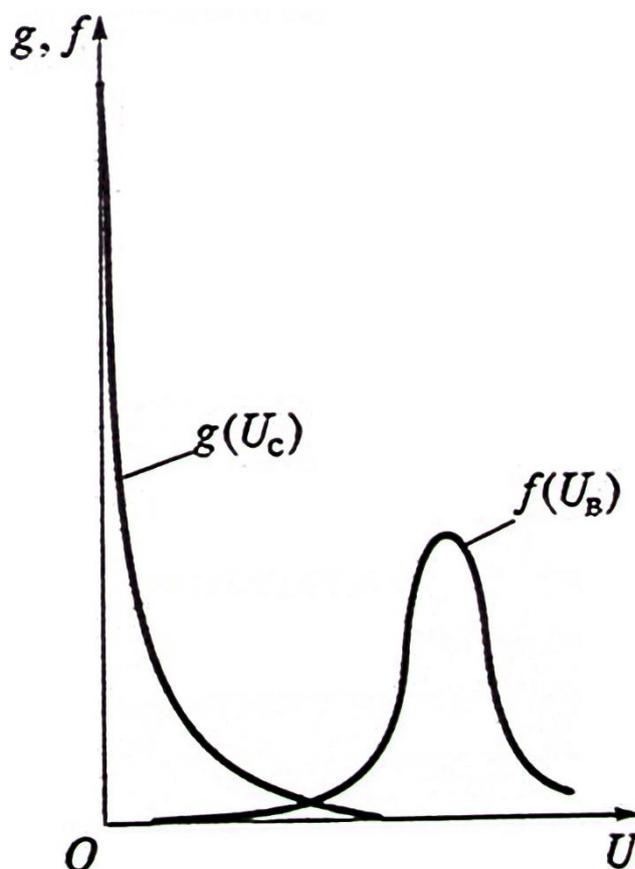


Рисунок 5 – Модель «слабейшего звена» для межвитковой изоляции

где $g(U_c)$ – плотность распределения рабочего напряжения, приложенного между проводниками пары; $f(U_B)$ – плотность распределения пробивного напряжения межвитковой изоляции.

ВБР межвитковой изоляции обмотки, состоящей из n элементов, определяется по следующей формуле:

(2)

где $F(U_g)$ – функция распределения пробивного напряжения межвитковой изоляции.

Действительная ВБР межвитковой изоляции обмотки P_g находится в пределах:

(3)

Верхнее значение ВБР наблюдается, когда дисперсия пробивного напряжения межвитковой изоляции равна нулю, то есть когда вся вероятность сосредоточена в точке . Нижний предел ВБР обмотки характерен для случая, когда напряжение, приложенное между витками U_c , принимает только одно значение.

Представленная математическая модель (2) не позволяет получить необходимые сведения о надежности межвитковой изоляции обмотки, так как пределы возможных значений, определяемые по формуле (3), слишком широки. Для получения математической модели, пригодной для расчета надежности обмотки, необходимо знать распределение напряжений воздействующих на межвитковую изоляцию, а также характер изменения функции распределения пробивного напряжения межвитковой изоляции от времени эксплуатации.[22]

В настоящее время существуют несколько методик определения ВБР межвитковой изоляции асинхронных электродвигателей:

- Первая методика основана на решение задач связанных с определением распределением пробивных напряжений межвитковой изоляции и приложенных напряжений, а также характера изменения функции распределения пробивных напряжений межвитковой изоляции от времени эксплуатации.

Исходные данные для расчета: марка и диаметр обмоточного провода; марка пропитывающего состава; количество эффективных проводников в секции, S ; количество последовательно соединенных секций, q ; количество пазов статора, z ; количество сторон секции в пазу, c ; частота пусков электродвигателя в час, f ; установившаяся температура обмотки при эксплуатации, T ; режим работы электродвигателя, степень увлажнения, температура окружающей среды при увлажнении; эмпирические зависимости параметров закона распределения вероятностей пробивных напряжений, от времени эксплуатации $lg U_0 = f(t)$ и $\alpha = \varphi(t)$.

Расчет производится в следующей последовательности:

1. Определяется количество эффективных проводников в обмотке электродвигателя.
2. Определяется количество элементов модели n .
3. Общее время, за которое следует определить ВБР разбивается на ряд интервалов таким образом, чтобы значения полиномов, для параметров закона распределения вероятностей пробивных напряжений, в каждом интервале времени могло быть приняты постоянными.
4. Определяется ВБР межвитковой изоляции последовательно для каждого интервала времени при одном включении электродвигателя.

$$- \quad , \quad (4)$$

где \quad – вероятность отказа,

$$\begin{aligned} & \text{-----} \quad - \quad \text{=} \quad \text{-----} \\ & \quad \text{-----} \end{aligned} \quad (5)$$

где k – кратность коммутационных перенапряжений;

\quad – амплитуда фазного напряжения;

n – количество элементов модели.

5. Определяется ВБР для каждого интервала времени Δt_i , с учетом количества включений электродвигателя за этот интервал.

$$v_i = f \cdot \Delta t_i \quad (6)$$

$$(7)$$

6. Определяется ВБР в функции времени. [21]

$$(8)$$

Главным недостатком данной методики является то, что параметры закона распределения вероятностей пробивных напряжений определены для времени работы от 504 до 2016 часов, что не учитывает реального времени работы межвитковой изоляции асинхронного электродвигателя. Так как одной из основ данной методики является распределение вероятностей пробивных напряжений, то использование для расчета ВБР при 20000 часов наработки не позволит получить точных результатов. Также стоит отметить, что данная методика не учитывает воздействие технологических факторов на надежность межвитковой изоляции.

- Для упрощения расчета была разработана вторая методика, она представляет собой модификацию первой. На рисунке 6 приведена графическая иллюстрация принятой математической модели.

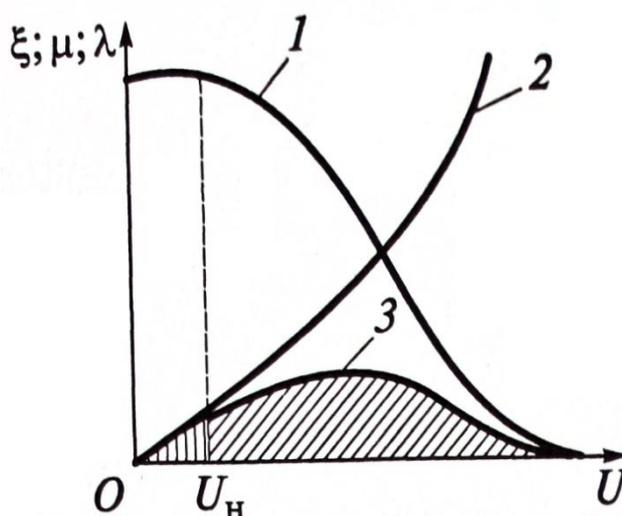


Рисунок 6 – Математическая модель второго варианта расчета ВБР обмотки

где 1 – функция распределения действующего напряжения, превышающего некоторый уровень; 2 – условная плотность распределения вероятности пробивного напряжения при условии, что при меньших напряжениях пробоя элемента не произошло; 3 – вероятность отказа при одном включении.

Известно, что:

(9)

Для элемента межвитковой изоляции обмотки в данный момент времени интенсивность отказов будет равна:

(10)

Выделим отрезок времени (например, час), в течении которого можно считать, что не происходит существенного изменения физического состояния элемента. Если за это время осуществимо ν пусков, то можно считать, что интенсивность отказа элемента за это время:

(11)

Уравнение (11) получено из следующих соображений: при пусках электродвигателя возникают коммутационные перенапряжения, поэтому каждый пуск можно рассматривать как бы независимое испытание на безотказность.

Вероятность распределения пробивных напряжений изоляции можно

(12)

записать в следующем виде:

где β – параметр распределения Вейбула, характеризующий форму распределения (параметр формы);

V – параметр положения (количественно; V – пробивное напряжение, при котором вероятность отсутствия пробоя равна

Рассмотрим основные положения и допущения, принятые в этой методике. Распределение времени безотказной работы обмотки тождественно закону распределения первых порядковых статистик величин, характеризующих прочность изоляции. Распределение этих статистик будет распределением минимумов из распределений пробивных напряжений.

Исходные данные для расчета: λ – параметр распределения Вейбула, характеризующий форму распределения (параметр формы); V – параметр положения (количественно; V – пробивное напряжение, при котором вероятность отсутствия пробоя равна $e^{-\lambda V^k}$; U_n – номинальное фазное напряжение; L – периметр паза; α – коэффициент заполнения свободной площади паза; d – диаметр изолированного провода; b – средняя ширина паза; U_k – напряжение на катушке (без учета перенапряжений); n – число катушек последовательно соединенных в фазе; m – число элементарных проводников в одном эффективном; a – число параллельных ветвей.

Расчет производится в следующей последовательности:

1. Определяется число элементов межвитковой изоляции.

$$\text{---} \quad (13)$$

где b – средняя ширина паза;

2. Определяется напряжение между витками в пределах катушки.

$$\frac{U}{l}, \quad (14)$$

где U – напряжение на катушке (без учета перенапряжений).

3. Число элементов межвитковой изоляции с разностью номеров l :

$$(15)$$

4. Определяется интенсивность отказов группы элементов межвитковой изоляции с l разностью их расположения в фазе.

$$\frac{N}{l} \quad (16)$$

5. Определяется интенсивность отказов межвитковой изоляции.

$$\frac{N}{a} \quad (17)$$

где N – число катушек последовательно соединенных в фазе;

l – число элементарных проводников в одном эффективном;

a – число параллельных ветвей.

Если рассчитывать надежность изоляции обмотки после окончания периода приработки, то можно записать соотношение:

$$(18)$$

где λ – скорость старения изоляции после периода приработки.

7. Определяется ВБР межвитковой изоляции. [22]

–

(19)

где t_0 – параметр положения;

m – параметр формы.

Главным недостатком данной методики является то, что в ней не учитывается воздействие технологических и эксплуатационных факторов на надежность межвитковой изоляции.

- Третья методика расчета по ОСТ 16 0.800.821–88. Рассмотрим основные положения и допущения, принятые в этой методике. Отказ изоляции обмоток происходит в результате короткого межвиткового замыкания, которое возможно только при существовании дефектов композиции межвитковой изоляции. Под дефектом понимается сквозное повреждение изоляции. Под дефектностью понимается число дефектов на единице длины. Дефект может иметь место при поставке материалов, возникнуть в процессе изготовления обмотки (порезы, проколы, сдиры, трещины) и образоваться в результате старения (трещины). За дефектный участок принимается элементарный участок, пробивное напряжение которого не выше напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка длиной, равной толщине изоляции.

Поверхностный пробой промежутков между токоведущими частями в местах дефектов происходит в результате воздействия коммутационных перенапряжений. Распределение коммутационных перенапряжений может быть описано суперпозицией двух законов. В рассматриваемой методике эмпирическое распределение перенапряжений описано суперпозицией двух нормальных законов. В целях упрощения расчетов учитывается только

правая часть распределения величин коммутационных перенапряжений. Не каждое перекрытие промежутка с дефектом перенапряжением приводит к отказу.

Распределение напряжений перекрытия промежутков в местах дефектов приняты в методике нормальными. При расчете вероятности отказа витковой изоляции учитываются только плотно касающиеся участки соседних витков.

Расчет вероятности отказа обмоток осуществляется для последовательных интервалов времени наработки. Величина интервала выбирается такой, в пределах которой дефектность изоляции изменяется несущественно.

Дефектность межвитковой изоляции определяется на непропитанных обмоточных проводах, уложенных, а затем аккуратно извлеченных из паза. Учет влияния пропитки на дефекты производится по специальной методике. При этом не в полной мере учитывается то обстоятельство, что, скрыв имевшиеся дефекты на обмоточных проводах, пропитывающий состав в сочетании с обмоточным проводом, то есть система межвитковой изоляции, может дать в процессе эксплуатации новые дефекты (микротрещины).

Исходная дефектность проводов определяется исходя из предположения, что дефектна изоляция, имеет сквозные повреждения. Считается, что наибольшее значение пробивного напряжения изоляции с таким дефектом будет равно:

(20)

где $U_{\text{ср}}$ – среднее пробивное напряжение воздуха в толщине, равной толщине изоляции провода (с учетом перекрытия по поверхности);

– среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения.

Дефектность определяется исходя из того, что дефекты расположены на длине провода случайно и распределены по длине провода по закону Пуассона, то есть среднее число повреждений β на образце провода длиной $l_{обр}$ принято не превышающим единицы. Исходя из этих соображений в методике рекомендованы длины образцов для эмальпроводов и проводов с волокнистой изоляцией. Закон распределения расстояний между изолированными проводниками определен, а расчет вероятности плотного касания выполнен с помощью методов теории массового обслуживания. [23]

Третья методика расчета ВБР наиболее полно учитывает процессы приводящие к отказу межвитковой изоляции и факторы влияющие на ее надежность, что в конечном итоге позволяет получить наиболее точные данные о ВБР межвитковой изоляции. Данная методика положена в основу действующего отраслевого стандарта.

2 Выводы, постановка задач для исследования

Проведя анализ литературы и нормативно-технической документации, можно сделать следующие выводы:

- Большинство отказов асинхронных электродвигателей (93%), происходят в результате выхода из строя системы межвитковой изоляции. В процессе изготовления и эксплуатации межвитковая изоляция наиболее сильно подвергается воздействиям, приводящим к ее разрушению. С учетом этих воздействий и большого количества элементарных проводников повышается вероятность возникновения короткого замыкания и как следствие отказа обмотки.

- На основании анализа методик оценки ВБР, наиболее полно учитывает процессы приводящие к отказу межвитковой изоляции и факторы влияющие на ее надежность, методика расчета ВБР по ОСТ 16 0.800.821–88.

- Для определения возможности использования новых электроизоляционных материалов в системе межвитковой изоляции, необходимо провести оценку ее ВБР. Для этого необходимо, экспериментальным путем, получить исходные данные.

- Величина ВБР определяется большим количеством факторов. В связи с этим возникает необходимость выявить из них наиболее значимые.

Следовательно, для оценки ВБР системы межвитковой изоляции, необходимо:

- На основе анализа свойств материалов, провести их выбор для использования в системе межвитковой изоляции.

- Изготовить макеты межвитковой изоляции насыпной обмотки, из выбранных материалов, провести их испытания согласно методике ОСТ 16 0.800.821–88.

- На основании результатов испытаний получить данные необходимые для проведения расчета ВБР по ОСТ 16 0.800.821–88. Провести расчет и оценку ВБР межвитковой изоляции изготовленной на основе исследуемых материалов.

- Выявить факторы влияющие на величину ВБР, исследуемой системы межвитковой изоляции, и оценить их значимость.

3 Объект и методы исследования

Объектом исследования является система межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного электродвигателя, изготовленная на основе пропиточного состава КП–50 и эмальпровода ПЭТД–180. В качестве методики испытаний используется ОСТ 16 0.800.821–88. МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АСИНХРОННЫЕ МОЩНОСТЬЮ СВЫШЕ 1КВТ ДО 400КВТ ВКЛЮЧИТЕЛЬНО. ДВИГАТЕЛИ. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения.

Для определения ВБР системы межвитковой изоляции и оценки факторов, значительно влияющих на нее, необходимо получить коэффициенты уравнения, для расчета скорости увеличения дефектности.

Согласно ОСТ 16 0.800.821–88, для получения коэффициентов уравнения, для расчета скорости увеличения дефектности необходимо:

- Изготовить макеты межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного электродвигателя;
- Провести испытание макетов на старение;
- Провести статистическую обработку результатов.

Макеты межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного электродвигателя изготовлены согласно выбранной методике, изображение макета приведено на рисунке 7.

Для изготовления макетов использовался эмальпровод ПЭТД–180 диаметром 0,800 мм. Он представляет собой обмоточный провод с двухслойной изоляцией, первый слой на основе полиэфиримидного лака, второй слой на основе полиамидимидного лака.



Рисунок 7 – Макет межвитковой изоляции всыпной обмотки асинхронного электродвигателя

Применяется для изготовления обмоток класса нагревостойкости Н: двигателей и сухих трансформаторов электрооборудования для промышленного и бытового применения, генераторов, измерительных приборов, катушек, реле, аппаратуры связи. Благодаря превосходным электрическим и температурным свойствам, а так же устойчивости к химическим веществам, провод обеспечивает высокую степень надёжности изделий и используется в изготовлении взрывозащищенного оборудования для химической, газовой, нефтеперерабатывающей и угольной промышленности. Механическая прочность изоляции провода позволяет использовать провод при механизированной намотке. Ресурс работы проводов – 20000 часов. Обладает следующими характеристиками:

- Температура окружающей среды, нижний предел минус 60 °С;
- Температурный индекс 180°С (Н);

Всего было изготовлено три макета. Для изготовления каждого макета были изготовлены образцы, из эмальпровода ПЭТД–180, 50 штук образцов длиной 300 миллиметров и 50 штук образцов длиной 320 миллиметров. У всех проводников, на протяжении 5мм от конца, была зачищена изоляция. Далее было увязано 50 пар, каждая из которых состояла из проводников длиной 300 и 320 миллиметров. Полученные пары были увязаны между собой в макет.

Далее была проведена пропитка макетов струйным методом. В качестве пропиточного состава был использован компаунд КП–50.

Компаунд КП–50 представляет собой смесь полимеризационноспособных олигомеров с добавками. Имеет пониженную пожароопасность и токсичность, т.к. не содержит растворителей или стирола.

Компаунд КП–50 применяется для пропитки и заливки обмоток электрических машин и аппаратов классов нагревостойкости F, изготовленных в общеклиматическом исполнении с применением проводов с эмалевой и волокнистой изоляцией. В качестве инициатора полимеризации используется пероксид бензоила.

Компаунд КП–50 обладает следующими характеристиками:

- Вязкость по вискозиметру ВЗ–246, с диаметром сопла 4мм, при температуре : 60-120 с.
- Продолжительность полимеризации в толстом слое с пастой перекиси бензоила при температуре : 30–60 мин.

- Продолжительность высыхания в тонком слое с пастой перекиси бензоила при температуре : 30 мин.
- Цементирующая способность, не менее: 250 Н.
- Электрическая прочность, после 24 часов пребывания в атмосфере с относительной влажностью , при , не менее: 20 МВ/м.

Далее пропитанный макет сушили в печи, конвекционным методом.

Для проведения испытания макетов на старение, согласно выбранной методике, необходимо определить испытательное напряжение.

Для этого из выбранного эмальпровода было изготовлено 100 штук образцов длиной 310 миллиметров. На эти образцы были нанесены кольцевые дефекты. Далее каждый образец испытывался напряжением в системе электрод-дробь. В результате были определены значения пробивного напряжения (таблица 1, приложение В).

По результатам испытаний было определено значение испытательного напряжения:

(21)

где – среднее значение пробивного напряжения,
– среднее квадратическое отклонение пробивного напряжения.

Затем, согласно методике, приведенной в ОСТ 16 0.800.821–88, были проведены испытания макетов на старение, для этого каждый макет был помещен в термошкаф для проведения теплового старения. Температура в первом термошкафу была установлена на уровне 190°C, во втором на уровне 205°C, в третьем 220°C. Испытания макетов проводились, через

определенные промежутки времени, путем приложения испытательного напряжения между парой образцов.

В результате испытаний получены зависимости числа образцов, пробившихся напряжением меньших или равным $U_{исп}$, от времени старения, они изображены на рисунке 8.

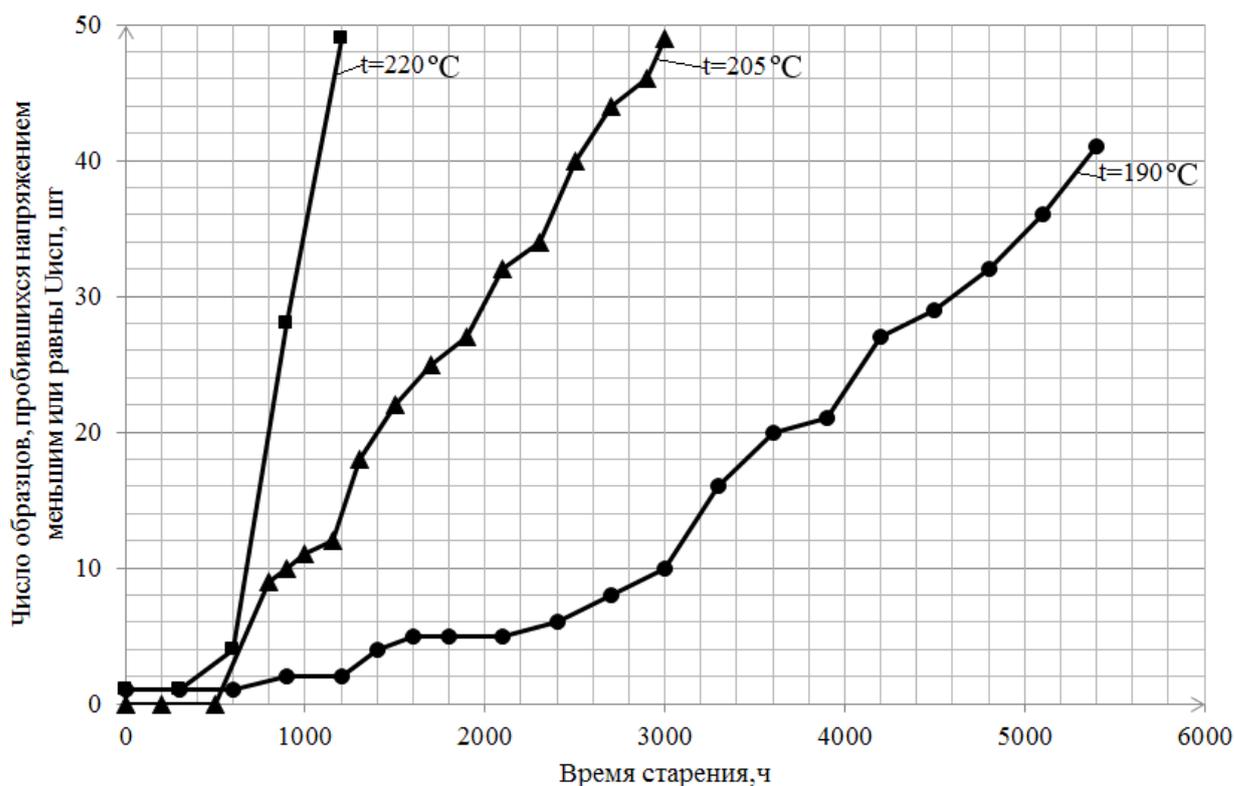


Рисунок 8 – Зависимости числа образцов, пробившихся напряжением меньших или равным $U_{исп}$, от времени старения

Статическая обработка результатов проводится согласно пункту 4, приложения 2 используемой методики.

Дефектность витковой изоляции после старения макетов при i -ой температуре, $мм^{-1}$:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (22)$$

где L – длина испытываемой части образца, мм;

n – число образцов, пробившихся напряжением меньшим или равным $U_{\text{исп}}$;

N – общее количество испытанных образцов.

Скорость увеличения дефектности витковой изоляции при i -ой температуре, $\text{мм}^{-1} \text{ч}^{-1}$:

$$\frac{\Delta D}{\Delta t} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (23)$$

где D – дефектность витковой изоляции не подвергавшейся старению, мм^{-1} ;

t – время старения макетов при i -ой температуре, ч;

Натуральные логарифмы скоростей увеличения дефектности витковой изоляции в функции от температуры представляются уравнениями:

$$\ln \frac{\Delta D}{\Delta t} = \ln A - \frac{B}{T} \quad (24)$$

$$\ln \frac{\Delta D}{\Delta t} = \ln A - \frac{B}{T} \quad (25)$$

$$\ln \frac{\Delta D}{\Delta t} = \ln A - \frac{B}{T} \quad (26)$$

где T – температура, при которой испытывались макеты, °С;

– температура характеризующая класс нагревостойкости материалов макетов, °С.

Для нахождения коэффициентов уравнений по результатам эксперимента используется способ наименьших квадратов.

$$\text{_____} \quad (27)$$

$$\text{_____} \quad (28)$$

где – число различных температур, при которых испытывались макеты.

Далее проводится расчет ВБР системы межвитковой изоляции.

Исходные данные для расчета ВБР приведены в приложении Г, таблица 1.

Число элементарных проводников в слое:

$$\text{_____} \quad (29)$$

Вероятность плотного касания соседних витков:

$$\text{_____} \quad (30)$$

Число проводников, находящихся в наружном слое секции (по периметру секции):

$$\text{—} \quad (31)$$

Число проводников, находящихся во внутренних слоях секции:

$$(32)$$

Доля пар соседних элементарных витков, относящихся к одному эффективному витку:

$$\text{—} \quad \text{—} \quad (33)$$

Общая длина пар соседних витков в обмотке, мм:

$$(34)$$

Число последовательно соединенных секций в фазе:

$$\text{—} \quad (35)$$

Среднее значение и среднее квадратическое отклонение величин коммутационных перенапряжений на секции, кВ:

$$\text{—} \quad (36)$$

$$\text{—} \quad (37)$$

Номинальное напряжение, приходящееся на секцию обмотки, кВ:

$$\text{—} \quad (38)$$

Скорость увеличения дефектности витковой изоляции, $\text{мм}^{-1}\text{ч}^{-1}$:

$$(39)$$

Дефектность витковой изоляции в части обмотки, не относящейся к области выхода катушек из паза (после пропитки), мм^{-1} :

$$(40)$$

Дефектность витковой изоляции в области выхода катушек из пазов (после пропитки), мм^{-1} :

$$(41)$$

Доля провода обмотки, принадлежащая к области выхода катушек из пазов:

$$\text{—} \quad (42)$$

Длина пар соседних витков во всей обмотке в области выхода катушек из пазов, мм:

$$(43)$$

Длина пар соседних витков во всей обмотке без учета области катушек на выходе из пазов, мм:

(44)

Расстояние между дефектами витковой изоляции, учитываемое в расчете, мм:

(45)

где $i=1, 2, 3, \dots M$;

(46)

Примечание. Число членов ряда M выбирается не менее 15.

Средние значения и средние квадратические отклонения напряжений перекрытия по поверхности изоляции промежутков между дефектами при воздействии импульсов коммутационных перенапряжений:

—

(47)

—

(48)

Вероятность отказа витковой изоляции при воздействии одного импульса перенапряжений и при условии, что на касающихся витках имеются дефекты, в местах которых расстояние между поверхностями токоведущих частей равно Z_i :

$$\frac{1}{\sigma} \int_{Z_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z_i^2}{2\sigma^2}\right) dZ_i \quad (49)$$

где σ – функция нормального распределения, определяемая по справочному приложению 5:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{Z_i^2}{2\sigma^2}\right) dZ_i \quad (50)$$

Примечание. Число членов ряда K_m выбирается не менее 10.

Время наработки, ч:

$$T_j = \frac{1}{\sigma} \int_{Z_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Z_i^2}{2\sigma^2}\right) dZ_i \quad (51)$$

где Δt – расчетный интервал времени, выбирается в пределах от 500 до 1500 ч.

$$j=1,2,3, \dots, \quad (52)$$

Вероятность отказа одного элемента витковой изоляции за время наработки Δt при дефектности, равной 1, 1/мин:

$$\text{---} \quad (53)$$

За элемент витковой изоляции принимается элементарный участок изоляции одного из соприкасающихся витков, на котором имеется сквозное повреждение.

Дефектность витковой изоляции в области обмотки, не принадлежащей к области выхода катушек из паза, в момент времени наработки t_j , мм⁻¹:

$$(54)$$

Дефектность витковой изоляции в области выхода катушек из паза в момент времени наработки двигателя t_j , мм⁻¹:

$$(55)$$

Вероятность отказа одного элемента витковой изоляции в интервале времени наработки от $(t_j - \Delta t)$ до t_j :

$$(56)$$

Вероятность отказа одного элемента витковой изоляции в области выхода катушек из паза в интервале времени наработки от $(t_j - \Delta t)$ до t_j :

$$(57)$$

Число элементов витковой изоляции в области обмотки, не принадлежащей к выходу из паза, в момент времени наработки t_j :

(58)

Число элементов витковой изоляции в области выхода катушек из паза, в момент времени наработки t_j :

(59)

Вероятность отказа витковой изоляции на интервале времени наработки от $(t_j - \Delta t)$ до t_j :

(60)

Примечание. Если значения произведений $\lambda_j \Delta t$ и $\lambda_j t_j$ меньше 0,01, то выражение (60), как и другие выражения такого вида можно заменить выражением:

(61)

Вероятность безотказной работы витковой изоляции в течение времени наработки t_j :

(62)

Оценка значимости и влияния факторов на величину ВБР, исследуемой системы межвитковой изоляции, производится путем варьирования их значений.

На основании анализа факторов, влияющих на величину ВБР, были выбраны следующие:

- Номинальная толщина изоляции. Данный фактор показывает вероятность возникновения дефектов в процессе изготовления и эксплуатации межвитковой изоляции. Увеличение толщины изоляции приведет к снижению числа дефектов, возникающих в процессе изготовления, и к увеличению числа дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.
- Коэффициент пропитки. Чем больше коэффициент пропитки, тем выше вероятность ликвидации дефектов в процессе пропитки.
- Дефектность витковой изоляции. Чем больше дефектность, тем выше вероятность пробоя.
- Частота включения двигателя. Данный фактор оказывает воздействие на количество коммутационных перенапряжений.
- Амплитудные значения номинального фазного напряжения и фазных коммутационных перенапряжений. Данные факторы характеризуют степень электрической нагрузки.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Данный раздел ВКР посвящен выполнению анализа и планированию комплекса работ в рамках научного исследования и оценке его коммерческого потенциала, структурированию произведенных работ, определению трудоемкости выполненных работ, разработке график их выполнения, определению бюджета проведения научного исследования.

6.1 Предпроектный анализ

6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

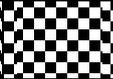
Целевым рынком являются коммерческие организации занимающиеся проектированием и производством электродвигателей, организации по ремонту ЭД, а также организации производящие контроль ресурса работоспособности оборудования, в том числе электродвигателей.

Исходя из сегмента рынка, произведем сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено на рисунке 16.

Результаты сегментирования:

- Основными сегментами являются коммерческие организации связанные с электродвигателями, их проектированием и производством, ремонтом, контролем их ресурса работоспособности;
- Наиболее сильно предприятие должно быть ориентировано на сегменты рынка связанные с проектированием и производством электродвигателей, а также с контролем их работоспособности;

- Наиболее привлекательными сегментами рынка являются отрасли связанные с проектированием и производством электродвигателей, а также с контролем их работоспособности.

		Вид разработки		
		Методы определения вероятности безотказной работы изоляции ЭД	Определение наиболее совместимых компонентов изоляции ЭД	Методы контроля работоспособности в процессе эксплуатации ЭД
Отрасль	Проектирование и производство ЭД			
	Ремонт ЭД			
	Контроль ресурса работоспособности ЭД			

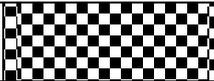
	Фирма А		Фирма Б
---	---------	--	---------

Рисунок 16 – Карта сегментирования рынка разработок для электродвигателей

6.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку

сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. [24]

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена для данного случая в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда пользователя	0,05	2	1	1	0,1	0,05	0,05
Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Надежность	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
Безопасность	0,1	4	2	2	0,4	0,2	0,2
Простота эксплуатации	0,1	1	1	1	0,1	0,1	0,1

Продолжение таблицы 6

Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	1	1	0,5	0,1	0,1
Уровень проникновения на рынок	0,2	5	2	2	1	0,4	0,4
Финансирование научной разработки	0,1	4	1	1	0,4	0,1	0,1
Наличие сертификации разработки	0,2	5	1	1	1	0,2	0,2
Итого	1	34	16	16	4,1	1,7	1,7

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 6, подобраны, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n B_i \cdot B_j \quad (63)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя. [24]

Итог данного анализа:

Уязвимость позиции конкурентов обусловлена тем, что у них не имеется сертификации на данную разработку, следовательно, ее применение в крупных и известных организациях невозможно.

Конкурентное преимущество разработки обусловлено наличием сертификата на данную разработку. Данная разработка нашла применение в изучаемой отрасли, на данный момент является единственной в области надежности электрических машин. На данный момент происходит совершенствование этой разработки.

Исходя из сказанного выше данная разработка, действительно, способна заинтересовать партнеров и инвесторов. Данная разработка является высоко конкурентной, в силу того, что она имеет сертификат и является единственной и непревзойденной в своем роде.

6.1.3 FAST-анализ

Стадия 1. Выбор объекта FAST-анализа.

В рамках магистерской диссертации в качестве объекта FAST-анализа выступает объект исследования – макет всыпной обмотки асинхронного двигателя на основе эмальпровода ПЭТД–180 и пропиточного состава КП–50.

Стадия 2. Описание главной, основных и вспомогательных функций, выполняемых объектом. Информация полученная при выполнении данной стадии представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Классификация функций выполняемых объектом исследования

Наименование функции	Количество процессов	Выполняемая функций	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Макетирование	–	Моделирует процессы всыпной обмотки	х		
Данные о скорости дефектообразования	1	Получение данных о скорости дефектообразования данного макета		х	
Данные о совместимости материалов	1	Получение данных о совмести материалов данного макета			х
Данные о технологичности и материалов	1	Получение данных о технологичности материалов данного макета			х

Стадия 3. Определение значимости выполняемых функций объектом.

Первый этап: матрица смежности функций представлена в таблице 8

Таблица 8 – Матрица смежности

	Макетирова ние	Данные о скорости дефектообразов ания	Данные о совместимо сти материалов	Данные о технологичн ости материалов
Макетирование	=	=	>	>
Данные о скорости дефектообразов ания	=	=	>	>
Данные о совместимости материалов	<	<	=	>
Данные о технологичност и материалов	<	<	<	=

Второй этап: преобразование матрицы смежности в матрицу количественных соотношений, таблица 9.

Таблица 9 – Матрица количественных соотношений функций

	Макетирование	Данные о скорости дефектообразования	Данные о совместимости материалов	Данные о технологичности материалов	ИТОГО
Макетирование	1	1	1,5	1,5	5
Данные о скорости дефектообразования	1	1	1,5	1,5	5
Данные о совместимости материалов	0,5	0,5	1	1,5	3,5
Данные о технологичности материалов	0,5	0,5	0,5	1	2,5

Третий этап: определение значимости функции.

Функция 1 «Макетирование», относительная значимость равна $5/16=0,31$;

Функция 2 «Данные о скорости дефектообразования», относительная значимость равна $5/16=0,31$;

Функция 2 «Данные о совместимости материалов», относительная значимость равна $3,5/16=0,22$;

Функция 3 «Данные о технологичности материалов», относительная значимость равна $2,5/16=0,16$;

Стадия 4. Анализ стоимости функций, выполняемых объектом исследования. Расчет стоимости функций приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Определение стоимости функций, выполняемых объектом исследования

Наименование функции	Количество процессов	Выполняемая функций	Трудоемкость выполнения, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Макетирование	–	Моделирует процессы всыпной обмотки	36	1500	1800	3300
Данные о скорости дефектообразования	1	Получение данных о скорости дефектообразования данного макета	8	–	400	400

Продолжение таблицы 10

Данные о совместимости материалов	1	Получение данных о совместимости материалов данного макета	15	–	900	900
Данные о технологичности материалов	1	Получение данных о технологичности материалов данного макета	1	–	60	60

Определи относительные затраты на функции:

Функция 1 «Макетирование», относительная значимость равна $3300/4660=0,71$;

Функция 2 «Данные о скорости дефектообразования», относительная значимость равна $400/4660=0,086$;

Функция 3 «Данные о совместимости материалов», относительная значимость равна $900/4660=0,19$;

Функция 4 «Данные о технологичности материалов», относительная значимость равна $60/4660=0,014$;

Стадия 5. Построение функционально-стоимостной диаграммы объекта и ее анализ. Функционально-стоимостная диаграмма объекта приведена на рисунке 17.

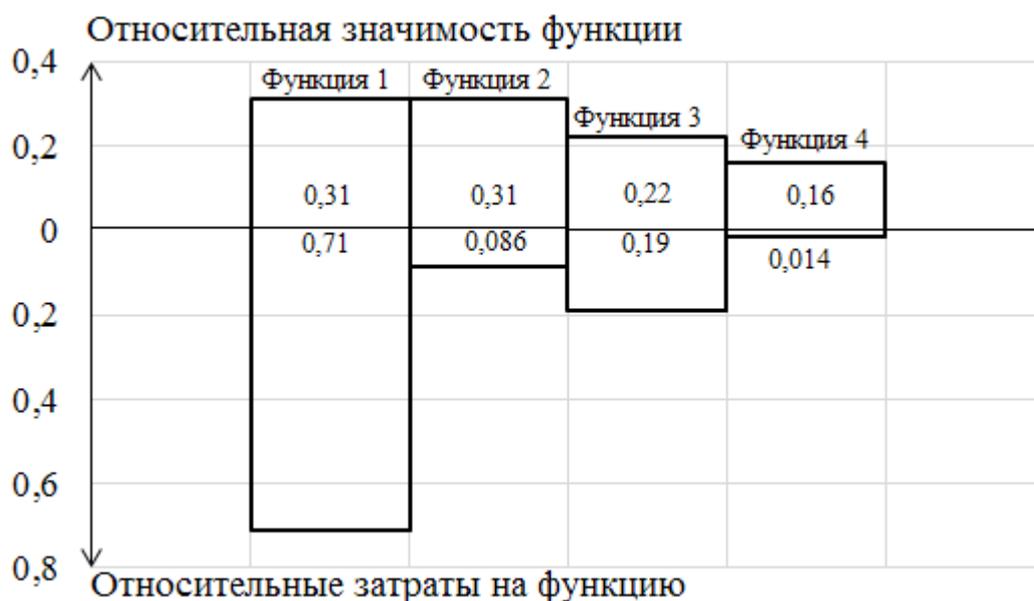


Рисунок 17 – Функционально-стоимостная диаграмма объекта

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью (полезностью) функций и затратами на них.

Анализ приведенной выше ФСД показывает явное наличие рассогласования по функциям 1, 2, 4. Необходимо провести работы по ликвидации данных диспропорций.

Стадия 6. Оптимизация функций выполняемых объектом.

Оптимизацию функций выполняемых данным объектом провести невозможно, по причине того, что данные функции максимально

оптимизированы. Без макетирования невозможно получить данные о скорости дефектообразования. В свою очередь без данных о скорости дефектообразования невозможно получить данные о совместимости материалов, а без данных о совместимости материалов невозможно получить данные о технологичности материалов.

Итог FAST – анализа: снижение затрат на единицу полезного эффекта провести невозможно, по причинам указанным в стадии б.

6.1.4 Диаграмма Исикава

Диаграмма причины-следствия Исикавы – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Диаграмма Исикава приведена на рисунке 18.



Рисунок 18 – Диаграмма Исикава

6.1.5 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 1, приложение Д.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице – 11.

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта							
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	0	+	+
	B3	0	0	+	0	+	0
	B4	+	+	0	0	+	+
Слабые стороны проекта							
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5	
	У1	0	0	+	+	0	
	У2	0	0	0	+	0	
	У3	0	0	+	+	0	
	У4	0	0	0	+	0	

Анализ интерактивной матрицы проекта:

- В1С1 – За счет того, что данная разработка единственная в своем роде на нее имеется спрос;
- В1С2 – Возможность разработки установить вероятность безотказной работы повышает на нее спрос;
- В1С3 – За счет снижения цены разработки спрос на нее повышается;
- В1С4 – Компаниям, имеющим спрос на данный продукт, не придется оказывать финансирование разработки, потому что она финансируется из бюджета, следовательно спрос на данную разработку будет выше;
- В1С5 – Ввиду того, что большое число компании знакомы с персоналом и имеют положительный опыт работы с ними, спрос на разработку будет выше;
- В1С6 – Наличие сертификата позволяет использовать данную разработку и утверждать о компетентности полученных результатов в ходе ее использования, следовательно, спрос на данную разработку будет выше;
- В2С1 – Наличие материалов, которые являются передовыми и ранее не испытанными, позволяют данной разработке оставаться единственной в своем роде;
- В2С2 – Наличие материалов, которые являются передовыми и ранее не испытанными, позволяют установить вероятность безотказной работы изоляции, выполненной из данных материалов;
- В2С3 – Материалы предоставляются их производителями, что снижает стоимость разработки;

- В2С5 – Квалифицированный персонал сможет легко разобраться в технологических процессах с использованием новых материалов;
- В2С6 – Компаниями, предоставляющим материалы, необходимы компетентные результаты. Компетентность полученных результатов подтверждается стандартом;
- В3С3 – Ввиду того, что персоналом и раньше проводились подобные исследования имеются опыт и знания, позволяющие удешевить технологический процесс разработки;
- В3С5 – Ввиду того, что персонал и раньше получал данные, и имеет опыт осуществления технологических процессов, его квалификация будет выше;
- В4С1 – Ввиду эксклюзивности разработки и заинтересованности в ней потенциальными покупателями, с их стороны может быть оказана помощь;
- В4С2 – Ввиду заинтересованности в установлении ВБР потенциальными покупателями, с их стороны может быть оказана помощь;
- В4С5 – Ввиду того, что большое число компании знакомы с персоналом и имеют положительный опыт работы с ними, вероятность оказания помощи повышается;
- В4С6 – Ввиду того, что данная технология позволяет получить компетентные данные и применяется в разработке, то вероятность оказания помощи со стороны заинтересованных лиц повышается;
- У1Сл3 – Ввиду отсутствия необходимого оборудования для получения более точных результатов вероятность возникновения угрозы получения не точных результатов повышается;

- У1Сл4 – При необходимости уточнения данных придется проводить длительные испытания;
- У2Сл4 – Ввиду долгого времени проведения испытаний необходимых для разработки, длительность времени разработки повышается;
- У3Сл3 – Ввиду того, что в следствие изменения требований к сертификации продукции, полученных данных может не хватить для получения сертификата на данную разработку, придется проводить повторные длительные испытания;
- У3Сл4 – Ввиду того, что в следствие изменения требований к сертификации продукции, полученных данных может не хватить для получения сертификата на данную разработку, придется проводить повторные длительные испытания;
- У4Сл4 – Ввиду того, что исследуемые материалы поставляются не всегда вовремя, срок проведения испытаний может увеличиться;

Из полученного анализа видно, что большинство угроз, которые мы можем оперативно исключить, связаны с отсутствием необходимого оборудования для получения более точных испытаний, путем получения материальной помощи от заинтересованных лиц.

В рамках **третьего этапа** должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 2, приложение Д.

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

6.1.6 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации приведен в таблице 1, приложение Е.

Согласно полученным итоговым баллам данная разработка является перспективной, а знания разработчика достаточны для ее успешной коммерциализации.

6.1.7 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Наиболее успешными методами коммерциализации результатов научно-технического исследования в данном случае являются:

- Торговля патентными лицензиями. Данный метод может оказаться успешным по причине того, что в патентной лицензии, предоставляющей данные о надежности витковой изоляции, заинтересованы предприятия производящие проектирование, производство и ремонт асинхронных электродвигателей. Данные предприятия представляют собой сферы крупного, среднего и малого бизнеса и имеют большое распространение.
- Инжиниринг. Данный метод может оказаться успешным по причине того, что в получении проекта асинхронного электродвигателя с определенной надежностью витковой изоляции, заинтересованы предприятия производящие производство и ремонт асинхронных электродвигателей.

Данные предприятия представляют собой сферы крупного, среднего и малого бизнеса и имеют большое распространение.

6.2 Инициация проекта

6.2.1 Устав проекта

6.2.1.1 Цели и результат проекта

В данном разделе содержится информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Информация по заинтересованным сторонам проекта приведена в таблице 12.

Таблица 12 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ЗАО «Сибкабель»	Повышение роста продаж обмоточных проводов
ЗАО «Дельтапласт»	Повышение роста продаж пропиточных составов
ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В.Вахрушева»	Получение методики позволяющей изготавливать асинхронные электродвигатели с требуемыми параметрами надежности
ООО «Сибирская электротехническая компания»	Получение методики позволяющей в результате ремонта асинхронных электродвигателей получать требуемые параметры надежности
ОАО «Газпром»	Покупка асинхронных электродвигателей с заданными параметрами надежности

Цели и результат проекта приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Получение данных о надежности витковой изоляции
Ожидаемые результаты проекта	– Данные о надежности витковой изоляции; – Выявление факторов влияющих на надежность витковой изоляции и степени их влияния; – Составление рекомендаций по получению требуемой надежности витковой изоляции.
Критерии приемки результата проекта	Обоснованность и наличие подтверждений результатов проекта
Требования к результату проекта	– Обоснованность; – Наличие подтверждений результата;

6.2.2 Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эта информация представлена в таблице 14.

Таблица 14 – Рабочая группа

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
Дудкин А.Н., НИ ТПУ, доцент кафедры ЭКМ	Научный руководитель	Отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта, является экспертом проекта	360
Бекк П.А., НИ ТПУ, студент кафедры ЭКМ	Инженер (исполнитель)	Специалист, выполняющий отдельные работы по проекту	1536
Супуева А.С., НИ ТПУ, лаборант кафедры ЭКМ	Лаборант	Участствует в экспериментальных исследованиях	672

6.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Ограничения проекта приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения / допущения
Бюджет проекта	Ограничивается средствами выделяемыми заинтересованными компаниями
Источник финансирования	Ограничиваются заинтересованными компаниями
Сроки проекта	18 месяцев
Дата утверждения плана управления проектом	1.10.14
Дата завершения проекта	1.06.16

6.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

6.3.1 Иерархическая структура работ проекта

На рисунке 19 представлена иерархическая структура работ по данному проекту.

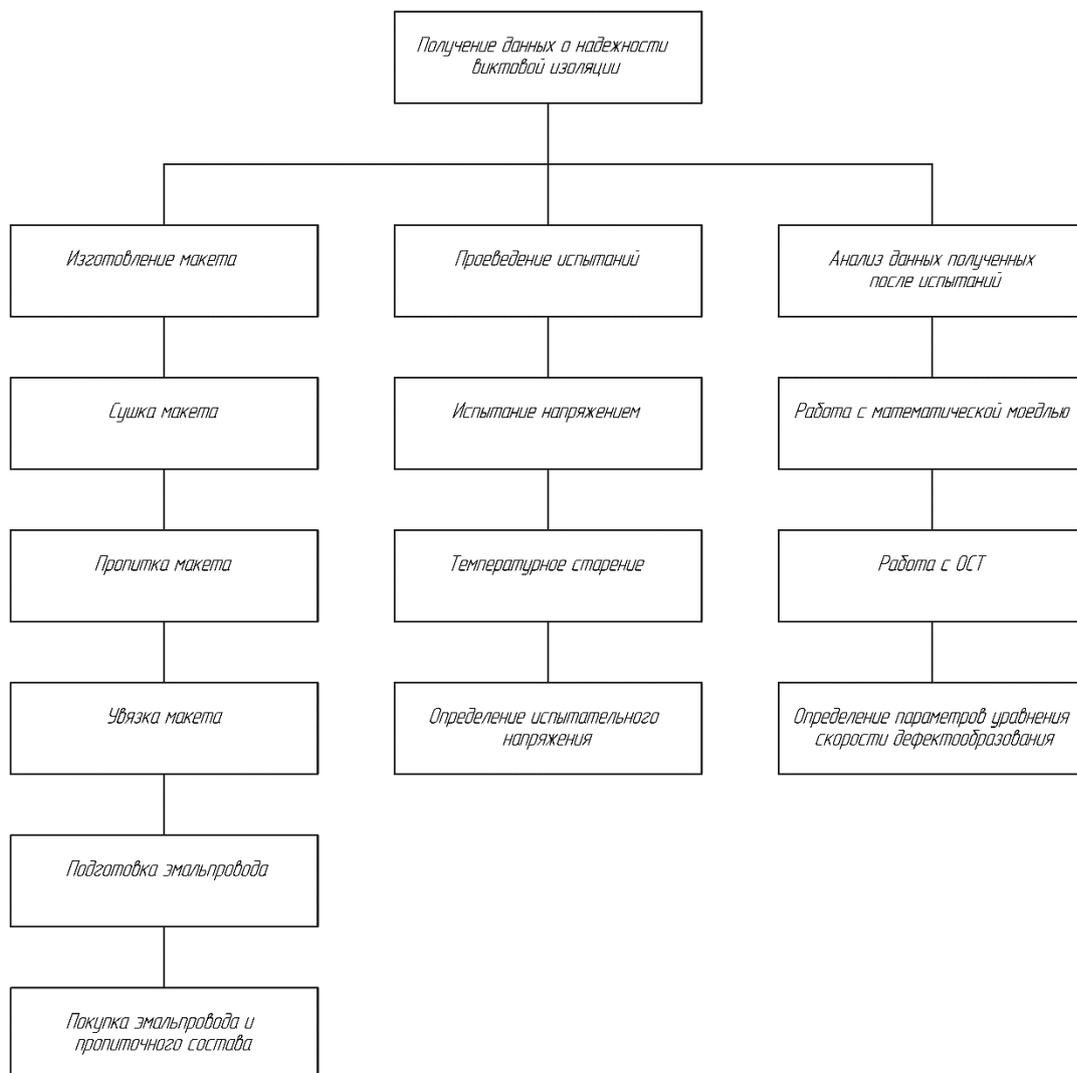


Рисунок 19 –Иерархическая структура работ

6.3.2 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела определены ключевые события проекта, их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информацию представлена в таблице 16.

Таблица 16 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Изготовление макета	3.11.14	Макет всыпной обмотки асинхронного электродвигателя
2	Проведение испытаний	28.03.16	Данные для определения параметров уравнения скорости дефектообразования
3	Анализ данных полученных после испытания	30.04.16	Данные о надежности витковой изоляции

6.3.3 План проекта

Линейный график проекта представлен в виде календарного плана, таблица 1, приложение Ж.

Календарный план-график проведения НИОКР по теме приведен на рисунке 1, приложение Ж.

6.3.4 Бюджет научного исследования

6.3.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). Результаты по данной статье приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Перчатки	Пара	2	15	36
Нож	Штука	2	30	72
Кусачки	Штука	1	200	240
Эмальпровод ПЭТД-180	Кг	1	400	480
Компаунд КП-50	Банка	1	800	960
Итого по статье C_m				1752

6.3.4.2 Специальное оборудование для экспериментальных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 % от его цены. Результаты по данной статье приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для экспериментальных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1.	Муфельная печь	1	4600	4600
3.	Весы лабораторные	1	8600	8600
Итого:				13200

6.3.4.3 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 1, приложение 3.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (64)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (65)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Расчет баланса рабочего времени приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер	Лаборант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	52	52	52
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	56	56	28
- невыходы по болезни	14	17	20
Действительный годовой фонд рабочего времени	229	226	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (66)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{тс}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 20.

Таблица 20 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Научный руководитель	27500	0,3	0,15	1,3	51838	2308,91921	229	528742,5
Инженер	17500	0,3	0,5	1,3	40950	1848,18584	226	417690
Лаборант	13000	0,3	0,3	1,3	27040	1206,56574	251	302848
Итого								1249281

Тарифные ставки были приняты на основании данных опубликованных в [25]

6.3.4.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (67)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы.

Расчет дополнительной заработной платы приведен в таблице 21.

Таблица 21 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Научный руководитель	Инженер	Лаборант
Основная зарплата	48487,11	1066399,84	617758,68
Дополнительная зарплата	7273,067	159959,976	92664,802
Зарплата исполнителя	55760,18	1226359,816	710422,482
Итого по статье $C_{\text{зп}}=1992542,475$ руб.			

6.3.4.5 Отчисление на социальные нужды

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot \mathcal{B}_{\text{осн}} + \mathcal{Z}_{\text{доп}} = 0,3 \cdot 1992542,47 = 597762,74, \quad (68)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

6.3.4.6 Накладные расходы

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot \mathcal{B}_{\text{осн}} + \mathcal{Z}_{\text{доп}} = 0,8 \cdot 1992542,47 = 1594033,98, \quad (69)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

6.3.4.7 Группировка затрат по статьям

Группировка затрат по статьям приведена в таблице 1, приложение И.

6.3.5 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями проекта приведен в таблице 22.

Таблица 22 – План управления коммуникациями проекта

Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
Статус проекта	Научный руководитель	Инженеру	При принятии решений о направлении исследований

Продолжение таблицы 22

Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Инженер	Научному руководителю	Еженедельно
Документы и информация по проекту	Инженер	Научному руководителю	Еженедельно
О выполнении контрольной точки	Лаборант	Инженеру	По факту выполнения контрольной точки

6.3.6 Реестр рисков проекта

Информация по данному разделу приведена в таблице 1, приложение К.

6.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты

и затраты проекта, так и затраты и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

Кроме выше перечисленных видов эффективности можно выделить ресурсный эффект (характеризуется показателями, отражающими влияние инновации на объем производства и потребления того или иного вида ресурса), научно-технический (оценивается показателями новизны и полезности) и др.

6.4.1 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (70)$$

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

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

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

За первый вариант примем рассматриваемый в ходе расчетов вариант исполнения.

В качестве второго варианта примем вариант, который, в отличие от первого предусматривает еще и использование пирометра.

В качестве третьего варианта примем вариант, который, в отличие от второго предусматривает еще и использование оборудования которое более эффективно моделирует условия эксплуатации в ходе теплового старения.

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

Расчёт интегрального финансового показателя приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Интегральный финансовый показатель

	Φ_{pi}	$I_{финр}^{исп.i}$
Исполнение 1	4212327,19	0,98
Исполнение 2	4217327,19	0,981
Исполнение 3	4297327,19	1

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

(71)

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 – бальная 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 24.

Таблица 24 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Повышение производительности труда пользователя	0,05	5	4	4
Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	4
Надежность	0,05	5	4	4
Безопасность	0,1	5	4	4
Простота эксплуатации	0,1	5	4	3
Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	5
Уровень проникновения на рынок	0,2	4	5	5
Финансирование научной разработки	0,1	5	5	5
Наличие сертификации разработки	0,2	5	5	5
ИТОГО	1			

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы 25.

Таблица 25 – Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

	I_{pi}
Исполнение 1	4,7
Исполнение 2	4,5
Исполнение 3	4,5

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}}, I_{исп.3} = \frac{I_{p-исп3}}{I_{финр.3}} \quad (72)$$

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}):

$$\mathcal{E}_{cp1} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.(2,3)}}; \mathcal{E}_{cp2} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.(1,3)}}; \mathcal{E}_{cp3} = \frac{I_{исп.3}}{I_{исп.(1,2)}} \quad (73)$$

В таблице 26 приведена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 26 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/ п	Показатели	Исп.1		Исп.2		Исп.3	
		По отношен ию к исп.2	По отношен ию к исп.3	По отношен ию к исп.1	По отношен ию к исп.3	По отношен ию к исп.1	По отношен ию к исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки		0,98		0,981		1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки		4,7		4,5		4,5
3	Интегральный показатель эффективности		4,79		4,58		4,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,04	1,06	0,95	1,01	0,93	0,981

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволило понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в работе технической задачи с позиции финансовой и

ресурсной эффективности, наиболее эффективным вариантом является вариант исполнения 1.

7 Социальная ответственность

Низковольтные электрические машины – одно из самых массовых и широко используемых изделий электротехнической промышленности. В связи с этим вопрос об их надежности и качестве изготовления становится особенно важным. Анализ отказов асинхронных электродвигателей показывает, что значительная их часть (90%) происходит в результате отказов обмоток.

Для исследования данной проблемы на базе лаборатории ТПУ был разработан и смонтирован учебно-лабораторный стенд для проведения высоковольтных испытаний изоляции обмоточных проводов и систем изоляции обмотки на стойкость к воздействию испытательного напряжения.

В процессе испытаний возникает возможность поражения людей электрическим током, получение ожога при возникновении короткого замыкания и образуются продукты распада при старении изоляции (озон). Пожар выступает в качестве возможной чрезвычайной ситуации на рабочем месте. Поэтому необходимо обеспечить электробезопасность, разработать мероприятия и средства, обеспечивающие защиту людей от воздействия электрического тока и других вредных и опасных факторов.

7.1 Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды

7.1.1 Выделение озона

Образующийся в процессе пробоя изоляции озон по параметрам острой токсичности относится к 1 классу опасности. Согласно [26] предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны – 0,1 мг/м³, максимальная разовая ПДК озона в атмосферном воздухе – 0,16 мг/м³, средняя суточная ПДК озона в атмосферном воздухе – 0,03 мг/м³ [26,27]. При вдыхании высоких концентраций озона (9 мг/м³) и выше может появиться кашель, раздражение глаз, головная боль, головокружение и за грудиные боли. Возможно появление бронхоспазма и даже начальных стадий отека легких (при многочасовом воздействии высоких концентраций). Для защиты персонала от воздействия озона обязательно систематическое проветривание помещения после получаса работы установки. Иным способом является установка вытяжки, которая обеспечивает постоянное устранение вредных веществ.

7.1.2 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений определяется совокупным воздействием на организм человека температуры, влажности, скорости движения воздуха, теплового излучения нагретых поверхностей. Микроклимат различных производственных помещений зависит от колебаний внешних метеорологических условий, времени дня, года, особенностей производственного процесса и систем отопления и вентиляции.[28]

Согласно [3] работа на лабораторно-учебном стенде в лаборатории относится к классу работ с интенсивностью энергозатрат 120 – 150 ккал/час. В производственных помещениях, в которых работа с лабораторными стендами является основной и связана с нервно-эмоциональным напряжением, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата, приведенные в таблице 27, для категории работ 1а в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами микроклимата производственных помещений.

Таблица 27– Параметры микроклимата производственных помещений категории 1а

Период года	Параметр микроклимата	Величина
Холодный и переходный	Температура воздуха в помещении	22 – 24 °С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23 – 25°С
	Относительная влажность	40 – 60 %
	Скорость движения воздуха	0,1 – 0,2 м/с

Для обеспечения достаточного постоянного и равномерного нагревания воздуха в рабочих аудиториях в холодный период года используется отопление. Температуру в помещении следует регулировать с учетом тепловых потоков от оборудования. Стенд необходимо установить так, чтобы тепловые потоки, исходящие от него, были направлены в противоположную от студентов сторону.

С целью поддержания параметров микроклимата в допустимых пределах, а также комфортные условия работы магистрантов применяется

кондиционирование воздуха. Кондиционирование воздуха обеспечивает поддержание параметров микроклимата в течение всех сезонов года, очистку воздуха от пыли и вредных веществ.

7.1.3 Шум

Другим вредным фактором, оказывающим пагубное воздействие на здоровье человека, является шум. Согласно [29] предельно допустимые уровни (ПДУ) звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для измерительных и аналитических работ в лаборатории имеют значения представленные в таблице 28 [29,30].

Таблица 28 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, измерительные и аналитические работы в лаборатории;	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

Влияние шума на слуховой анализатор проявляется в ауральных эффектах, которые, главным образом, заключаются в медленно прогрессирующем понижении слуха по типу неврита слухового нерва (кохлеарный неврит). Подвергающиеся шумовому воздействию люди, чаще всего жалуются на головные боли, которые могут иметь разную интенсивность и локализацию, головокружение при перемене положения тела, снижение памяти, повышенную утомляемость, сонливость, нарушения сна, снижение эмоциональной устойчивости, снижение аппетита, потливость, боли в области сердца. Шум – это один из самых сильных стрессорных агентов. Влияние шума сказывается на функциях эндокринной и иммунной систем организма, в частности это может проявляться в виде трех главных биологических эффектов: снижение иммунитета к инфекционным болезням; снижение иммунитета, направленного против развития опухолевых процессов; появление благоприятных условий для возникновения и развития аллергических и аутоиммунных процессов.

Источником шума при работе на установке является повышающий трансформатор, входящий в состав данного учебно-лабораторного стенда. Для уменьшения шумового воздействия на человека используются индивидуальные и коллективные средства защиты. В качестве коллективной защиты выступает звукоизоляционный материал, которым покрыт стенд за которым находится понижающий трансформатор. А противозумные наушники и вкладыши могут использоваться, как средства индивидуальной защиты [31,32].

7.1.4 Освещение

В лаборатории должны быть соблюдены нормы освещенности и качественные показатели освещения в соответствии с требованиями [33].

Помещения должны иметь естественное и искусственное освещение. Естественное освещение должно осуществляться через боковые светопроемы. Искусственное освещение должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

Освещенность рабочей поверхности должна составлять 300÷500 лк. Коэффициент пульсации освещенности не более 10 %. Коэффициент естественной освещенности КЕО в лабораторных помещениях должен быть не ниже 1,2% – при боковом освещении и 3,5% – при верхнем или комбинированном освещении. Коэффициент искусственной освещенности КЕО в лабораторных помещениях должен быть не ниже 0,7% – при боковом освещении и 2,1% – при верхнем или комбинированном освещении.

Произведем расчет искусственного освещения для рабочей лаборатории № 254 8 корпуса ТПУ, в которой проходят лабораторные работы по дисциплине «Электротехническое материаловедение». Лаборатория имеет следующие размеры:

- ширина – 6,5 м;
- длина – 8 м;
- высота – 3 м;
- площадь – 52 м².

В лаборатории предусмотрено общее равномерное освещение, для которого применяются люминесцентные лампы типа ЛБ (лампы белого цвета), для которых используется светильник типа ОД – 2-80 (длинной 1528 мм, шириной 266 мм). Размещение светильников в помещении определяется следующими размерами [34]:

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3,5 - 0 = 3,5 \text{ ,м} \quad (74)$$

где H – высота помещения, м;

$h_c=0$ – расстояние светильников от перекрытия (свес), м.

Расчётная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_p = 3,5 - 0,7 = 2,8 \text{ ,м} \quad (75)$$

где $h_p=0,7$ – высота рабочей поверхности над полом, м.

Расстояние между светильниками:

$$L_b = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,8 = 3,92 \text{ ,м} \quad (76)$$

где $\lambda=0,7$ – интегральный критерий оптимальности расположения светильников.

Оптимальное расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$l = L/3 = 3,92/3 = 1,306 \text{ ,м} \quad (77)$$

На основе данных расчетов рекомендуется разместить светильники в 2 ряда, в каждом из которых можно установить 3 светильника типа ОД – 2 мощностью 125 Вт. При этом разрывы между светильниками в ряду составят 0,4 м. Учитывая, что в каждом светильнике установлено по две лампы, общее число ламп в помещении составит 12 штук. План помещения и размещения светильников приведен на рисунке 20.

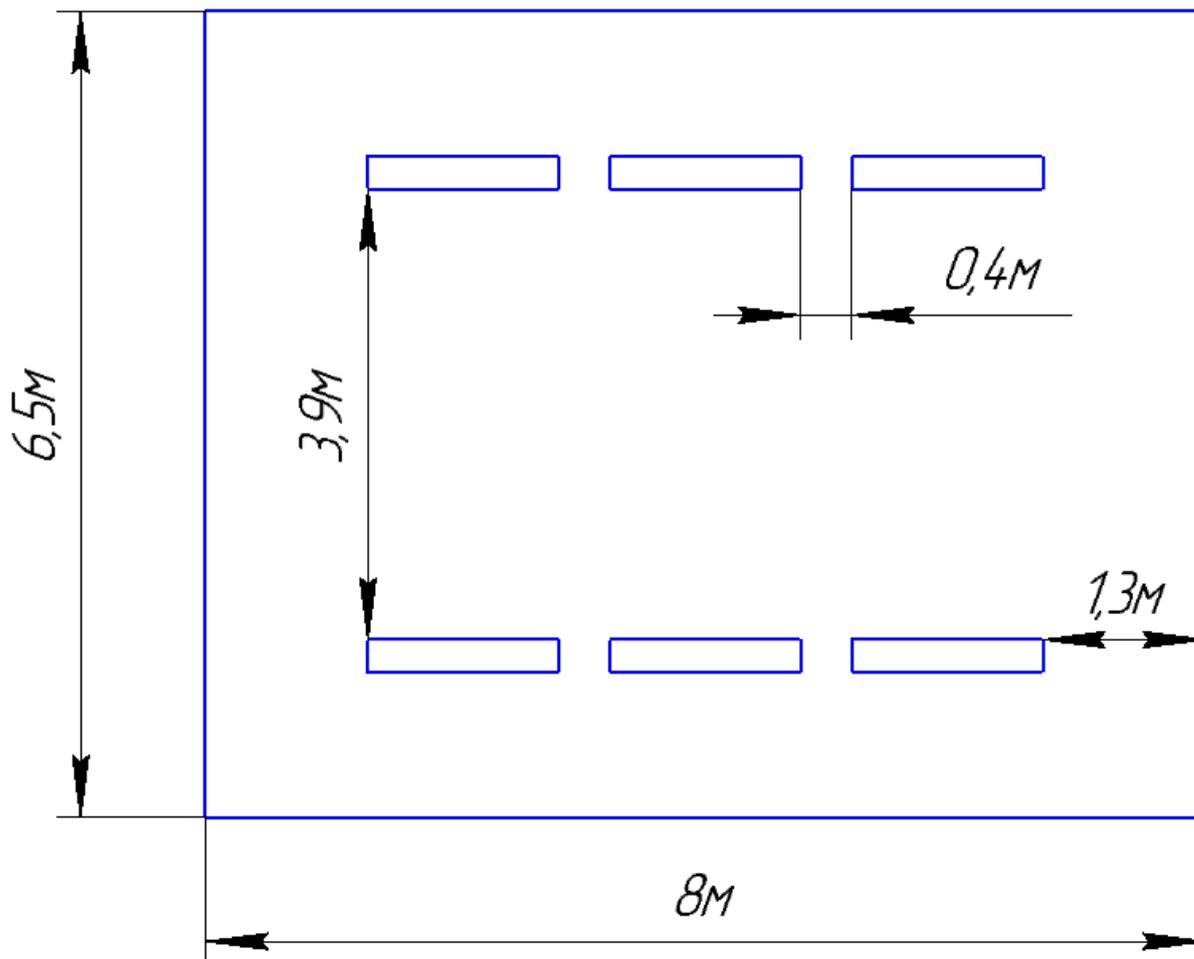


Рисунок 20 – План помещения и размещения светильников

Расчет общего равномерного освещения выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен.

Световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta) \quad (78)$$

где $E_n=300$ – нормируемая минимальная освещённость по [35],лк;

$S=52$ – площадь освещаемого помещения, м^2 ;

$K_3=1,5$ – коэффициент запаса для помещения с малым выделением пыли;

$Z=1,1$ – коэффициент неравномерности освещения, для люминесцентных ламп;

$N=12$ – число ламп, шт;

η – коэффициент использования светового потока, %.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен p_c и потолка p_n .

Расчет индекса помещения осуществляется по формуле:

$$i = S / h(A+B) = 52 / 2,8 \cdot (8+6,5) = 1,281 \quad (79)$$

где $S=52$ – площадь помещения, м^2 ;

$A=8$ – длина помещения, м;

$B=6,5$ – ширина помещения, м.

Коэффициенты отражения p_c и p_n имеют следующие значения [34]:

$p_c = 50\%$ (стены свежепобеленные с окнами без штор); $p_n = 70\%$ (потолок свежепобеленный).

Для полученных значений p_c , p_n и i коэффициент использования светового потока $\eta = 53\%$. Подставляя полученные значения в формулу 5,

найдем значение минимально требуемого светового потока для рабочей аудитории:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta) = 300 \cdot 52 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 100 / (12 \cdot 53) = 4047, \text{ лк}$$

Рассчитав световой поток Φ , зная тип лампы, выберем ближайшую стандартную лампу и определим электрическую мощность всей осветительной системы. Ближайшая стандартная лампа – ЛД 80 Вт с потоком 4250 лк [34].

Делаем проверку

$$-10\% \leq (\Phi_{\text{станд}} - \Phi) / \Phi_{\text{станд}} \leq +20\% \quad (80)$$

где $\Phi_{\text{станд}} = 4250$ – световой поток лампы ЛД 80.

Получаем:

$$-10\% \leq 4,8\% \leq +20\% \text{ (подходит)}$$

Электрическая мощность осветительной установки равна:

$$P = N \cdot P_{\text{л}} = 12 \cdot 80 = 960 \text{ Вт} \quad (81)$$

где $P_{\text{л}} = 80$ – мощность лампы ЛД 80.

Напряжение сети 220 В. По результатам данного расчета можно сделать следующий вывод: в рабочей аудитории (размерами 6,5 x 8 м) со свежепобеленными потолком и стенами, с окнами без штор следует

использовать 6 светильников типа ОД – 2-80 с люминесцентными лампами ЛБ мощностью 80 Вт с потоком 4250 лк.

7.2 Анализ опасных производственных факторов

7.2.1 Поражение электрическим током

Электрический ток, проходя через живой организм, оказывает термическое, электролитическое, биологическое действия. Термическое действие проявляется в ожогах, нагреве и повреждении кровеносных сосудов, перегреве сердца, мозга и других органов, что вызывает в них функциональные расстройства. Электролитическое действие проявляется в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает значительное нарушение ее состава, а также ткани в целом. Биологическое действие выражается в нарушении внутренних биоэлектрических процессов. Например, взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать непроизвольное сокращение мышц. Поэтому необходимо соблюдение мер электробезопасности [36,37].

К работе на электроустановке должны допускаться лица, прошедшие инструктаж и обучение безопасным методам труда, проверку знаний правил безопасности и инструкций применительно к выполняемой работе. Для электробезопасности установка должна быть оснащена устройствами защиты от токов короткого замыкания и перегрузок.

Токоведущие части электроустановки не должны быть доступны для случайного прикосновения, а доступные прикосновению открытые и сторонние проводящие части не должны находиться под напряжением, представляющим опасность поражения электрическим током.

Для защиты от поражения электрическим током в нормальном режиме должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты от прямого прикосновения:

- основная изоляция токоведущих частей;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;
- применение сверхнизкого (малого) напряжения.

Для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения изоляции должны быть применены по отдельности или в сочетании следующие меры защиты при косвенном прикосновении:

- защитное заземление;
- автоматическое отключение питания;
- уравнивание потенциалов;
- выравнивание потенциалов;
- двойная или усиленная изоляция;
- сверхнизкое (малое) напряжение;
- защитное электрическое разделение цепей;
- изолирующие (непроводящие) помещения, зоны, площадки.

Применение двух и более мер защиты в электроустановке не должно оказывать взаимного влияния, снижающего эффективность каждой из них.

Защиту при косвенном прикосновении следует выполнять во всех случаях, если напряжение в электроустановке превышает 50 В переменного и 120 В постоянного тока.

Заземляющее устройство [38], используемое для заземления электроустановок одного или разных назначений и напряжений, должно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к заземлению этих электроустановок: защиты людей от поражения электрическим током при повреждении изоляции, условиям режимов работы сетей, защиты электрооборудования от перенапряжения и т.д. в течение всего периода эксплуатации.

В первую очередь должны быть соблюдены требования, предъявляемые к защитному заземлению. Требуемые значения напряжений прикосновения и сопротивления заземляющих устройств при стекании с них токов замыкания на землю и токов утечки должны быть обеспечены при наиболее неблагоприятных условиях в любое время года. Заземляющие устройства должны быть механически прочными, термически и динамически стойкими к токам замыкания на землю.

В электроустановках напряжением выше 1 кВ для защиты от поражения электрическим током должно быть выполнено защитное заземление открытых проводящих частей. В таких электроустановках должна быть предусмотрена возможность быстрого обнаружения замыканий на землю. Защита от замыканий на землю должна устанавливаться с действием на отключение по всей электрически связанной сети в тех случаях, в которых это необходимо по условиям безопасности (для линий, питающих передвижные подстанции и механизмы, торфяные разработки и т.п.).

Перед началом эксплуатации электроустановки:

- необходимо проверить исправность защитного заземления и средства автоматического отключения питания;
- запрещается использовать электроаппараты и приборы в условиях, не соответствующих рекомендациям (инструкциям) или с неисправностями, которые могут привести к пожару;
- запрещается пользоваться поврежденными розетками, рубильниками, другими электроустановочными изделиями.

В помещение, которое по окончании работ закрывается и не контролируется дежурным персоналом, все электроустановки и электроприборы должны быть обесточены (за исключением дежурного освещения, автоматических установок пожаротушения, пожарной и охранной сигнализации, а также электроустановок, работающих круглосуточно).

При оказании первой помощи при поражении электрическим током, прежде всего, необходимо освободить пострадавшего от источника тока – оттолкнув от пострадавшего электрический провод с помощью деревянной сухой палки (ручка швабры, скалка), резинового коврика или других изолирующих материалов. Пострадавшего нельзя брать за открытые части тела, пока он находится под действием тока.

Если сердцебиение сохранено, а дыхание отсутствует – начинайте искусственную вентиляцию легких (рот в рот или рот в нос). При отсутствии сердцебиения – начинайте непрямой массаж сердца в сочетании с искусственной вентиляцией легких (2 вдоха на 15 толчков). Как правило, запустить сердце можно, нанеся сильный удар в середину грудины и продолжив наружный массаж сердца. Показателем правильного массажа сердца будут пульсовые толчки на сонной артерии, сужение зрачков и появление самостоятельного дыхания. После появления сердцебиения и

дыхания пострадавшего надо срочно госпитализировать. Госпитализации подлежат все лица, получившие электротравму. Они должны соблюдать строгий постельный режим, находиться под наблюдением врача.

Оказывая первую помощь больным с электрическими ожогами, в соответствии с правилами оказания первой помощи при термических ожогах, а также провести транспортную иммобилизацию (обездвиживание). Переправляют их в стационар всегда в положении лежа, несмотря на кажущееся удовлетворительное состояние.

7.2.2 Термический ожог

При работе с макетом необходимо соблюдать меры безопасности, чтобы не получить термический ожог. Для этого применяются перчатки или рукавицы из хлопчатобумажной, льняной ткани или грубодисперсного сукна или других тканей с защитными накладками [39].

Если вы обожглись о макет, то правила оказания первой помощи следующие. Во-первых, обожженную поверхность кожи следует окунуть в холодную или прохладную воду, подержать под водой минут 10-15, для отведения лишнего тепла из ткани. Во-вторых, наложить чистую марлевую или тканевую повязку. И, в-третьих, вызвать скорую помощь.

Если в результате ожога появились пузыри, ни в коем случае нельзя их прокалывать. Также категорически запрещается смазывать ожоги яичным желтком, подсолнечным маслом, мазями, посыпать порошком, смазывать обожженное место маслом, детским кремом, хозяйственным мылом и т.д., так как они способствуют загрязнению обожженной поверхности и заражению инфекциями, а также при этом вы только замедлите теплоотдачу, а, следовательно, увеличите площадь и глубину поражения. Облепиховое

масло и различные мази по назначению врача используются на более поздних стадиях лечения, т.к. они ускоряют заживление ожогового дефекта.

Нельзя прикладывать натуральный лед к обожженной коже, так как это может привести к омертвлению клеток кожи и не восстановлению их в дальнейшем.

7.3 Охрана окружающей среды

7.3.1 Воздействие озона на окружающую среду

По параметрам острой токсичности озон относится к 1 классу опасности. Согласно ГОСТ 12.1.007–76 предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны – $0,1 \text{ мг/м}^3$, максимальная разовая ПДК озона в атмосферном воздухе – $0,16 \text{ мг/м}^3$, средняя суточная ПДК озона в атмосферном воздухе – $0,03 \text{ мг/м}^3$.

Высокая окисляющая способность озона и образование во многих реакциях с его участием свободных радикалов кислорода определяют его высокую токсичность. Воздействие озона на организм может приводить к преждевременной смерти. Озон эффективно убивает плесень и бактерии.

Наиболее опасное воздействие высоких концентраций озона в воздухе:

- на органы дыхания прямым раздражением;
- на холестерин в крови человека с образованием нерастворимых форм, приводящим к атеросклерозу;
- на органы размножения у самцов всех видов животных, в том числе и человека (вдыхание этого газа убивает мужские половые клетки и препятствует их образованию). При долгом нахождении в среде с

повышенной концентрацией этот газ может стать причиной мужского бесплодия.

Озон считается вредным, так как может переноситься к поверхности Земли и ввиду своей токсичности вредить живым существам. Кроме того, повышение содержания озона внесло вклад в рост парникового эффекта атмосферы. По наиболее широко распространенным научным оценкам, вклад озона составляет около 25% от вклада углекислого газа. [40]

Увеличение концентрации озона вблизи поверхности имеет сильное негативное воздействие на растительность, повреждая листья и угнетая их фотосинтетический потенциал. В результате исторического процесса увеличения концентрации приземного озона, вероятно, была подавлена способность поверхности суши поглощать углекислый газ и поэтому увеличились темпы роста углекислого газа в XX веке. [41]

До недавнего времени борьба с озоном велась в двух направлениях: деструкцией газа или разбавлением до безопасных концентраций и выбросом в атмосферу. Деструкция требует применения множества технологических процессов, что ведет к значительному удорожанию метода озонирования. Разбавление озона при выбросе в атмосферу является наиболее простым и доступным способом. [42]

7.4 Защита в чрезвычайных ситуациях

7.4.1 Требования пожарной безопасности

Лица допускаются к работе на электроустановки после прохождения первичного инструктажа. Обучение лиц мерам пожарной безопасности осуществляется путем проведения повторного инструктажа один раз в год.

Причинами возгорания электроустановки могут служить:

- несоблюдение техники безопасности;
- короткое замыкание (в случае неисправности блокировок, средств автоматического отключения питания);
- перегрев токоведущих частей и электроизмерительного блока.

Поэтому во избежание пожароопасных ситуаций необходимо соблюдать следующие требования [43,44,45,46]:

- соблюдать требования безопасности при работе на электроустановке;
- очищать помещения от горючих отходов и мусора;
- определить места и допустимое количество единовременного хранения сырья;
- оборудовать специально отведённые места для курения;
- запрещается загромождать эвакуационные пути и выходы различными материалами и изделиями, оборудованием, мусором и т.п.
- пожарные гидранты должны находиться в исправном состоянии, а в зимнее время должны быть утеплены и очищаться от снега и льда;
- все средства пожаротушения должны иметь соответствующие сертификаты.
- дороги, проезды и подъезды к зданию должны быть всегда свободными для проезда пожарной техники, содержаться в исправном состоянии, а зимой быть очищенными от снега и льда;
- не реже одного раза в полугодие проводить практические тренировки всех задействованных для эвакуации работников.

Порядок действий при обнаружении пожара или признаков горения и меры по локализации и ликвидации последствий ЧС:

- незамедлительно оповестить пожарную охрану по телефону, назвав адрес объекта, место возникновения пожара и свою фамилию;
- принять возможные меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей;
- в случае угрозы жизни людей немедленно организовать их спасение, используя для этого имеющиеся силы и средства;
- проверить включение автоматических систем противопожарной защиты (оповещения людей о пожаре, пожаротушения, противодымной защиты);
- при необходимости отключить электроэнергию (за исключением систем противопожарной защиты), выполнить другие мероприятия, способствующие предотвращению развития пожара;
- прекратить все работы в здании;
- удалить за пределы опасной зоны всех работников, не участвующих в тушении пожара;
- осуществить общее руководство по тушению пожара до прибытия подразделения пожарной охраны;
- обеспечить соблюдение требований безопасности работниками, принимающими участие в тушении пожара;
- одновременно с тушением пожара организовать эвакуацию и защиту материальных ценностей;

- организовать встречу подразделений пожарной охраны и оказать помощь в выборе кратчайшего пути для подъезда к очагу пожара;
- сообщать подразделениям пожарной охраны, привлекаемым для тушения пожара и проведения связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ, сведения о перерабатываемых или хранящихся на объекте опасных, взрывчатых, сильнодействующих ядовитых веществах.

План эвакуации людей из помещения, где проводятся испытания на высоковольтной установке, показан на рисунках 1 и 2, приложение Л.

7.5 Вывод по главе

Основным фактором, влияющим на производительность людей, работающих с учебно-лабораторным стендом, являются комфортные и безопасные условия труда. Условия труда магистрантов в рабочей аудитории характеризуются возможностью воздействия на них следующих производственных факторов: шума, тепловыделений, выделение вредных веществ, а именно выделение озона, действие микроклимата, недостаточной освещённости, параметров технологического оборудования и рабочего места.

Таким образом, в данном разделе были рассмотрены вопросы техники безопасности при работе с электрооборудованием на напряжение свыше 1кВ, а также проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье человека. Были отмечены источники негативного воздействия, меры коллективной и индивидуальной защиты.

Заключение

В результате проделанной работы был проведен анализ системы изоляции низковольтных асинхронных электродвигателей, описаны материалы, используемые для ее изготовления, факторы воздействующие на систему и ее показатели надежности, проведен анализ методик расчета ВБР межвитковой изоляции.

Изготовлены макеты межвитковой изоляции насыпной обмотки, на основе эмальпровода ПЭТД–180 и пропиточного состава КП–50. Проведены испытания на старение, в результате чего определены значения коэффициентов уравнения скорости увеличения дефектности витковой изоляции. На основании полученных результатов определена ВБР испытанной системы, а также были определены факторы, оказывающие на нее значительное влияние.

Кроме того, в работе были выполнены разделы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и «Социальная ответственность» и раздел на иностранном языке. В первом разделе был проведен предпроектный анализ, инициация проекта, планирование управления научно-техническим проектом и была определена ресурсная, финансовая, бюджетная, социальная и экономическая эффективность исследования. Во втором разделе был проведен анализ вредных факторов, опасных производственных факторов, факторов воздействующих на окружающую среду, способов защиты в чрезвычайных ситуациях. В третьем разделе, на английском языке, был проведен анализ системы изоляции электрических машин, были описаны материалы, используемые для изготовления систем изоляции низковольтных электродвигателей и факторы воздействующие на систему изоляции низковольтных электрических машин.

Список публикаций студента

1. Бекк П.А. Underground cables // Язык и мировая культура: взгляд молодых исследователей. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции. Часть II. г. Томск. 2014.
2. Супуева А.С., Бекк П.А. Обеспечение надежности изоляции низковольтных обмоток // Вторая Российская молодежная научная школа-конференция: энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи. г. Томск. 2014.
3. Шуликин С.Н., Бекк П.А. Оценка электрохимической коррозии электрических контактов. VII Международная научно-техническая конференция: электромеханические преобразователи энергии. г. Томск. 2015.

Список использованных источников и литературы

1. Изоляция электрических машин общего назначения. Издание третье переработанное и дополненное / Л.М. Берштейн –М.: Энергоиздат,1981.–376 с.
2. ГОСТ 8865–93. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация. / М.: Издательство стандартов, 1993.–6 с.
3. Обмоточные провода - Изоляция электрических машин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/izolyaciya-elektricheskikh-mashin-15.html>. – Загл. С экрана. Дата обращения: 05.04.16.
4. Провода медные круглые, эмалированные, короностойкие с двухслойной изоляцией, с температурным индексом 180/Каталок продукции ЗАО «Сибкабель».
5. Изоляционные материалы для низковольтных устройств. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elmatec.ru/nizkovolt>. – Загл. С экрана дата обращения: 03.03.15
6. Обмоточные провода: учебник для вузов. – 2-е изд., переработанное и дополненное / И.Б. Пешков – М.: Энергоатомиздат, 1995.– 416 с.
7. Электроизолит. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.electroizolit.ru/>. – Загл. С экрана дата обращения:05.04.16.
8. Торгово-промышленная компания «инрфхим». [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.infrachim.ru/slkm/9.html>. – Загл. С экрана дата обращения:03.03.15.
9. ЗАО Дельтопласт. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.deltaplast.ru/>. – Загл. С экрана дата обращения: 05.04.16.

10. Гетманенко В.М. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя / Научный журнал КубГАУ. – 2011. - №73(09).
11. Конструкция асинхронных двигателей. [Электронный ресурс]– Режим доступа http://www.agrovodcom.ru/elektrodvigatel/info_konstrukcija-asinhronnyh-dvigatelej.php . – Загл. С экрана дата обращения: 03.03.15.
12. Элинар. Группа компаний. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.elinar.ru/Default.htm>. – Загл. С экрана дата обращения: 05.04.16.
13. «Ваш Мастер». Электроизоляционные материалы: лавитерм, имидо-флекс, изофлекс. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vash-master.ru/zl/zap0-lav.htm>. – Загл. С экрана дата обращения: 05.04.16.
14. Надежность электрических машин: учебник для студентов высших учебных заведений/ О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемеская; под ред. О.Д. Гольдберга. –М.: Издательский центр «Академия», 2010.–288 с.
15. Частотное регулирование электроприводов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-audit.ru/chrp/index.shtml>. – Загл. С экрана дата обращения: 02.04.16.
16. Don-Ha Hwang, Ki-Chang Lee, Yong-Joo Kim, In-Woo Lee, Tae-Hoon Lim, Dong-Hee Kim, Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications, / IEEE IAS Conference Proceedings, Oct. 2003.
17. E. Persson, Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induc-tion Motors, IEEE IAS Transactions, vol.28. No. 5, Oct. 1992. ; R. Kerkman, D. Leggate, G. Skibinski. Interaction of Drive Modulation & Cable Parameters on AC Motor Transients, IEEE IAS Conference Proceedings, 1996. ; Melfi, M., Sung, A.M.J., Bell, S., Skibinski, G.L. Effect of Surge Voltage Risetime

on the Insulation of Low Voltage Machines Fed by PWM Con-verters // Industry Applications, IEEE Transactions on, Jul/Aug 1998, pages (766 - 775).

18. Variable speed drives and motors, Motor insulation voltage stresses un-der PWM inverter operation. Gambica / Rema technical report No. 1, third edition, 2006.

19. ГОСТ 15150–69 МАШИНЫ, ПРИБОРЫ И ДРУГИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

20. ГОСТ Р 53480–2009. НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 2010.–33 с.

21. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Н.Л. Кузнецов. –М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

22. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения: материалы лекций прочитанных в Политехническом музее на семинаре по надежности и прогрессивным методам контроля качества продукции / О.Д. Гольдберг– М: Знание,1976. –56 с.

23. ОСТ 16 0.800.821–88 / МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АСИНХРОННЫЕ МОЩНОСТЬ СВЫШЕ 1КВТ ДО 400 КВТ ВКЛЮЧИТЕЛЬНО. ДВИГАТЕЛИ. Надёжность. Расчетно-экспериментальные методы определения.

24. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

25. Планово-финансовый отдел [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents>. . – Загл. С экрана дата обращения: 02.04.16.
26. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2007.– 5 с.
27. ГН 2.2.5.1313. – 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы.–М.: Минздрав России. 1998.
28. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.–М.: Минздрав России. 1997.
29. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.–М.: Минздрав России. 1997.
30. ГОСТ 12.1.003–83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008.– 11 с.
31. СНиП П–12–77. Защита от шума. –М.: Госстрой СССР. 1977.
32. ГОСТ 12.4.011–89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – М.: Стандартинформ, 2004.– 8 с.
33. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. – М.: Минздрав России, 2003.
34. Расчет искусственного освещения. Методические указания к выполнению индивидуальных заданий для студентов дневного и заочного обучения всех специальностей / О.Б. Назаренко. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 12 с.
35. СНиП 23–05–95. Естественное и искусственное освещение. – М.: Минрегион России, 2010.

36. ГОСТ 12.1.019 – 2009 (с изм. №1) ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Стандартинформ, 2010.– 15 с.
37. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. – М.: Стандартинформ, 2010.– 5 с.
38. ГОСТ 12.1.030 – 81. Защитное заземление, зануление. – М.: Стандартинформ, 2010.– 10 с.
39. ГОСТ 12.4.011 – 89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. – М.: Стандартинформ, 2010.– 10 с.
40. Изменение климата. Обобщающий доклад. / МГЭИК – Женева, Швейцария, 2007. – 104 с.
41. The Copenhagen Diagnosis: Climate Science Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.copenhagendiagnosis.com/>. – Загл. С экранна дата обращения: 02.04.16.
42. Интересные и нужные сведения о строительных материалах и технологиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alobuild.ru/ozonirovanie/toksikologija-i-metodi-obezvrezhivaniya-ozona.php>. – Загл. С экранна дата обращения: 02.04.16.
43. СНиП 21–01–97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997. – 12 с.
44. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69–ФЗ. О пожарной безопасности.
45. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. №69–ФЗ. О пожарной безопасности.
46. НПБ 166-97. Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации.

47. N. Frost, M. Chapman, R. Bruetsch. Considerations for Rotating Low-Voltage Machine Insulation Design, International Symposium on Electrical Insulation – Vancouver, Canada, 2008.
48. Michael Chapman, Nancy Frost, Rudolf Bruetsch, Von Roll. Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines Switzerland Ltd., 4226 Breitenbach, Switzerland, Von Roll USA, Inc., Schenectady – New York, USA, 2009.
49. K. Alewine, N. Frost, D. Michaels, G. Miller, T. Wacker. Insulation Materials for Low Voltage Applications, Energy Asia, 2008.
50. N. Frost, G. Miller, K. Alewine. Introduction to Insulation Materials, short course presented at 2007 EIC/EME, Nashville, TN, 2007.
51. M. Chapman, R. Bruetsch, N. Frost. Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines, International Symposium on Electrical Insulation – Vancouver, Canada, 2008.
52. Nancy Frost, Michael Chapman, Rudolf Bruetsch. Considerations for Rotating Low-Voltage Machine Insulation Designs. Von Roll USA, Inc., Schenectady, NY, 12306 USA Von Roll Switzerland Ltd., 4226 Breitenbach, Switzerland, 2010.
53. K. Alewine, N. Frost, D. Michaels, G. Miller, T. Wacker. Insulation Materials for Low Voltage Applications, Energy Asia. 2005.
54. N. Frost, D. Hughes, D. Laurenty, G. Miller. A Review of Vacuum Pressure Impregnation Procedure for Form Wound Stators. EIC/EME, Indianapolis, IN. 2003.
55. G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Piscataway, NJ: IEEE Press. 2004.
56. G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani. Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair. Piscataway, NJ: IEEE Press. 2004.

57. A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, Mar. 2005.

58. A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921–937, Jul./Aug. 1992.

59. Stefan Grubic, Student Member, IEEE, Jose M. Aller, Bin Lu, Member, IEEE, and Thomas G. Habetler, Fellow. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 55, NO. 12, DECEMBER 2008.

60. Design of Rotating Electrical Machines JuhaPyrho nen, Tapani Jokinen and Vale´ ria Hrabovcova. A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6. 2008.

