

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи



Супуева Аделя Сагынбековна

**СНИЖЕНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК
НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Леонов Андрей Петрович

Томск - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Влияние дефектности на надежность межвитковой изоляции низковольтных обмоток.....	11
1.1 Факторы, влияющие на износ и дефектообразование в межвитковой изоляции.....	11
1.2 Влияние взаимодействия пропиточных составов и обмоточных проводов на образование и развитие дефектов.....	24
1.3 Существующие методы оценки устойчивости компонентов систем межвитковой изоляции к дефектообразованию	37
1.4 Выводы. Постановка задач на исследование.....	46
ГЛАВА 2. Описание используемых методов исследования и свойств исследуемых материалов.....	48
2.1 Исследуемые эмалированные провода и пропиточные составы.....	48
2.2 Определение механической прочности изоляции эмалированных проводов.....	48
2.3 Определение пробивного напряжения изоляции эмалированных проводов.....	53
2.4 Определение дефектности изоляции эмалированных проводов.....	54
2.5 Определение смачивающих свойств жидкостей.....	55
2.6 Расчетно-экспериментальный метод определения скорости дефектообразования в межвитковой изоляции обмоток.....	57
ГЛАВА 3. Исследование дефектности систем низковольтной межвитковой изоляции.....	60
3.1 Исследование устойчивости эмалевой изоляции проводов к образованию дефектов.....	60
3.2 Определение «залечиваемости» сквозных дефектов в эмалевой изоляции при пропитке.....	70

3.3 Исследование влияния адгезии в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» на эксплуатационную дефектность.....	76
3.4 Выводы по главе.....	81
ГЛАВА 4. Обеспечение минимального уровня дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток.....	83
4.1 Определение критериев допустимой дефектности эмалевой изоляции.....	83
4.2 Разработка рекомендаций по прогнозированию интенсивности процессов дефектообразования в межвитковой изоляции.....	90
4.3 Разработка мероприятий по обеспечению минимального уровня дефектности межвитковой изоляции на стадии изготовления и в процессе эксплуатации.....	95
4.4 Выводы по главе.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Низковольтные асинхронные электродвигатели – наиболее распространенный и широко применяющийся тип электрических машин. Статистические данные об их эксплуатации показывают [24,54,86,94], что надежность этих изделий все ещё остается недостаточно высокой: ежегодно в среднем капитальному ремонту подвергается 20-25 % от общего количества установленных двигателей, значительная часть которых выходит из строя по причине отказа системы изоляции [15,23,41,51,57,59,60,69]. В связи с этим вопрос о повышении качества и надежности этих устройств имеет на сегодняшний день особое значение.

Частыми причинами выхода из строя системы изоляции асинхронных электродвигателей являются неудовлетворительное качество применяемых эмалированных проводов и электроизоляционных материалов, несовершенство и нарушение технологического процесса обмоточно-изолирующих работ, а также несоответствие режимов эксплуатации. В подавляющем большинстве случаев отказы происходят из-за повреждения межвитковой изоляции обмотки как самого слабого элемента [16,19,23,24,33,41,54,60,70,71,75,108].

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования надежности низковольтных обмоток изложены в ряде работ, проведенных коллективами под руководством Бернштейн Л.М., Галушко А.И., Гольдберга О.Д., Похолкова Ю.П. и др. В этих работах описаны критерии и механизм отказа низковольтных обмоток [15,54,86,98,108]; исследованы процессы дефектообразования в витковой изоляции при изготовлении и во время эксплуатации [16,57,70-75,80-82]; предложены способы испытаний и методы определения дефектности электроизоляционных материалов и обмоточных проводов [30,33,34,60,66]; разработаны математические модели, методы оценки и прогнозирования показателей надежности систем изоляции обмоток [19,20-24,31,37,51,58,63,85,88,94]. Установлено: критерием отказа является наличие

сквозных повреждений в изоляции – дефектов, в местах которых возможно возникновение короткого замыкания [73-75,77,80,81].

В то же время, остается нерешенным ряд вопросов, связанных со снижением дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток:

- существующие методы испытаний не всегда адекватно оценивают устойчивость эмалевой изоляции к дефектообразованию, а также не учитывают особенности её эксплуатации в составе частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией питающего напряжения;

- отсутствуют количественные критерии оценки устойчивости эмалевой изоляции обмоточных проводов к образованию дефектов;

- отсутствуют методы количественной оценки величины адгезионного взаимодействия между компонентами системы межвитковой изоляции и его влияния на процессы дефектообразования;

- отсутствуют рекомендации по экспресс-прогнозированию уровня дефектности межвитковой изоляции в процессе эксплуатации.

Решение вышеперечисленных проблем, является актуальной задачей, так как позволит снизить уровень дефектности межвитковой изоляции и тем самым повысить её надежность.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка комплекса мероприятий по снижению дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. оценить адекватность существующих методов оценки устойчивости эмалевой изоляции обмоточных проводов к дефектообразованию, в том числе с учетом особенностей эксплуатационных нагрузок, характерных для частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения;
2. исследовать влияние уровня дефектности межвитковой изоляции на показатели её надежности;

3. исследовать влияние адгезионного взаимодействия на процессы дефектообразования в системах межвитковой изоляции;
4. разработать рекомендации по экспресс-прогнозированию интенсивности дефектообразования в межвитковой изоляции в процессе эксплуатации;
5. разработать мероприятия по снижению дефектности межвитковой изоляции.

Научная новизна работы:

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения работы адгезии для системы «пропиточный состав - эмалированный провод».
2. Установлена корреляционная связь между работой адгезии и скоростью дефектообразования в межвитковой изоляции низковольтных обмоток.
3. Установлено, что отказ межвитковой изоляции обмоток низковольтных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения, возможен при единичных дефектах эмалевого изоляционного слоя.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности прогноза скорости дефектообразования на основе количественной оценки работы адгезии в системах межвитковой изоляции.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны критерии по определению устойчивости эмалевого изоляционного слоя к дефектообразованию.
2. Разработаны рекомендации по экспресс-прогнозированию скорости дефектообразования с учетом адгезионного взаимодействия в межвитковой изоляции.
3. Получены новые данные по скоростям дефектообразования для ряда систем межвитковой изоляции.
4. Разработан метод определения устойчивости эмалевого изоляционного слоя к действию поверхностных разрядов (Патент на изобретение №2491565 от 27.08.13).

Объекты исследования: эмалированные провода и пропиточные составы, и их различные сочетания в системах межвитковой изоляции низковольтных обмоток асинхронных двигателей.

Предмет исследования: физико-механические процессы дефектообразования в межвитковой изоляции низковольтных обмоток.

Методология диссертационного исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили результаты отечественных и зарубежных исследований в области надежности систем изоляции электрических машин, адгезии, прочности и разрушения полимерных композиционных материалов. При выполнении работы были применены методы математической статистики и обработки результатов эксперимента.

Методы диссертационного исследования. В ходе исследований применялись стандартные и оригинальные методы испытаний на реальных образцах обмоточных проводов и физических моделях систем межвитковой изоляции; для статистической обработки экспериментальных данных и расчетов использовались программные продукты: MS Excel, Mathcad 14.0 и COMSOL Multiphysics 3.5a.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Необходимый уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции обеспечивается при дефектности эмалевой изоляции проводов не более $0,006 \text{ мм}^{-1}$.
2. Единичные дефекты резко снижают среднее время до пробоя межвитковой изоляции низковольтных электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.
3. Интенсивность процессов дефектообразования в межвитковой изоляции во время эксплуатации может быть спрогнозирована с учетом работы адгезии.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность полученных результатов определяется использованием научно-обоснованных методов исследований и статистической обработки результатов экспериментов, а также сопоставлением экспериментальных и расчетных данных с ранее проводимыми исследованиями.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: XII Всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск: ТПУ, 2010 г.); XI Региональных научно-практических студенческих конференциях «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (г. Томск: ТПУ, 2011 г.); XVII, XIX Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск: ТПУ, 2011 г., 2013 г.); V, VII Международных научно-технических конференциях «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск: ТПУ, 2011г., 2015г.); II, III Российских молодежных научных школах-конференциях «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» - г. Томск: ТПУ, 2014 г.- 2015г.; VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск: НГТУ, 2015г.)

Внедрение результатов исследований. Результаты экспериментальных исследований дефектности и дефектообразования для различных систем «эмалированный провод – пропиточный состав» переданы и используются на АО «Сибкабель», ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева», г. Томск (подтверждается соответствующими актами (см. Приложение 2)).

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в планировании и проведении экспериментальных исследований; обработке, анализе и обобщении полученных данных; написании статей, докладов; разработке и оформлении патента на изобретение.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для соискателей ученых степеней, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 120 страницах, содержит 49 рисунков, 32 таблицы, 3 приложения и список использованных источников из 116 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, ее научная новизна и практическая значимость, представлены цель и задачи диссертационной работы. Приведен краткий обзор содержания работы.

Первая глава посвящена вопросам влияния дефектности на надежность межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных двигателей. Показано, что основной причиной отказа системы изоляции является возникновение межвиткового замыкания, обусловленного наличием сквозных дефектов в изоляции; появление и развитие дефектов происходит под воздействием технологических и эксплуатационных нагрузок, а также зависит от совместимости компонентов системы. Отмечена проблема и причины ускоренного износа межвитковой изоляции обмоток электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемых приводов с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Рассмотрены существующие методы оценки устойчивости изоляции обмоточных проводов и межвитковой изоляции к образованию дефектов.

Во второй главе приведено описание исследуемых обмоточных проводов и пропиточных составов, а также используемых в работе методов исследования.

Третья глава посвящена исследованию дефектности систем межвитковой изоляции низковольтных обмоток. Проведена оценка достоверности существующих методов определения устойчивости эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам. Выявлено: стандартные методы не всегда адекватно оценивают устойчивость эмалевой изоляции к образованию дефектов, используемые критерии носят условный характер. Отмечено: адекватное определение дефектности, как основной характеристики, достоверно оценивающей устойчивость эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам, обеспечивается при испытаниях проводов в электролите. Разработан метод оценки устойчивости эмалевой изоляции к действию электрических разрядов, характерных для обмоток двигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. Проведены исследования по оценке «залечиваемости» сквозных повреждений при пропитке. Установлено: наличие несовпадающих

и единичных дефектов на одном витке обмотки ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя даже после двукратной пропитки. Исследовано влияние адгезии на интенсивность появления дефектов в системе межвитковой изоляции. Предложен расчетно-экспериментальный способ оценки работы адгезии, основанный на определении поверхностных энергий контактирующих материалов и их межфазной энергии.

В четвертой главе приведено обоснование допустимого уровня дефектности эмалевой изоляции, превышение которого приводит к недопустимому снижению вероятности безотказной работы межвитковой изоляции и всей обмотки в целом. Установлена корреляционная связь между величиной работы адгезии и скоростью дефектообразования межвитковой изоляции. Приведены рекомендации по прогнозированию интенсивности процессов разрушения межвитковой изоляции на основе количественного определения величины адгезии между пропиточным составом и эмалированным проводом. В результате работы предложен комплекс мероприятий, позволяющий минимизировать уровень дефектности межвитковой изоляции как в процессе изготовления, так и во время эксплуатации.

В заключение приведены основные выводы по результатам диссертационной работы.

В приложениях представлены таблицы с результатами исследований, акты внедрения результатов работы и патент на изобретение.

Автор выражает глубокую благодарность кандидату технических наук, доценту Дудкину Анатолию Николаевичу за неоценимую помощь при написании диссертации.

ГЛАВА 1

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОБМОТОК

1.1 Факторы, влияющие на износ и дефектообразование в межвитковой изоляции

Опыт эксплуатации и многочисленные исследования не оставляют сомнений в том, что самым слабым с точки зрения надежности элементом низковольтной электрической машины является её система изоляции [15,23,24,51,54,57,59,60,86,94]. Согласно литературным данным до 95 % от общего количества отказов асинхронных двигателей приходится на долю обмоток, самым слабым компонентом которых в свою очередь является межвитковая изоляция (рисунок 1.1) [16,19,33,41,51,60,70,108]. Как правило, пробой происходит только в том случае, если в изоляции имеются сквозные повреждения (дефекты) (рисунок 1.2) [71-75,77,80,81].

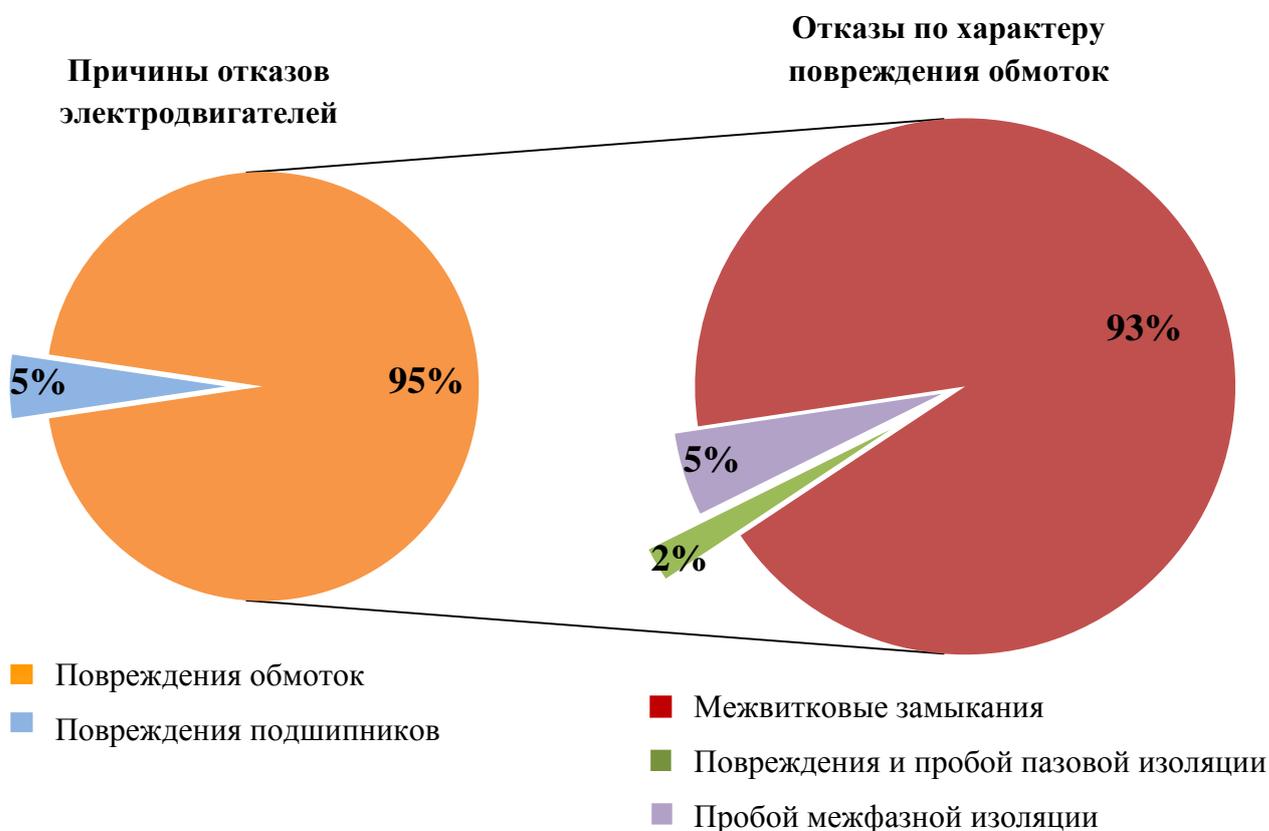


Рисунок 1.1 – Распределение причин отказов асинхронных электродвигателей.



Рисунок 1.2 – Общий вид межвитковой изоляции обмотки (а) и характерный вид межвиткового замыкания (б).

Износ изоляции и образование дефектов происходит в результате сочетания воздействующих нагрузок (технологических и эксплуатационных) и может ускоряться с учетом влияния конструктивных параметров обмотки и совместимости компонентов системы изоляции (рисунок 1.3) [15,16,20-24,31,37,41,51-55,57-60,66,70-82,86,94,98,102,106,110-113,116].

Для количественной оценки повреждаемости изоляции принято использовать дефектность λ (1/мм; 1/мм²), которая определяет количество дефектов на единицу длины или площади изоляции. Сквозные дефекты могут существовать в изоляции обмоточных проводов в состоянии поставки (дефектность в состоянии поставки λ_{II}), возникать в процессе производства (технологическая дефектность λ_T) и эксплуатации электродвигателей (эксплуатационная дефектность $\lambda_{Э}$) [3–5]. Общая дефектность λ за весь период жизни электрической машины будет определяться как сумма [16,59,71,81,82]:

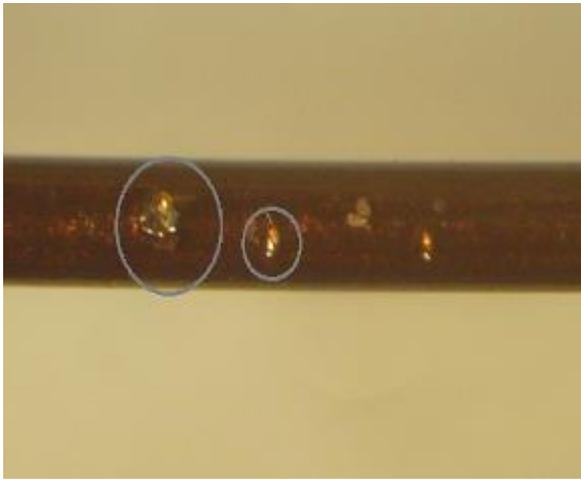
$$\lambda = \lambda_{II} + \lambda_T + \lambda_{Э} \quad (1.1)$$

Выделяют типичные дефекты: точечные, линейный размер которых не превышает 0,5 мм и протяженные типа сдиров изоляции, линейный размер которых 0,5 и более мм (рисунок 1.4) [51,57,60,70].

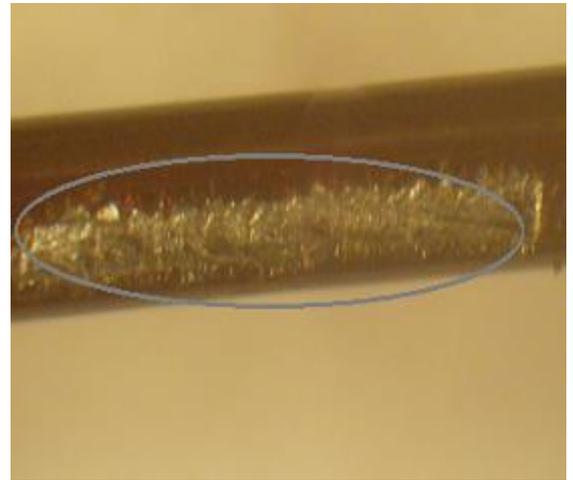


*для двигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения

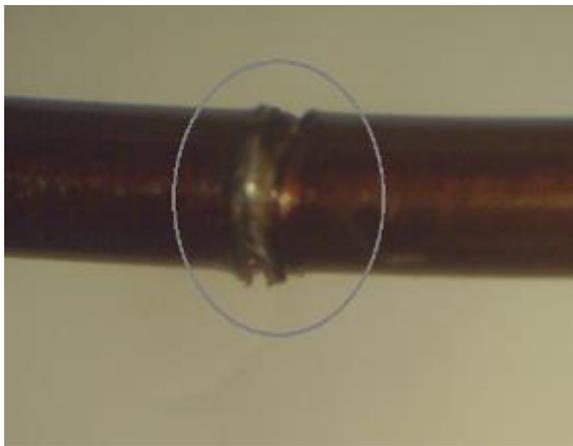
Рисунок 1.3 – Основные нагрузки и факторы, определяющие износ и надежность изоляции обмоток.



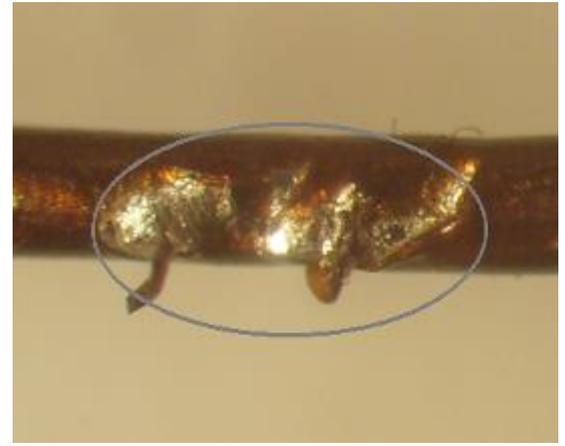
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.4 – Характерный вид дефектов в изоляции эмалированных обмоточных проводов: а) точечный; б) протяженный; в) кольцевой (спиральный); г) трещины, отслаивания изоляции, появившиеся в результате воздействия рабочего инструмента.

При этом в межвитковой изоляции различают зависимые и независимые дефекты (рисунок 1.5) [38,80,82]. Опасными считаются зависимые – дефекты прорастающие одновременно в композиции «изоляция провода – пропиточный состав – изоляция провода». Независимые – дефекты, прорастающие в изоляции только одного из соприкасающихся проводников, либо прорастающие при старении в композиции «эмаль – пропиточный состав» менее опасны. Это связано с тем, что пробивное напряжение даже состаренной изоляции превышает величины рабочих напряжений и перенапряжений [57,59]. В этом случае, как правило, преждевременный отказ не возникает.

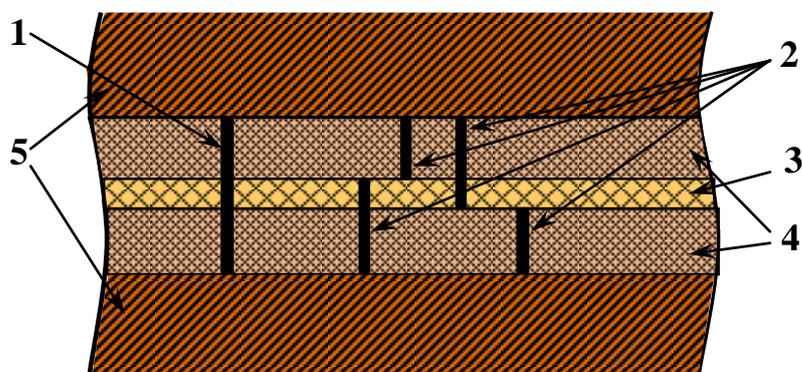


Рисунок 1.5 – Возможные дефекты в системе межвитковой изоляции: 1) дефект зависимый; 2) дефекты независимые; 3) пропиточный состав; 4) изоляция провода; 5) токопроводящая жила провода.

Сквозные повреждения изоляции, в виде трещин, порезов, проколов, сдиров и т.п., могут появиться как в процессе изготовления обмоточных проводов, так и во время изготовления обмоток [4,18,20,24,51,60,67,68,70,71,75,86,95]. Поскольку на стадии обмоточно-изолирующих работ изоляция не подвергается воздействиям, приводящим к деструкции, то повреждения имеют механический характер и полностью обусловлены механическими свойствами изоляции провода. Так при изготовлении обмоток провода подвергаются растяжению при намотке (рисунок 1.6) [15,16], истиранию поверхности при укладке, изгибанию, вследствие чего может значительно снижаться пробивное напряжение (рисунок 1.7), механическая прочность (рисунок 1.8), а также стойкость изоляции к воздействию растворителей в процессе пропитки и сушки [57,76,79,82].

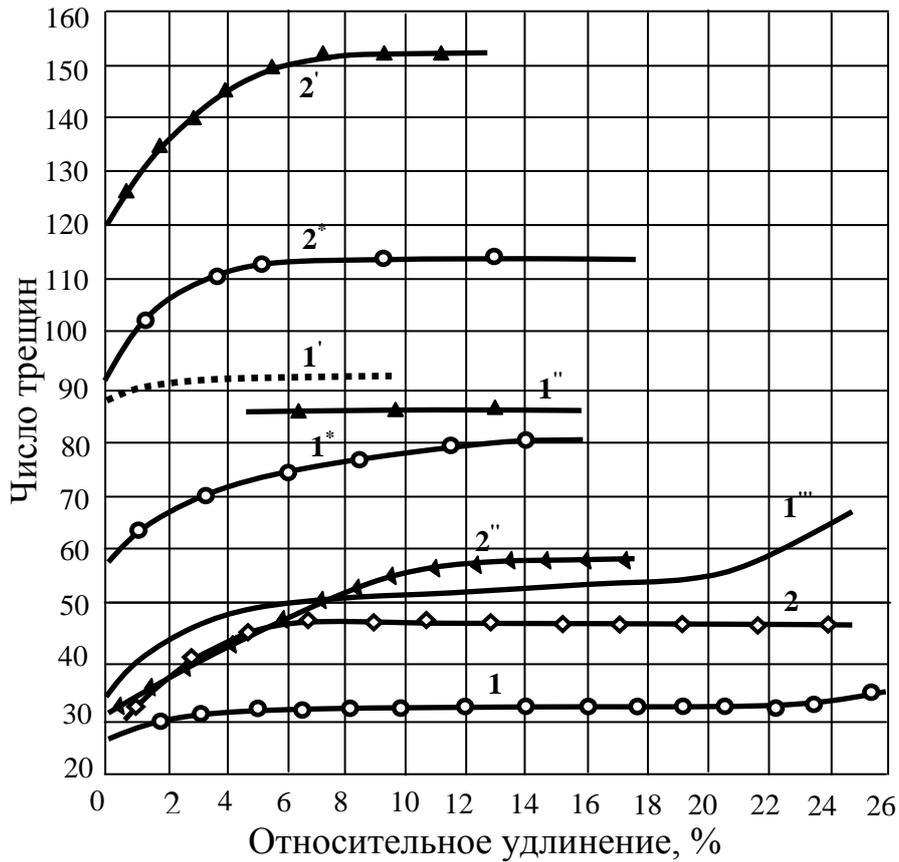


Рисунок 1.6 – Зависимость числа трещин провода от относительного удлинения: 1, 1', 1'', 1''', 1*- провода ПЭВ-2 диаметром 1,81 мм; 2, 2', 2'', 2*- провода ПЭТВ-943 диаметром 1,62 мм; 1, 2- провода в состоянии поставки, 1', 2'- после 1 ч кипячения в воде; 1''- после воздействия ксилола в течение 30 мин при 110°C; 1''', 2'''- после теплового удара при 170°C; 1*, 2*- тоже при 190°C.

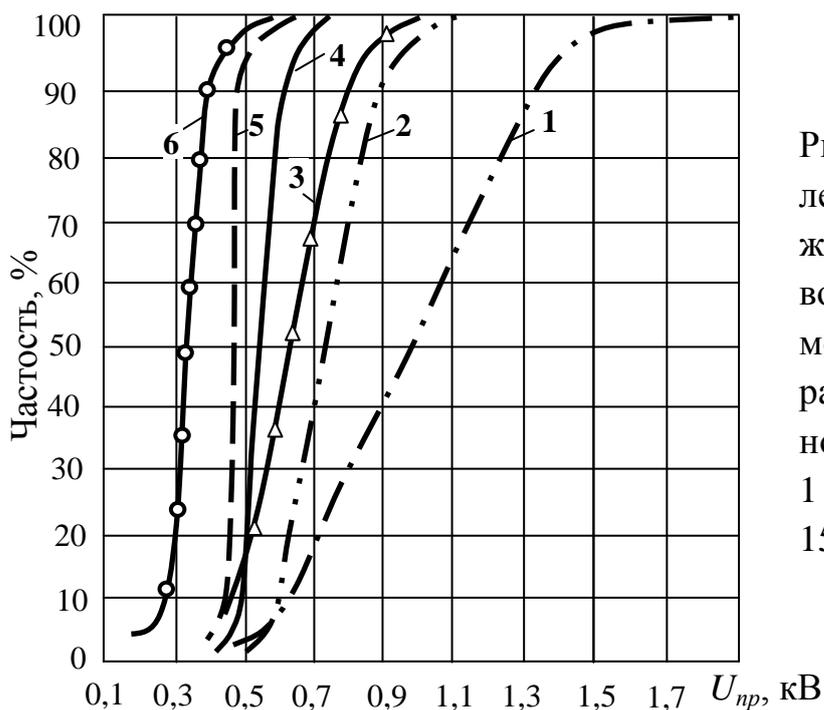


Рисунок 1.7 – Распределение пробивных напряжений $U_{пр}$ изоляции провода марки ПЭВ-2 диаметром 1,81 мм. Провод растянут до относительного удлинения: 1 - 0%; 2 - 5%; 3 - 10%; 4 - 15%; 5 - 20%; 6- 25%.

Как отмечено в [16,33,70]: большое влияние на повреждаемость изоляции провода может оказывать операция укладки обмотки, а также вид применяемого металлического укладочного инструмента (таблица 1.1, 1.2).

Таблица 1.1 – Влияние обмоточно-изолировочных работ на качество изоляции провода ПЭВА-2

Этапы отбора	Среднее значение \bar{U}_{np} , кВ	Стандартное отклонение, кВ	Доля дефектных образцов q , %
В состоянии поставки	4,15	1,99	0,018
После намотки на шаблон	4,05	1,94	0,019
После укладки обмотки	1,4	1,18	0,119

Таблица 1.2 – Значения дефектностей изоляции провода ПЭВА-2 обмотанного с применением обычного и мягкого укладочного инструмента

Инструмент	Среднее значение \bar{U}_{np} , кВ	Стандартное отклонение, кВ	Доля дефектных образцов q , %
Жесткий	2,52	1,185	0,0182
Мягкий	2,89	1,145	0,0035

Помимо этого повреждаемость витковой изоляции в процессе изготовления обмоток в значительной степени зависит и от конструктивных параметров обмоток: диаметра провода (рисунок 1.9), толщины изоляции, коэффициента заполнения паза медью и т.д. [70,71]. Так, к примеру, снижение коэффициента заполнения паза на 2,5 % и применение мягкого укладочного инструмента позволяет снизить дефектность провода более чем в 2 раза (таблица 1.3), что приводит к увеличению надежности обмоток электродвигателей со всыпными обмотками с 93 % до 98,5 % [16,81].

Эксплуатационные дефекты (отслоения, продавливания, трещины) возникают в процессе старения изоляции под действием температуры, электрического поля, механических нагрузок и окружающей среды [15,23,24,38,51,52,55,59,60,66,72-74,78,94,99,102,106,108,110-113,116].

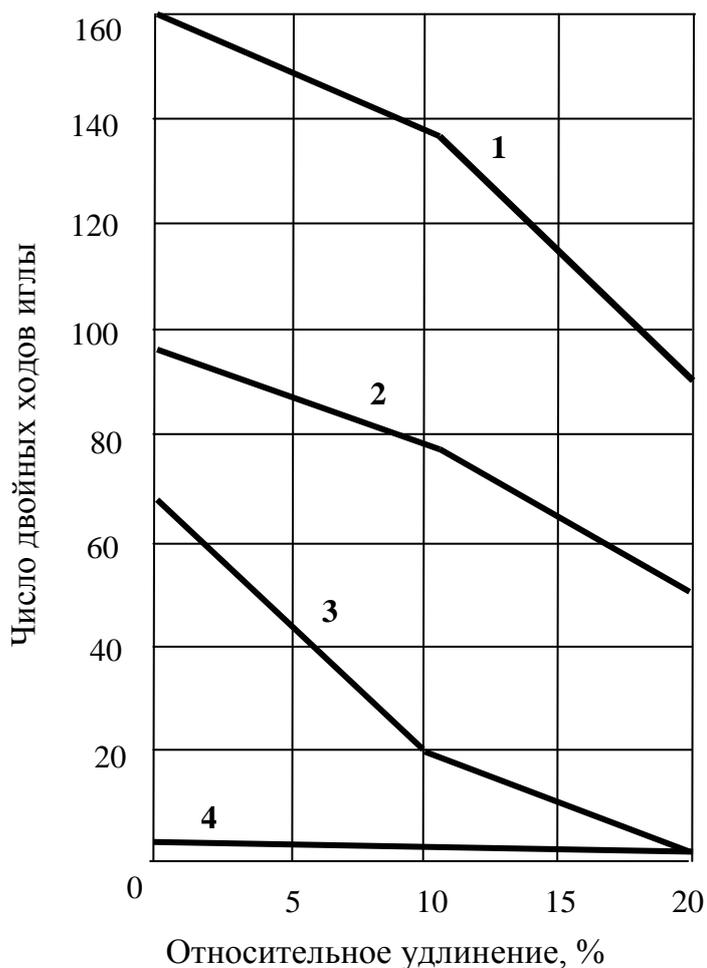


Рисунок 1.8 – Зависимость механической прочности эмалевой изоляции проводов от относительного удлинения провода.

1, 4 - провода марки ПЭВ-2; 2, 3 - провода марки ПЭТВ; 1, 2 - провода в состоянии поставки, 3, 4 - после кипячения в воде 1 ч.

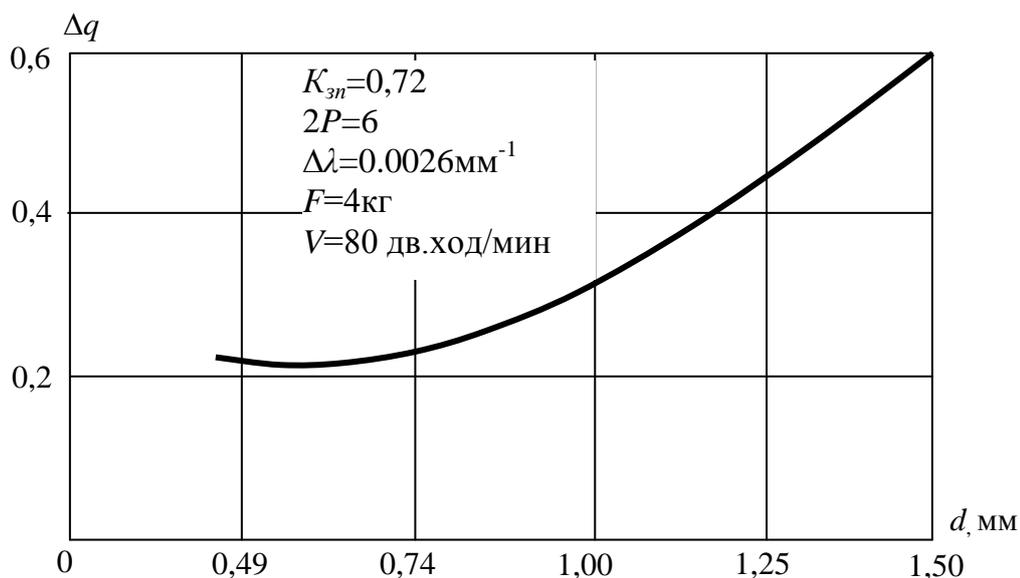


Рисунок 1.9 – Зависимость приращения дефектности витковой изоляции (провод ПЭТВ) от диаметра провода при укладке обмотки.

Таблица 1.3 – Расчетные значения аварийности витковой изоляции обмоток при испытательном напряжении $U_{исп} = 2,5$ кВ

Аварийность, %			
Коэффициент заполнения, $K_{zn}=0,82$		Коэффициент заполнения, $K_{zn}=0,79$	
обычный инструмент	«мягкий» инструмент	обычный инструмент	«мягкий» инструмент
13,8	3,42	7,5	1,34

Основными факторами, вызывающими ухудшение свойств изоляции низкого напряжения, являются тепловые и механические воздействия [15,19,23,24,55,82]. При нормальных условиях эксплуатации, процесс теплового старения сам по себе не вызывает повреждений изоляции, но приводит к термической деструкции, ведущей в свою очередь, к потере механической прочности и эластичности, благоприятствуя тем самым хрупкому разрыву, появлению и развитию внутренних и поверхностных дефектов. На рисунке 1.10 показано изменение дефектности витковой изоляции во времени для различных температур старения [81]. Кроме того, тепловое старение приводит к значительному уменьшению сопротивления изоляции, снижению адгезии пленок эмальлаков к проводам в системах изоляции электрических машин, ухудшению стойкости изоляции к химически агрессивным средам.

Термомеханические нагрузки, связанные с различием температурных коэффициентов линейного расширения изоляции и проводников приводят к образованию в изоляции трещин, набуханию и расслоению изоляции, взаимному смещению отдельных слоев конструкции [24,50,57,58,84].

Механические нагрузки, возникающие вследствие центробежных усилий, электродинамических сил, вибрации и температурных деформаций [15,74,81,82,86,116], в большинстве случаев имеют периодический характер. Наиболее типичной является вибрация, возникающая от небаланса ротора, выработки подшипников, неуравновешенности приводимого механизма и передачи и т.д.

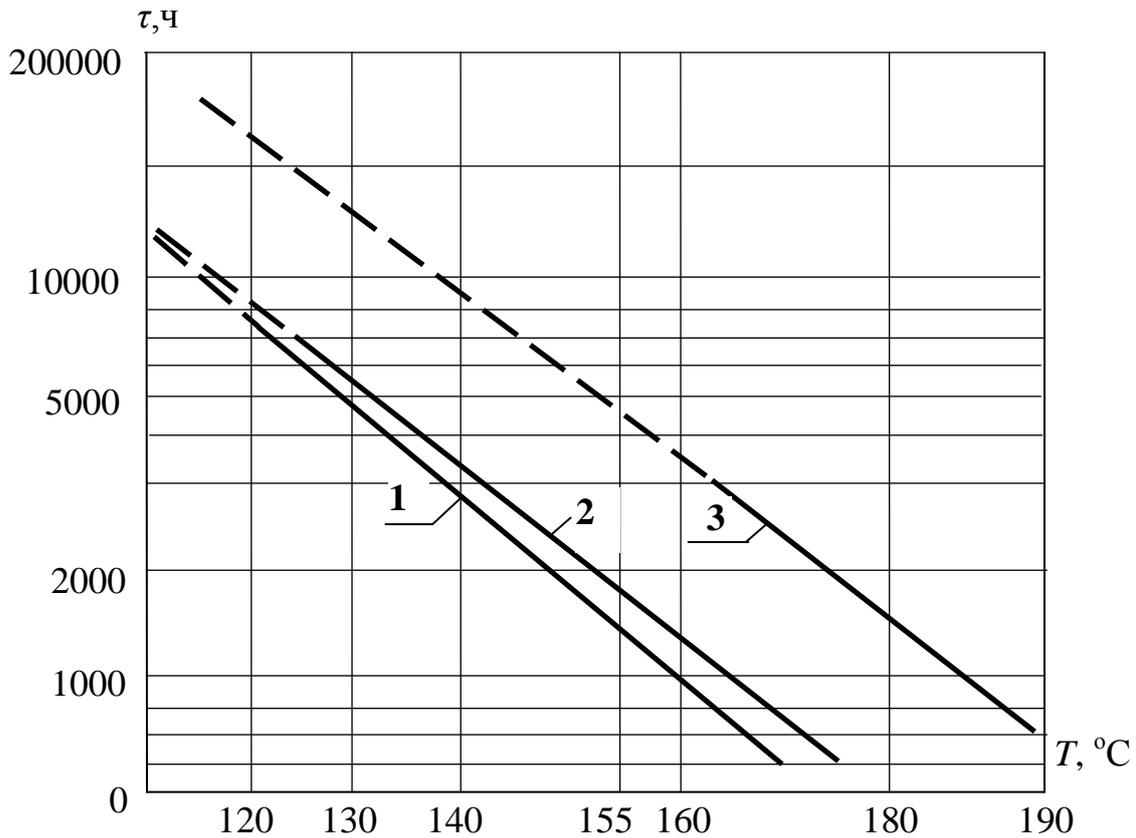


Рисунок 1.10 – Зависимость срока службы эмалевого изоляционного материала круглых проводов в скрутках от температуры: 1 - ПЭВ-2; 2 - ПЭМ-2; 3 - ПЭТВ.

Первоначально вибрация не оказывает влияния на надежность обмоток, так как пропиточный материал цементирует обмотку. С потерей механических свойств изоляционных конструкций вследствие теплового старения влияние вибрации на надежность изоляции обмотки становится все более ощутимым, нарушается цементация обмотки, и отдельные проводники приобретают некоторую свободу перемещения. Это ведёт к разрушению витковой изоляции в точках соприкосновения проводников.

Условия работы изоляции ухудшаются и в результате действия окружающей среды, прежде всего, воздействия влаги. Наличие влаги в порах ведет к значительному уменьшению механической прочности изоляции, росту диэлектрических потерь, усиливает влияние ионизационных явлений, приводит к химическому старению электроизоляционных материалов (гидролизу). Не менее вредное воздействие на изоляцию обмоток оказывают кислоты и щелочи, а также пары растворителей находящиеся в окружающей среде. Запыленность атмосферы у

двигателей, система охлаждения которых предусматривает соприкосновение наружной атмосферы с изоляцией обмоток, может вызвать эрозию изоляции из-за ударов абразивных частиц [15,19].

Совместное действие перечисленных нагрузок приводит к ускорению процессов старения изоляции и появлению дефектов, что характеризуется примерами, представленными в таблице 1.4 [24].

Таблица 1.4 – Исследование влияния режимов эксплуатации на надежность изоляции обмоток четырех партий асинхронных двигателей А2-71-4

№ партий электро-двигателя	Испытательный режим	Средняя наработка на отказ, ч
1	Температурное старение при $T=160^{\circ}\text{C}$ в режиме искусственной нагрузки	1432
2	Старение при $T=160^{\circ}\text{C}$ в режиме искусственной нагрузки и вибрационного ускорения $a=1,5\text{ g}$	330
3	Старение при $T=160^{\circ}\text{C}$ в режиме реверсов на холостом ходу при вибрации $a=0,5\text{g}$	593
4	Старение в режиме реверсов при $T=160^{\circ}\text{C}$ и вибрации $a=1,5\text{g}$	54

Как видно из результатов испытаний, при добавлении к фактору теплового старения фактора вибрации средняя наработка на отказ уменьшилась в 4 раза; при добавлении к тепловому старению частых динамических усилий и перенапряжений средняя наработка на отказ уменьшилась в 2,5 раза; при одновременном воздействии всех перечисленных факторов средняя наработка на отказ уменьшилась почти в 30 раз.

Исследования влияния температуры и вибрации на витковую изоляцию обмоток асинхронных двигателей, приведенные в [74], также подтверждают: уровень дефектности изоляции возрастает при одновременном воздействии температуры и вибрации (рисунок 1.11).

В процессе работы изоляция электрической машины продолжительное время находится под воздействием рабочего напряжения, а кроме того, периодически

испытывает воздействие коммутационных перенапряжений, возникающих в обмотках двигателя при включениях и реверсах [15,33,72,73,78,99].

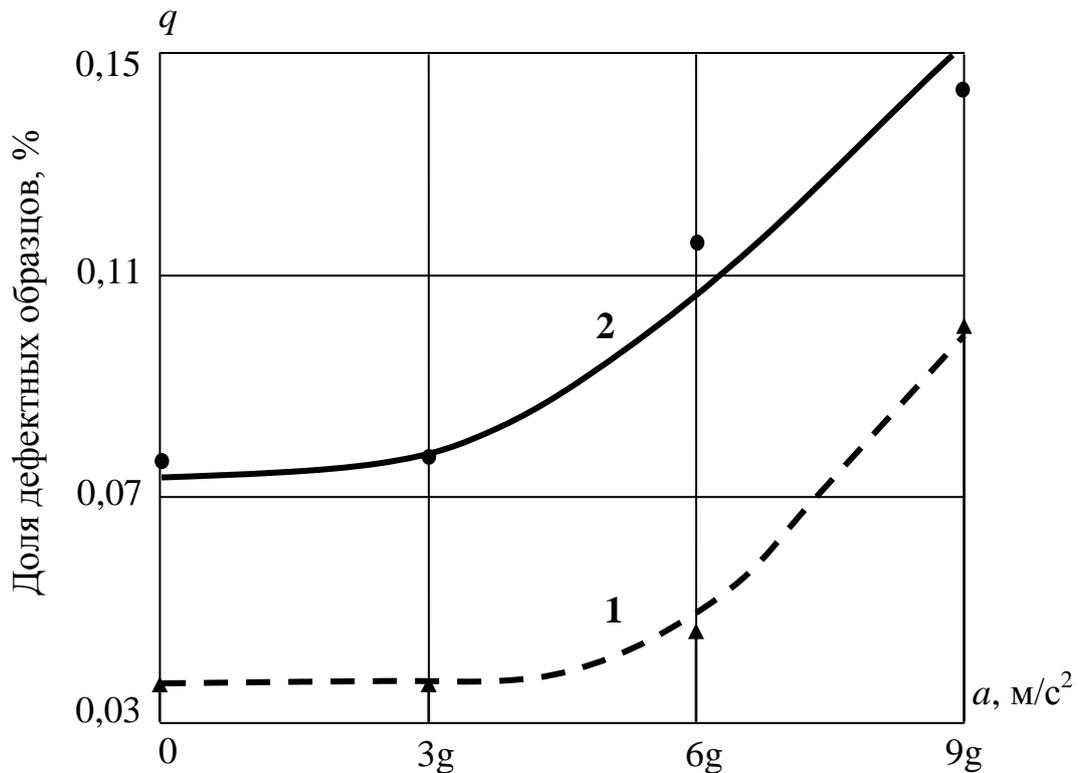


Рисунок 1.11 – Зависимость дефектности витковой изоляции от величины ускорения вибрации: 1 - 200 °С; 2 - 220 °С.

Помимо прочего на процессы дефектообразования оказывает влияние действия электрического поля. До недавнего времени электрическим старением в низковольтных системах изоляции традиционно пренебрегали, так как значение рабочего напряжения ниже значения напряжения начала ионизации, а действие коммутационных перенапряжений недостаточно для пробоя неповрежденной витковой изоляции [57,71-73].

Внедрение частотно-регулируемых электроприводов, построенных на базе асинхронных двигателей и преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения существенно изменило уровень электрических перенапряжений в низковольтных обмотках. В этом случае возникают перенапряжения, действующие с частотой 10^{-4} с и до 10 раз превышающие значение питающего напряжения [12,13,52,100,113]. Это привело к возникновению электрических разрядов в воздушных полостях между соприкасающимися витками обмотки (рису-

нок 1.12), ускоренному старению изоляции, и как следствие снижению надежности и срока службы электродвигателя [103,104,106-112,116].

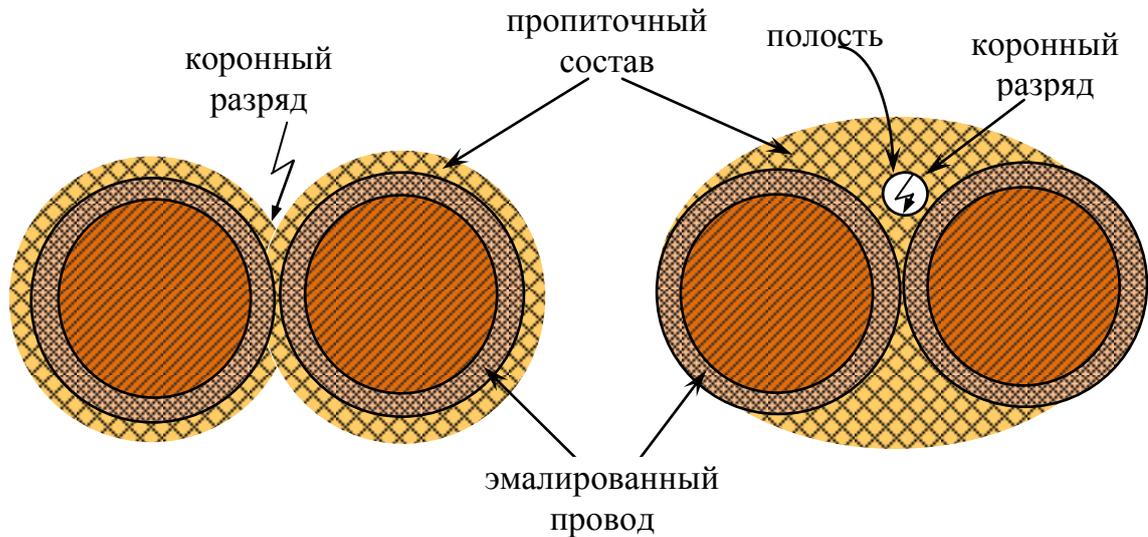


Рисунок 1.12 – Место возникновения электрических (коронных) разрядов между витками низковольтной обмотки в ЧРП.

Электрическое старение на фоне общего разрушения, вызванного температурой, механическими воздействиями и т.д., проявляется в виде электрической эрозии поверхности изоляции, локальных перегревов под действием электрических разрядов. Разряды вызывают перераспределение напряжения по толщине изоляции и её повреждение из-за нагрева около очагов разрядов, тем самым создавая условия для электрического и теплового пробоя. Кроме того, разряды сопровождаются химическими реакциями с образованием озона, который взаимодействуя с азотом воздуха, образует окислы азота и далее в присутствии влаги – азотную кислоту, разрушительно действующую на изоляцию и приводящую к появлению в ней дефектов [15].

В связи с этим отмечается необходимость учета действия электрических разрядов на процессы появления дефектов в низковольтной межвитковой изоляции.

Анализ изложенного материала позволяет отметить, что дефектность изоляции определяется не только ее стойкостью к воздействующим тепловым, механическим, электрическим и прочим нагрузкам (прежде всего стойкостью эмалевой изоляции), но и совместимостью пропиточных составов и эмалированных обмо-

точных проводов. Только учитывая взаимодействие компонентов, можно оценить устойчивость системы к образованию дефектов.

1.2 Влияние взаимодействия пропиточных составов и обмоточных проводов на образование и развитие дефектов

Окончательное формирование межвитковой изоляции происходит в процессе пропитки обмоток, когда пропиточный состав в жидком состоянии проникает в поры и пустоты между проводами. При пропитке увеличивается электрическая прочность изоляции вследствие заполнения пор и капилляров обмотки лаками, имеющих более высокую электрическую прочность, чем воздух. Кроме того, снижается превышение температуры обмоток, поскольку теплопроводность лаков намного выше теплопроводности воздуха. Цементируя витки обмоток, пропиточный состав снижает механический износ изоляции витков. Пропитка значительно замедляет процессы теплового старения и увлажнения электроизоляционных материалов, так как уменьшается площадь их соприкосновения с окружающей средой [22,30,35,39,56,76,79].

По завершении процесса пропитки во время сушки пропиточный состав отверждается, при этом образуется однородная и монолитная система межвитковой изоляции и появление дефектов во многом определяется взаимодействием (совместимостью) ее компонентов. При этом следует выделить процессы залечивания дефектов в эмалевой изоляции и процессы дефектообразования во время эксплуатации.

В работах [51,60] показано: «залечиваемость» сквозных повреждений прежде всего зависит от вида, размера и типа их взаимного расположения (таблица 1.5) и оценивается коэффициентом скрытия дефектов при пропитке P_e , который численно равен вероятности скрытия сквозных повреждений в результате полного покрытия их пленкой пропиточного материала:

$$P_e = 1 - \sqrt{q} \quad (1.2)$$

где q – вероятность непропитки сквозных дефектов одновременно на изоляции обмоточных проводов одной пары определяется как отношение числа образцов, пробитых испытательным напряжением к общему числу испытанных образцов [35,60,63]:

$$q = \frac{n_{\text{деф}}}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (1.3)$$

Таблица 1.5 – Вероятности скрытия дефектов эмалевой изоляции в зависимости от различного типа их сочетания

Параметр	Типы расположения дефектов		
	«точечный – точечный»	«точечный – протяженный»	«протяженный - протяженный»
Интервал изменения P_g	0,85÷1	0,74÷1	0,42÷0,83
Среднее значение P_g	0,94	0,88	0,65

Данные испытания проводились на макетах, имитирующих низковольтную обмотку (части пакета статора, в которые укладывались витки с искусственно нанесенными дефектами) [60].

Помимо этого, отмечено влияние смачивающих свойств пропиточных составов на скрытие дефектов в эмалевой изоляции [39,57]: при повышении вязкости возрастает энергия смачивания пропиточного состава, что повышает вероятность залечивания сквозных повреждений (таблица 1.6). Отдельно следует отметить: дефекты типа «протяженный - протяженный» практически не «залечиваются» при пропитке и представляют наибольшую опасность с точки зрения надежности межвитковой изоляции.

Детальное исследование эффективности «залечивания» в зависимости от типа технологических повреждений эмалевой изоляции [22] показало:

- 1) В системах с хорошей совместимостью пропиточный состав заполняет искусственные повреждения в эмали, если глубина повреждения менее толщины слоя эмали (рисунок 1.13.a). В процессе теплового старения разрушения в дан-

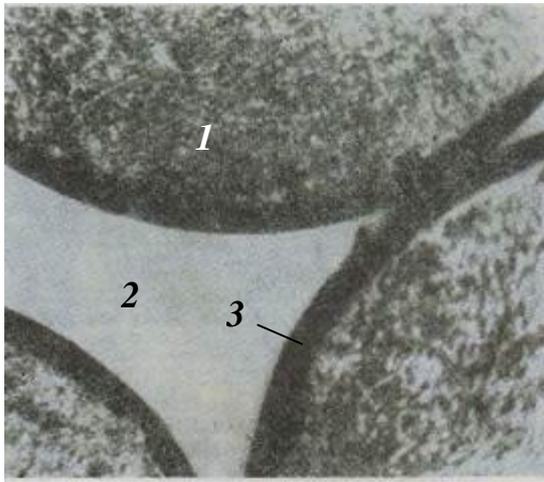
ных системах изоляции не отличаются от тех, какие были обнаружены с поврежденными проводами (рисунок 1.13.б).

- 2) В системах с плохой совместимостью повреждения эмали происходят даже в том случае, если эмаль не имела технологических повреждений. Например, в сочетании компаунда КП-50 с изоляцией провода марки ПНЭД-имид уже в исходном состоянии происходит разрушение межвитковой изоляции в виде отслоения эмали от меди (рисунок 1.13.в). Наиболее значительные отслоения происходят именно в местах повреждения эмали.
- 3) В системах с искусственными повреждениями, глубина которых превышает толщину эмали и вызвавших деформацию меди, происходят значительные отслоения эмали именно в местах ее повреждений независимо от показателя совместимости. Даже в системе с хорошей совместимостью с пропиточным компаундом БИД-9127 и эмалевой изоляцией провода ПЭФ-155 имеются значительные отслоения и разрывы эмали в местах ее искусственных повреждений (рисунок 1.13.г) [22].

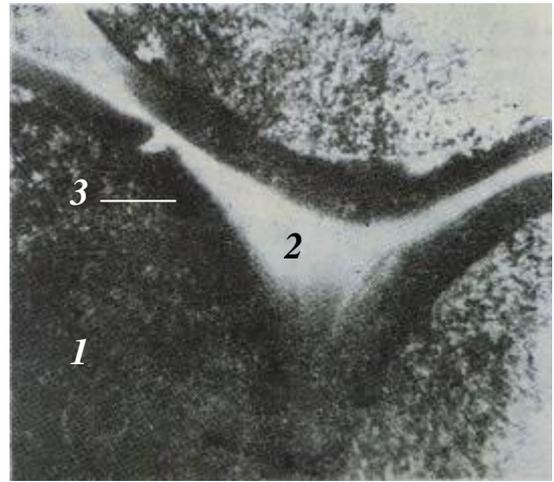
Таблица 1.6 – Коэффициент скрытия дефектов при пропитке для макетов, пропитанных пропиточным составом с различной вязкостью.

Композиция межвитковой изоляции (тип дефекта)	Коэффициент скрытия дефектов при пропитке				
	Вязкость пропиточных составов по ВЗ-4, с				
	19	25	31	37	44
ПЭТВ+МЛ-92 (К-К)	0,9895	1	0,9895	1	1
ПЭТВ+КО 964Н (К-К)	0,8165	0,8538	0,866	0,9242	0,9465
ПЭТ-155+МЛ-92 (К-К)	0,9859	1	0,988	1	1
ПЭТ-155+КО-964Н (К-К)	0,9129	0,9309	0,9487	0,9832	0,9832
ПЭТ-155+КО-916К (К-К)	0,98	0,98	0,98	-	1
ПЭТ-155+КО-916К (К-П)	0,44	0,72	0,84	-	0,76
ПЭТ-155+КО-916К (П-П)	0,32	0,36	0,4	-	0,42
ПЭТ-155+КО-916К (П-П)*	0	0	0,02	-	0,04

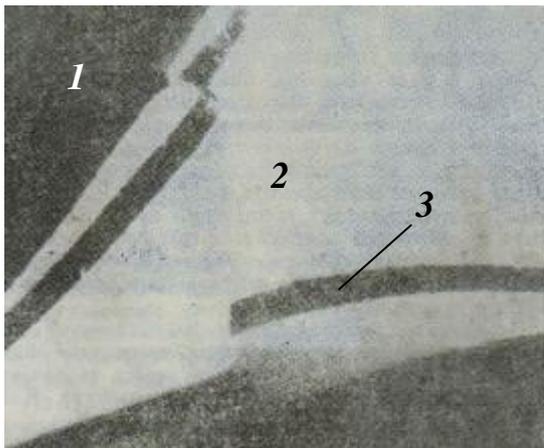
Примечание: К-К дефект типа «кольцевой-кольцевой»; К-П дефект типа «кольцевой-протяженный»; П-П дефект типа «протяженный-протяженный» с повреждениями, не превышающими толщину эмали; П-П* дефект типа «протяженный-протяженный» с повреждениями, превышающими толщину эмали.



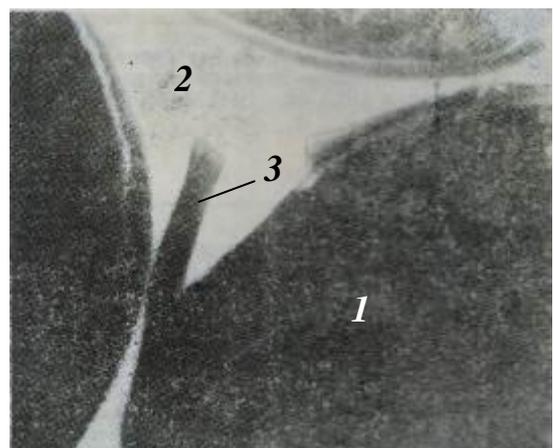
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.13 – Характерный вид «залечивания» в системах межвитковой изоляции: а) провод ПЭФ-155 и компаунд КП-50 в исходном состоянии; б) провод ПЭФ-155 и компаунд КП-50 после теплового старения в течение 300 ч при 190°C; в) провод ПНЭД-имид и компаунд КП-50 в исходном состоянии; г) провод ПЭФ-155 и компаунд БИД-9127 в исходном состоянии; 1 - провод; 2 - пропиточный компаунд; 3 - пленка эмали на проводе.

Таким образом, качественная пропитка должна скрыть большинство повреждений изоляции. В то же время важно чтобы пропиточный состав не вызывал в процессе пропитки и сушки необратимых ухудшений в эмалевой пленке или не ускорял процессы её старения во время эксплуатации [37,56].

Наглядным примером плохой совместимости и отрицательного влияния пропитки на срок службы изоляции могут служить системы, представленные в таблице 1.7 [57]. Как видно, средний срок службы пропитанных скруток может уменьшиться в несколько раз по сравнению с непропитанными.

Таблица 1.7 – Влияние пропиточных материалов на срок службы скруток из эмалированных проводов.

Марка провода	Пропиточный материал	Средний срок службы, ч, при температуре, °С		
		170	190	210
ПЭТВ	Без пропитки	10836	3360	423
	МГМ-8	6501	2218	446
	ПЭ-933	5050	2100	549
	КП-34	4032	816	-
ПЭТ-155	Без пропитки	19941	7392	1152
	МГМ-8	5954	2622	997
	ПЭ-933	12472	6216	2544
	КО-916К	18200	10584	3268

Исследования процессов разрушения межвитковой изоляции, проведенные в [22,23,30,35,56,76,109] показали, что интенсивность появления дефектов во время эксплуатации будет определяться взаимодействием между пропиточным составом и эмалированным проводом.

Отмечено [21,23]: разрушение межвитковой изоляции начинается с растрескивания пропиточного состава под действием внутренних механических напряжений $\sigma_{вн}$. Причинами появления $\sigma_{вн}$ являются: усадка пропиточного состава после сушки и в процессе эксплуатации двигателя; термомеханические напряжения, обусловленные различием физико-механических параметров компонентов системы изоляции (модуль упругости и температурный коэффициент линейного расширения). Величина внутренних напряжений как основной нагрузки, иницииру-

ющей процесс появления дефектов, также зависит от жесткости пропиточного состава и потери массы в процессе старения [35,37,50,57,58].

Кроме того, авторами [23] отмечено влияние конструктивных параметров обмотки (коэффициент заполнения паза, диаметр проводника и толщина эмали) на величину внутренних напряжений в промежутке между проводниками (таблице 1.8). Предложен геометрический параметр λ ($\lambda=D/d$, где D – диаметр провода с эмалевой изоляцией, d - диаметр проводника) как величина, характеризующая обмоточные параметры. Показано: вероятность растрескивания полимерной изоляции уменьшается более чем в 10 раз при увеличении геометрического параметра λ с 1,1 до 1,36. В свою очередь геометрический параметр существенно возрастает с уменьшением диаметра проводника. Как видно из рисунка 1.14, наиболее резкое возрастание λ происходит при диаметрах менее 0,5 мм. В то же время возможность варьирования геометрического параметра λ необходимо осуществлять с учетом коэффициент заполнения паза и удельных мощностных характеристик электрической машины.

Таблица 1.8 – Зависимость внутренних механических напряжений $\sigma_{вн}$ от диаметра проводника d и фактора λ

d , мм	0,44	0,69	1,08	1,5
λ	1,14	1,11	1,09	1,07
$\sigma_{вн}$	2,9	3,2	3,4	3,6

Данные предположения также подтверждают результаты микроскопического анализа процесса разрушения изоляции (таблица 1.9): с ростом диаметра проводника степень разрушения возрастает.

Помимо этого, на величине $\sigma_{вн}$ сказывается «эффект взаимного влияния проводников», при котором происходит суммирование полей напряжений, возникающих вокруг соседних проводов (рисунок 1.15) [23]. Наиболее напряженные участки пропиточного состава находятся в точках пересечения линии, соединяющей центры соседних проводников с поверхностью контакта пропиточный состав – эмалированный провод (точки А и В, рисунок 1.15). Это подтвер-

ждается результатами микроскопического исследования систем «пропиточный состав – эмалированный провод».

Таблица 1.9 – Результаты микроскопического анализа системы компаунд КП-101- провод ПЭТВ при температуре 155 °С.

Диаметр провода, мм	Коэффициент заполнения	Степень растрескивания компаунда R_C и пленки эмали $R_Э$ при длительности старения, ч					
		Исходное состояние		24		500	
		$R_C, \%$	$R_Э, \%$	$R_C, \%$	$R_Э, \%$	$R_C, \%$	$R_Э, \%$
0,44	0,7	0	0	0	0	0,6	0
0,69		0,6	0	2,5	0	11,0	1,7
1,08		0,6	0	9,3	0	17,0	5,0
1,5		3,7	0	23,0	0	39,0	26,7
0,44	0,8	0	0	0	0	0,6	0
0,69		0	0	4,3	0	17,0	1,7
1,08		0	0	13,0	0	27,0	3,3
1,5		1,2	0	30,0	0	48,0	19,6

Установлено [23]: появление магистральных (сквозных) трещин наблюдается в наиболее напряженном объеме материала, около линии, соединяющей центры соседних проводников (рисунок 1.16.а). Трещины, направленные в центральную область межвиткового пространства, как правило, не являются сквозными; их рост прекращается при удалении от провода на расстояние $(0,08-0,3)d$ (рисунок 1.16.б). Дальнейший процесс образования сквозных трещин в межвитковой изоляции значительно усложняется вследствие взаимодействия компонентов на границе раздела фаз. В этом случае наиболее важной и определяющей характеристикой выступает адгезия, от величины которой зависит дальнейший характер разрушения системы межвитковой изоляции [11,17,49,56].

Развитие трещины может быть остановлено, если она попадает в полость на границе фаз пропиточный состав – эмаль. Полость становится ловушкой для трещины и ее дальнейшее продвижение приостанавливается. Торможение трещины по описанному механизму возможно только при условии, что адгезионная прочность на границе раздела фаз не превышает определенного уровня, при котором трещина может прорасти в пленку эмали (рисунок 1.16.в).

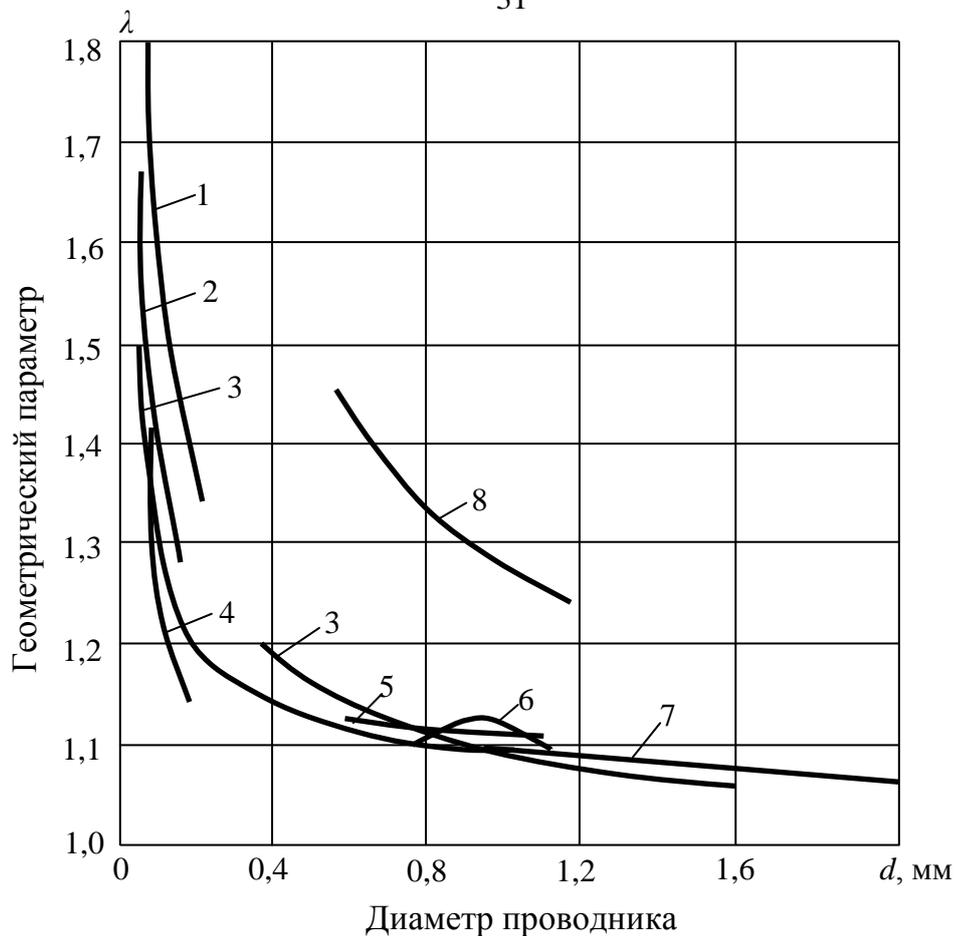


Рисунок 1.14 – Зависимость геометрического параметра λ от диаметра проводника: 1 – ПЭВТЛ-К; 2 – ПЭВД; 3 – ПЭВ-2; ПЭТВ; ПЭВТЛ-2; 4 – ПЭВ-1; ПЭВТЛ-1; ПЭТВ-Р; ПНЭТ-имид; 5 и 7 – ПЭТВ; 6 – ПЭВТЛ-2; 8 – ПСД; ПСДК.

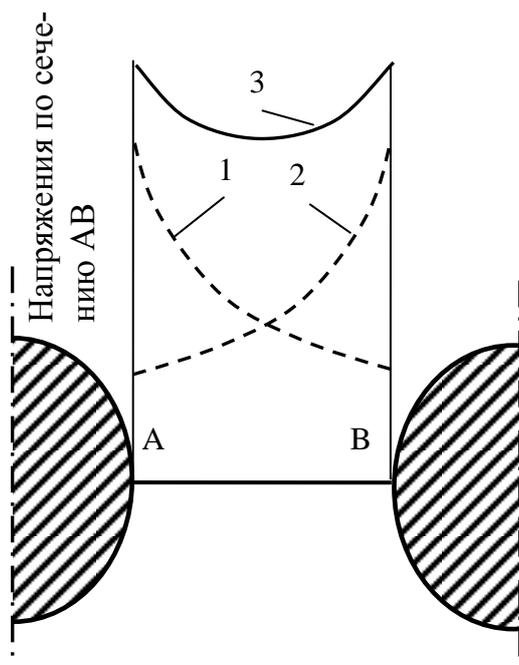
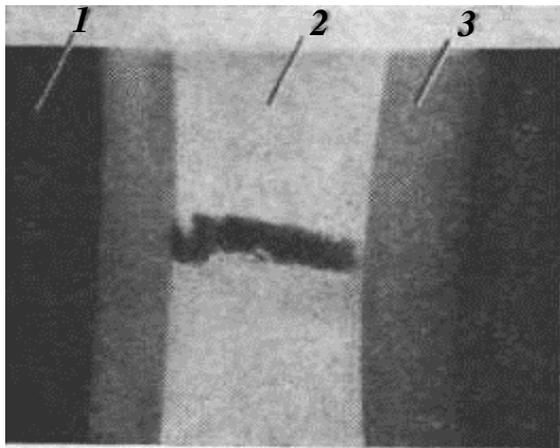
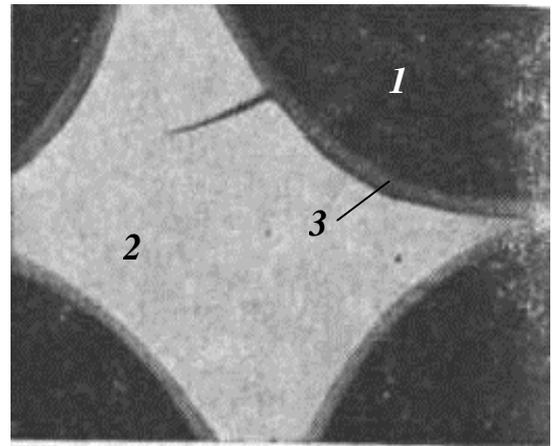


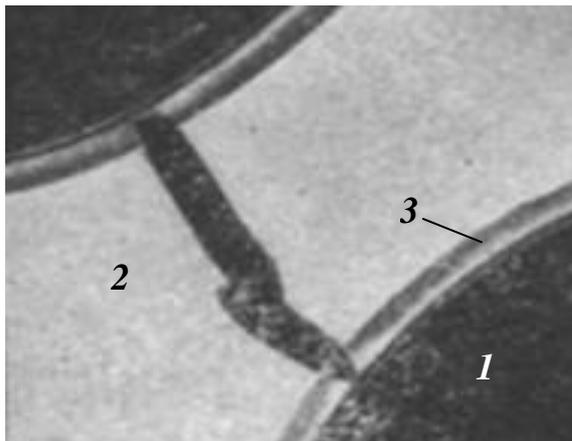
Рисунок 1.15 – Эффект взаимного влияния проводников: 1 - кривая распределения внутренних напряжений от левого проводника; 2 - кривая распределения напряжений от правого проводника; 3 - суммарная кривая.



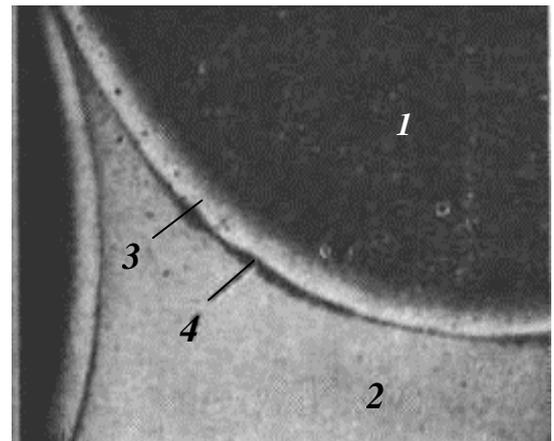
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.16 – Характерный вид разрушения межвитковой изоляции:

а) магистральная трещина в жестком компаунде; б) трещина, прорастающая в центральную область ячейки; в) трещина, прорастающая в пленку эмали; г) отслоение пропиточного материала от эмали; 1 – провод; 2 – пропиточный компаунд; 3 – пленка эмали на проводе; 4 – область отслоения.

Наряду с образованием трещин в пропиточном составе наблюдается его отслоение от пленки эмали (рисунок 1.16.г). Отслоения возникают, как правило, на части периметра провода, обращенной к центральным областям ячеек [11,23,57].

В то же время низкий уровень адгезионной прочности пропиточного состава к эмалевой изоляции провода может вызвать потерю цементации витков и следовательно, изменение конструктивной формы обмотки и ускоренное истирание эмали. Таким образом, адгезия в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» является главным фактором, определяющим интенсивность разрушения и появление дефектов.

В случае межвитковой изоляции имеет место адгезия между двумя полимерными пленками: эмалевой изоляции и пленки, сформированной из слоя отвержденного пропиточного состава.

Прочность адгезионных соединений такого типа зависит от ряда факторов: температуры, времени контакта, вязкости адгезива, площади контактирующих поверхностей, числа связей, определяющих адгезию и их энергии; величиной и временем действия силы, направленной на разрыв адгезионного взаимодействия; состояния поверхности субстрата и т.д. (рисунок 1.17) [11,14,17,22,46,47,84,93].

Адгезионную прочность в общем виде можно представить как [49,56]:

$$A = K_1 S_{ucm} \sum U_i n_i - f(\sigma_{вн}) \quad (1.4)$$

где $K_1 = f(T_p, V_p, t_p)$ - коэффициент, связанный с формой, размерами и условиями разрушения образца (T_p, V_p, t_p - соответственно температура, скорость и время действия разрушающей силы); $S_{ucm} = f(T_k, P_k, t_k)$ - истинная поверхность контакта (T_k, P_k, t_k - соответственно температура, давление и время контакта взаимодействующих поверхностей); U_i и n_i - соответственно энергия и число адгезионных связей, приходящихся на единицу поверхности; $f(\sigma_{вн})$ - работа внутренних напряжений против сил адгезии.

Величины $T_k, P_k, t_k, T_p, V_p, t_p$ можно считать постоянными, так как они являются неизменными для большого числа обмоток одного типа [57].



Рисунок 1.17 – Факторы, определяющие адгезионное взаимодействие на границе раздела сред

Из выше сказанного можно сделать вывод: величину адгезионной прочности в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» главным образом определяют вязкость адгезива (определяет площадь контакта и число связей) и энергия смачивания (обуславливает величину свободной поверхностной энергии и силу межмолекулярного взаимодействия между пропиточным составом и эмалевой изоляцией).

Также важную роль в характере разрушения межвитковой изоляции играет адгезия эмалевого лака к меди провода. Проведенное в [15] определение адгезии системы «медь – эмалевая пленка провода – пленка пропиточного состава» в процессе теплового старения (рисунок 1.18) выявило: до старения разрушение происходит на границе «пленка пропиточного состава – эмалевая пленка провода», после старения соотношение адгезионной прочности изменяется.

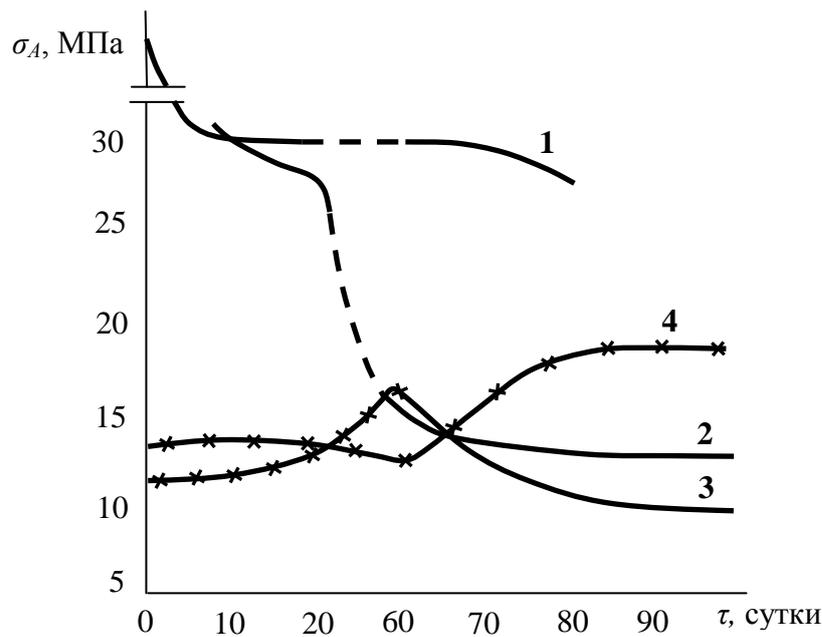


Рисунок 1.18 – Зависимость адгезионной прочности σ_A в системе эмалированный провод ПЭТ-155 - пропиточный состав от продолжительности старения при 180°C: 1 – провод ПЭТ-155 непропитанный; 2 – ПЭТ-155+ПЭ993; 3 – ПЭТ-155+КО-916К; 4 – ПЭТ-155+КО-964Н; — – разрушение по границе медь – эмалевая пленка; x – разрушение по границе пропиточный лак – эмалевая пленка.

Для повышения срока службы обмотки, сочетание пропиточного состава и обмоточного провода должны выбираться таким образом, чтобы адгезия эмале-

вой пленки к меди провода была значительно выше адгезии пленки пропиточного состава к пленке эмалированного провода.

Результаты сравнения срока службы систем «пленка ПЭГ – слой пропиточного состава и пленка ПЭИ – слой пропиточного состава» с адгезионной прочностью этих систем в условиях теплового старения (рисунок 1.19) [11] подтверждают: наибольший срок жизни имеют системы, характеризующиеся умеренной прочностью связи пропиточного состава с пленкой покрытия, и наоборот, высокая прочность связи между этими компонентами приводит к сокращению сроков службы.

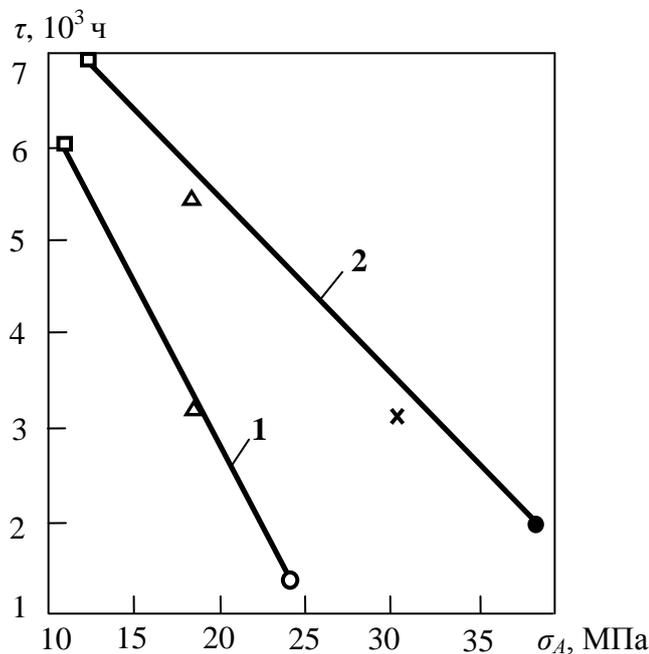


Рисунок 1.19 – Корреляция адгезионной прочности в системах пленка ПЭГ – слой пропиточного состава (1) и пленка ПЭИ – слой пропиточного состава (2) со сроком службы в условиях теплового старения при 180°C (1) и 210°C (2):

□- ПМФС; △- ПМФСЭ; ○- ПЭЦ; ×- ПЭЭ; ●- АМ.

Таким образом, взаимное влияние компонентов межвитковой изоляции сказывается как на скрытии дефектов при пропитке, так и на их появлении во время работы электрической машины. Условиями минимальной интенсивности процессов разрушения межвитковой изоляции являются качественное скрытие сквозных повреждений изоляции эмалированных проводов и умеренная адгезия пропиточных составов к эмалевой изоляции.

1.3 Существующие методы оценки устойчивости компонентов систем межвитковой изоляции к дефектообразованию

Наличие дефектов и стойкость изоляции к их появлению, прежде всего, определяются при производстве и применении эмалированных проводов [7,8]. Начальная дефектность изоляции эмалированных проводов контролируется в процессе их производства путем определения числа точечных повреждений [3,27,40]. В зависимости от диаметра, образец провода определенной длины с заземленной жилой протягивают с постоянной скоростью через электрод (либо фетровые пластины). Число дефектов на проводах фиксируют с помощью реле со счетчиком.

Аналогично предыдущему методу [86] число точечных повреждений определяется пропусканием (протягиванием) образца провода через влажный контакт. Однако метод рекомендован лишь для проводов диаметром $0,02 \div 0,5$ мм.

В качестве общих недостатков этих методов следует отметить отсутствие каких-либо рекомендаций по определению стойкости эмалевой изоляции к механическим нагрузкам, а также к воздействию растворителей.

Основные современные стандартные способы определения механической прочности изоляции эмалированных проводов заключаются в оценке стойкости к истиранию иглой под постоянно увеличивающейся нагрузкой [26] и в определении числа двойных ходов иглы по поверхности провода до истирания эмалевой изоляции [27].

Как показывают результаты [5,48,53] эти методы обладают рядом недостатков: малая статистическая устойчивость и большой разброс результатов (таблица 1.10) в силу высокой чувствительности к случайным колебаниям условий испытаний (разбросу по диаметру иглы, разбросу по диаметру жилы, аккуратности балансировки коромысла и т.д.); критерии оценки условны и не дают количественной характеристики механических свойств изоляции; малый испытываемый участок изоляции.

Таблица 1.10 – Характерные величины разброса результатов определения стойкости к истиранию провода ПЭТВ-2 ($d=2,65$ мм)[5]

Число двойных ходов N	36	92	147	203	258	295
Частота*	1	3	8	4	8	3

*Количество результатов, соответствующих данному числу ходов.

Изменение механических свойств после действия растворителя и горячих пропиточных составов оценивается по степени размягчения эмалевой изоляции. Оценку производят после выдержки проводов в течение 30 минут при 60°C в соответствующей среде путем процарапывания изоляции образцов карандашами с грифелем различной твердости [30].

Данный метод позволяет оценить химическую совместимость компонентов межвитковой изоляции [23,57] и подобрать растворитель (таблица 1.11), либо пропиточный состав (таблица 1.12), который не ухудшит эмалевую изоляцию.

Таблица 1.11 – Стойкость изоляции эмалированных проводов к растворителям

Марка провода	В исходном состоянии	Твердость карандаша* для растворителя									
		Смесь бутанола и фенола в объемном отношении 8,5:1,5	Ацетон	Циклогексанон	Смесь бутанола, уайт-спирита и ксилола в объемном отношении 1:6:3	Ксилол	Уайт-спирит	Толуол	Сольвентнафта	Этиловый спирт	Бутанол
ПЭЛ	НВ	6В	6В	4В	6В	5В	НВ	5В	6В	6Н	6В
ПЭВ-2	6Н	В	2Н	2Н	5Н	5Н	5Н	5Н	6Н	5В	4В
ПЭТВ	3Н	В	2В	3Н	3Н	2Н	3Н	2Н	3Н	Н	3Н
ПЭТ-155	3Н	В	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н
ПЭТВЛ-2	2Н	5В	5В	6В	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	6В	5В
ПЭТ-200	7Н	6Н	4Н	6Н	5Н	6Н	6Н	6Н	6Н	5Н	6Н
ПНЭД-имид	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н

*7Н – наиболее твердый карандаш, 6В – наиболее мягкий.

Таблица 1.12 – Стойкость изоляции эмалированных проводов к пропиточным составам

Марка провода	В исходном состоянии	Твердость карандаша									
		Компаунды		Пропиточные лаки							
		КП-34	КП-101	ПБС-1	ПЭ-933	ФЛ-98	ПФ-97	МЛ-92	ПЭ-933	КО-916К	КО-964Н
ПЭЛ	НВ	НВ	НВ	6В	6В	4В	4В	В	6В	6В	4В
ПЭВ-2	6Н	6Н	6Н	6В	В	4Н	4Н	6Н	6Н	6Н	6Н
ПЭТВЛ-2	2Н	2Н	2Н	6В	3В	2Н	В	2Н	2Н	2Н	2Н
ПЭВТ	3Н	2Н	Н	2Н	НВ	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н
ПЭТ-155	3Н	3Н	3Н	2Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н	3Н
ПЭТ-200	7Н	6Н	6Н	6Н	7Н	6Н	4Н	5Н	5Н	6Н	5Н
ПНЭД-имид	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н	2Н

В то же время критерии оценки достаточно условны и не позволяют достоверно определить изменение дефектности изоляции после действия агрессивных сред.

В работах [2,15] предложено использовать пробивное напряжение, как характеристику, чувствительную к наличию дефектов для оценки качества эмалированных проводов (таблицы 1.13). Следует отметить, что пробивное напряжение не отражает тех физических или химических процессов, которые протекают в эмалевой изоляции и определяет ее механические свойства. Так же при подобном подходе нельзя установить точное количество дефектов на единице длины провода, поскольку пробивное напряжение является лишь индикатором наличия или отсутствия повреждений в изоляции.

Кроме того пробивное напряжение не обладает «предсказательными возможностями», т.е. не позволяет оценить скорость появления дефектов во время эксплуатации обмотки. Скачкообразное изменение пробивного напряжения есть следствие механического разрушения изоляции.

Таблица 1.13 – Электрические свойства эмалевой изоляции проводов

Провод	Диаметр, мм	Толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение, кВ	Пробивное напряжение проводов, кВ (в дроби)							
				в исходном состоянии		растянутые на					
						5%		10%		15%	
				среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное	среднее	минимальное
ПЭТМ	1,16	0,08	9,1	3,3	2,4	2,3	1,0	1,3	0,7	1,0	0,5
ПЭТ-200	1,45	0,07	11,5	6,2	1,4	3,7	1,4	4,3	2,0	3,4	1,0
ПЭТ-155	1,56	0,08	9,5	3,8	1,0	2,6	0,5	1,7	0,5	1,0	0,5
ПЭФ-155	1,0	0,08	12,7	5,9	3,6	5,7	4,0	6,0	2,0	5,8	2,6
ПЭТВ	1,0	0,08	6,4	6,5	2,2	5,4	1,4	5,4	1,2	5,0	1,0

Более точная оценка состояния изоляции эмалированных проводов обеспечивается при испытаниях в электролите или в системе электродов «провод-дробь» [63]. В этом случае критерием оценки служит дефектность изоляции. Испытания предполагают определение дефектности в состоянии поставки, а также после намотки катушек и укладки их в пазы. Данный метод отличается трудоемкостью, и не исключает появление дополнительных дефектов при извлечении образцов провода из пазов сердечника. Так же не учитываются действие агрессивных сред.

Способность межвитковой изоляции выдерживать эксплуатационные нагрузки без образования дефектов может быть оценена несколькими методами, отраженными в работах ряда коллективов [15,23].

Процессы разрушения могут быть оценены по снижению величины пробивного напряжения [19,24]. Подобный подход лежит в основе математической модели (рисунок 1.20) определения вероятности безотказной работы элемента межвитковой изоляции:

$$P_{\Xi} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(U_B)g(U_C)dU_BdU_C \quad (1.5)$$

где $f(U_B)$ и $g(U_C)$ – плотности распределения пробивного и приложенного напряжений.

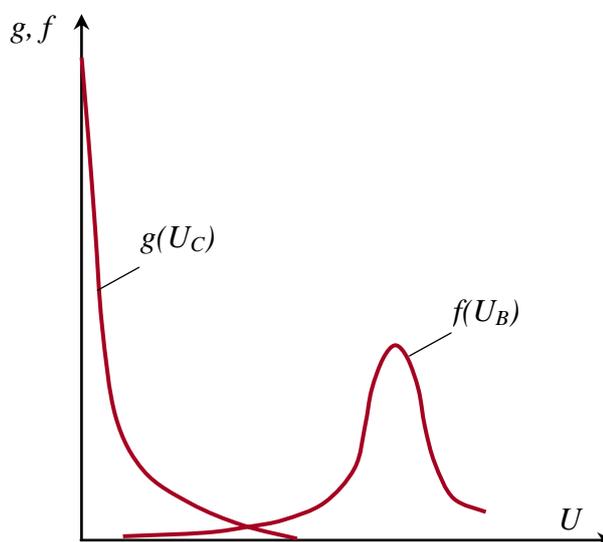


Рисунок 1.20 – Графическая интерпретация математической модели надежности межвитковой изоляции: $g(U)$ – плотность распределения вероятности приложенного напряжения; $f(U)$ – плотность распределения пробивного напряжения.

При возникновении дефектов произойдет резкое снижение пробивного напряжения. Данная модель не учитывает взаимодействие эмалированных проводов с пропиточными составами, конструктивные параметры обмотки, а также ряд эксплуатационных нагрузок: температура и влажность в полости двигателя, вибрация и т.д.

Интенсивность приращения дефектов также может быть оценена при определении среднего срока службы пропитанных скруток [15]. Существенным недостатком такого подхода является несоответствие конструкции образцов (скруток) реальным системам изоляции низковольтных обмоток, что в ряде случаев не согласуется с результатами, полученными при испытаниях макетных образцов.

Испытания макетных образцов с микроскопическим исследованием срезов [23] позволяют получить информацию о характере разрушения систем межвитковой изоляции, но не дают возможности количественно оценить процесс дефектообразования.

Стойкость межвитковой изоляции к появлению дефектов во время эксплуатации наиболее адекватно отражает скорость дефектообразования H_{ϵ} , определяемая согласно методике [63] по результатам комплексных испытаний с помощью выражения:

$$H_{\epsilon i} = \frac{\lambda_{\epsilon i} - \lambda_{\epsilon 0}}{t_i} \quad (1.6)$$

где $\lambda_{\epsilon i}$ – дефектность витковой изоляции после старения макетов при i -ой температуре, мм^{-1} ; $\lambda_{\epsilon 0}$ – дефектность витковой изоляции, не подвергавшейся старению, мм^{-1} ; t_i – время старения макетов при i -ой температуре, ч.

Методика основана на физической модели отказа элемента витковой изоляции, согласно которой отказ возможен только при наличии сквозного дефекта между соседними витками обмотки. Испытания проводятся на макетах, которые имитируют обмотку электрической машины (рисунок 1.21).

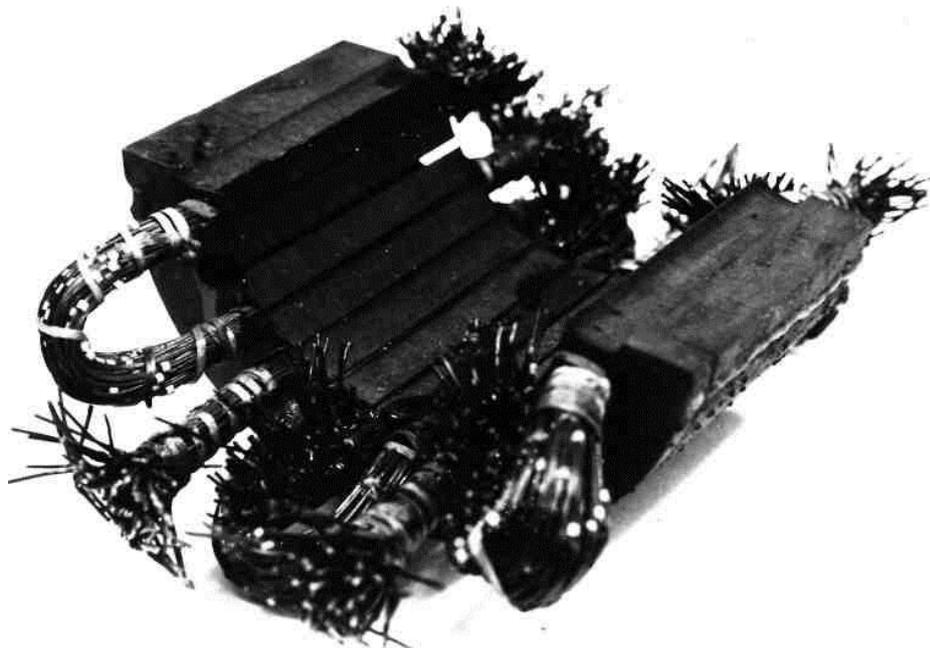


Рисунок 1.21 – Общий вид макета межвитковой изоляции для испытаний на надёжность.

Корпусом макета служат статоры реальных машин или их сегменты, а также макеты пазовой части статора, специально изготовленные с точным соблюдением геометрии паза реального двигателя. В корпус укладываются специально изготовленные пары проводников из обмоточного провода, предварительно изолирован-

ные пазовой изоляцией. Макеты подвергаются тепловому старению. Тепловое старение проводят циклически; после каждого цикла макеты охлаждаются до комнатной температуры и подвергаются воздействию вибрации с ускорением $1,5g$ в течение 2 ч. Цель испытаний – добиться заметного приращения дефектности в процессе старения. Подобные условия испытаний максимально приближены к реальным условиям эксплуатации. Большой объем проведенных исследований позволил получить данные о скоростях дефектообразования для ряда систем межвитковой изоляции: H_g – скорость дефектообразования при температуре класса нагревостойкости, a_g – коэффициент уравнения скорости увеличения дефектности (таблица 1.14) [60,63].

Таблица 1.14 – Коэффициенты уравнения скорости дефектообразования витковой изоляции.

Марка провода	Пропиточный лак	$H_g \cdot 10^{-6}$, мм ⁻¹ ч ⁻¹	a_g , °C ⁻¹
ПЭТВ	МЛ-92	0,141	0,0648
ПЭТВ-2	ГФ-95	0,18	0,06
ПЭТВМ	ПЭ-9153	0,578	0,0537
ПЭТ-155	ПЭ-933	0,322	0,056
ПЭТ-155	КО-916К	0,137	0,078
ПЭТ-180	КО-916К	0,068	0,221
ПЭТ-200	КО-916К	0,248	0,0515

Широкое применение данного способа затруднено в связи с длительностью и трудоемкостью проведения эксперимента. Помимо этого, полученные результаты не дают информации о характере взаимодействия компонентов межвитковой изоляции во время старения.

Предлагаемый в [24] упрощенный подход предполагает при отсутствии исходных данных принимать значение скорости дефектообразования H_g в пределах $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-6}$ мм⁻¹ч⁻¹ без каких-либо уточняющих рекомендаций. В то же время ошибочный выбор верхнего и нижнего предела может привести к неверному определению уровня надежности.

Приращение дефектности изоляции эмалированного провода, обусловленной действием температуры и механической нагрузки с учетом положений термофлуктуационной теории прочности диэлектриков, предлагается определять по выражению [82]:

$$\lambda = \frac{4\pi N_O d_{СМТ}^3}{3l_{кр}^2} \sum_{i=1}^n V_i e^{\frac{W_i - \gamma\sigma_T}{KT}} \quad (1.7)$$

где N_O – число химических связей в единице объема; τ – время действия температуры и механических нагрузок, ч; $l_{СМТ}$ – расстояние между субмикротрещинами, мм; $l_{кр}$ – критическая глубина трещин, мм; V_i – доля i -х химических связей в структурной формуле полимера; W_i – энергия разрыва i -й химической связи; γ – структурный коэффициент; σ_T – механическое напряжение в полимере при данной температуре; K – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Предложенный подход позволяет количественно оценить уровень дефектообразования изоляции, но сложность получения исходных данных для изоляции проводов конкретных марок затрудняет проведение расчетов.

В [66] предложено оценку дефектности проводить по частичным разрядам, протекающих в межвитковой изоляции низковольтных двигателей. Данный метод предполагает прогноз остаточного ресурса электродвигателя, но учитывает только существование дефектов в изоляции и не определяет причин их появления и позволяет снизить величину дефектности λ .

В работе [18] предложено прогнозировать надежность межвитковой изоляции по величине внутренних механических напряжений, как основной нагрузки, приводящей к растрескиванию пропиточного состава в процессе эксплуатации. Учитывается соотношение распределений прочности на растяжение пропитываемого состава σ_p и внутреннего напряжения $\sigma_{вн}$ (рисунок 1.22). Образование трещины происходит при пересечении функций распределения этих величин (заштрихованная площадь под пересекающимися кривыми).

В данном случае оцениваются только внутренние напряжения $\sigma_{вн}$ в пропиточном составе без учета адгезионного взаимодействия с эмалевой изоляцией

проводов, определяющего дальнейший характер разрушения и возможность образования сквозного дефекта. Так же совершенно не учитываются конструктивные параметры обмотки и прочие воздействующие на изоляцию факторы.

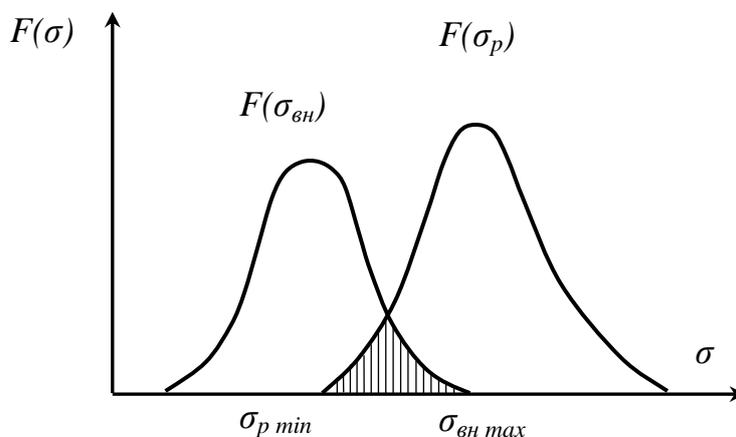


Рисунок 1.22 – Соотношение распределений прочности на растяжение пропитывающего состава σ_p и внутреннего напряжения $\sigma_{вн}$.

Косвенно величина адгезии в системах «пропиточный состав - эмалированный провод» может быть определена путем оценки цементирующей способности пропиточных составов [25]. О цементации витков судят по величине усилия, необходимого для вырывания центрального проводника из пучка предварительно пропитанных проводников такого же диаметра.

Несмотря на то, что испытания проводятся на образцах, конструкция которых близко воспроизводит расположение витков в реальной обмотке, результаты не дают информации о процессах взаимодействия и разрушения компонентов межвитковой изоляции. Полученные данные позволяют определить минимальный необходимый уровень цементации витков и сделать лишь косвенный вывод о жесткости пропиточных материалов [56].

В заключении можно отметить следующее: достаточно высокий процент отказов обмоток связан с недостаточно эффективными методами определения и прогнозирования дефектности компонентов и систем межвитковой изоляции на стадии производства и в процессе эксплуатации электродвигателей. Стандартные методы не всегда позволяют адекватно оценить стойкость изоляции проводов к воздействию нагрузкам; предлагаемые способы оценки дефектообразования в

системе межвитковой изоляции трудоемки, длительны, а также не учитывают величину адгезионного взаимодействия.

1.4 Выводы. Постановка задач на исследование.

Обзор работ, посвященных вопросам обеспечения надежности изоляции низковольтных обмоток электрических машин, позволяет сделать следующие выводы:

1. Эксплуатационная надежность обмоток в основном определяется дефектностью её межвитковой изоляции [16,38,71,80,81]. Наличие сквозного дефекта является главным критерием, определяющим возможность отказа, так как уровень пробивного напряжения даже состаренной изоляции превышает величины рабочих напряжений и перенапряжений [72,73].
2. Надежность межвитковой изоляции определяется, прежде всего, электрическими и механическими свойствами изоляции эмалированных проводов, а также способностью сохранять эти свойства на необходимом уровне при воздействии технологических и эксплуатационных нагрузок, в том числе с учетом условий эксплуатации в системе частотно-регулируемого привода [4,5,13,15,18,23,34,37,40-43,48,51-55,60,70-75,108].
3. В процессе эксплуатации дефектность определяется главным образом взаимодействием пропиточного состава и эмалевого изоляции провода, при этом важную роль в образовании дефектов играет адгезия в системе [9,11,17,22,35,47,49,56,80,84].
4. В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по оценке стойкости обмоточных проводов к появлению дефектов. Существующие критерии условны, не отражают реальные нагрузки, воздействующие на эмалированный провод; как правило, носят качественный характер и не позволяют адекватно оценить свойства изоляции с точки зрения стойкости к появлению дефектов [2-5,26,27,30,48,53].

5. В проведенных рядом авторов исследованиях [11,22,23,57,79] детально описан механизм разрушения межвитковой изоляции, показано влияние адгезии на процессы дефектообразования, проведена качественная оценка цементации витков обмотки. В то же время, отсутствует информация о способах количественной оценки величины адгезии и её влиянии на надежность системы.
6. Не смотря на большой объем исследований эксплуатационной надежности межвитковой изоляции [18,19,23,33,41,51,54,57,59,60,69-71,75,108], до настоящего времени отсутствуют какие-либо рекомендации по экспресс-прогнозированию скорости дефектообразования H_e в межвитковой изоляции.

Разработка методов и критериев устойчивости межвитковой изоляции к образованию дефектов; способа определения величины адгезии в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» с прогнозом интенсивности процессов дефектообразования позволит обеспечить снижение дефектности как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Исследовать причины возникновения дефектов в системе низковольтной межвитковой изоляции с учетом воздействующих нагрузок, а также влияния адгезионного взаимодействия на процессы дефектообразования.
2. Исследовать методы определения свойств эмалевой изоляции обмоточных проводов с точки зрения стойкости к появлению дефектов.
3. Определить критерии устойчивости эмалевой изоляции к разрушению и дефектообразованию, в том числе для обмоток электродвигателей частотно-регулируемого привода.
4. Разработать рекомендации по определению величины адгезии в системе межвитковой изоляции.
5. Разработать рекомендации по прогнозированию скорости дефектообразования H_e в системе межвитковой изоляции с учетом адгезионного взаимодействия.
6. Разработать рекомендации по снижению дефектности межвитковой изоляции низковольтных обмоток на стадии изготовления и в процессе эксплуатации.

ГЛАВА 2

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И СВОЙСТВ ИССЛЕДУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Исследуемые эмалированные провода и пропиточные составы

В качестве объектов исследования выбраны современные эмалированные провода и электроизоляционные пропиточные составы, применяющиеся при производстве низковольтных обмоток для систем изоляции на классы нагревостойкости В, F и H (таблица 2.1, 2.2) [9,42,44,45,52,89-92,97].

2.2 Определение механической прочности изоляции эмалированных проводов

Основными методами оценки стойкости эмалевой изоляции к технологическим воздействиям являются испытания механической прочности изоляции эмалированных проводов на истирание под постоянной нагрузкой иглой диаметром 0,4 мм и под постепенно возрастающей нагрузкой иглой диаметром 0,23 мм [26,27].

Образцы перед испытанием должны быть смотаны с катушки без растяжения и изгибов. От испытываемой катушки с проводом отбирается два образца длиной 200 мм каждый при испытании под постоянной нагрузкой и один образец провода длиной 350 мм при испытании под постоянно увеличивающейся нагрузкой. Поверхность образцов протирается, так же без растяжения и изгибов, чистым сухим мягким материалом. С одного конца каждого образца на длине 10-15 мм удаляется изоляция, после чего данные образцы могут быть подвержены испытанию.

Определение механической прочности изоляции эмалированных проводов на истирание под постоянной нагрузкой проводится на устройстве (рисунок 2.1), схема рабочей части которого, показана на рисунке 2.2 [26].

Таблица 2.1 – Описание марок исследуемых эмалированных проводов.

Марка провода	Температурный индекс, °С	Конструкция провода	Примечание
ПЭТВ	130	Провода медные круглого сечения, изолированные полиэфирной эмалью	Высокая электрическая прочность
ПЭТ-155	155	Провода медные круглого сечения, изолированные полиэфиримидной эмалью	Повышенная теплостойкость
ПЭЭА-155		Провода алюминиевые круглого сечения, изолированные полиэфиримидной эмалью	
ПЭТД-180	180	Провода медные круглого сечения с двойной изоляцией из полиэфиримидной и полиамидимидной эмали	Высокие механические и тепловые характеристики
ПЭТД2-К-180		Провода медные круглого сечения с двойной изоляцией из тригидроксиэтилциануратного лака, содержащего 0,1 об. % наночастиц оксида кремния) и полиамидимидной эмали	
ПЭФД-2-200	200	Провода медные круглого сечения с двойной изоляцией из полиэфиримидного лака и полиамидимидного лака	Стойкость к воздействию трансформаторных и синтетических масел, хладагентов, выдерживает действие больших токовых перегрузок
ПЭТ-200-1		Провода медные круглого сечения, изолированные полиамидимидной эмалью	

Таблица 2.2 - Описание марок исследуемых пропиточных составов.

Марка пропиточного состава	Класс нагревостойкости	Химический состав	Примечание
ГФ-95	В	Модифицированный глифталь (раствор поликанденсации глицерина, фталевого андигрида и растворительного масла)	Способность длительно сохранять пластичность при тепловом старении, высокая маслостойкость, а также стойкость к действию кислых химических реагентов (паров кислот и хлора)
МЛ-92	В	Смесь глифталевого лака ГФ-95 и 16% (масс.) меламиноформальдегидной смолы в органических растворителях	Высокие электроизоляционные свойства, высокая цементирующая способность, дугостойкость, влаго- и маслостойкость
ПЭ-9153М	Ф	Модифицированный олигоимидалкид	Пониженное содержание токсичных, пожаро- и взрывоопасных органических растворителей, сокращенное время и пониженная температура сушки
КП-50	Ф и Н	Смесь полимеризационноспособных олигомеров с целевыми добавками не содержащую растворителей	Пониженная пожароопасность и токсичность, т.к. не содержит растворителей или стирола, а количество летучих компонентов не превышает 3-4%
КП-55-5	Ф и Н	Полиэфир, модифицированный кремнийорганическими смолами, стабилизаторами, пластификаторами и регуляторами адгезии	Пониженная вязкость и увеличенный срок жизни, отсутствие растворителей или стирола позволяет снизить пожароопасность по сравнению с пропиточными лаками, содержащими органические растворители (ГФ-95, МЛ-92)
КО-916К	Н	Полиорганосилоксановая смола, модифицированная полиэфиром	Высокие электроизоляционные свойства, пропитывающая способность, теплопроводность, нагревостойкость, короностойкость, влагостойкость



Рисунок 2.1 – Стенд для лабораторных испытаний изоляции обмоточных проводов на стойкость к истиранию.

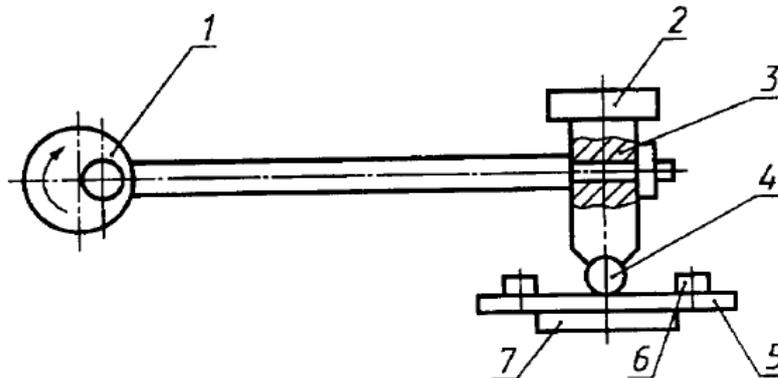


Рисунок 2.2 – Схема рабочей части устройства для определения механической прочности изоляции эмалированных проводов по числу двойных ходов иглы:
 1) эксцентрик; 2) груз; 3) головка скребка; 4) игла; 5) образец провода; 6) зажим; 7) пластина для крепления образца.

Лабораторный стенд состоит из электродвигателя, его привода с редуктором и эксцентриком, скребка со стальной иглой на конце, набора грузов для установления соответствующей нагрузки на иглу, приспособления для поворота на заданный угол испытуемого образца вокруг его оси, реле автоматического отключения двигателя при возникновении контакта между иглой и жилой провода, счетчика числа двойных (возвратно-поступательных) ходов иглы.

Подготовленный образец провода прочно закрепляется в зажимах устройства. Игла диаметром 0,4 мм опускается на образец провода и затем прижимается к нему грузом. Значение нагрузки на иглу складывается из силы тяжести головки скребка и груза и должна соответствовать величине нагрузки H в зависимости от номинального диаметра проволоки [26].

К жиле образца провода подводится напряжение величиной 12 В, после чего устройство должно быть включено, и игла начинает совершать возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости по поверхности образца.

Скорость иглы составляет 60 ± 3 двойных ходов в 1 минуту, длина хода иглы в одном направлении составляет 10 мм. После автоматического отключения устройства в момент окончания истирания изоляции образца и возникновения контакта между иглой и проволокой (жилой провода) по счетчику, фиксируется число двойных ходов иглы. Испытания проводятся в трех местах по окружности провода (путем поворота провода на 120° и 240°).

Определение механической прочности изоляции эмалированных проводов на истирание под постепенно возрастающей нагрузкой проводятся на устройстве (рисунок 2.3), имеющем шкалу, градуированную в значениях коэффициента, на которой умножают начальную нагрузку для определения «нагрузку до повреждения изоляции» [27].

Образец испытуемого провода закрепляется в зажимающих кулачках, отрегулировав поддерживающую опору до контакта с образцом. Начальная нагрузка, прикладываемая к истирающему устройству, составляет не более 90% минимальной разрушающей нагрузки, установленной в нормативном документе на конкретный провод. Истирающее устройство нагружают, плавно опускают на по-

верхность провода и приводят в действие. Напряжение между жилой образца и иглой должно быть $(6,5 \pm 0,5)$ В. Истирание проводят в одном направлении вдоль оси образца. Скорость движения иглы составляет (400 ± 40) мм/мин. Значение, при котором устройство останавливается, считывают с градуированной шкалы. Произведение этого значения и начальной нагрузки фиксируют. Поворачивая образец на 120° и 240° , испытания проводятся еще дважды на одном и том же образце. Среднее значение результатов трех измерений принимают за среднее значение разрушающей нагрузки.

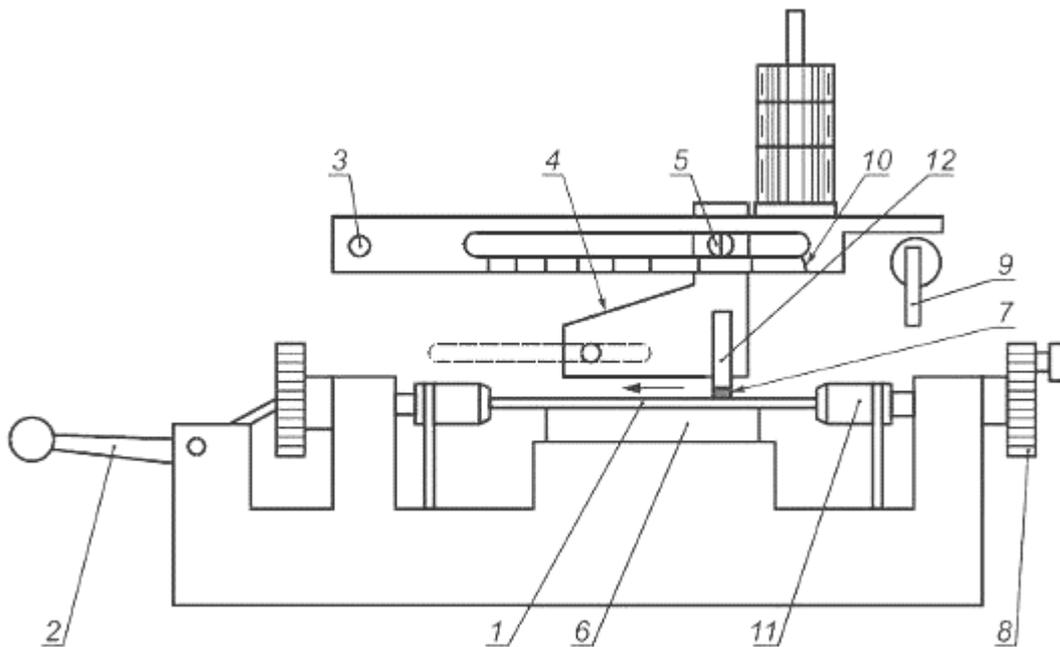


Рисунок 2.3 – Прибор для испытания на стойкость к истиранию при одностороннем движении иглы: 1) образец; 2) натяжное устройство для распрямления образца; 3) фиксированная точка вращения; 4) нагруженное истирающее устройство; 5) указатель; 6) опора, перемещающаяся по высоте; 7) рояльная проволока; 8) планшайба для поворота на 120° ; 9) рычаг возврата в исходное положение; 10) градуированная шкала, на которой отмечают коэффициент умножения; 11) зажим; 12) скребок.

2.3 Определение пробивного напряжения изоляции эмалированных проводов

Испытаниям по определению пробивного напряжения подвергаются скрутки эмалированного провода изготовленные и испытанные согласно ГОСТ Р МЭК 60851-5 – 2008 [28]. За результат принимается среднее арифметическое не менее 5 измерений.

2.4 Определение дефектности изоляции эмалированных проводов

Согласно ОСТ16 0.800.821-88 [63] оценка дефектности изоляции эмалированных проводов производится в электролите под воздействием постоянного напряжения, величиной до 60 В. Электролит представляет собой раствор NaCl в концентрации 50 мг на 1 литр воды.

Электрическая схема установки для проведения испытания приведена на рисунке 2.4. Для проведения испытаний производится отбор по 100 образцов провода длиной 250 мм без (в состоянии поставки) и после предварительных механических воздействий, имитирующих технологические нагрузки при изготовлении обмотки (растяжение, изгиб, воздействие растворителей и повышенной температуры). Все образцы освобождаются с одного конца от изоляции на расстоянии 10 мм.

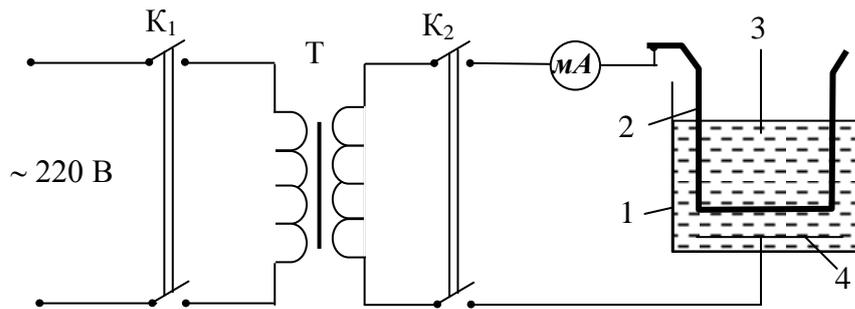


Рисунок 2.4 – Электрическая схема установки для определения дефектности изоляции эмалированных проводов: 1) ванна; 2) испытуемый образец провода; 3) электролит; 4) металлический электрод.

Образец испытуемого провода помещается в ванну с подсоленной водой. На образец провода подается напряжение. Одним электродом служит образец провода, вторым – электролит (заземлен при помощи металлического электрода). Так как сопротивление эмалевой пленки весьма велико, при отсутствии сквозного повреждения на испытательной длине ток по цепи практически равен нулю. Если же на изоляции испытуемого участка провода имеется сквозное повреждение, электролит проникает до металла провода и ток резко увеличивается, что можно визуально определить по показаниям миллиамперметра и выделению пузырьков газа в месте нахождения повреждения.

При погружении образцов в электролит, расстояние от освобожденной от изоляции части образца до поверхности электролита должно быть не менее 10 мм. По полученным экспериментальным данным производят расчет дефектности изоляции эмалированных проводов по выражению:

$$\lambda = \frac{q}{n \cdot l_{исп}}, \text{ мм}^{-1} \quad (2.1)$$

где q – суммарное число выявленных повреждений со всей партии; n – число испытанных образцов; $l_{исп}$ – длина образца провода, мм.

2.5 Определение смачивающих свойств жидкостей

Определение смачивающих свойств проводится методом, основанном на измерении веса образца при погружении его в жидкость [36]. При этом происходит втягивание или выталкивание твердого тела, в зависимости от того, смачивается оно или не смачивается жидкостью. Схема установки для определения энергии смачивания приведена на рисунке 2.5. На аналитических весах (электронные весы типа CAU 120D) измеряется вес исследуемого образца.

Для проведения измерения сосуд с исследуемой жидкостью 2, с помощью подъемного столика 3 подводят до соприкосновения уровня жидкости с краем образца 1. Эту операцию можно провести достаточно точно, т.к. момент соприкосновения фиксируется по резкому изменению показания весов на электронном табло. В результате образования мениска у образца, последний погружается в исследуемую жидкость, что приводит к кажущемуся увеличению веса на величину Δm . Выталкивающая сила будет противодействовать увеличению веса провода и для момента равновесия можно записать [7]:

$$W_{\text{Э}} = \sigma_{\text{жг}} \cdot \cos \theta \quad (2.2)$$

где $W_{\text{Э}}$ – энергия смачивания (Дж/м²); $\sigma_{\text{жг}}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз: жидкость – газ (Дж/м²); $\cos \theta$ – краевой угол смачивания.

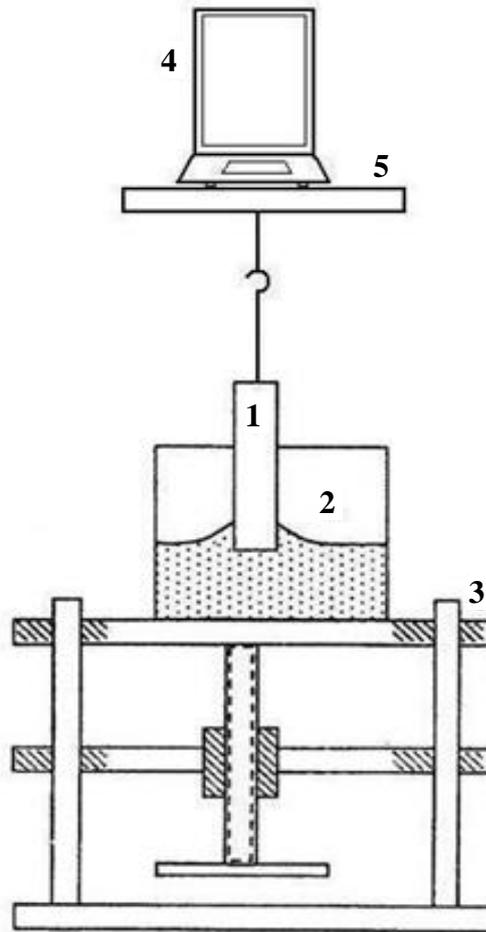


Рисунок 2.5 – Схема установки для определения энергии смачивания: 1) испытуемый образец; 2) сосуд с жидкостью; 3) подъемный столик; 4) аналитические весы; 5) столик для весов.

Для определения угла смачивания жидкости используют метод отрыва провода. Медленно опуская сосуд с жидкостью, регистрируется значение веса провода в момент отрыва его от поверхности жидкости. Обозначив увеличение веса провода в момент отрыва Δm_1 :

$$\sigma_{жз} = g \cdot \Delta m_1 / \Pi_{пр} \quad (2.3)$$

где $\Pi_{пр}$ – периметр сечения провода, м; $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Затем рассчитываем величину угла смачивания:

$$\cos \theta = \Delta m / \Delta m_1 \quad (2.4)$$

За результат принимается среднее арифметическое не менее 10 измерений.

2.6 Расчетно-экспериментальный метод определения скорости дефектообразования в межвитковой изоляции обмоток

Оценка скорости дефектообразования производится по результатам испытаний специальных макетов. За основу принята методика, изложенная в ОСТ16 0.800.821-88 [63].

Испытанию подвергаются 3÷4 группы макетов, имитирующие межвитковую изоляцию низковольтной обмотки (рисунок 2.7). Цель испытаний: получить заметное приращение дефектности в процессе теплового старения при 3÷4 температурах. Минимальная температура принимается на 5÷10°С выше класса нагревостойкости, каждая последующая на 15÷20°С выше предыдущей. В каждом макете должно быть не менее 50 связок испытуемого провода. Каждые два проводника связываются между собой и собираются в общую связку. Связывание производится нитками или другими подобными материалами, обладающими диэлектрическими свойствами и достаточной механической прочностью. Концы изолированных витков разводятся.



Рисунок 2.7 – Макет для испытания витковой изоляции.

Для обозначения каждой отдельной пары на один из концов каждой связки наматывается изоляционная лента. Температурный индекс ленты выше темпера-

турного индекса витковой изоляции не менее чем на 20°C. Ширина изоляционный ленты 20÷25 мм.

Подготовленные макеты нагреваются в термощафе до температуры, равной температуре начала пропитки и пропитываются методом погружения в течение 3÷5 минут, а затем сушатся в термощафах.

Испытания проводят циклически, длительность цикла зависит от температуры старения и составляет 50÷300 часов. После каждого цикла макеты вынимаются, охлаждаются до комнатной температуры, и каждая связка проводов испытывается испытательным напряжением $U_{исн}$. Распределение пробивного напряжения таких образцов подчиняется нормальному закону, в связи с этим величина $U_{исн}$ определяется в соответствии с [33] по выражению:

$$U_{исн} \equiv \bar{U}_\sigma + 3\sigma_\sigma \quad (2.5),$$

где \bar{U}_σ – среднее значение пробивного напряжения образцов с искусственно нанесенными дефектами (кольцевой порез изоляции провода до проводника выполняется посередине лезвием толщиной не более 0,1 мм; количество испытываемых образцов должно быть не менее 50); σ_σ – среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения.

Определение пробивного напряжения образцов проводится в системе электродов «провод-дробь» на высоковольтной установке для пробы диэлектриков (рисунок 2.8).

При испытании производится подъем напряжения до величины $U_{исн}$, фиксируется количество образцов, пробившихся напряжением, меньшим или равным $U_{исн}$ и общее количество испытанных образцов.

Дефектность межвитковой изоляции в процессе старения макетов при i -ой температуре:

$$\lambda_{gi} = -\frac{1}{l_{исн}} \ln \left(1 - \frac{n_{qi}}{n_{ui}} \right) \quad (2.6)$$

где $l_{исн}$ – длина испытываемой части образца, мм; n_{qi} – число образцов, пробившихся напряжением, меньшим или равным $U_{исн}$; n_{ui} – общее количество испытанных образцов.

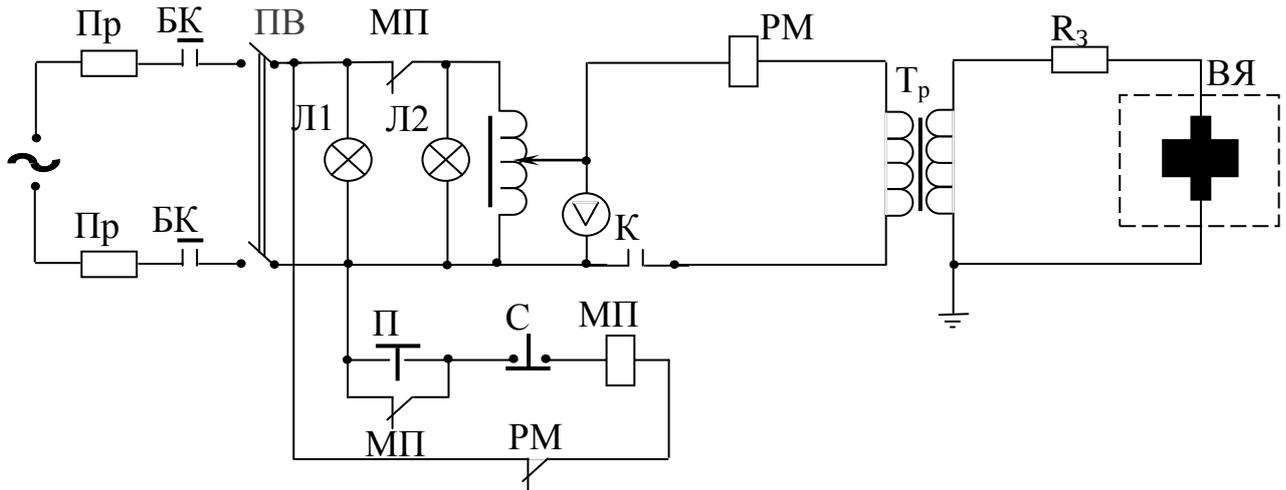


Рисунок 2.8 – Электрическая схема установки для пробоя изоляции: ВЯ – высоковольтная ячейка; МП – магнитный пускатель; П, С – кнопки «Пуск», «Стоп»; БК – блокировка; Л1, Л2 – сигнальные лампы низкого и высокого напряжения; Пр – плавкие вставки; РМ – реле максимального тока; Тр – высоковольтный трансформатор; ПВ – пакетный выключатель; R_з – защитное сопротивление.

Скорость дефектообразования H_6 межвитковой изоляции рассчитывается по выражению 1.6, п.1.3 [63].

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ СИСТЕМ НИЗКОВОЛЬТНОЙ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

3.1 Исследование устойчивости эмалевой изоляции проводов к образованию дефектов

Современные требования потребителей обмоточных проводов наиболее часто сводятся к повышению электрической и механической прочности эмалевой изоляции (таблица 3.1) [6,42,43,62]. Это является вполне обоснованным, учитывая тот факт, что именно недостаточная стойкость эмалевого покрытия к воздействию нагрузкам является причиной образования сквозных повреждений, ведущих к отказу обмоток.

Таблица 3.1 – Сравнительные данные по техническим требованиям к эмалированному проводу [42].

Параметры	МЭК 317-3	ТУ 16.К71-160–92	Фактические требования заказчиков
Допуск на размер проводника	±0,010	±0,010	±0,005
Относительное удлинение	> 30	> 30	> 42
Упругость, °	< 45	< 43	< 30
Тепловой удар Диаметр стержня Температура	2,24 220 °С	3 220 °С	В соответствии с заказом
Пробивное напряжение $U_{пр}$ при повышенной температуре	5000 3800	4900 –	7500
Точечные повреждения	< 5	–	< 5
Тангенс дельта, > °С	–	–	нормирование
Микротрещины	3	–	3
Механическая прочность 0,23	Ср. 11,3 Мин. 9,6	10,4 8,8	>, в соответствии с заказом
Стойкость к коронному разряду	–	–	+

В настоящее время устойчивость изоляции эмалированных проводов к воздействию нагрузкам оценивается с помощью ряда методов, рекомендованных различными нормативными документами [26-28]. Как отмечено в ряде работ [2,3,5,40,48,95] результаты подобных испытаний не всегда позволяют объективно оценить свойства и качество эмалевой изоляции. В этой ситуации возникает необ-

ходимость конкретизации критериев оценки стойкости эмалевой изоляции к воздействию нагрузкам, прежде всего, с учетом возможности появления дефектов.

В настоящей работе проведены исследования свойств эмалированных проводов с использованием существующих стандартных методов [26-28] и оригинальной методики, основанной на определении дефектности [63]. Результаты представлены на рисунках 3.1 – 3.3 и в таблицах 3.2 – 3.4.

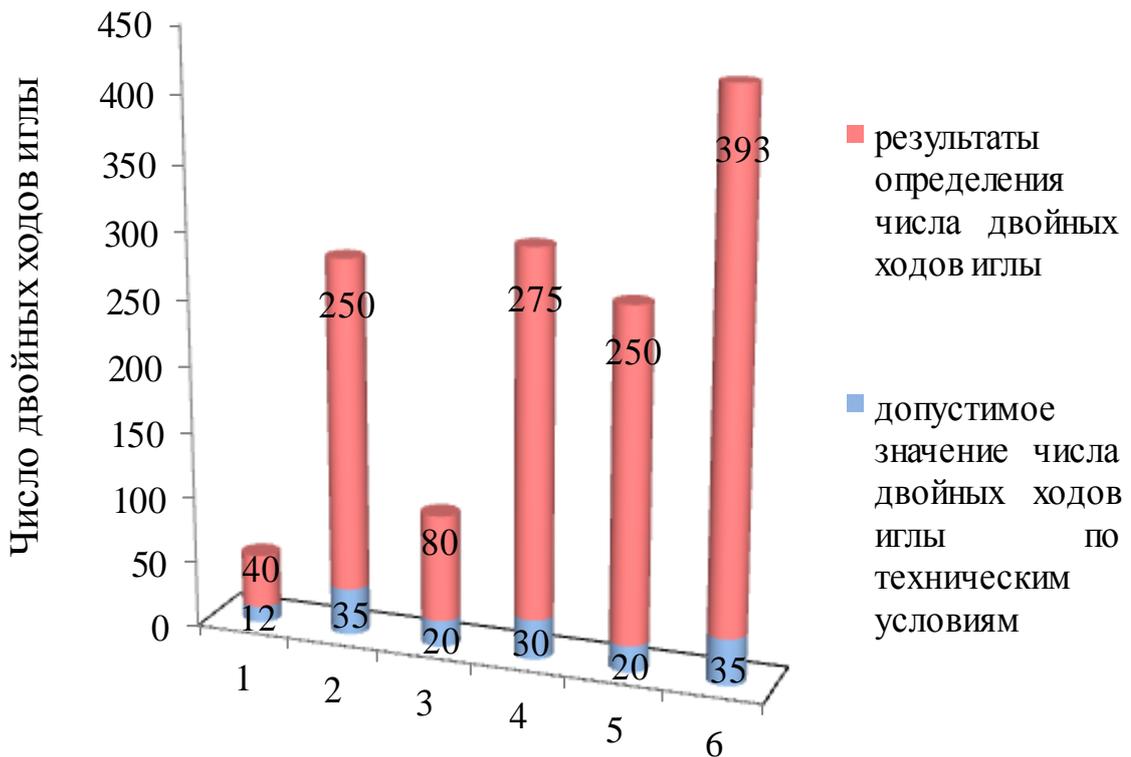


Рисунок 3.1 – Стойкость к истиранию эмалевой изоляции проводов под постоянной нагрузкой: 1) ПЭЭА-155; 2) ПЭТД-180; 3) ПЭТ-155; 4) ПЭТ-200-1; 5) ПЭТВ-2; 6) ПЭТД2-К-180.

Сравнительный анализ результатов показывает:

- 1) Для метода, основанного на определении числа двойных ходов иглы до истирания изоляции [26] характерна малая статистическая устойчивость результатов. Об этом свидетельствует широкий диапазон полученных данных (таблица 3.2). Важно отметить: испытывают провода только в состоянии поставки.

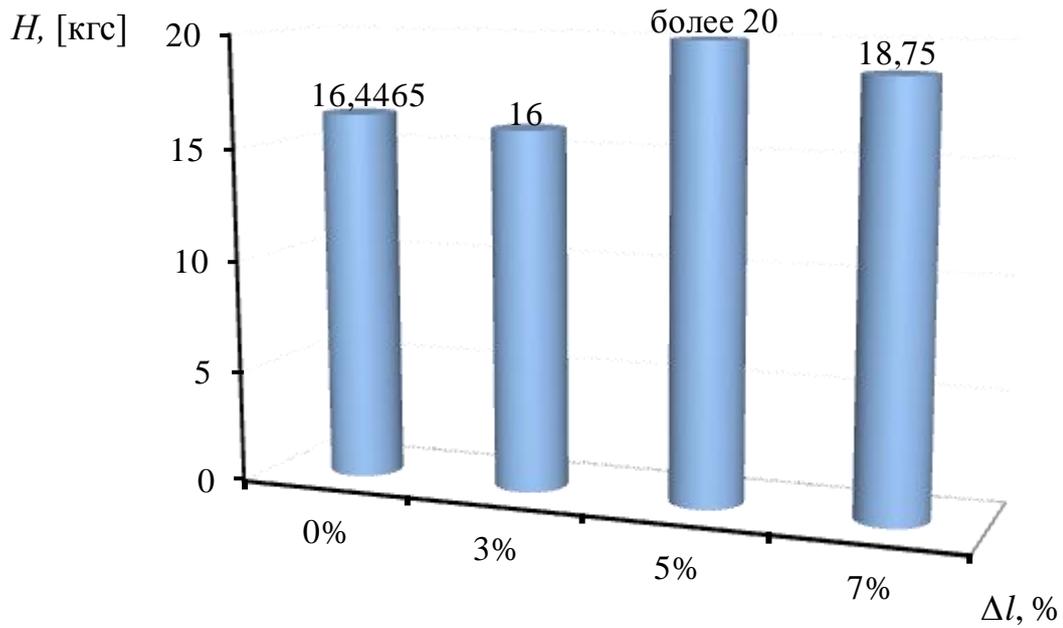


Рисунок 3.2 – Стойкость к истиранию эмаливой изоляции провода ПЭЭА-155 под постоянно увеличивающейся нагрузкой (допустимый предел нагрузки H равен 4,5 кгс).

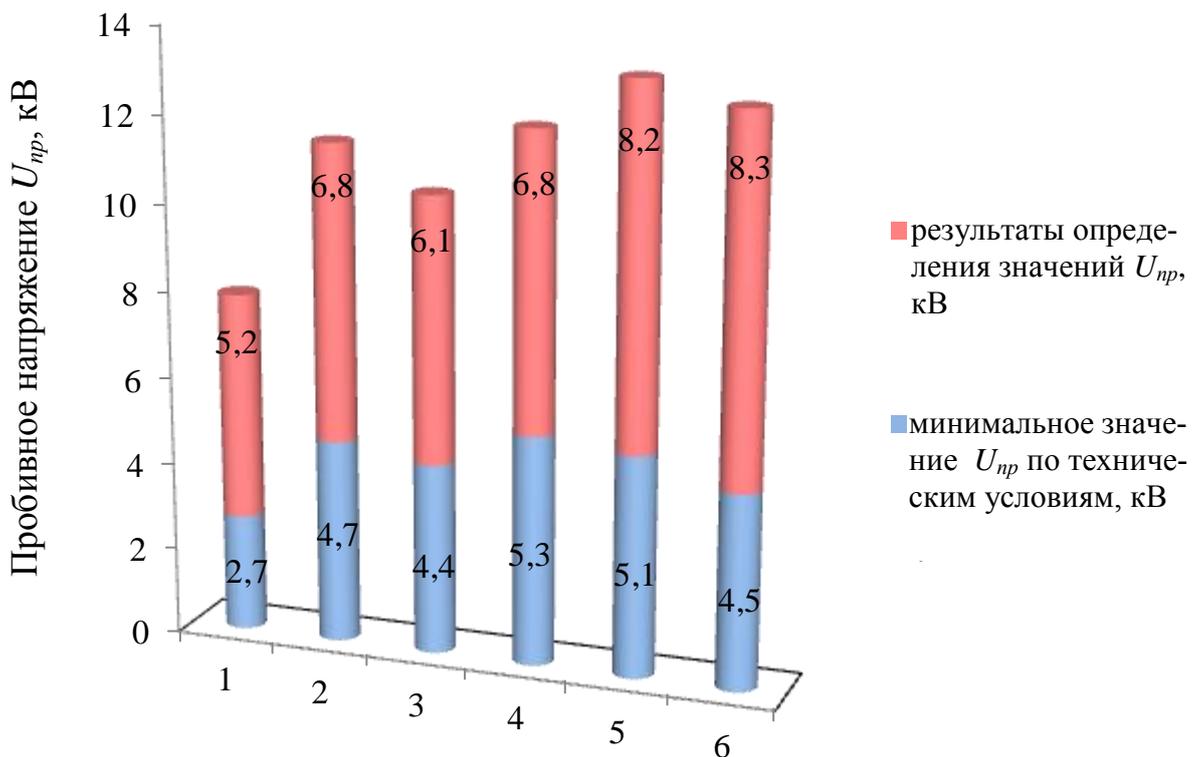


Рисунок 3.3 – Средние значения пробивных напряжений эмаливой изоляции проводов: 1) ПЭЭА-155; 2) ПЭТД-180; 3) ПЭТ-155; 4) ПЭТ-200-1; 5) ПЭТВ-2; 6) ПЭТД-К-180.

Таблица 3.2 – Влияние растяжения провода на стойкость изоляции к истиранию под постоянной нагрузкой.

Марка провода	Параметр	Число двойных ходов иглы N по поверхности изоляции			
		Относительное удлинение образца, %			
		0	3	5	7
ПЭЭА-155	Интервал изменения	15÷62	19÷55	14÷53	19÷59
	Среднее значение	40	28	30	33
ПЭТД-180	Интервал изменения	270÷130	284÷102	25÷164	27÷372
	Среднее значение	250	203	64	159
ПЭТ-155	Интервал изменения	24÷226	22÷197	6÷61	23÷128
	Среднее значение	80	74	39	56

Таблица 3.3 – Дефектность изоляции эмалированных проводов в состоянии поставки и после механических нагрузок.

Марка провода	В состоянии поставки	Дефектность изоляции λ (мм^{-1}) после имитации технологических воздействий для образцов с различным относительным удлинением, %		
		3	5	7
ПЭЭА-155	0,0012	0,0012	0,016	0,118
ПЭТ-155	0	0	0	0,0004
ПЭТД-180	0	0	0	0
ПЭТД2-К-180	0	0	0	0

Таблица 3.4 – Дефектность изоляции эмалированных проводов после механических воздействий и выдержки в растворителе.

Марка провода	Дефектность изоляции λ (мм^{-1}), после механических воздействий и выдержки в растворителе для образцов с различным относительным удлинением, %			
	0	3	5	7
ПЭЭА-155	0,036	0,0416	0,0524	0,076
ПЭТ-155	0	0,00012	0,00028	0,00036
ПЭТД-180	0,0016	0,002	0,003	0,0028
ПЭТД2-К-180	0	0	0	0,0002

В процессе же изготовления реальных обмоток провода подвергаются растяжению при намотке, истиранию поверхности при укладке, изгибанию, что может снизить механическую прочность изоляции. Результаты испытаний предварительно растянутых образцов провода подтверждают: с увеличением относительного удлинения образца может снижаться число двойных ходов иглы по поверхности провода до разрушения изоляции (таблица 3.2).

- 2) Рекомендованная ГОСТ Р МЭК 60851-3 – 2002 [27] оценка стойкости изоляции к истиранию с постоянно увеличивающейся нагрузкой достаточно условна, так как результат представляется в формате «да» - «нет» (произошло разрушение пленки эмали или нет). Все испытанные провода успешно прошли испытания (в качестве примера на рисунке 3.2 приведены данные для ПЭЭА-155; изоляция других марок проводов выдержала испытания без разрушения).
- 3) Важным недостатком существующих стандартных методов оценки механических свойств [26,27] является малая испытываемая площадь образца. Это отрицательно сказывается на точности и достоверности полученных результатов, так как для эмалевой изоляции характерна большая неоднородность свойств по длине провода. Кроме того, используемые критерии условны, малоинформативны и совершенно не позволяют учесть изменение дефектности.
- 4) Контроль величины пробивного напряжения U_{np} дает возможность выявить провода с низкой электрической прочностью. Однако результаты лишь констатируют факт наличия или отсутствия разрушения изоляции без анализа процессов, приводящих к разрушению. В связи с этим пробивное напряжение не может быть принято в качестве критерия стойкости изоляции к появлению дефектов, несмотря на прямую связь между наличием повреждений в изоляции и величиной U_{np} . Результаты экспериментальных данных (таблица 1, Приложение 1) только позволяют отметить: эмалевая изоляция всех исследуемых проводов обладает достаточной электрической прочностью. Поскольку изменение пробивного напряжения есть следствие механического разрушения изоляции, основное внимание при определении свойств следует уделять механической прочности.

5) Точная качественная и количественная оценка устойчивости эмалевой изоляции к воздействию нагрузкам обеспечивается при определении дефектности в электролите [63].

Помимо этого, на образование дефектов оказывает влияние действие растворителей и реакционноспособных компонентов пропиточных материалов в процессе пропитки и сушки обмоток. Как отмечалось ранее в п. 1.3. это может привести к размягчению и набуханию эмали, что также снижает прочность изоляции.

В работе проведено исследование совместного влияния механических нагрузок и растворителей на дефектность изоляции эмалированных проводов (таблица 3.3, 3.4). Испытывались образцы провода с относительным удлинением 3, 5, 7%. Навивание образцов провода, имитирующее изгиб, осуществлялось согласно [28]. Образцы провода помещались в ёмкость с растворителем, загружались в термошкаф и выдерживались 30 минут; перед испытанием просушивались и протирались. Результаты позволяют отметить, что подобные комплексные испытания обеспечивает достоверную оценку как механической стойкости эмалевой изоляции к воздействию нагрузкам, так и степень ее повреждаемости. Только в этом случае определяется точное количество дефектов.

Например, провод ПЭЭА-155 показал очень высокую дефектность λ после растяжения, что свидетельствует о минимальной устойчивости к технологическим воздействиям. Это характерно для проводов с алюминиевой жилой, так как адгезия эмалевой пленки к алюминию намного меньше чем к меди. Поэтому при растяжении эмалевая изоляция утоньщается и растрескивается, что является причиной роста дефектности. В то же время результаты стандартных испытаний (рисунки 3.1, 3.2, 3.3, таблица 3.2) показали: эмалевая изоляция обладает достаточной стойкостью к истиранию. В результате можно сделать неверный вывод о механической прочности изоляции данного провода.

Для проводов марок ПЭТ-155, ПЭТД-180, ПЭТД2-К-180 хорошая механическая прочность, определенная по стандартным методам, подтверждается низкой

величиной дефектности λ (менее $0,006 \text{ мм}^{-1}$, что обуславливает малую вероятность совпадения дефектов и высокую надежность межвитковой изоляции).

В последние годы потребители обмоточных проводов предъявляют новое требование [43-45,105]: устойчивость эмалевой изоляции к воздействию коронных разрядов. Это проблема характерна для обмоток электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода. Преобразователи частоты, построенные на базе полупроводниковых ключей с высокой скоростью переключения, обуславливают повышенные электрические нагрузки во время эксплуатации.

Электрические перенапряжения в низковольтных обмотках приводят к возникновению электрических разрядов по поверхности изоляции, в значительной степени ускоряющих процессы ее старения и дефектообразования.

К сожалению, в отечественной технической литературе недостаточно информации о каких-либо методах и рекомендациях по определению стойкости эмалированных проводов к действию электрических разрядов.

Для оценки стойкости эмалевой изоляции к поверхностным разрядам предложена методика, заключающаяся в выдержке образца провода в среде действия электрических разрядов при повышенном напряжении [64]. Испытания проводились в системе электродов «провод – дробь» (рисунок 3.4), размещаемой в высоковольтной ячейке (ВЯ). Общая схема установки для проведения испытаний приведена на рисунке 3.5.

Заземленный образец провода помещается в ванну со стальной дробью, которая полностью покрывает испытываемую часть образца (испытываемая длина не менее 125 мм). С аппарата испытания (АИД-90) на металлический плоский электрод подается высокое напряжение (от 3,5 до 5,5 кВ в зависимости от марки провода). Действие электрического поля высокой напряженности в дроби ведет к возникновению поверхностных разрядов, которые действуя на изоляцию испытываемого провода, постепенно снижают электроизоляционные свойства эмали, приводя к появлению дефектов и, как следствие, к ее пробое [64].

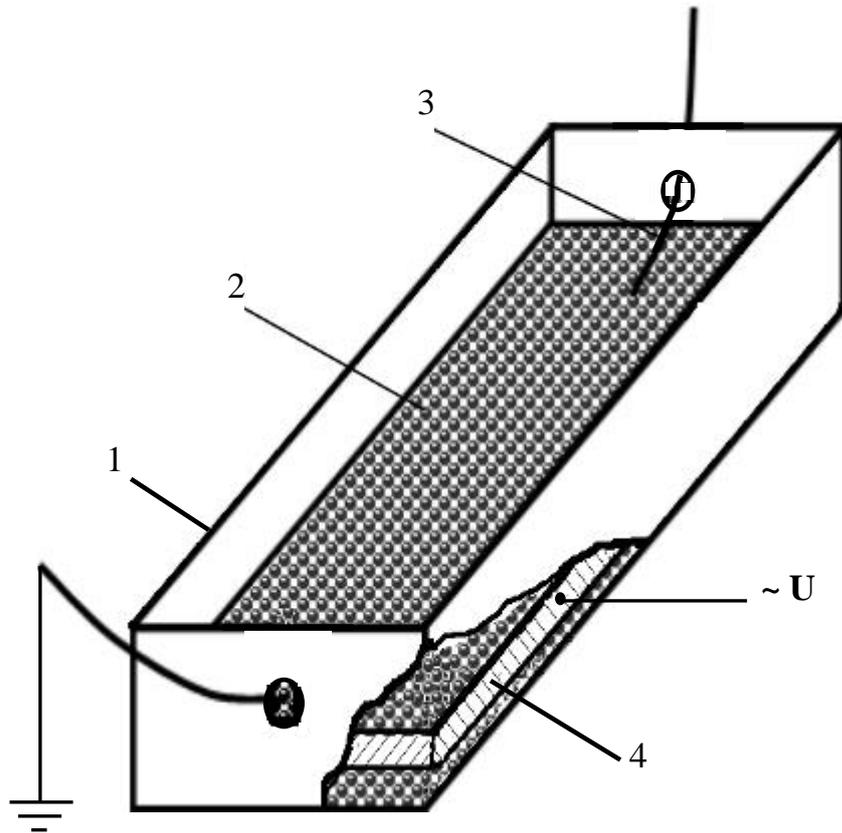


Рисунок 3.4 – Устройство для испытаний изоляции эмалированных проводов:
1) ванна; 2) стальная дробь; 3) образец провода; 4) металлический электрод.

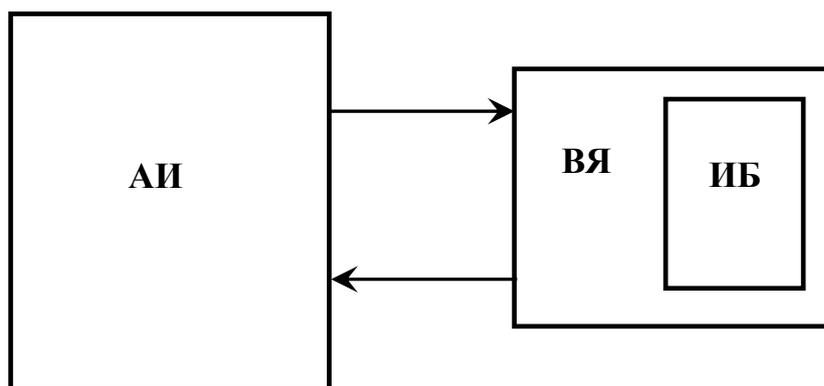


Рисунок 3.5 – Блок-схема установки для определения стойкости эмалированных обмоточных проводов к поверхностным разрядам: АИ – аппарат испытаний; ВЯ - высоковольтная ячейка; ИБ – испытательный блок.

Возникновение поверхностных разрядов возможно при условии, если максимальная напряженность E_{max} превышает критическую напряженность $E_{кр}$ электрического поля в выбранной системе электродов [1,10,61].

Критическая напряженность электрического поля $E_{кр}$ может быть определена по выражению [61]:

$$E_{кр} = 1,65m\delta \left[\frac{0,13}{(\delta R)^{0,38}} \right], \text{ В/м} \quad (3.1)$$

где $m=(0,5 \div 0,9)$ – коэффициент гладкости; $\delta=1$ – относительная плотность воздуха; $R=1$ мм – радиус дроби.

Для предлагаемых условий испытаний в системе электродов «провод-дробь»: $E_{кр} = 1,5 \cdot 10^6$ В/м.

Величина максимальной напряженности электрического поля E_{max} определена путем моделирования с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Полученные результаты (рисунок 3.6) показали: при испытательном напряжении $U_{исп}=4$ кВ величина $E_{max}=4,5 \cdot 10^6$ В/м, что превышает $E_{кр}$ и свидетельствует о наличии поверхностных разрядов во время испытаний образцов провода.

Стойкость изоляции оценивали по времени от момента подачи напряжения до пробоя изоляции испытуемого образца провода.

За результат принимали среднее арифметическое значение времени t_{np} не менее 10 образцов при фиксированном значении испытательного напряжения:

$$t_{np} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{npi}}{n} \quad (3.2)$$

где $\sum_{i=1}^n t_{npi}$ – сумма значений времени до пробоя, n – количество образцов.

Были проведены испытания проводов ПЭТД-180, ПЭЭА-155, ПЭТВ-2, ПЭТ-155, ПЭТ-200-1 и ПЭТД2-К-180 близкого диаметра $0,9 \div 1,05$ мм. Результаты определения стойкости эмалированных проводов к поверхностным разрядам показаны в таблице 3.5.

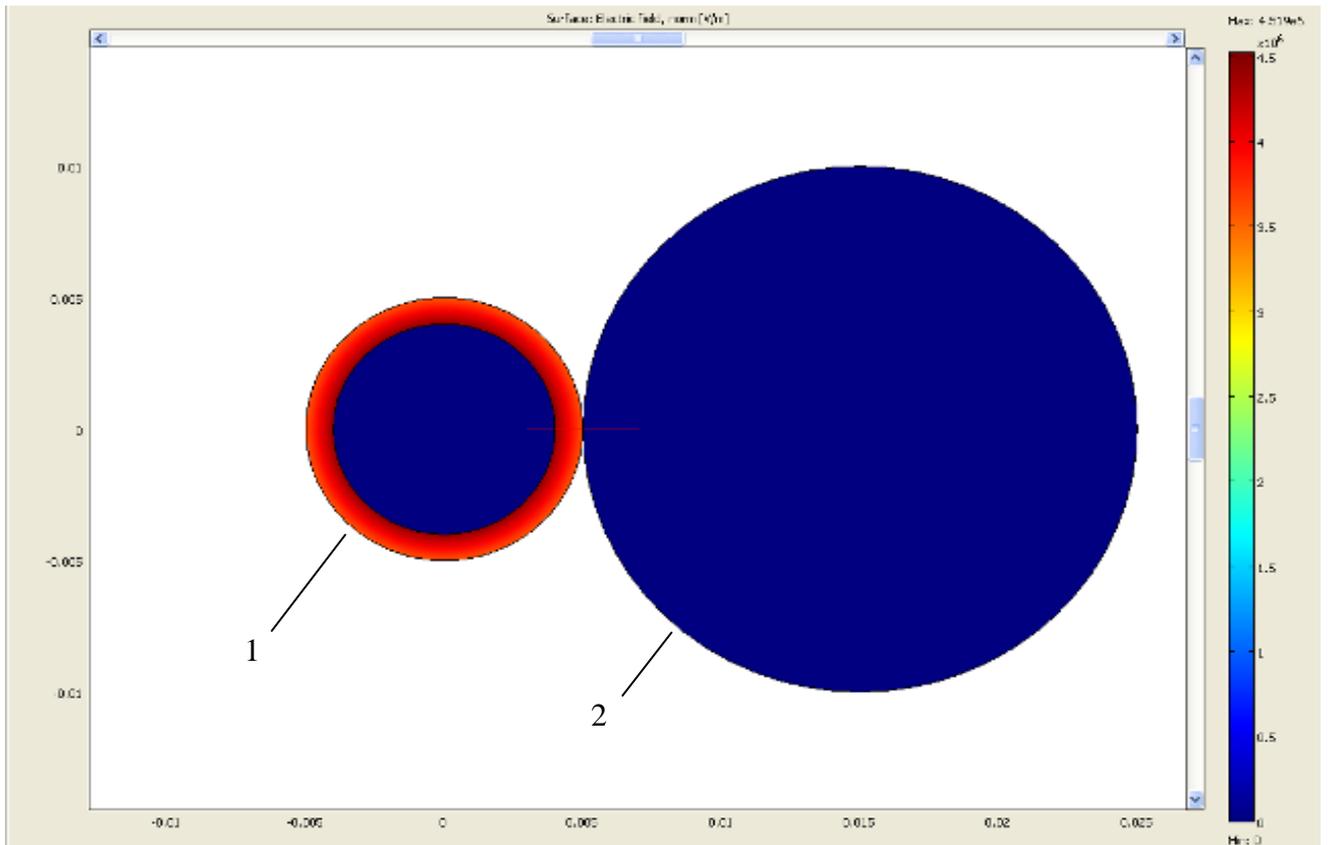


Рисунок 3.6 – Распределение напряженности электрического поля в системе «провод-дробь»: 1) эмалированный провод; 2) дробь.

Таблица 3.5 – Среднее время до пробоя $t_{пр}$ изоляции проводов в системе электродов «провод – дробь».

Марка провода	Испытательное напряжение $U_{исп}$, кВ				
	3,5	4	4,5	5	5,5
ПЭЭА-155	330	120	50	-	-
ПЭТВ-2	-	920	660	300	100
ПЭТ-155	-	2600	820	330	60
ПЭТД-180	-	4000	1750	1140	100
ПЭТД2-К-180	-	5300	2100	1900	450
ПЭТ-200-1	-	1700	900	270	75

Полученные данные наглядно демонстрируют различную степень стойкости эмалированных проводов к электрическим нагрузкам (в порядке убывания): ПЭТД-2-К-180, ПЭТД-180, ПЭТ-155, ПЭТ-200-1, ПЭТВ-2, ПЭЭА-155.

Наибольшим средним временем до пробоя обладает изоляция проводов ПЭТД-180 и ПЭТД2-К-180. Различие в устойчивости к поверхностным разрядам данных эмалированных проводов становится видна при уровне испытательного

напряжения выше 5 кВ, либо после предварительного приложения механических нагрузок на образцы (растяжение образцов, навивание на металлический стержень диаметром, равным двойному диаметру провода) (таблица 3.6) [52].

Таблица 3.6 – Среднее время до пробоя $t_{пр}$ изоляции эмалированных проводов после растяжения (относительное удлинение 5 %).

Марка провода	Испытательное напряжение $U_{исп}$, кВ	
	4	4,5
ПЭТД-180	1981	1271
ПЭТД2-К-180	2691	1714

Результаты наглядно показывают, что при действии поверхностных разрядов провод ПЭТД2-К-180 сохраняет свои свойства на более высоком уровне. Изоляция данного провода представляет собой двухслойную композицию, обеспечивающую необходимую устойчивость к действию электрических разрядов [65].

Проведенные исследования механических и электрических свойств изоляции эмалированных проводов позволяют отметить следующее:

- 1) эффективной характеристикой, отражающей реальную стойкость изоляции к технологическим воздействиям, является дефектность; комплексные испытания образцов по определению дефектности λ эмалевой изоляции обеспечивают всестороннюю качественную и количественную оценку ее стойкости к появлению дефектов;
- 2) испытания в системе электродов «провод-дробь» позволяют качественно оценить стойкость эмалевой изоляции к дефектообразованию при действии поверхностных разрядов.

3.2 Определение «залечиваемости» сквозных дефектов в эмалевой изоляции при пропитке

Тщательный отбор эмалированных проводов устойчивых к воздействию нагрузкам не исключает образование дефектов в процессе изготовления реальных обмоток. Считается, что подобного рода дефекты должны «залечиваться»

(скрываться) при качественной пропитке [35,51,57,60]. В этом случае восстанавливается электрическая прочность поврежденного участка изоляции и возрастает стойкость к эксплуатационным воздействиям. Поэтому очень важно обеспечить максимально полное «залечивание» дефектов пропиточным составом.

Исследование скрытия дефектов при пропитке выявило: «залечиваемость» сквозных повреждений зависит от их вида (точечные, кольцевые, протяженные) и расположения в реальной обмотке [51,60,81]. Наиболее опасными считаются близко расположенные и совпадающие повреждения, которые лежат на смежных, плотно касающихся витках обмотки. В этом случае вероятно возникновение короткого замыкания, связанного с действием искровых разрядов во время коммутаций.

В обмотках электродвигателей, управляемых с помощью преобразователя частоты отмечено резкое увеличение электрических перенапряжений. В ряде случаев наблюдается появление коронных разрядов на поверхности изоляции низковольтной обмотки [103,104,106-112,116]. Несмотря на накопленный опыт, в настоящее время недостаточно информации о том, как сказывается наличие дефектов на развитие процессов пробоя и отказа низковольтной межвитковой изоляции с учетом новых условий эксплуатации.

Оценка скрытия пропиткой сквозных повреждений при воздействии эксплуатационных нагрузок, характерных для частотно-регулируемого привода на базе широтно-импульсной модуляции проводилась на макетных образцах межвитковой изоляции путем определения среднего времени до пробоя.

Образцы представляли собой скрутки из короностойкого провода ПЭТД 2К-180 с рабочей зоной 125 мм, выполненные согласно ГОСТ Р МЭК 60851-5–2008 [28] (рисунок 3.7). Испытывались бездефектные скрутки и с искусственно нанесенным дефектом (в виде кольцевого пореза эмалевой изоляции до жилы провода). С целью отбора бездефектных образцов перед высокочастотными испытаниями каждая скрутка испытывалась повышенным испытательным напряжением, определенного по выражению 2.5, п. 2.6. Скрутки испытывались в сочетании с различными пропиточными составами: лак КО-916К и компаунды КП-50 и КП-

55-5. Образцы дважды пропитывались и подвергались ступенчатой сушке в соответствии с нормативно-технической документацией.

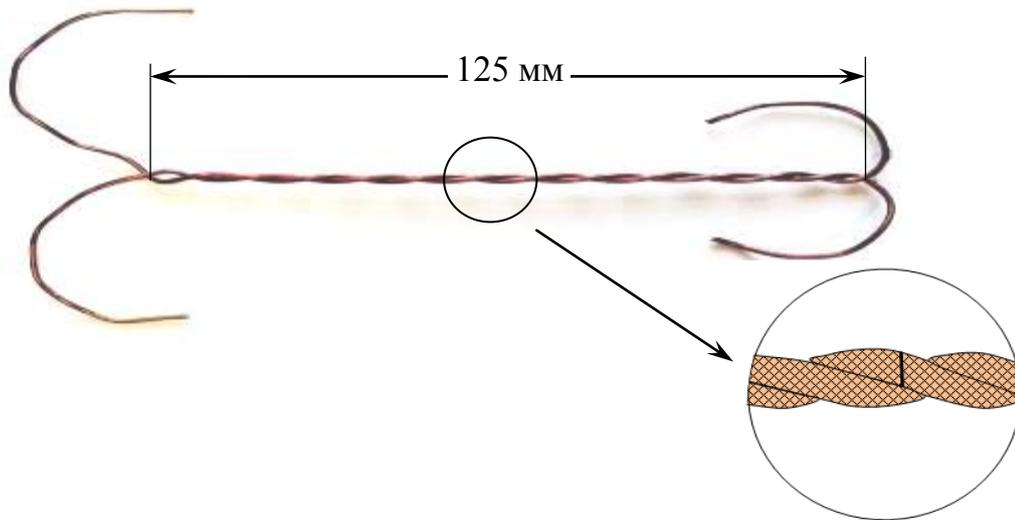


Рисунок 3.7 – Общий вид скруток обмоточного провода с кольцевым дефектом на одном витке.

При проведении испытаний за основу принята методика [113], позволяющая оценить среднее время до пробоя скруток при воздействии эксплуатационных нагрузок, характерных для обмоток электродвигателей частотно-регулируемых приводов на базе широтно-импульсной модуляции. Общая схема проведения испытаний приведена на рисунке 3.8.

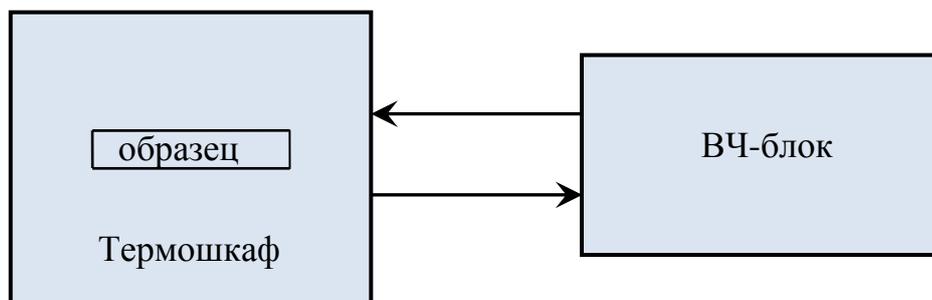


Рисунок 3.8 – Схема проведения испытаний на короностойкость систем «пропиточный состав – эмалированный провод».

Испытуемые образцы помещались в термошкаф, нагретые до температуры, соответствующей классу нагревостойкости провода (180°C). После этого образец испытывался высокочастотным (ВЧ) модулированным напряжением, при этом по всей рабочей поверхности скрутки возникал непрерывный коронный разряд, который в сочетании с температурой адекватно воспроизводил основные эксплуата-

ционные воздействия на межвитковую изоляцию. В качестве критерия оценки принято среднее время до пробоя 30 образцов.

Выявлено, что наличие сквозных дефектов в эмалевой изоляции, даже на одном витке, ведет к резкому снижению среднего времени до пробоя (рисунок 3.9). Коронные разряды, возникающие под действием перенапряжений в местах независимых дефектов, приводят к ускоренному разрушению неповрежденной эмалевой изоляции на втором витке (рисунок 3.10). Практически на всех образцах пробой изоляции происходит в месте дефекта (рисунок 3.11).

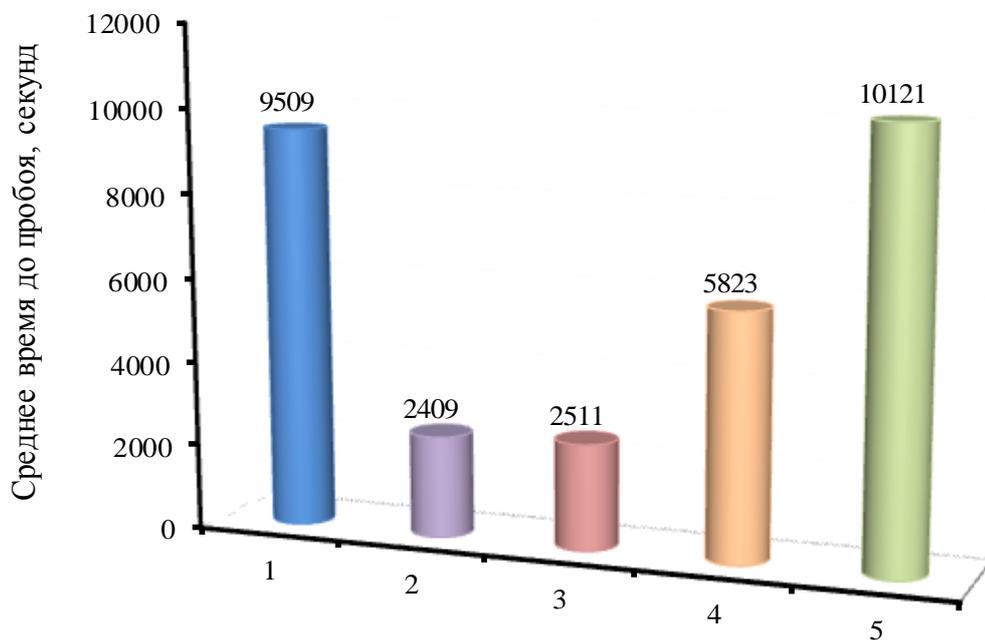


Рисунок 3.9 – Среднее время до пробоя скруток из провода ПЭТД2-К-180 при испытаниях ВЧ-модулированным сигналом: 1 – бездефектные непропитанные образцы; 2 – непропитанные образцы с кольцевым дефектом на одном витке; образцы с кольцевым дефектом на одном витке пропитанные: 3 – лаком КО-916К, 4 – компаундом КП-55-5, 5 – компаундом КП-50.

Применение короностойкого лака КО-916К не обеспечивает хорошей «залечиваемости» дефектов (не смотря на двухкратную пропитку образцов), среднее время до пробоя практически не изменяется по сравнению с дефектным непропитанным образцом (рисунок 3.9).

Заметное повышение среднего времени до пробоя обеспечивается при пропитке компаундами. Пленка отвержденного компаунда обладает меньшей усадкой, большей толщиной, стойкостью к электрическим нагрузкам, что обеспечивает хорошее скрытие повреждений, повышая среднее время до пробоя. Среди ис-

следуемых компаундов хорошее «залечивание» повреждений эмаливой изоляции обеспечивает компаунд КП-50.

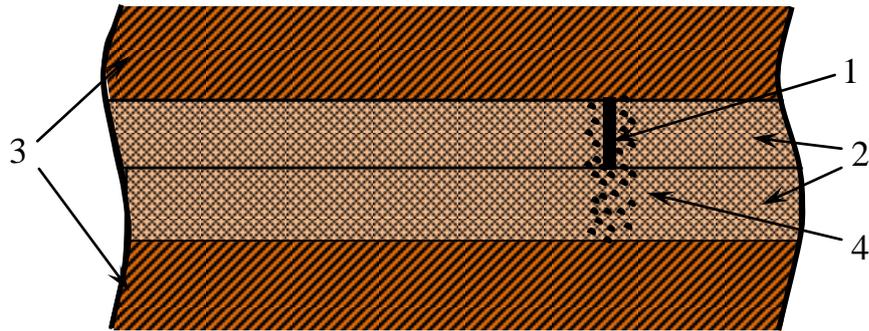


Рисунок 3.10 – Физическая модель отказа элемента низковольтной межвитковой изоляции в обмотке ЧРП: 1) независимый дефект; 2) изоляция провода; 3) токопроводящая жила провода; 4) появление коронных разрядов в месте дефекта.

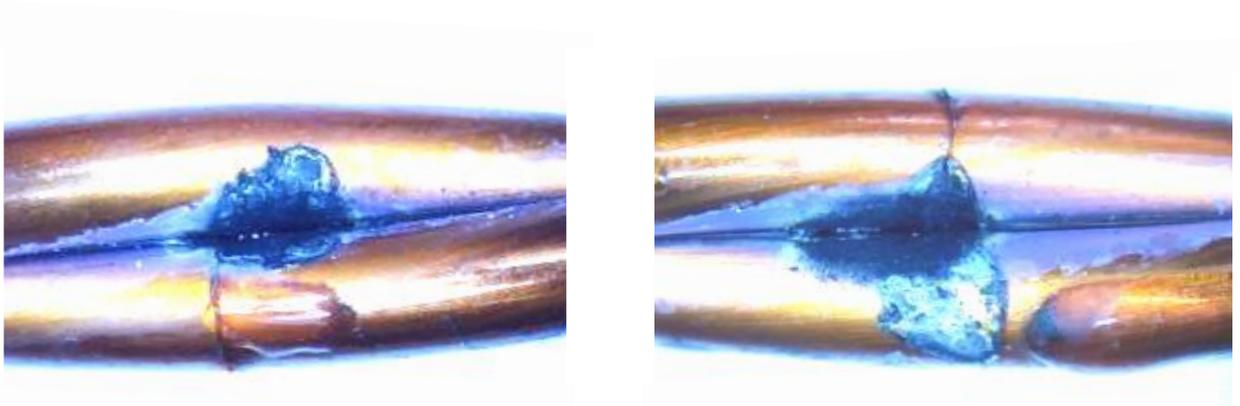


Рисунок 3.11 – Характерный вид места пробоя изоляции макетного образца в месте дефекта.

Качество «залечиваемости» дефектов также оценено по вероятности их возникновения (вероятности вскрытия «залеченного» дефекта) на образце в интервале времени:

$$Q = \frac{N_{\text{деф}}}{\sum_{i=1}^n N_u} \quad (3.3)$$

где $N_{\text{деф}}$ – число образцов, пробитых ВЧ-модулированным напряжением; $\sum_{i=1}^n N_u$ – суммарное число испытанных образцов.

Результаты представлены на рисунке 3.12.

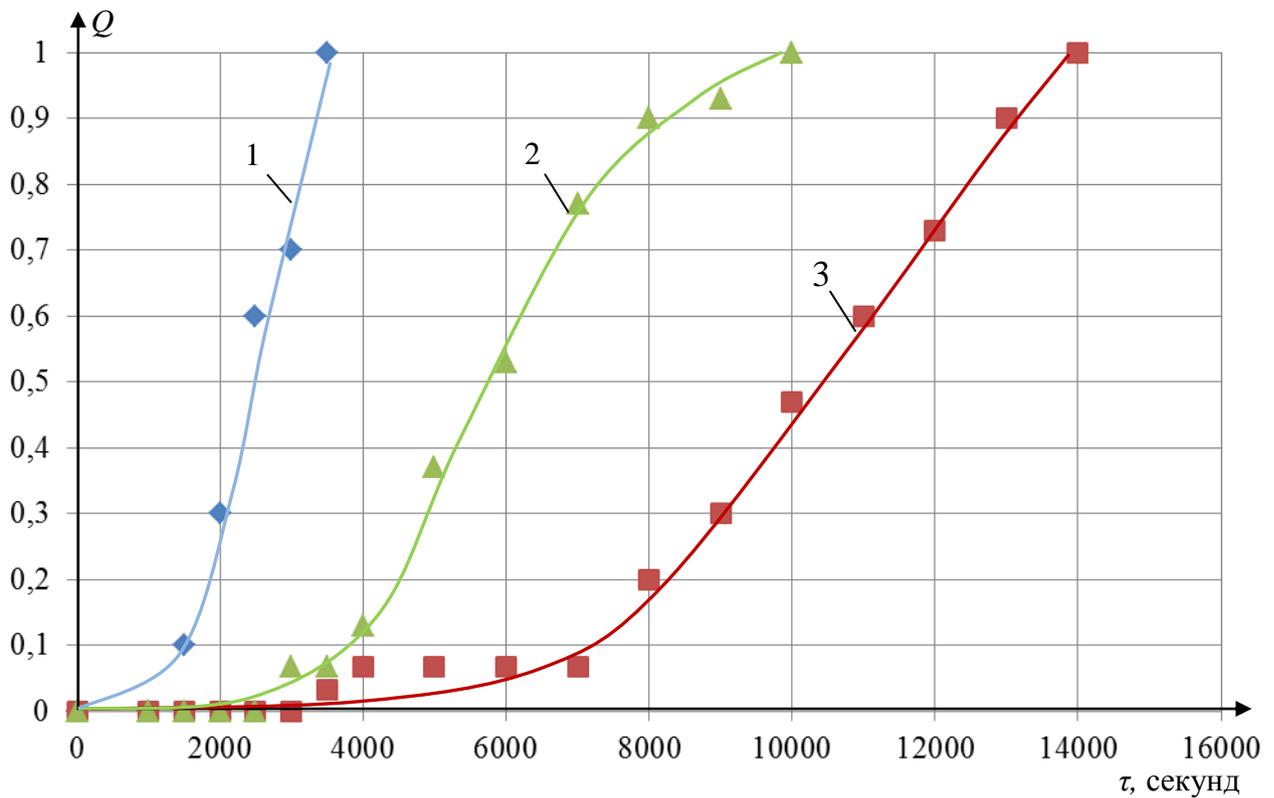


Рисунок 3.12 – Зависимость интегральной вероятности возникновения дефекта на образце (скрутка из провода ПЭТД2-К-180) от времени воздействия ВЧ-модулированным напряжением: 1 – пропиточный лак КО-916К, 2 – пропиточный компаунд КП-55-5, 3 – пропиточный компаунд КП-50.

Как видно из рисунка 3.12, минимальная величина интегральной вероятности Q также наблюдается у партии образцов, пропитанных пропиточным лаком КО-916К.

Применение компаундов обеспечивает лучшее восстановление изоляционного слоя в местах дефектов. Пленка компаунда на основе олигомеров образует диэлектрический барьер, препятствующий разрушению изоляции и возникновению короткого замыкания, что подтверждается минимальной интегральной вероятностью образования дефекта (кривая 3, рисунок 3.12).

Относительная погрешность результатов измерений среднего времени до пробоя оценивалась по коэффициенту Стьюдента с заданной доверительной вероятностью $P=0,95$ [83] и для скруток провода в сочетании с пропиточными компаундами КП-50 и КП-55-5 составила 9,6 % и 10,2 % соответственно; в сочетании с пропиточным лаком КО-916К – 28 %.

Более высокая относительная погрешность результата измерений последней композиции связана с тем, что при пропитке лаком характерна высокая неоднородность свойств и толщины отвержденной пленки (обусловлена испарением растворителя и меньшим объемом лаковой основы).

При жесточенных электротепловых нагрузках на изоляцию обмоток, характерных для широтно-импульсной модуляции, пропиточный состав не всегда обеспечивает необходимого «залечивания» сквозных дефектов в эмалевой изоляции. При наличии в эмалевой изоляции некоторого числа дефектов, предпочтительней пропитку осуществлять электроизоляционными компаундами (например КП-50).

3.3 Исследование влияния адгезии в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» на эксплуатационную дефектность

В процессе эксплуатации дефектообразование в межвитковой изоляции начинается с появления трещин в пропиточном составе, которые впоследствии могут привести к разрыву эмалевой пленки. Вероятность образования сквозных дефектов определяется величиной адгезионного взаимодействия между компонентами системы [11,23,49,50,57]. В случае высокой адгезии произойдет прорастание трещины в эмалевую изоляцию. При условии, что адгезия на границе раздела фаз «пропиточный состав – эмалевая изоляция» не превышает некоторого значения, развитие трещины из одной компоненты в другую может быть остановлено. Таким образом, оптимальная адгезия должна находиться в пределах [57]:

$$A_{\min} \leq A_{\text{опт}} \leq A_{\max}$$

В ряде работ отмечается связь адгезионной прочности и срока службы систем межвитковой изоляции [11,15], однако отсутствуют какие-либо рекомендации по прогнозу эксплуатационной дефектности с учетом адгезионного взаимодействия в системе межвитковой изоляции.

Все существующие методы оценки адгезионной прочности основаны на механическом разрушении взаимодействия полимер – подложка [11,14,47,49,84,93].

Разделение двух адгезионно связанных твердых тел по межфазной плоскости технически провести трудно: величина адгезионной прочности существенно зависит от размеров отрываемых пленок, методов отрыва (скорости, направления силы отрыва) и других факторов. Кроме того, в большинстве случаев результаты дают косвенную информацию о величине адгезии; существующие методы не применимы для системы «пропиточный состав - эмалированный провод» и не позволяют оценить влияние сил взаимодействия между полимерными изоляционными материалами на стойкость системы к разрушению в процессе эксплуатации.

Адгезионная связь между компонентами межвитковой изоляции образуется в процессе пропитки, когда пропиточный состав смачивает поверхность эмалевой изоляции и в результате отверждения образует пленку, связанную по всей поверхности с изоляцией провода силами адгезии [56,87,93]. В этом случае адгезионное взаимодействие можно охарактеризовать обратимой термодинамической работой адгезии W_a (Дж/м², Н/м) – величиной, определяемой физико-химическими характеристиками контактирующих поверхностей, и не зависящей от условий формирования адгезионного соединения [14,17].

Оценка адгезионного взаимодействия между двумя полимерными пленками «пропиточный состав – эмалевая изоляция» возможна путем расчетно-экспериментального метода определения работы адгезии W_a на основе теоретических положений для многослойных пленочных материалов, предложенных в [49].

С позиций термодинамики процесс смачивания связан с самопроизвольным уменьшением свободной энергии системы. Термодинамическая работа адгезии в этом случае может быть представлена как [14,46,47,56]:

$$W_a = \gamma_L + \gamma_S + \gamma_{LS} \quad (3.4)$$

где γ_L – свободная поверхностная энергия адгезива; γ_S – свободная поверхностная энергия субстрата; γ_{LS} – межфазная поверхностная энергия.

Суммарная свободная энергия образуется из вкладов различных межмолекулярных сил, действующих на этой поверхности. Электроизоляционные эмали и пропиточные составы представляют собой полярные диэлектрики. Предполагая, что на поверхности полимерной изоляции выполняются принципы аддитивного и

независимого действия межмолекулярных сил, поверхностную энергию γ можно записать как [14,17]:

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (3.5)$$

где d и p – указывают соответственно на дисперсионную и полярную составляющие, обусловленные образованием водородных связей и дипольным взаимодействием.

Межфазное γ_{LS} натяжение между адгезивом γ_L и субстратом γ_S можно найти по выражению:

$$\gamma_{LS} = \gamma_L + \gamma_S - 2\sqrt{\gamma_L^d \gamma_S^d} - 2\sqrt{\gamma_L^p \gamma_S^p} \quad (3.6)$$

В работах Каган Д.Ф., Гуль В.Е. предложено связать составляющие сил свободной энергии поверхности твердого тела (γ_S^d, γ_S^p) и жидкости (γ_L^d, γ_L^p) со значением $\cos \theta$ - краевого угла смачивания твердой поверхности жидкостью [49]:

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2\left(\sqrt{\gamma_S^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_S^p \gamma_L^p}\right) \quad (3.7)$$

Из уравнения 3.7 можно найти γ_S^d и γ_S^p по данным измерения углов смачивания θ двумя жидкостями конкретных полимеров в стеклообразном состоянии, если значения γ_L^d, γ_L^p для обеих жидкостей известны.

В таблице 3.10 приведены литературные данные полярных и дисперсионных составляющих поверхностных энергий стандартных жидкостей [17,49].

Таблица 3.10 – Значения γ^d, γ^p для различных жидкостей.

Жидкость	$\gamma \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	$\gamma^d \cdot 10^3, \text{ Н/м}$	$\gamma^p \cdot 10^3, \text{ Н/м}$
Глицерин	63,0	37,0	26,0
Вода	73,0	22,0	51,0

Термодинамическую работу адгезии жидкости можно определить по выражению [35,46,87]:

$$W_a = \gamma_L (1 + \cos \theta) \quad (3.8)$$

где γ_L (равна $\sigma_{жсг}$ - поверхностному натяжению жидкости) и краевой угол смачивания θ поддаются непосредственному и достаточно точному измерению.

Смачивающие свойства эталонных жидкостей (использованы вода и глицерин) к поверхности эмалевой изоляции и отвержденного пропиточного состава

определялись путем последовательного гидростатического взвешивания [35] по методике, описанной в п. 2.5.

Образцы представляют собой отрезки эмалированного провода длиной 7 см примерно одного диаметра (около 1 мм) (рисунок 3.13). Торцевая часть образца, погружаемая в жидкость, зачищается и тщательно шлифуется для обеспечения ровной поверхности контакта с жидкостью. Одна партия образцов используется для определения параметров смачивания жидкостей к поверхности эмалевой изоляции. Другая партия после предварительного окунания в пропиточный состав и термообработки использовалась для определения параметров смачивания жидкостей поверхности пленки отвержденного пропиточного состава. За результат принималось среднее арифметическое не менее 100 измерений.



Рисунок 3.13 – Общий вид образцов для определения смачивающих свойств

Путем решения системы из двух уравнений согласно (3.8) были определены значения дисперсионной ($\gamma_{эи}^d$, $\gamma_{нс}^d$) и полярной ($\gamma_{эи}^p$, $\gamma_{нс}^p$) составляющих для отвержденных пропиточных составов и эмалевой изоляции проводов [4,17,49]:

$$\begin{cases} \gamma_{H_2O}(1 + \cos \theta) = 2\left(\sqrt{\gamma_{эи}^d \gamma_{H_2O}^d} + \sqrt{\gamma_{эи}^p \gamma_{H_2O}^p}\right) \\ \gamma_{zl}(1 + \cos \theta) = 2\left(\sqrt{\gamma_{эи}^d \gamma_{zl}^d} + \sqrt{\gamma_{эи}^p \gamma_{zl}^p}\right) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} \gamma_{H_2O}(1 + \cos \theta) = 2\left(\sqrt{\gamma_{нс}^d \gamma_{H_2O}^d} + \sqrt{\gamma_{нс}^p \gamma_{H_2O}^p}\right) \\ \gamma_{zl}(1 + \cos \theta) = 2\left(\sqrt{\gamma_{нс}^d \gamma_{zl}^d} + \sqrt{\gamma_{нс}^p \gamma_{zl}^p}\right) \end{cases} \quad (3.10)$$

Используя выражения 3.5, 3.6 определена суммарная поверхностная энергия компонентов и их межфазной поверхностной энергии γ_{LS} для некоторых сочетаний систем межвитковой изоляции (таблица 2, Приложение 1), с последующим расчетом работы адгезии W_a по выражению 3.4.

Обработка результатов измерений параметров смачивания проводилась согласно [29]. Относительная погрешность результата серии измерений оценивалась по коэффициенту Стьюдента с заданной доверительной вероятностью $P=0,95$ [83] и составила $5\div 7\%$.

Расчетно-экспериментальные данные работы адгезии W_a для некоторых систем «пропиточный состав – эмалированный провод» сопоставлены с литературными и экспериментально полученными величинами скоростей дефектообразования H_g (таблица 3.11). Скорость дефектообразования определялась по методике, описанной в п.2.6.

Таблица 3.11 – Соотношение величин работы адгезии W_a и скоростей дефектообразования H_g в системах межвитковой изоляции.

Система "пропиточный состав – эмалированный провод"	Работа адгезии W_a , 10^{-3} Н/мм	Скорость дефектообразования H_g , 10^{-6} мм ⁻¹ ч ⁻¹
ГФ-95 + ПЭТВ*	0,160	0,18
МЛ-92 + ПЭТВ*	0,137	0,141
КО-916К + ПЭТ-155*	0,116	0,137
КО-916К + ПЭТД-180	0,108	0,011
ПЭ-9153М + ПЭТД-180	0,094	0,0095
ПЭ-9153М + ПЭЭА-155	0,082	0,004
КО-916К + ПЭФД-2-200	0,058	0,0025

*литературные данные скоростей дефектообразования [60,63].

Проанализировав результаты работы, можно сделать следующие выводы:

1. Величина адгезионного взаимодействия в системе «пропиточный состав - эмалированный провод» может быть оценена путем определения работы адгезии W_a с учетом величин поверхностных энергий контактирующих материалов.
2. Обобщение полученных данных работы адгезии W_a с литературными и экспериментальными величинами скоростей дефектообразования H_g в исследуемых системах показали: для систем с большей величиной работы адгезии характерна более высокая скорость дефектообразования. Это связано с повышением вероятности развития сквозного дефекта в системе «пропиточный состав - эмалированный провод», что приводит к снижению надежности полученной композиции. При анализе были приняты некоторые допущения: не учитыва-

лось распределение пропиточного состава в реальной обмотке, внутренние механические напряжения, работа адгезии принималась без учета процесса старения системы межвитковой изоляции.

3.4 Выводы по главе

1. Проведены сравнительные испытания эмалированных проводов по существующим стандартным и оригинальным методикам. Результаты испытаний позволяют утверждать, что используемые критерии не всегда позволяют выявить провода с низкой устойчивостью эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам. Дефектность – наиболее эффективный критерий механической прочности эмалевой изоляции проводов, чувствительной к воздействиям производственного процесса изготовления обмоток.
2. Для проводов, используемых в обмотках электродвигателей, применяемых в частотно-регулируемых приводах на базе широтно-импульсной модуляции, необходимо определять способность эмалевой изоляции выдерживать действие электрических разрядов. Подобная сравнительная оценка обеспечивается при испытаниях в системе электродов «провод-дробь». Критерием служит среднее время до пробоя изоляции провода. Разработанный способ не требует специального дорогостоящего оборудования, малозатратен и легко может быть реализован в условиях производства.
3. Независимые дефекты в межвитковой изоляции могут значительно снизить среднее время до пробоя при воздействии электротепловых нагрузок, характерных при работе электродвигателей в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией питающего напряжения. В этом случае пропиточный состав не всегда обеспечивает необходимое «залечивание» поврежденного участка изоляции. Следовательно, при выборе эмалированных проводов для обмоток двигателей частотно-регулируемого привода следует применять провода с дефектностью эмалевой изоляции

близкой к нулю и пропиточные компаунды, обеспечивающие наибольшую «залечиваемость» сквозных повреждений (например КП-50).

4. Оценка величины адгезионного взаимодействия, определяющего интенсивность процессов дефектообразования в системе «пропиточный состав - эмалированный провод», возможна с помощью расчетно-экспериментального метода, основанного на определении поверхностных энергий компонентов межвитковой изоляции и их межфазной поверхностной энергии.

ГЛАВА 4

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ДЕФЕКТНОСТИ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОБМОТОК

4.1 Определение критериев допустимой дефектности эмалевой изоляции

Со стороны потребителей обмоточных проводов в настоящее время выдвигаются требования по улучшению характеристик эмалевой изоляции [42-45]. В первую очередь обращается внимание на повышение входных контролируемых параметров: пробивного напряжения $U_{пр}$ и числа двойных ходов иглы N до истирания изоляции. Прежде всего, это связано с возможностью образования дефектов по причине недостаточной механической и электрической прочности изоляции, что значительно сокращает срок службы межвитковой изоляции [2,3,5,40,42,43,48,95].

Результаты исследований, представленные в п.3.1, показывают: существующие методы не всегда позволяют адекватно судить о свойствах эмалевой изоляции по всей длине провода, даже, несмотря на количественное увеличение выборки образцов исследуемых проводов в несколько раз. Кроме того применяемые методы не позволяют в полной мере оценить устойчивость к воздействующим эксплуатационным нагрузкам реальных обмоток; так как во многих случаях выявляются лишь образцы с грубыми дефектами, либо обладающие недопустимо низкими электроизоляционными свойствами.

Способность изоляции обмоточных проводов, выдерживать технологические и эксплуатационные нагрузки характеризуется устойчивостью их эмали к дефектообразованию. В связи с этим важно определить начальную дефектность эмалевой изоляции, а также оценить ее устойчивость к появлению новых дефектов в процессе изготовления обмоток.

Результаты исследований, проведенные в п.3.1., позволяют рекомендовать дефектность λ как оптимальную характеристику, объективно и точно отражающую уровень электрических и механических свойств эмалевой изоляции в любых состояниях. Сравнительный анализ по различным критериям, приведенный в таб-

лице 4.1, подтверждают адекватность оценки устойчивости эмалевой изоляции к воздействию нагрузкам по дефектности λ , определенной в электролите.

В настоящее время отсутствует четкая информация по обоснованию предельного значения дефектности. Допустимую границу уровня дефектности λ следует определять с учетом показателей надежности межвитковой изоляции, так как количество дефектов критически влияет на вероятность её отказа.

В работе согласно методике [63] проведена расчетная оценка влияния дефектности на вероятность безотказной работы ряда систем межвитковой изоляции для нескольких габаритов асинхронных двигателей серии АИР (высота оси вращения 71, 90 и 160 мм). Основные исходные данные для расчета приведены в таблице 4.2. Обмоточные данные принимались согласно [68]. Коэффициенты уравнения скорости дефектообразования выбраны с учетом систем изоляции согласно литературным данным (п.1.2, таблица 1.14). Результаты расчетов представлены на рисунках 4.1 – 4.3.

Как следует из полученных результатов при уровне дефектности $\lambda > 0,006 \text{ мм}^{-1}$ вероятность безотказной работы для всех рассмотренных вариантов снижается ниже предельного допустимого уровня: $P_{МВИ} < 0,9$ при времени наработки 20000 часов [24,63]. Это позволяет величину λ равную $0,006 \text{ мм}^{-1}$ принять в качестве предельного уровня дефектности, превышение которого приводит к необратимому уменьшению надежности межвитковой изоляции и всей обмотки в целом.

Таблица 4.1 – Сравнительные данные результатов испытаний эмалевой изоляции проводов по различным критериям

Марка провода	Механическая прочность		Испытание иглой с постоянно увеличивающейся нагрузкой	Электрическая прочность		В состоянии поставки λ_{II}	Определение дефектности λ , мм ⁻¹					
	Число двойных ходов иглы N			Пробивное напряжение $U_{пр}$, кВ	После навивания на стержень согласно п.3.1 λ_{2d}			После выдержки в растворителе $\lambda_{раств}$				
	допустимое	фактическое	допустимое		фактическое		Относительное удлинение образца, %					
					3%	5%	7%	3%	5%	7%		
ПЭЭА-155	12	40	+	2,7	5,2	+	+	-	-	-	-	-
ПЭТ-155	20	80	+	4,4	6,1	+	+	+	+	+	-	-
ПЭТД-180	35	250	+	4,7	6,8	+	+	+	+	+	+	-
ПЭТД2-К-180	35	393	+	4,5	8,3	+	+	+	+	+	+	+

«+» - эмалированный провод прошел испытание (результаты испытаний не превышают допустимых пределов);

«-» - результаты испытаний свидетельствуют о низкой стойкости эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам.

Таблица 4.2 – Исходные данные для расчета вероятности безотказной работы систем межвитковой изоляции

Параметр	Обозначение	Величина
Число фаз обмотки	m_ϕ	3
Число параллельных ветвей обмотки	a_1	1
Число пазов статора	Z_1	24÷36
Число слоев обмотки статора	N_{s1}	1
Диаметр изолированного провода, мм	$d_{из}$	0,92÷1,2
Номинальная толщина диаметральной изоляции провода, мм	Δb_{c1}	0,08
Относительное удлинение провода при изготовлении обмотки, %	α_p	3
Давление окружающей среды, кПа	P	60
Влажность в полости двигателя, %	φ_n	71÷83
Температура в полости двигателя, °С	θ_n	20
Средняя температура обмотки, °С	θ	$T_{кн}^* - 10^\circ\text{C}$
Среднее квадратическое отклонение температуры обмотки, °С	σ_θ	5
Класс нагревостойкости изоляции, °С	θ_0	В, F, H
Коэффициент пропитки	K_{np}	0,5
Максимальное вибрационное ускорение, g	G_B	0,5
Частота включения двигателя	$f_{вкл}$	5÷8
Амплитудное значение номинального фазного напряжения, кВ	U_ϕ	0,311
Среднее значение амплитуды фазных коммутационных перенапряжений, кВ	V_ϕ	0,65
Среднее квадратическое отклонение фазных коммутационных перенапряжений, кВ	$\sigma_{V\phi}$	0,18

*температура класса нагревостойкости.

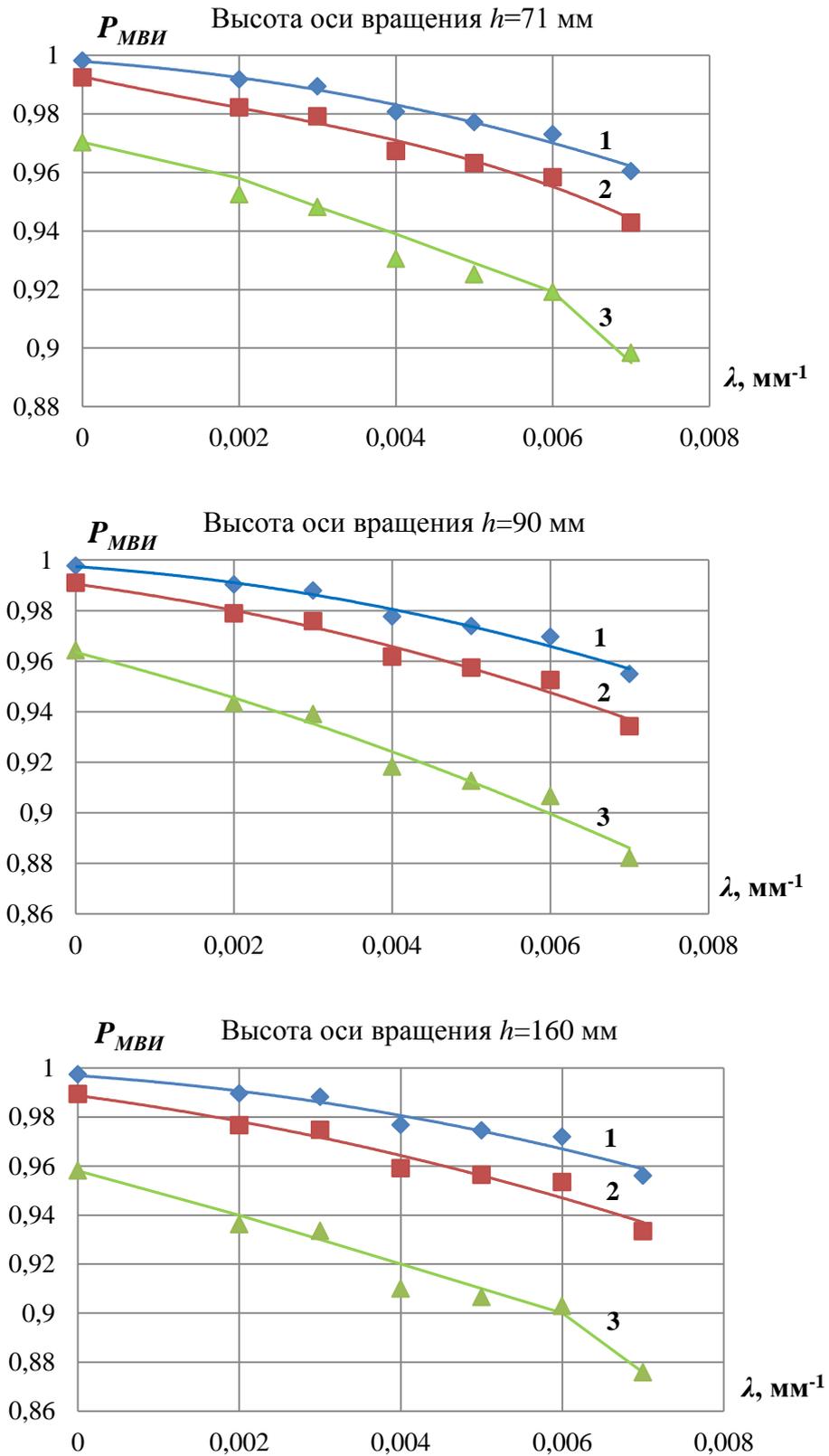


Рисунок 4.1 – Влияние дефектности λ на вероятность безотказной работы межвитковой изоляции $P_{МВИ}$ с учетом времени наработки (система изоляции ПЭТВ – МЛ-92): 1 – 5000 ч; 2 – 10000 ч; 3 – 20000 ч.

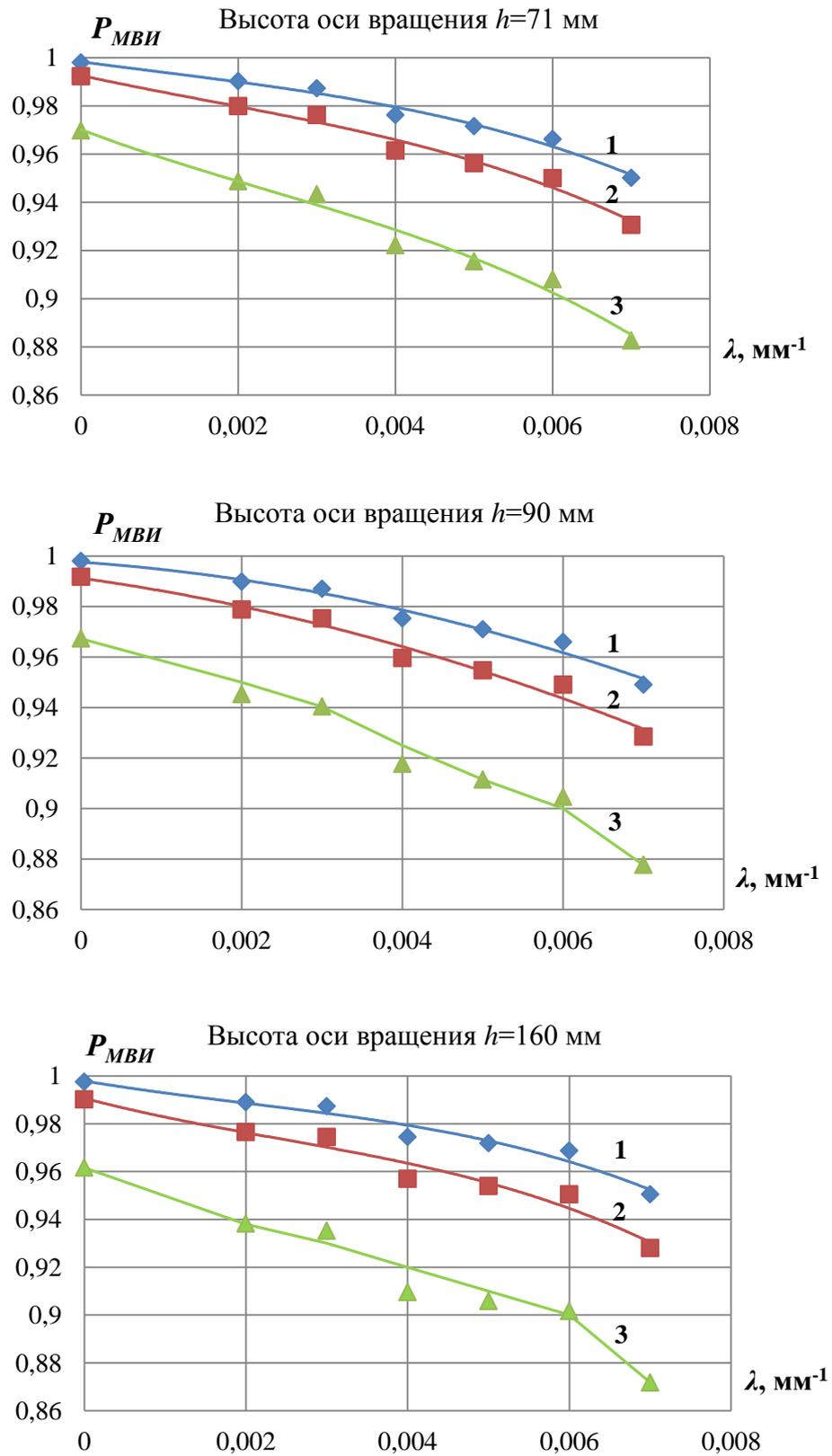


Рисунок 4.2 – Влияние дефектности λ на вероятность безотказной работы межвитковой изоляции P_{MVI} с учетом времени наработки (система изоляции ПЭТ-155 – КО-916К): 1 – 5000 ч; 2 – 10000 ч; 3 – 20000 ч.

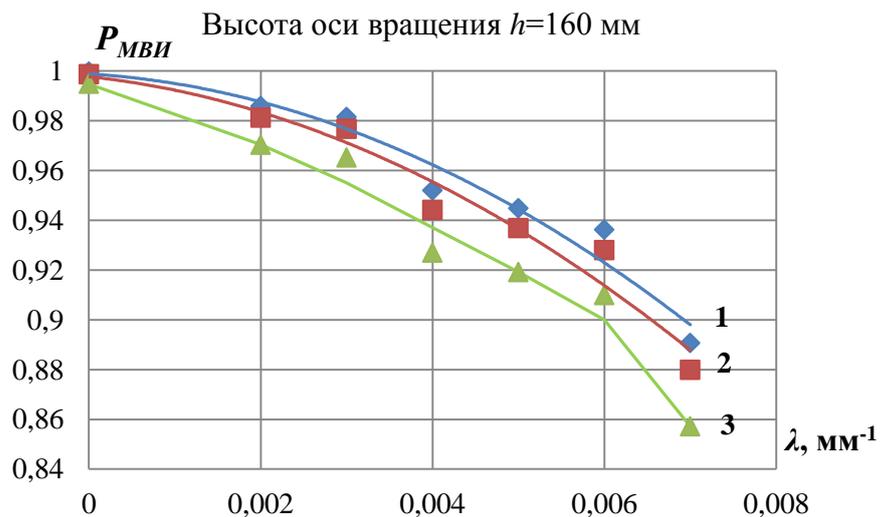
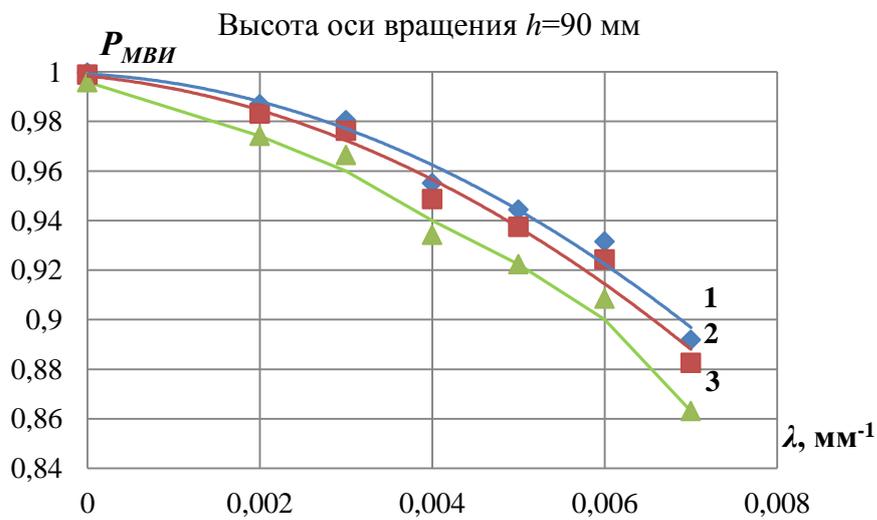
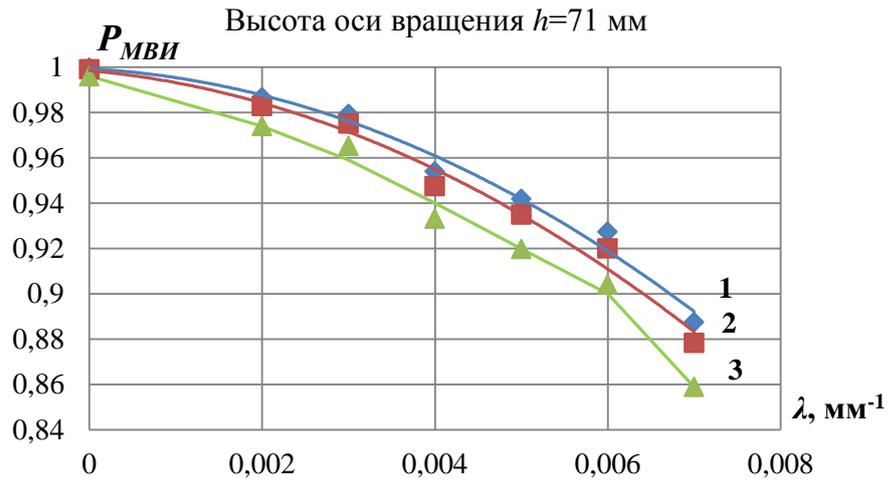


Рисунок 4.3 – Влияние дефектности λ на вероятность безотказной работы межвитковой изоляции $P_{МВИ}$ с учетом времени наработки (система изоляции ПЭТ-180 – КО-916К): 1 – 5000 ч; 2 – 10000 ч; 3 – 20000 ч.

4.2 Разработка рекомендаций по прогнозированию интенсивности процессов дефектообразования в межвитковой изоляции

Как отмечено в гл.1 процессы разрушения межвитковой изоляции зависят от времени и условий эксплуатации и проявляются с разной интенсивностью. Общий вид интенсивности отказов низковольтных асинхронных двигателей (основная причина отказа – межвитковое замыкание обмотки) в период эксплуатации имеет следующий вид (рисунок 4.4) [81].

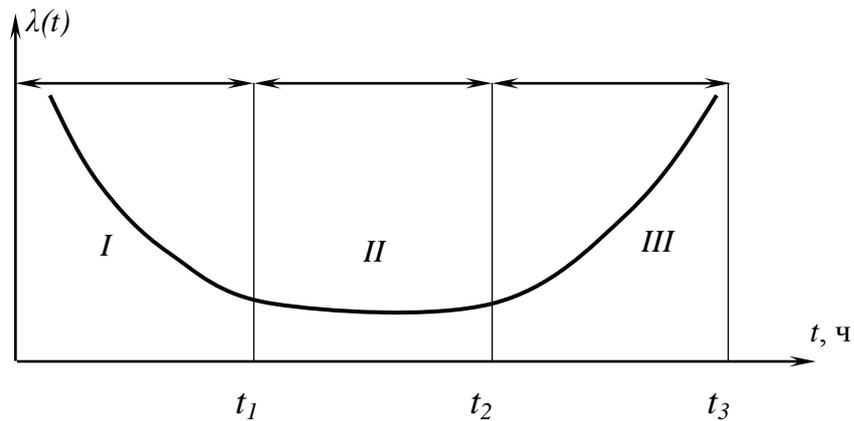


Рисунок 4.4 – Распределение интенсивности отказов асинхронных двигателей: I – период приработки; II – период нормальной эксплуатации; III – период износа.

Период приработки характеризуется высоким числом отказов, которое постепенно снижается. Большинство отказов в этот период происходит из-за повреждения обмоток, прежде всего, ее межвитковой изоляции [16,19,23,24,33,41,51,54,60,70,71,75,81,108]. Как правило, это обусловлено неудовлетворительным качеством изоляции обмоточных проводов и технологией производства электродвигателей.

Для снижения количества отказов в этот период необходимо обеспечить тщательный отбор эмалированных проводов с минимальной дефектностью. Однако это не исключает наличия повреждений при изготовлении реальных обмоток. Кроме того, в изоляции могут присутствовать ослабленные места, размеры которых не превышают толщину эмалевого покрытия: микротрещины, различные структурные нарушения в материале, неоднородности, включения, обусловленные неудовлетворительной технологией изготовления провода, и которые, как правило, не выявляются в процессе контрольных испытаний. В период эксплуата-

ции вероятность появления дефектов в таких ослабленных местах очень высокая. Для «залечивания» повреждений и исключения ослабленных мест обмотка должна подвергаться качественной пропитке.

К началу нормальной эксплуатации интенсивность отказов постепенно снижается [24]. В этот период отказы обусловлены случайными причинами: авариями, недопустимыми перегрузками в условиях эксплуатации и т.д. На этом участке износ изделия практически не сказывается.

Третий участок кривой распределения характеризуется повышенным ростом интенсивности отказов электродвигателей по причине усиления процессов старения и износа изоляции. Интенсивность появления дефектов характеризуется скоростью дефектообразования H_g , определяемая по выражению 1.5, п. 1.3 [63]. Именно приращение дефектности в единицу времени характеризует способность изоляции противостоять внешним нагрузкам.

Скорость дефектообразования H_g достаточно точно может быть установлена путем испытаний систем межвитковой изоляции на физических макетах согласно ОСТ16 0.800.821-88 [63]. К сожалению, применение данного метода сопровождается большими временными и материальными затратами, отличаются трудоемкостью, что сильно ограничивает его применение.

Так как большое влияние на процессы разрушения межвитковой изоляции в период износа оказывает взаимодействие пропиточного состава с эмалевой изоляцией провода и, принимая во внимание результаты, приведенные в п. 3.3, предлагается оценивать интенсивность процессов дефектообразования в межвитковой изоляции с учетом величины работы адгезии в системе.

Исследование корреляционной связи между величиной работы адгезии W_a (переменная x), определенной согласно п.3.3, и скоростью дефектообразования H_g (функция $y=f(x)$) в системах межвитковой изоляции проводилось в соответствии с [96]. Исходные данные для расчета коэффициента корреляции представлены в таблице 4.3.

Ниже приведены вычисления параметров распределения.

Таблица 4.3 – Таблица результатов наблюдений значений x и y .

№	x	y	$x \cdot y$	x^2	y^2
1	0,058	0,0025	0,000145	0,00336	0,000006
2	0,082	0,004	0,000328	0,00672	0,000016
3	0,094	0,0095	0,000893	0,00884	0,00009
4	0,108	0,011	0,00119	0,0117	0,000121
5	0,113	0,137	0,0159	0,0135	0,0188
6	0,137	0,141	0,0193	0,0188	0,0199
7	0,16	0,18	0,0288	0,0256	0,0324
Σ	0,752	0,485	0,0666	0,0884	0,0713

Средние значения x : $\bar{x} = \frac{\sum x}{n} = \frac{0,752}{7} = 0,1074$

где n – число различных значений x , встречающихся в таблице 4.3.

Среднее значение величины y : $\bar{y} = \frac{\sum y}{l} = \frac{0,485}{7} = 0,0692$

где l_1, l_2, \dots, l_n – числа значений y , соответствующих величинам $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$.

Дисперсия величины x : $\sigma_x^2 = \frac{\sum x^2}{n} - \bar{x}^2 = 0,000997$, тогда среднее квадратич-

ное отклонение: $\sigma_x = \sqrt{0,000997} = 0,0316$.

Аналогично: $\sigma_y^2 = \frac{\sum y^2}{l} - \bar{y}^2 = 0,00538$, тогда $\sigma_y = \sqrt{0,00538} = 0,0734$.

Среднее значение исследуемых величин:

$$\mu_{11} = \frac{x \cdot y}{k} - \bar{x} \cdot \bar{y} = \frac{0,0666}{7} - 0,1074 \cdot 0,0692 = 0,002,$$

где k – количество наблюдений.

Коэффициент корреляции: $r = \frac{\mu_{11}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = 0,879$

Средняя ошибка коэффициента корреляции: $\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{k}} = 0,092$

Полученное значение коэффициента корреляции $r \approx 88\%$ по шкале Чеддока свидетельствует о высокой статистической связи между величиной работы адгезии W_a и скоростью дефектообразования H_e [96].

Согласно [32] проведено определение многочленов $P_1(x)$ и $P_2(x)$, приближающих наилучшим образом в среднем функцию $y=f(x)$, заданную таблицей 4.3:

$$P_1(x) = -0,151 + 2,042x \quad (4.1)$$

$$P_2(x) = -0,0964 + 0,9519x + 4,9845x^2 \quad (4.2)$$

Для каждого многочлена $P_1(x)$ и $P_2(x)$ найдена мера отклонения от искомой функции:

$$\sigma = \sum_{i=0}^n [f(x_i) - P_i(x_i)]^2 \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = \sum_{i=1}^7 [y_i - P_1(x_i)]^2 = 0.0086 \quad (4.4)$$

$$\sigma_2 = \sum_{i=1}^7 [y_i - P_2(x_i)]^2 = 0.0078 \quad (4.5)$$

Так как $\sigma_2 < \sigma_1$, то в качестве многочлена, приближающего наилучшим образом в среднем функцию $y=f(x)$, заданную таблицей 4.3, принимается многочлен второй степени $P_2(x)$.

На рисунке 4.5 представлены обобщенные результаты величин скоростей дефектообразования H_g в зависимости от работы адгезии W_a между компонентами межвитковой изоляции.

Для всех рассмотренных систем характерно повышение скорости дефектообразования с увеличением работы адгезии между пропиточным составом и эмалевой изоляцией обмоточного провода. Наибольшая скорость дефектообразования отмечена в системах МЛ-92+ПЭТВ, ГФ-95+ПЭТВ. Для пропиточных лаков МЛ-92 и ГФ-95 характерна большая потеря массы в процессе старения (до 50%) [15,87], что обуславливает рост величины внутренних механических напряжений и, в сочетании с высокой работой адгезии, ускоряет процессы дефектообразования. Пленка кремнийорганического лака КО-916К обладает большей эластичностью за счет сравнительно меньшей усадки и потери массы (10÷15 %) и, как следствие, меньшими внутренними механическими напряжениями. В этом случае определяющую роль играет величина адгезии: чем она выше, тем выше скорость дефектообразования (система КО-916К+ПЭТ-155). И наоборот, минимальная

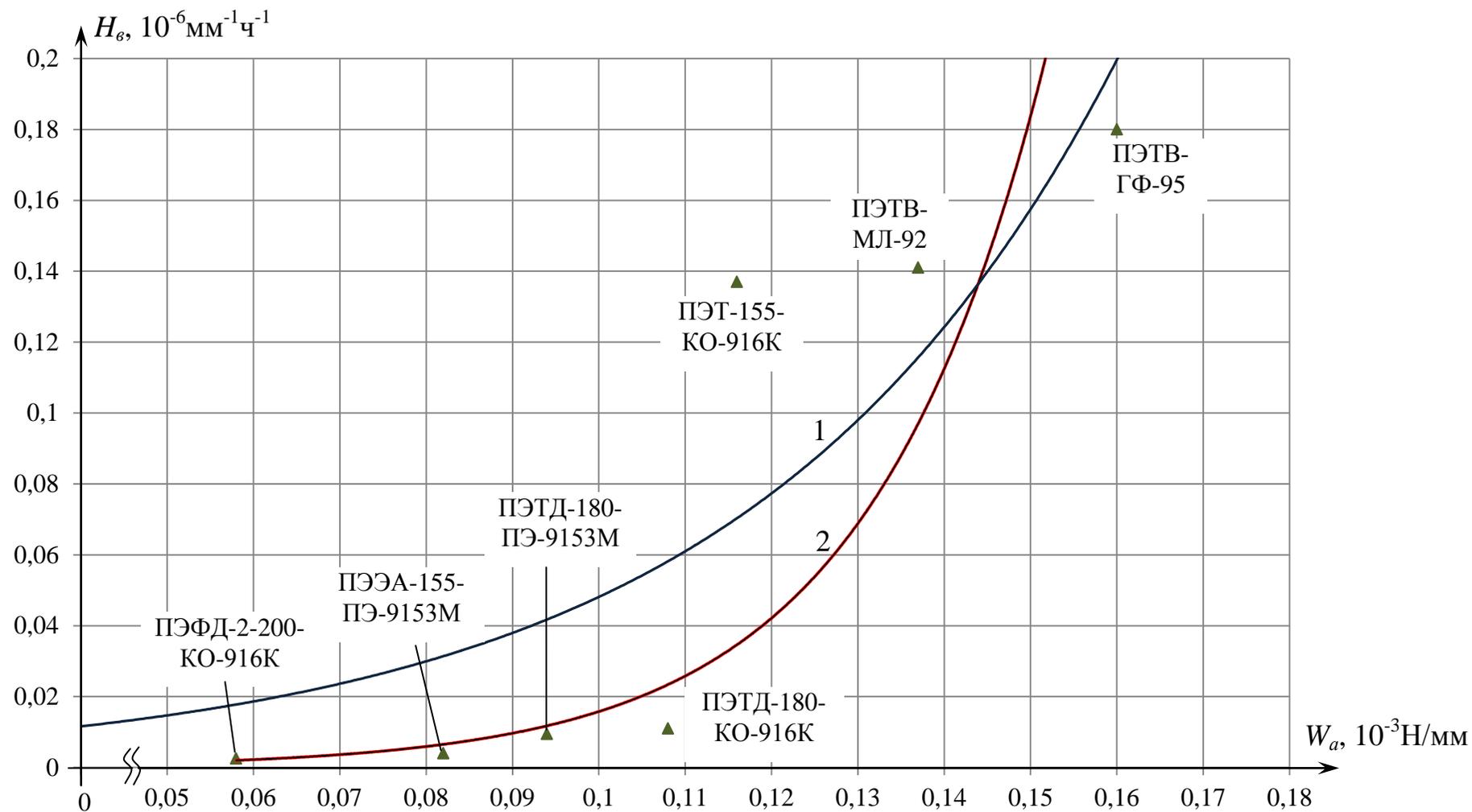


Рисунок 4.5 – Зависимость скорости дефектообразования H_g от работы адгезии W_a в системах межвитковой изоляции: 1 – расчетная кривая (определена по выражению 4.2); 2 – экспериментальная кривая.

интенсивность процессов разрушения отмечена в системах с наименьшей величиной работы адгезии. Разброс в полученных значениях, очевидно, связан с принятым в работе допущениями (п. 3.3): не учитывались распределение пропиточного состава в реальной обмотке, внутренние механические напряжения, а также изменение работы адгезии в процессе старения.

Таким образом, наличие корреляционной связи между работой адгезии и скоростью дефектообразования дает возможность прогнозировать интенсивность появления дефектов в композициях «пропиточный состав – эмалированный провод».

4.3 Разработка мероприятий по обеспечению минимального уровня дефектности межвитковой изоляции на стадии изготовления и в процессе эксплуатации

Обеспечение минимального уровня дефектности межвитковой изоляции возможно только при комплексном подходе, учитывающем оценку наличия дефектов в эмалевой изоляции обмоточного провода в состоянии поставки, возможность возникновения дефектов при технологических воздействиях, а также их появление во время эксплуатации электродвигателя.

Главной причиной образования дефектов в изоляции является недостаточная механическая прочность эмалевого покрытия к технологическим и эксплуатационным факторам. Поэтому очень важно на начальном этапе выявить и исключить провода с низкой стойкостью к вышесказанным нагрузкам.

К сожалению, существующие методы, предусмотренные для оценки качества эмалевой изоляции на входном контроле, не всегда позволяют выявить эмалированные провода с низкой стойкостью изоляции к образованию дефектов. Используемые критерии оценки (пробивное напряжение изоляции эмалированного провода U_{np} и число двойных ходов иглы N стальной иглы до разрушения изоля-

ции) малоинформативны и не позволяют достоверно оценить свойства эмалевой изоляции.

Как отмечено в п.3.1 стойкость эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам наглядно характеризуется дефектностью λ . Очевидно, что определение её допустимого уровня должно проводиться, начиная с момента выбора компонентов обмотки с учетом повреждаемости изоляции во время обмоточно-изолирующих работ и заканчивая прогнозом скорости дефектообразования H_g в процессе эксплуатации.

Определение точного числа дефектов и стойкости изоляции к их образованию рекомендуется проводить, используя критерий:

$$\lambda_{дон} = \lambda_{II} + \lambda_T \leq 0,006 \text{ мм}^{-1} \quad (4.6)$$

Величина $\lambda_{дон}$ может быть определена по методике, описанной в п. 2.4. и п. 3.1. Метод позволяет изначально выявить наличие дефектов в эмалевой изоляции низкого качества или последующий их рост в процессе изготовления обмоток.

В случае, если результаты определения дефектности показали превышение $\lambda > 0,006 \text{ мм}^{-1}$ на любой стадии испытаний (в состоянии поставки; после механических воздействий), то рекомендуется выбрать другую партию или марку провода.

Помимо этого, для соответствия требований потребителей, касающихся повышения стойкости эмалевой изоляции проводов к действию повышенных электрических нагрузок, предлагается проведение дополнительных испытаний в системе электродов «провод-дробь».

Этот вид испытаний необходимо проводить для эмалированных проводов, применяющихся в обмотках двигателей частотно-регулируемого привода на базе широтно-импульсной модуляции. Критерием устойчивости эмалевой изоляции к действию электрических разрядов служит среднее время до пробоя, определяемое по выражению 3.2.

Интервал изменения испытательного напряжения промышленной частоты $U_{исп}$ может быть принят 4÷5,5 кВ. Минимальное значение при этом обеспечивает

появление поверхностных разрядов по поверхности провода, а максимальное – недостаточно для пробоя неповрежденной, бездефектной эмалевой изоляции.

В качестве эталона предлагается принять среднее время до пробоя эмалированного провода короностойкого исполнения ПЭТД2-К-180. В настоящее время это единственная выпускаемая в РФ марка провода с изоляцией, устойчивой к электрическим нагрузкам, характерным для систем частотно регулируемых электроприводов [65]. Как показали исследования для данного провода среднее время до пробоя при $U_{ucn}=4$ кВ составило $t_{np} \geq 85$ минут, при $U_{ucn}=5,5$ кВ составило $t_{np} \geq 7$ минут.

Повреждаемость межвитковой изоляции в процессе эксплуатации, зависит не только от свойств изоляции эмалированных проводов и качества пропитки, но и их оптимального сочетания (совместимости) с электроизоляционными пропиточными материалами [57,79]. В ряде случаев рост трещин, возникающих в пропиточном составе, может привести к разрыву эмалевой изоляции. Характер разрушения определяется величиной адгезии между компонентами системы. Как показано в п.4.2 прогноз интенсивности процессов разрушения систем «пропиточный состав – эмалированный провод» возможно осуществлять определяя величину работы адгезии W_a .

Оценка работы адгезии W_a может быть выполнена согласно расчетно-экспериментальной методике, описанной в п. 3.3, путем расчета свободных поверхностных энергий пропиточного состава γ_L , эмалевой изоляции провода γ_S и их межфазной поверхностной энергии γ_{LS} (уравнение 3.4 – 3.6).

Согласно установленной корреляционной связи и используя выражение 4.2, определяется прогнозируемое значение скорости дефектообразования исследуемой системы межвитковой изоляции.

Предлагаемый подход прост и имеет сравнительно малые продолжительность и трудоемкость при проведении работ. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования величины скорости дефектообразования H_e в композициях «пропиточный состав - эмалированный провод».

Общая последовательность проведения мероприятий по снижению уровня дефектности межвитковой изоляции в процессе изготовления и во время эксплуатации представлена в виде блок-схемы на рисунке 4.6.

4.4 Выводы по главе

1. Определен критерий допустимой дефектности $\lambda_{доп} \leq 0,006 \text{ мм}^{-1}$ при которой обеспечивается необходимый уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции.
2. Разработаны рекомендации по определению устойчивости изоляции эмалированных проводов к действию поверхностных разрядов.
3. Установлена корреляционная взаимосвязь интенсивности процессов дефектообразования в межвитковой изоляции с величиной адгезии в системе, что позволяет прогнозировать уровень её скорости дефектообразования H_g .
4. Предложен комплекс мероприятий по снижению уровня дефектности межвитковой изоляции во время изготовления и в процессе эксплуатации.



Рисунок 4.6 – Блок-схема проведения мероприятий по обеспечению минимального уровня дефектности λ межвитковой изоляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным итогом проведенной работы является разработка рекомендаций по снижению дефектности низковольтной межвитковой изоляции, в основу которых положено определение критериев допустимой дефектности эмалированных проводов и установление корреляционной зависимости работы адгезии и скорости дефектообразования.

Научные и практические результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть сформулированы следующим образом.

1. Уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции $P_{МВИ} \geq 0,9$ при наработке 20000 часов обеспечивается при дефектности эмалевой изоляции не более $0,006 \text{ мм}^{-1}$.
2. Оценка устойчивости эмалевой изоляции к действию поверхностных разрядов, необходимой для обмоток электродвигателей, работающих в составе частотно-регулируемого привода с широтно-импульсной модуляцией напряжения, может быть оценена в системе «провод-дробь» (Патент на изобретение №2491565 от 27.08.13). Проведенные исследования показали, что наибольшее среднее время до пробоя отмечено у провода ПЭТД2-К-180.
3. Выявлено критическое влияние несовпадающих дефектов на среднее время до пробоя и отказ низковольтной межвитковой изоляции при действии электрических нагрузок, обусловленных широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения. В этом случае рекомендуется применять только короностойкие бездефектные провода и пропитку предпочтительно осуществлять пропиточными составами без растворителей.
4. В работе впервые предложен метод расчетно-экспериментальной оценки работы адгезии в системе межвитковой изоляции, основанный на определении поверхностных энергий пленок эмалевой изоляции и пропиточного состава, а также их межфазной энергии.

5. Установлена и математически описана статистическая связь между величиной работы адгезии и скоростью дефектообразования межвитковой изоляции в процессе эксплуатации.
6. Сформулированы рекомендации, позволяющие проводить экспресс-прогнозирование интенсивности процессов дефектообразования в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» в зависимости от величины работы адгезии.
7. Результаты работы внедрены на предприятиях г. Томска (см. Приложение 2).

Перспективы дальнейшей разработки темы: полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований возможности получения рекомендаций по снижению дефектности систем изоляции обмоток низковольтных электрических машин постоянного тока.

Список использованных источников

1. Александров, Г.Н. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, В.Е. Кизеветтер. – Л.: «Энергия», 1969. – 240 с.
2. Андрианов, А.В. Пробивное напряжение как критерий годности обмоточных проводов / А.В. Андрианов, В.К. Андрианов, Е.В. Быков // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – с. 17-20.
3. Андрианов, А.В. О статистике точечных повреждений проводов и витковых замыканиях обмоток / А.В. Андрианов, В.К. Андрианов, Е.В. Быков // Кабели и провода. – 2013. – № 5(342). – с. 28-31.
4. Андрианов, В.К. Исследование свойств электрической изоляции тончайших эмалированных проводов в условиях воздействия механических напряжений и повышенных температур / В.К. Андрианов, В.Т. Пивненко // Кабели и провода. – 2001. – № 2. – с. 11-13.
5. Андрианов, В.К. К оценке стойкости к истиранию изоляции обмоточных проводов / В.К. Андрианов, О.Б. Бураков, Е.В. Быков // Кабели и провода. – 2008. – № 5. – с. 26-29.
6. Андрианов, В.К. Состояние производства и научно-технические аспекты развития обмоточных проводов в России / В.К. Андрианов, Е.Б. Васильев // Кабели и провода. – 2014. – № 5(348). – с. 3-6.
7. Аникеенко, В.М. Обмоточные провода: учебное пособие / В.М. Аникеенко, А.В. Петров. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 163 с.
8. Антонов, М.В. Технология производства электрических машин: учебник для вузов по спец. «Электромеханика» / М.В. Антонов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.
9. Астахин, В.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна / В.В. Астахин, В.В. Трезвов, И.В. Суханова. – М.: Химия, 1986. – 157 с.
10. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларио-

- нов, Ю.С. Пинталь; под ред. В.П. Ларионова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464 с.
11. Басин, В.Е. Адгезионная прочность / В.Е. Басин. – М.: Химия, 1981. – 208с.
 12. Белассел, М. Влияние типа обмотки на перенапряжения в асинхронных двигателях, работающих от частотных преобразователей / М. Белассел / Электротехника. – 2013. – № 8. – с. 30-33.
 13. Белассел, М. Волновые параметры и межвитковые перенапряжения в многовитковой насыпной обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя / М. Белассел, В.Я. Беспалов // Электротехника. – 2008. – № 7. – с. 14-17.
 14. Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – М.: Химия, 1969. – 316 с.
 15. Бернштейн, Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения / Л.М. Бернштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 376 с.
 16. Бесперстов, П.П. Исследование дефектообразования в изоляции обмоток асинхронных двигателей при их изготовлении: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Бесперстов Петр Павлович. – Томск, 1975г. – 179 с.
 17. Богданова, Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов: учебное пособие / Ю.Г. Богданова. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – 68 с.
 18. Ваксер, Н.М. Изоляция электрических машин. Учебное пособие / Н.М. Ваксер. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1985. – 83 с.
 19. Воробьев, В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004. – 56 с.
 20. Вэрэш, А.Г. Исследование и обеспечение показателей качества при изготовлении асинхронных двигателе: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Вэрэш Александр Генрихович. – Томск, 1974г. – 257 с.

21. Галушко, А.И. Внутренние напряжения в герметизирующих компаундах радиоэлектронной аппаратуры / А.И. Галушко. – М.: Изд-во «Советское радио», 1974. – 104 с.
22. Галушко, А.И. Исследование совместимости пропиточных материалов с эмалированными проводами в местах повреждения эмали / А.И. Галушко, Н.А. Этъемез // Электротехническая промышленность. Серия «Кабельная техника». – 1983. – № 8 (222). – с. 11-12.
23. Галушко, А.И. Надежность изоляции электрических машин / А.И. Галушко, И.С. Максимова, Р.Г. Оснач. – М.: Энергия, 1979. – 175 с.
24. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин / О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская. – М.: Академия, 2010. – 288 с.
25. ГОСТ 13526-79 Лаки и эмали электроизоляционные. Методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 31 с.
26. ГОСТ 14340.10 – 69. Провода эмалированные круглые. Методы испытания механической прочности изоляции на истирание. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 6 с.
27. ГОСТ Р МЭК 60851-3–2002. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 3. Механические свойства. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 26 с.
28. ГОСТ Р МЭК 60851-5–2008. Провода обмоточные. Методы испытаний. Часть 5. Электрические свойства. – М.: Стандартиформ, 2008. – 17 с.
29. Гришин, В.К. Статистические методы анализа и планирования экспериментов / В.К. Гришин. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 128 с.
30. Грунвальд, А.А. Испытание стойкости эмалированных проводов к действию пропиточных составов и растворителей / А.А. Грунвальд, И.М. Майофис, Н.П. Полякова, В.Р. Сианка // Электротехническая промышленность. Серия «Кабельная техника». – 1976. – вып.1. – с. 13-15.

31. Гусенков, А.П. Методы и средства обеспечения надежности машин: прочность, долговечность, диагностика / А.П. Гусенков, Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука. – 1993. – 237 с.
32. Гутер, Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
33. Деревянко, В.И. Выбор испытательных напряжений при контроле витковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Деревянко Владимир Иванович. – Томск, 1981г. – 194 с.
34. Деревянко, В.И. К методу определения дефектности обмоточных эмальпроводов, применяемых в низковольтном электротехническом оборудовании / В.И. Деревянко, Ю.П. Похолков // Томск: Известия ТПУ. – 1974. – том 282. – с. 56-60.
35. Дудкин, А.Н. Разработка методов оценки режимов пропитки обмоток асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Дудкин Анатолий Николаевич. – Томск, 1980г. – 208 с.
36. Дудкин, А.Н. Электротехническое материаловедение: учебное пособие / А.Н. Дудкин, В.С. Ким. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 199 с.
37. Дудкин А.Н. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках / А.Н. Дудкин, В.С. Ким, С.С. Марьин // Томск: Известия ТПУ. – 2005. – том 308. № 7. – с. 171-174.
38. Дудкин, А.Н. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // Томск: Известия ТПУ. – 2015. – том 326. № 11. – с. 83-89.
39. Дудкин, А.Н. Обеспечение качества пропитки обмоток мехатронных систем / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // В мире научных открытий. – 2015. – №8 (68). – с. 52-65.

40. Елагина, В.И. Метод определения числа точечных повреждений круглых эмалированных проводов / В.И. Елагина, Д.К. Рудаков, С.В. Соболев // Электротехническая промышленность. – 1983. – № 8 (222). – с. 13-14.
41. Ермолин, Н.П. Надежность электрических машин / Н.П. Ермолин, И.П. Жерихин // Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
42. Зеленецкий, Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода / Ю.А. Зеленецкий // Кабели и провода. – 2013. – № 5(342). – с. 19-23.
43. Зеленецкий, Ю.А. Перспективы совершенствования электротехнических изделий / Ю.А. Зеленецкий // Кабели и провода. – 2008. – № 5(312). – с. 21-22.
44. Зеленецкий, Ю.А. Современные тенденции в производстве эмалированных проводов / Ю.А. Зеленецкий // Кабели и провода. – 2005. – № 6(295). – с. 6-9.
45. Зеленецкий, Ю.А. Повышение энергоэффективности асинхронных электродвигателей путем применения эмалированных проводов, изготовленных по современной технологии / Ю.А. Зеленецкий, А.С. Кобелев // Кабели и провода. – 2015. – №4(353). – с. 15-20.
46. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
47. Зимон, А.Д. Адгезия пленок и покрытий / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1977. – 352 с.
48. Золотарев, В.М. Исследование корреляции электрических и механических параметров двойной изоляции эмальпроводов / В.М. Золотарев, Ю.А. Анто-нец, А.Г. Гурин, Л.А. Щебенюк, О.В. Голик // Электротехника и электромеханика. Харьков: Национальный технический университет «ХПИ». – 2005. – №2. – с. 78-80.
49. Каган, Д.Ф. Многослойные и комбинированные пленочные материалы / Д.Ф. Каган, В.Е. Гуль, Л.Д. Самарина. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

50. Кан, К.Н. Механическая прочность эпоксидной изоляции / К.Н. Кан, А.Ф. Николаевич, В.М. Шанников. – Л.: Энергия, 1973. – 152 с.
51. Кириллов, Ю.А. Обеспечение надежности электрической изоляции асинхронных двигателей на стадии проектирования и изготовления: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Кириллов Юрий Алексеевич. – Томск, 1990г. – 233 с.
52. Коробцов, А.А. Применение эмалированных проводов в обмотках асинхронных двигателей с частотным управлением / А.А. Коробцов, А.П. Леонов, Ю.П. Похолков, Е.Ю. Солдатенко, И.А. Кочетков // Кабели и провода. – 2013. – № 3(340). – с. 16-18.
53. Коровкин, А.В. Статистическое исследование свойств эмальпроводов с разной толщиной полиэфиримидной изоляции применительно к электрическим машинам: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Коровкин Андрей Венедиктович. – Москва, 2001 г. – 225 с.
54. Кузнецов, Н.Л. Надежность электрических машин: учебное пособие / Н.Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
55. Куклева, Л.Е. Влияние теплового старения на образование дефектов в изоляции эмальпроводов / Л.Е. Куклева, Ю.П. Похолков, В.М. Шамшур // Томск: Известия ТПУ. – 1974. – том 282. – с. 52-54.
56. Леонов, А.П. Определение работы адгезии в системе межвитковой изоляции [Электронный ресурс] / А.П. Леонов, А.С. Супуева // Интернет – журнал «Науковедение». – 2013. – № 3. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/24tvn313.pdf> (дата обращения 29.02.2016 г.).
57. Леонов, А.П. Разработка методов оценки совместимости пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02 / Леонов Андрей Петрович. – Томск, 2003. – 127 с.
58. Марьин, С.С. Методы оценки долговечности низковольтной межвитковой изоляции / С.С. Марьин, С.Н. Шуликин, И.Н. Шуликин // Томск: Известия ТПУ. – 2011. – том 348, № 4. – с. 144-148.

59. Матялис, А.П. Исследование долговечности изоляции обмоток низковольтных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Матялис Альфонсас Петро. – Томск, 1972г. – 188 с.
60. Матялис, А.П. Изоляция электрических машин: учебное пособие по курсовому проектированию / А.П. Матялис. – Томск: Изд-во ТПИ, 1985. – 95 с.
61. Меркулов, В.И. Математическое моделирование в электроизоляционных конструкциях: учебное пособие / В.И. Меркулов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 152 с.
62. Мещанов, Г.И. Развитие производства эмалированных проводов в России / Г.И. Мещанов, И.Б. Пешков, В.Т. Пивненко // Кабели и провода. – 2006. – № 3(298). – с. 25-28.
63. ОСТ16 0.800.821-88. Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1кВт до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно - экспериментальные методы расчета.
64. Пат. 2491565 Российская федерация, МПК G01R31/12. Способ определения стойкости изоляции эмалированных проводов к поверхностным разрядам / Леонов А.П., Коробцов А.А., Супуева А.С.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU). – № 2012109972/28; заявлен 14.03.2012; опубл. 27.08.2013 Бюл. № 24.
65. Пат. 80267 Российская федерация, МПК H01B7/00. Короностойкий обмоточный провод / Андрианов В.К., Пешков И.Б., Мещанов Г.И., Бураков О.Б.; заявитель и патентообладатель: Открытое Акционерное Общество Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности (ВНИИКП) (RU). – № 2008133291/22; заявлен 14.08.2008; опубл. 27.01.2009 Бюл. № 3.
66. Пахомов, А.И. Методы и средства диагностики изоляции асинхронных двигателей сельскохозяйственного производства на основе частичных раз-

- рядов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Пахомов Александр Иванович. – Краснодар, 2008. – 33с.
67. Пешков, И.Б. Обмоточные провода / И.Б. Пешков. – М.: Энергоиздат, 1995. – 415 с.
68. Петриков, Л.В. Асинхронные электродвигатели. Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация. Справочник / Л. В. Петриков, Г. Н. Корначенко. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 496 с.: ил.
69. Полковниченко, Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей / Д.В. Полковниченко // ISBN 966-593-254-3. Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – №1, с. 59-62.
70. Похолков, Ю.П. Влияние обмоточно-изолирующих работ и качества изоляции на надежность обмоток электрических машин: дис. ... канд. техн. наук / Похолков Юрий Петрович. – Томск, 1966г. – 244 с.
71. Похолков, Ю.П. Надежность изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей / Похолков Ю.П. // Томск: Известия ТПУ. – 1972. – том 242. – с. 207-212.
72. Похолков, Ю.П. Пробой изоляции электрических машин при одновременном действии переменного и емкостного напряжений / Ю.П. Похолков, П.П. Бесперстов, Ю.Г. Гладких // Известия ТПУ. – 1974. – том 282. – с. 44-47.
73. Похолков, Ю.П. Исследование коммутационных перенапряжений в обмотках асинхронных электродвигателей / Ю.П. Похолков, П.П. Бесперстов // Томск: Известия ТПУ. – 1972. – том 242. – с. 213-215.
74. Похолков, Ю.П. Исследование совместного влияния температуры и вибрации на дефектность витковой изоляции асинхронных двигателей / Ю.П. Похолков, П.П. Бесперстов, В.С. Ключев, В.В. Пыхтин // Томск: Известия ТПУ. – 1974. – том 282. – с. 48-51.
75. Похолков, Ю.П. Исследование влияния технологического процесса изготовления обмоток на дефектность витковой изоляции асинхронных двига-

- телей / Ю.П. Похолков, П.П. Бесперстов, В.В. Пыхтин // Томск: Известия ТПУ. – 1975. – том 222. – с. 52-65.
76. Похолков, Ю.П. Влияние пропитывающего состава на надежность витковой изоляции асинхронных электродвигателей / Ю.П. Похолков, В.И. Дервянко // Томск: Известия ТПУ. – 1974. – том 282. – с. 61-64.
77. Похолков, Ю.П. Разработка основ проектирования и технологии производства систем изоляции низковольтных обмоток электрооборудования: отчет о НИР / Ю.П. Похолков, А.Н. Дудкин, А.П. Матялис, А.В. Петров. – Томск: ТПУ, 1999. – 58 с.
78. Похолков, Ю.П. Изоляция обмоток низковольтных асинхронных двигателей в условиях применения системы частотного управления / Ю.П. Похолков, А.П. Леонов, А.А. Коробцов // Электричество. – 2012. – №6. – с. 52-54.
79. Похолков, Ю.П. К вопросу о совместимости пропиточных составов и эмалированных проводов / Ю.П. Похолков, А.П. Леонов, И.Н. Шуликин // Электротехника. – 2009. – № 7. – с. 30-33.
80. Похолков, Ю.П. Исследование дефектности витковой и корпусной изоляции насыпных обмоток асинхронных электродвигателей / Ю.П. Похолков, Э.К. Стрельбицкий, А.С. Гитман, О.П. Муравлев // Томск: Известия ТПУ. – 1967. – том 162. – с. 34-38.
81. Пыхтин, В.В. Исследование влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на надежность обмоток асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Пыхтин Виктор Васильевич. – Томск, 1976. – 221с.
82. Пыхтин, В.В. Процесс образования сквозных дефектов в пленочной полимерной изоляции обмоток асинхронных двигателей при тепловых и механических нагрузках / В.В. Пыхтин // Электротехника. – 2006. – № 3. – с. 48-52.
83. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Л.: Энергия, 1978. – 262с., ил.

84. Санжаровский, А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий / А.Т. Санжаровский. – М.: Наука, 1974. – 154 с.
85. Сидельников, Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации / Л.Г. Сидельников, Д.О. Афанасьев // Пермь: Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – с. 129-137.
86. Смирнов, Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий / Г.В. Смирнов. – Томск: Изд-во Томского Университета, 1990г. – 192 с.
87. Справочник по электротехническим материалам / Под редакцией Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386с.:ил.
88. Труханов, В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
89. ТУ 16.К71-001-87 Провод алюминиевый эмалированный с температурным индексом 155.
90. ТУ 16.К71-160-92 Провод медный круглый эмалированный с температурным индексом 155.
91. ТУ 16-705.264-82 Провода медные круглые с двухслойной изоляцией.
92. ТУ 16.К71-410-2009 Провода медные круглые, эмалированные, короностойкие, с двухслойной изоляцией, с температурным индексом 180.
93. Фрейдин, А.С. Свойства и расчет адгезионных соединений / А.С. Фрейдин, Р.А. Турусов. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
94. Хомутов, С.О. Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов / С.О. Хомутов, Е.В. Кобозев // Барнаул: Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2006. – № 2. – с. 4-8.
95. Щебенюк, Л.А. Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируруемую дефектность изоляции эмальпровода / Л.А. Ще-

- бенюк, С.А. Антонец // ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 59(1032). – с. 188-194.
96. Щиголев, Б.М. Математическая обработка наблюдения / Б.М. Щиголев. – М.: Наука, 1969. – 344 с.
97. Электроизоляционные компаунды без растворителей. Пропиточные компаунды. [Электронный ресурс] / ЗАО «ДЕЛЬТАПЛАСТ». Режим доступа: <http://www.deltaplast.ru/kat/kompaund.htm> (дата обращения 25.04.2015).
98. Ямансарин, И.И. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей в условиях горно-обогатительного комбината: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Ямансарин Ильдар Ильдусович. – Самара, 2012. – 20 с.
99. Gupta, B. Risk in surge testing of turn insulation in windings of rotating machines / B. Gupta // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – 2003. – p. 459-462.
100. Bellomo, J. P. The effect of pulsed voltages on dielectric material properties / J.P. Bellomo, P. Castelan, T. Lebey // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1999. – V. 6. – № 2. – p. 20-26.
101. Bohm, F.R. A new generation of wire enamel for the production of magnet wires with outstanding corona resistance / F.R. Bohm, K. Nagel, H. Schindler // Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference. – 2003. – p. 109-113.
102. Bonnett, A. H. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors / A.H. Bonnett, G.C. Soukup // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – p. 921-937.
103. Chapman, M. Insulation systems for rotating low-voltage machines / M. Chapman, N. Frost, R. Bruetsch // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – 2008. – p. 257-260.
104. Hwang, D. Accessing the insulation characteristics for stator windings of low-voltage induction motors for adjustable-speed drive applications / D. Hwang,

- K. Lee, Y. Kim, I. Lee, T. Lim, D. Kim // IEEE Industry Application Conference. – 2003. – V. 1. – p. 432-438.
105. Fabiani, D. Aging acceleration of insulating materials for electrical machine windings supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges / D. Fabiani, G.C. Montanari, A. Contin // IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. – 2001. – p. 283-286.
106. Fenger, M. Motor winding problems caused by inverter drives / M. Fenger, S.R. Campbell, J. Pedersen // IEEE Industry Applications Magazine. – 2003. – V.9. – № 4. – p. 22-31.
107. Frost, N. Considerations for rotating low-voltage machine insulation designs / N. Frost, M. Chapman, R. Bruetsch // IEEE Insulation. – 2008. – p. 571-574.
108. Grubic, S. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems / S. Grubic, J.M. Aller, B. Lu, T.G. Habetler // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – V. 55. – № 12. – p. 4127-4134.
109. Halpern, E.H. Interaction of varnish with magnet wire enamel / E.H. Halpern // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1967. – V. 2. – №3. – p. 141-145.
110. Kaufhold, M. Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors / M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck, M. Eberhardt // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2000. – V. 47. – № 2. – p. 396-402.
111. Kaufhold, M. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters / M. Kaufhold // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 1996. – V. 12. – № 5. – p. 9-6.
112. Lahoud, N. Electrical aging of the insulation of low voltage machines: model definition and test with the design of experiments / N. Lahoud, J. Faucher,

- D. Malec, P. Maussion // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – V. 60.
113. Leonov, A.P. Estimation of winding insulation resistance to the corona discharges / A.P. Leonov, V.V. Redko, E.Yu. Soldatenko // OP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – p. 1-5.
114. Melfi, M. Effect of surge voltage risetime on the insulation of low voltage machines fed by PWM converters / M. Melfi, A.M.J. Sung, S. Bell, G.L. Skibinski // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – V. 1. – p. 239-246.
115. Schemmel, F. Reliability and statistical lifetime-prognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems / F. Schemmel, K. Bauer, M. Kaufhold // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2009. – V. 25. – № 4. – p. 6-13.
116. Stone, G.C. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives / G.C. Stone, I.M. Culbert, B.A. Lloyd // IEEE Cement Industry Technical Conference Record. – 2007. – p. 187-192.

Таблица 1 – Результаты испытаний по определению пробивного напряжения изоляции проводов

Марка провода	Номинальный диаметр проволоки, мм	Нагрузка, прикладываемая к скручиваемой паре провода, Н	Число скруток на длине 125 мм	Номер испытания, $U_{исп}=10$ кВ										Среднее значение	Не менее*, кВ
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
ПЭТ-200-1	1,400	27,00	6	8,0	6,0	5,5	9,0	6,0	8,5	7,0	5,6	5,8	7,0	6,8	5,3
ПЭТ-155	0,830	13,50	8	6,5	6,0	7,5	6,0	6,5	7,0	5,0	5,0	5,5	6,4	6,1	4,4
ПЭТВ-2	0,900	13,50	8	9,0	8,5	7,5	8,0	8,5	7,0	7,5	9,0	8,5	8,5	8,2	5,1
ПЭТД-180	1,18	27,00	6	6,0	6,0	7,5	6,0	6,7	8,3	6,0	6,0	8,5	7,0	6,8	4,7
ПЭТД2-К-180	1,0	27,00	6	9,0	8,5	10,0	9,0	7,5	7,0	8,5	8,0	7,0	8,5	8,3	4,5
ПЭЭА-155	1,25	27,00	6	4,5	5,5	5,0	4,0	3,5	5,0	7,0	6,5	6,0	5,0	5,2	2,7

* согласно Техническим условиям на эмалированные провода

Таблица 2 – Расчетные значения дисперсионной γ^d и полярной γ^p составляющих компонентов систем «пропиточный состав – эмалированный провод» и их суммарных поверхностных энергий γ

Компонент межвитковой изоляции		$\gamma^d, \cdot 10^{-3}$ Н/мм	$\gamma^p, \cdot 10^{-3}$ Н/мм	$\gamma, \cdot 10^{-3}$ Н/мм
Провод	ПЭТВ	0,000042	0,093276	0,093318
	ПЭТ-155	0,001511	0,053514	0,055025
	ПЭЭА-155	0,007262	0,013313	0,040396
	ПЭТД-180	0,00094	0,04604	0,04698
	ПЭТД2-К-180	0,0150	0,0190	0,0340
	ПЭФД-2-200	0,010824	0,02344	0,034265
Пропиточный состав	ГФ-95	0,000151	0,069022	0,069173
	МЛ-92	0,000502	0,050369	0,050871
	ПЭ-9153М	0,000458	0,046487	0,046946
	КП-50	0,01981	0,016917	0,18898
	КП-55-5	0,0120	0,1590	0,0171
	КО-916	0,001375	0,060415	0,06179



Акт о использовании результатов работы

Авторы: Леонов А.П., Шуликин И.Н., Супуева А.С.

В рамках договора о сотрудничестве кафедры «Электромеханические комплексы и материалы» Томского политехнического университета совместно с ЗАО «Сибкабель» г.Томск проводит работы по повышению надежности электрической изоляции кабельно-проводниковой продукции.

В ходе исследования скоростей дефектообразования различных систем «эмалированный провод – пропиточный состав» отмечена низкая дефектность и малая скорость дефектообразования для композиции провод ПЭЭА-155 и пропиточный состав ПЭ-9153М. Полученные данные характеризует способность данной системы выдерживать длительное воздействие повышенных температур, обеспечивая необходимый уровень надежности при температурах до класса нагревостойкости Н включительно.

Полученные результаты переданы в технологической отдел ЗАО «Сибкабель» г.Томск и будут использованы при разработке новых рекомендаций по применению провода марки ПЭЭА-155.

Главный технолог

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'И.А. Кочетков'.

И.А. Кочетков



Утверждаю

Генеральный директор

АО «Сибкабель»

А.И. Кочетков

14 февраля 2016г.

АКТ**об использовании результатов работы**

Авторы работы: Леонов А.П., Супуева А.С., Чарков Д.И., Солдатенко Е.Ю.

В рамках сотрудничества между Томским политехническим университетом и АО «Сибкабель» на кафедре «Электротехнические комплексы и материалы» проводятся работы по исследованию надежности эмалированных проводов.

В ходе проведения исследований стойкости эмалированных проводов к электротепловым нагрузкам, характерным для систем частотного управления установлено:

- максимальное среднее время до пробоя системы «пропиточный состав – эмалированный провод» отмечено только у скруток из провода ПЭТД2-К-180. Это позволяет рекомендовать данную марку провода для изготовления обмоток асинхронных двигателей, применяемых в частотно-регулируемом приводе, для обеспечения необходимого уровня надежности;

- наибольшее среднее время до пробоя, характеризующее максимальную стойкость к эксплуатационным нагрузкам, обеспечивается при сочетании провода ПЭТД2-К-180 и пропиточного компаунда КП-50;

- для изготовления обмоток двигателей частотно-регулируемого привода следует применять провода с дефектностью, стремящейся к нулю (как, например, у провода ПЭТД2-К-180), т.к. наличие дефекта даже на одном витке резко снижает среднее время до пробоя.

Результаты исследований переданы в отдел главного технолога и используются для разработки рекомендаций по применению эмалированных проводов короностойкого исполнения.

Научный руководитель
работ, к.т.н., доцент

Леонов А.П.

Начальник
эмальпроизводства

Дзюбань Г.Н.

Главный технолог

Кочетков И.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Генеральный директор
 ОАО «Томский электромеханический
 завод им. В.В.Вахрушева»
 Пушкарев И.И.
 2016г.



АКТ

о реализации научных положений и выводов кандидатской диссертации
 Супуевой А.С. на тему: «Снижение дефектности межвитковой изоляции обмоток
 низковольтных электродвигателей»

В результате выполнения диссертационной работы Супуевой А.С. разработаны рекомендации по применению обмоточных проводов в обмотках асинхронных электродвигателей, управляемых с помощью преобразователей частоты. Установлено, что для эмалированных проводов, применяемых в данных системах, необходимым видом испытаний является оценка устойчивости эмалевой изоляции к образованию дефектов под действием электрических разрядов.

Супуевой А.С. разработан способ, позволяющий оценить стойкость изоляции эмалированных проводов к поверхностным разрядам путем определения среднего времени до пробоя при выдержке образцов в системе электродов «провод-дробь». Рекомендуемая величина испытательного напряжения составляет 4÷5,5 кВ. В качестве критерия оценки предложено принять среднее время до пробоя эмалированного провода короностойкого исполнения ПЭТД2-К-180 ($t_{пр} \geq 85$ минут при $U_{исп} = 4$ кВ; $t_{пр} \geq 7$ минут при $U_{исп} = 5,5$ кВ).

Полученные результаты переданы в конструкторский и технологический отделы ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева» и будут использованы при определении свойств изоляции обмоточных проводов.

Заместитель директора по технике
 и управлению качеством


 Големгрейн В.В.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2491565

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ
ЭМАЛИРОВАННЫХ ПРОВОДОВ К ПОВЕРХНОСТНЫМ
РАЗРЯДАМ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012109972

Приоритет изобретения **14 марта 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 августа 2013 г.**

Срок действия патента истекает **14 марта 2032 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



Автор(ы): *Леонев Андрей Петрович (RU), Коробцов Алексей Александрович (RU), Супуева Аделя Сагынбековна (RU)*