

На правах рукописи

МАРЬИН СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ НИЗ-
КОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальность: 05.09.02 - Электротехнические материалы и изделия.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук.

Томск - 2007

Работа выполнена на кафедре "Электроизоляционная и кабельная техника"
Томского политехнического университета

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор

Похолков Юрий Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

старший научный сотрудник

Кабышев Александр Васильевич

кандидат технических наук,

профессор

Константинов Геннадий Григорьевич

Ведущая организация:

СКБ "Сибэлектромотор", г. Томск

Защита состоится 22.03.2007 года в 16⁰⁰ часов в аудитории 312 на заседании диссертационного совета К 212.696.02 в Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 21.02.2007 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук



М.А. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Высокая надежность электротехнических устройств является необходимым условием эффективной работы различных автоматизированных систем, комплексов и оборудования, работающих в различных отраслях промышленности.

Основной причиной выхода из строя большинства низковольтных электрических машин, является отказ системы изоляции обмоток.

Наиболее подробно вопрос надежности изоляции электрических машин изучен в работах Похолкова Ю.П., Галушко А.И., Оснач Р.Г. и их учеников. Этими авторами показано, что наиболее слабым элементом системы изоляции низковольтных электрических машин является витковая изоляция. Выход из строя витковой изоляции обусловлен наличием в ней сквозных дефектов в пропиточном составе и эмалевом слое обмоточного провода, причем частота их появления возрастает по мере физического износа системы под действием эксплуатационных факторов. Следовательно, рост интенсивности отказов витковой изоляции обусловлен появлением в ней в процессе старения дефектов, типа сквозных трещин, проходящих через пропиточный состав и два слоя эмальизоляции обмоточного провода двух соприкасающихся витков.

Похолковым Ю.П. с сотрудниками разработана методика оценки показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей, которая получила статус отраслевого стандарта [ОСТ16.0.800.821-88]. Однако, данный метод весьма трудоемок. Действительно его практическое использование требует выполнения большого объема экспериментов для оценки параметров уравнения надежности.

Поэтому задача разработки эффективного экспресс – метода определения долговечности низковольтной изоляции является актуальной.

В связи с этим представляет определенный интерес идея о взаимосвязи электрической и механической долговечности изоляции низковольтных машин. Действительно, проращение сквозной трещины в межвитковой системе изоляции очень быстро приводит к ее отказу.

В этом плане следует отметить работы Похолкова Ю.П. и Пыхтина В.В., в которых получены предварительные результаты об ответственности трещинообразования в диэлектрике за потерю электрической прочности изоляции.

Таким образом, открывается возможность создать методику оценки долговечности электрической полимерной изоляции, основанной на теории проращения сквозных трещин. Наиболее подходящей, в этом плане, является термофлуктуационная теория прочности полимеров, разработанная Журковым С.Н. с учениками. Разработка этой идеи и составляет сущность настоящей диссертации.

Цель исследования: на основе изучения взаимосвязи процессов образования трещин в полимерных материалах с их рабочим ресурсом разработать методику расчета долговечности системы межвитковой изоляции низковольтных электрических машин, удобную для практического использования.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. На основании анализа литературных данных выявить факторы, влияющие на выход из строя межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

2. Изучить влияние вязкости пропиточных составов на дефектообразование в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

3. Установить взаимосвязь между внутренними механическими напряжениями, дефектностью и долговечностью изоляции электрических машин.

4. На основании теории механической прочности полимеров по Журкову и полученных в работе результатов, разработать методику определения долговечности системы межвитковой изоляции, удобную для практического применения.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны пропиточные составы марок МЛ-92 и КО-916К, а также обмоточные провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155 и ПЭТМ-180. Образцы для измерения внутренних механических напряжений, возникающих в пленках пропиточного состава, представляли собой консольно закрепленные пластины из стали марки 1Х18Н9Т. Образцы для оценки дефектности межвитковой изоляции представляли собой макеты, изготовленные из 50-ти попарно связанных отрезков обмоточного провода, пропитанных методом погружения пропиточными составами с различной величиной условной вязкости. Определение внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточном составе, проводилось с помощью консольного метода. Дефектообразование на макетах изучалось методом непосредственного осмотра и с помощью высоковольтных испытаний. Для проведения статистической обработки полученных результатов были использованы математические методы обработки данных в прикладном статистическом пакете Statgraphics for Windows 95/98/2000/NT. Для проверки значимости полученных результатов был применен непараметрический метод Т-критерий Уилкоксона.

Научная новизна работы.

1. Установлено влияние вязкости пропиточных составов МЛ-92 и КО-916к на уровень внутренних механических напряжений в системах низковольтной межвитковой изоляции: при увеличении вязкости пропиточных составов увеличивается уровень внутренних механических напряжений.

2. Для различных систем низковольтной межвитковой изоляции электрических машин установлена общая закономерность: с увеличением условной вязкости пропиточного состава ускоряются процессы дефектообразования в диэлектрических материалах.

3. Напряжение пробоя различных типов низковольтной межвитковой изоляции электрических машин уменьшается с ростом скорости дефектообразования. Этот результат рассматривается как общий закон взаимосвязи механической и электрической стойкости для данного вида электроизоляционных систем.

4. На основе термофлуктуационной теории прочности полимеров разработана экспресс-методика определения долговечности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин. Реализация предлагаемой методики

в производственных условиях не требует больших трудовых и материальных затрат.

5. Для создания межвитковой изоляции электрических машин с высоким рабочим ресурсом, предлагается применять в технологическом процессе низкие скорости охлаждения пропиточного состава.

Практическая ценность. Предложенная методика расчета долговечности межвитковой изоляции низковольтных электрических машинах в процессе их эксплуатации позволяет без проведения большого объема экспериментальных работ планировать срок службы изделия. Разработанные рекомендации по режимам термообработки пленки пропиточного состава позволяют в достаточной степени повысить надежность обмотки электрической машины. Результаты работы внедрены на предприятиях электротехнической промышленности г. Томска (ЗАО «Сибкабель» и ООО «Сибирская электротехническая компания») и используются для оценки надежности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

На защиту выносятся следующие **положения**:

1. С ростом внутренних механических напряжений интенсивность появления дефектов в различных системах межвитковой изоляции увеличивается по линейному закону.

2. Изменение вязкости пропиточного состава в оптимальных границах является эффективным технологическим приемом создания изоляционных систем низковольтных электрических машин с повышенным ресурсом работы.

3. Рабочий ресурс межвитковой изоляции низковольтных электрических машин определяется скоростью образования сквозных трещин в процессе эксплуатации.

Апробация работы. Основные результаты экспериментальных и теоретических исследований были доложены и обсуждались:

1. На V международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000, г. Новосибирск, 2000 г.

2. На XVI Всероссийской научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск: НПЦ «Полюс», 2000 г.

3. На 6-й, 7-й, 8-й и 9-й Всероссийских научно-технических конференциях «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск, 2000, 2001, 2002 и 2003 г.

4. На 5th Korea-Russia International Symposium on Science and technology (KORUS 2001), г. Томск, ТПУ, 2001 г.

5. На международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, ТПУ, 2001г.

6. На третьей международной конференции «Электрическая изоляция - 2002», Санкт Петербург, 18-21 июня, 2002 г.

7. На VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2001 г.

8. На международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», г. Томск, 3-5 сентября, 2003 г.

9. На всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации», г. Новосибирск, 2-5 декабря, 2004 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, 2 из которых в центральной печати.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержащих 133 страниц текста, 19 таблиц, 44 рисунка, списка литературы, включающего в себя 117 наименований и приложения на 2 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научно-практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации. В работах Похолкова Ю.П., Бесперстова П.П., Пыхтина В.В., Дудкина А.Н. Кирилова Ю.А., Матялиса А.П. и других авторов описаны факторы, воздействующие на систему межвитковой низковольтной изоляции, и требования, предъявляемые к электроизоляционным материалам, проанализированы причины отказов обмоток низковольтных электрических машин. Дан анализ работ Журкова С.Н., Регеля В.Р., Слуцкера А.И., Цоя Б. по физике образования и роста дефектов (трещин) в полимерных материалах. В обзоре литературы выявлено, что на сегодняшний день почти отсутствует информация о четкой взаимосвязи между механической и электрической прочностью электроизоляционных материалов, используемых для изготовления обмоток электрических машин. Анализ работ, посвященных проблеме повышения надежности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин, позволяет поставить ряд конкретных задач, решение которых обеспечит создания эффективной методики оценки долговечности межвитковой изоляции:

- Изучить влияние вязкости пропиточных составов на процесс дефектообразования межвитковой изоляции в процессе старения низковольтных электрических машин;
- Установить взаимосвязь между внутренними механическими напряжениями, дефектностью и долговечностью изоляции электрических машин;
- На основе теории механической прочности полимеров С.Н. Журкова разработать методику расчета долговечности межвитковой системы изоляции, удобную для практического применения.

Во второй главе описаны объекты и методы исследования. Для проведения исследований были выбраны пропиточные составы марок МЛ-92 и КО-916К, а также обмоточные провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155 и ПЭТМ-180. Причиной выбора этих материалов послужила широта их применения, значительно большой диапазон рабочих температур и хорошая совместимость. Для оценки скорости дефектообразования в межвитковой изоляции были изготовлены об-

разцы, представляющие собой макеты из 50-ти попарно связанных отрезков обмоточного провода длиной 330 мм,



Рис. 1. Связка обмоточного провода

обмоточного провода длиной 330 мм, пропитанных методом погружения пропиточными составами с различной величиной условной вязкости (рис. 1). Пропитка макетов проводилась двукратно методом погружения. Режим сушки проводился в соответствии с нормативно-

технической документацией на пропиточные составы. Для качественной оценки скорости дефектообразования количество макетов было по четырем на каждую партию.

Подготовленные макеты подвергались термическому старению (в течение не менее 1000ч) при различных температурах. В процессе теплового старения с интервалом в 50 - 100 часов макеты охлаждались до комнатной температуры и испытывались повышенным испытательным напряжением для выявления дефектных участков обмотки. При испытаниях учитывалось количество пар, пробитых испытательным напряжением. Испытания проводились на следующих системах: провод ПЭТВ + МЛ-92, провод ПЭТ-155 + КО-916К, провод ПЭТМ-180 + КО-916К.

В результате испытаний были определены дефектность λ и скорость дефектообразования H в макетах и в пропитанных парах по выражениям:

$$\lambda = -\frac{1}{\ell_{\text{исп}}} \ln(1 - q_i), \quad q_i = \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где $\ell_{\text{исп}}$ – длина испытуемой части образца мм, q_i – вероятность появления сквозного дефекта (трещины) на единице длины; n_i – число образцов, пробитых напряжением, меньшим или равным испытательному напряжению; n – общее количество испытанных образцов.

$$H = \frac{\lambda - \lambda_0}{t_i}, \quad (2)$$

где λ_0 – дефектность витковой изоляции до теплового старения (начальная дефектность), мм^{-1} ; t_i – время старения макетов, час.

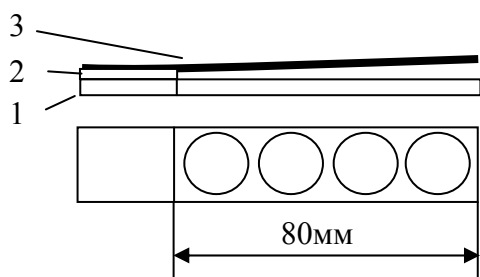


Рис. 2. Образец для исследования внутренних механических напряжений в полимерном покрытии. 1 – пластина-основание; 2 – прокладка; 3 – пластина подложка.

По результатам испытаний построены зависимости скоростей дефектообразования от времени старения, приведенные далее (рис. 7-9).

Определение внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточном составе, проводилось с помощью консольного метода. Для измерения напряжений консольным методом применялись стальные пластинки марки 1Х18Н9Т размером 80×15 мм толщиной (0,1—0,5) мм (рис. 2). На поверхность консольно закрепленной пластинки наносилось исследуемое покрытие. Возникающие в покрытии напряжения

рассчитывались по величине отклонения свободного конца пластинки по выражению:

$$\sigma_{вн} = \frac{\Delta h \cdot E \cdot h_K^3}{3 \cdot l^2 \cdot \Delta h_K \cdot (h_K + \Delta h_K)}, \quad (3)$$

где Δh - отклонение пластины подложки от первоначального положения, м; E - модуль упругости пластины ($E_{стали} = 1,96 \cdot 10^5$ МПа); l - длина полимерного покрытия, м; h_K - толщина пластины-подложки, м; Δh_K - толщина полимерного покрытия, м.

Результаты испытаний приведены в виде зависимостей внутренних механических напряжений от времени старения и температуры (рис. 3-6).

В третьей главе приведены результаты исследования влияния взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность. Оценено влияние вязкости пропиточных составов, времени старения, повышенных температур на уровень внутренних механических напряжений и скорости дефектообразования.

По результатам исследования внутренних механических напряжений в пропиточных составах установлено, что внутренние механические напряжения в пропиточных составах возникают сразу после полимеризации; с увеличением времени теплового старения уровень внутренних механических напряжений постоянно растет, уровень внутренних механических напряжений в пропиточных составах зависит от температуры, с увеличением условной вязкости пропиточного состава внутренние механические напряжения растут, уровень внутренних механических напряжений для лака КО-916К в два раза ниже, чем для лака МЛ-92.

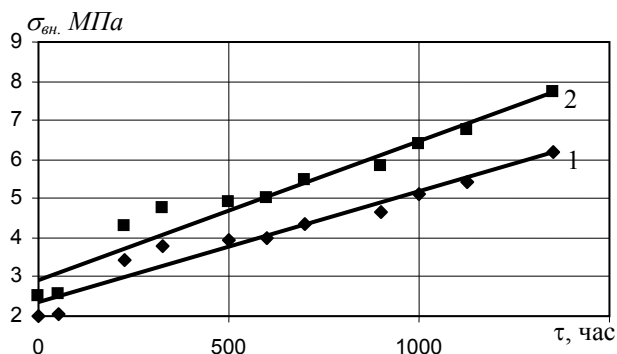


Рис. 3. Изменение величин внутренних механических напряжений в пленке пропиточного состава МЛ-92 от времени теплового старения и условной вязкости пропиточного состава (1-19; 2-40с по ВЗ-4), при $T_{стар} = 145^\circ\text{C}$

изоляции. Вследствие различия физико-механических параметров материалов, составляющих систему изоляции, в них неизбежно возникают внутренние механические напряжения, которые могут привести к разрушению межвитковой изоляции.

Пропиточный состав в отвержденном состоянии, эмальпленка и проводник образуют сопряженную систему. Эти элементы конструкции связаны друг с другом силами адгезии. При изменениях температуры или воздействии внешних нагрузок они вынуждены деформироваться совместно. Однако, деформации в сопряженной системе затруднены именно вследствие разности теплофизических и физико-механических параметров, таких как температурный коэффициент линейного расширения, модуль упругости и других свойств компонентов системы

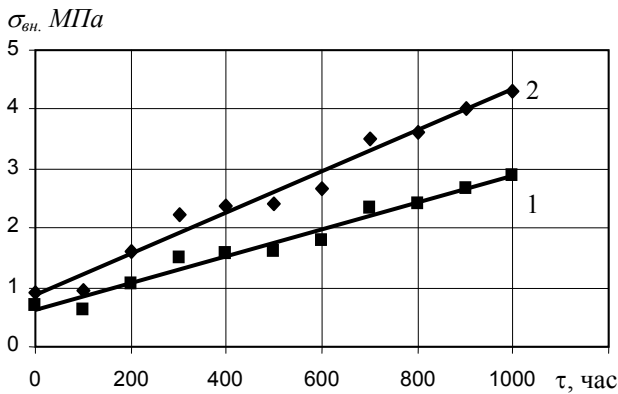


Рис. 4. Изменение величин внутренних механических напряжений в пленке пропиточного состава КО-916К от времени теплового старения и условной вязкости пропиточного состава (1-19; 2-40с по ВЗ-4), при $T_{\text{стар}}=220^{\circ}\text{C}$

рении обуславливается, главным образом, повышением температуры стеклования полимера, т.к. возрастает модуль упругости и снижается ТКЛР пропитываемого состава.

До 1000 ч старения кривые изменения внутренних механических напряжений пропиточных составов в процессе теплового старения характеризуются линейным нарастанием напряжений из-за происходящего в этот период резкого изменения физико-механических параметров (рис. 3-4).

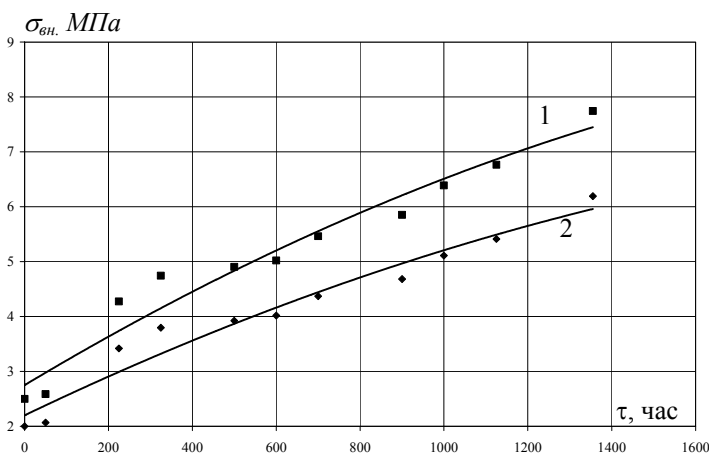


Рис. 5. Зависимость внутренних механических напряжений от времени теплового старения при различных режимах термообработки пропиточного состава МЛ-92 (1 – скорость охлаждения 30°C в минуту; 2 – скорость охлаждения 2°C в минуту) вязкость 40с по ВЗ-4, при $T_{\text{стар}}=145^{\circ}\text{C}$

В процессе теплового старения происходит углубление отверждения за счет непрореагировавших активных групп и двойных связей, а также структурирования, обусловленного термоокислительными процессами. Плотность сшивки макромолекул возрастает, и усиливается физическое взаимодействие между межузловыми отрезками пространственной сетки. В результате комплекс физико-механических параметров пропиточных материалов претерпевает глубокие изменения, и величина внутренних механических напряжений существенно возрастает. Возрастание внутренних напряжений при старении

обуславливается, главным образом, повышением температуры стеклования полимера, т.к. возрастает модуль упругости и снижается ТКЛР пропитываемого состава.

Из зависимостей, представленных на рисунках 3 и 4, видно, что с увеличением условной вязкости пропиточного состава внутренние механические напряжения также растут. Причем, рост наблюдается, несмотря на тип пропиточного состава.

Рост внутренних механических напряжений связан с тем, что на формирование адгезионного контакта между пропиточным составом и металлической подложкой оказывает влияния энергия смачивания пропиточного состава к металлической подложке, и чем выше эта энергия, тем выше сила адгезии. Как показано в работах Дудкина

А.Н. и Леонова А.П., с увеличением вязкости пропиточного состава увеличивается и его энергия смачивания, а так как подложка и отвержденное полимерное

покрытие деформируются совместно, то уровень напряжений будет там выше, где сила адгезии больше.

На величину внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточных составах, большое влияние оказывает режим термообработки полимера.

После нанесения пропиточных составов на подложку происходит их термообработка (сушка), т.е. нагрев для ускорения процесса полимеризации. Сушка при повышенной температуре вызывает интенсивное испарение растворителя, ускоряет процессы полимеризации. В работе после нагрева образцы охлаждались двумя способами: быстро (скорость охлаждения $30^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) и медленно (скорость охлаждения $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$). В результате получились две закономерности, представленные на рисунке 5. Из зависимостей видно, что, чем выше скорость охлаждения, тем выше уровень внутренних механических напряжений. Т.е., при быстром охлаждении в объеме полимера возникает сравнительно неупорядоченная трехмерная структура, а чем выше гетерогенность, тем выше и уровень внутренних механических напряжений.

При плавном режиме охлаждения пропиточного состава происходит более упорядоченное расположение макромолекул, т.е. структура получаемой пленки становится более гомогенной и, как следствие, менее нагружена внутренними механическими напряжениями.

Таким образом, проведенные исследования внутренних механических напряжений позволяют заключить, что от внутренних механических напряжений избавиться невозможно, т.к. они появляются в пропиточных составах сразу после полимеризации и «живут» в них весь срок эксплуатации. Однако, уровень напряжений зависит от типа, структуры материала, от условий полимеризации и от времени эксплуатации. Поэтому предлагается использовать для пропитки обмоток низковольтных электрических машин материалы с меньшей вязкостью, а процесс полимеризации проводить при плавном режиме охлаждения пропиточного состава.

Вторым этапом исследований, представленных в третьей главе, была оценка скорости дефектообразования, на образцах, имитирующих межвитковую изоляцию обмотки электрической машины. На рисунках 6-8 представлены зависимости изменения скорости дефектообразования от времени теплового старения для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов. Характер изменения скорости дефектообразования от времени старения и вязкости пропиточных составов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов остается постоянным, т.е. с увеличением времени старения и вязкости пропиточного состава величина скорости дефектообразования так же увеличивается.

С увеличением времени теплового старения происходит ухудшение свойств электрической изоляции, что повышает вероятность возникновения сквозного дефекта, являющегося причиной отказа межвитковой изоляции. В дальнейшем происходит возрастание числа и размеров трещин в пропиточном составе, что приводит к росту дефектности и скорости дефектообразования межвитковой изоляции.

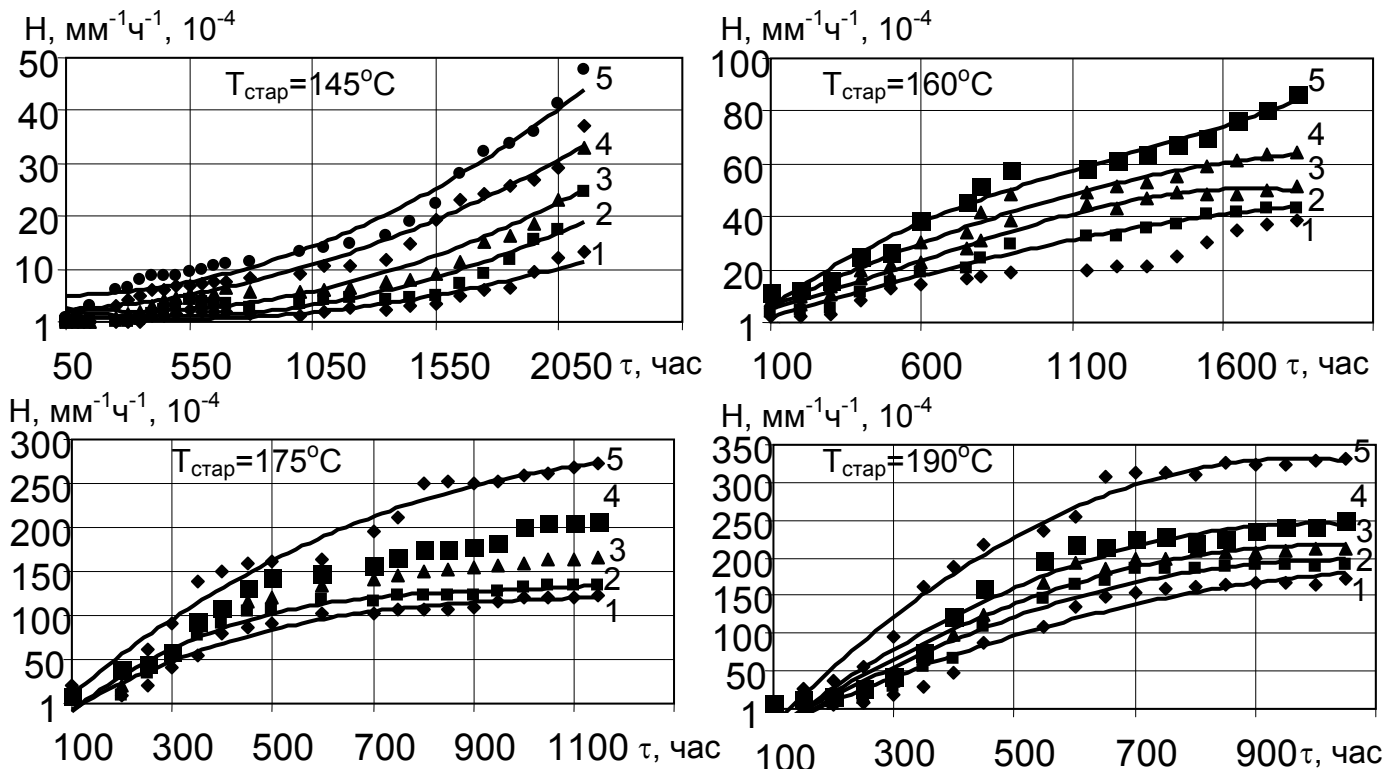


Рис. 6. Изменение скорости дефектообразования от времени теплового старения для системы ПЭТВ+МЛ-92 при различной условной вязкости пропиточного состава (1 –19с, 2-25с, 3-30с, 4-35с, 5-40с по ВЗ-4) и температуры старения.

Наиболее выраженным воздействием на изоляцию, приводящим к воз-

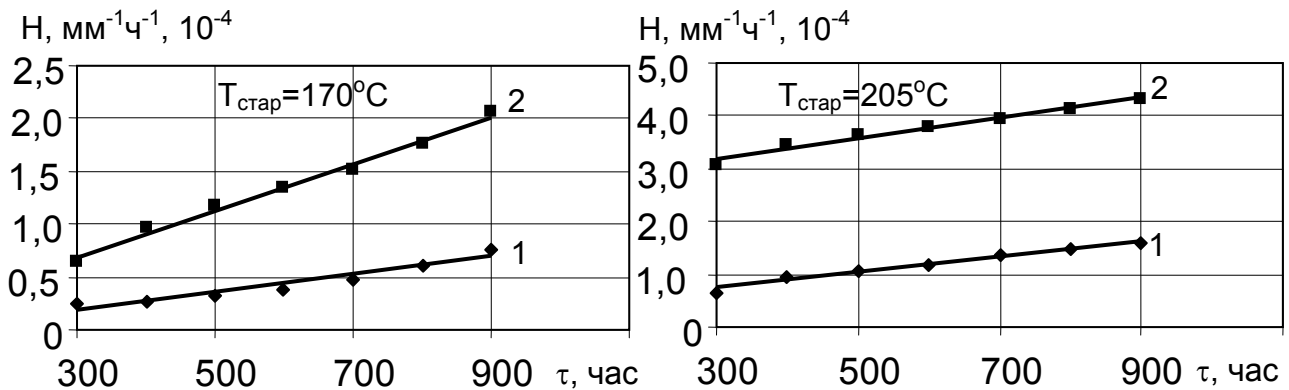


Рис. 7. Изменение скорости дефектообразования от времени теплового старения для системы ПЭТ-155+КО916К при различной условной вязкости пропиточного состава (1 –19с, 2-40с по ВЗ-4) и температуры старения.

никновению сквозного дефекта, является температура (рис 6-8) При изменении температуры, вследствие различия физико-механических параметров, ТКЛР и модуля упругости материалов, составляющих сопряженную систему – эмаль-провод-пропиточный состав, в объеме пропиточного состава возникают внутренние механические напряжения. Высокий уровень внутренних напряжений приводит к растрескиванию пропиточного состава. С увеличением времени теплового старения возрастает число и размеры таких растрескиваний, то есть появляются субмикроскопические трещины.

Изменение условной вязкости пропиточных составов с 19с до 40с по ВЗ-4 для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов

увеличивает величину скорости дефектообразования. Это связано с низким уровнем внутренних механических напряжений в составах с меньшей вязкостью.

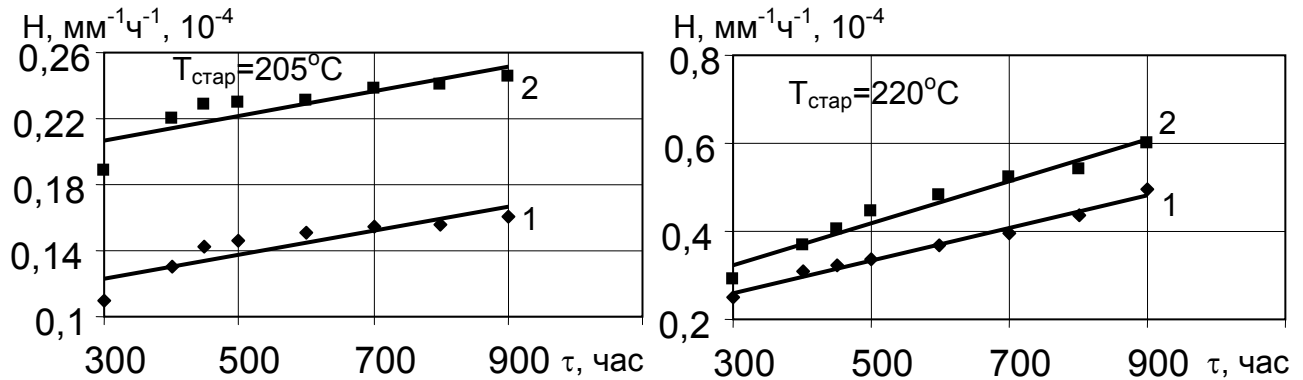


Рис. 8. Изменение скорости дефектообразования от времени теплового старения для системы ПЭТМ-180+КО916К при различной условной вязкости пропиточного состава (1 – 19с, 2-40с по ВЗ-4) и температуры старения.

В действительности, совмещая зависимости внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточных составах, с величинами скоростей дефектообразования в образцах, имитирующих обмотки электрических машин, наблюдается то, что с ростом внутренних механических напряжений величина скорости дефектообразования растет (рис 9 а,б).

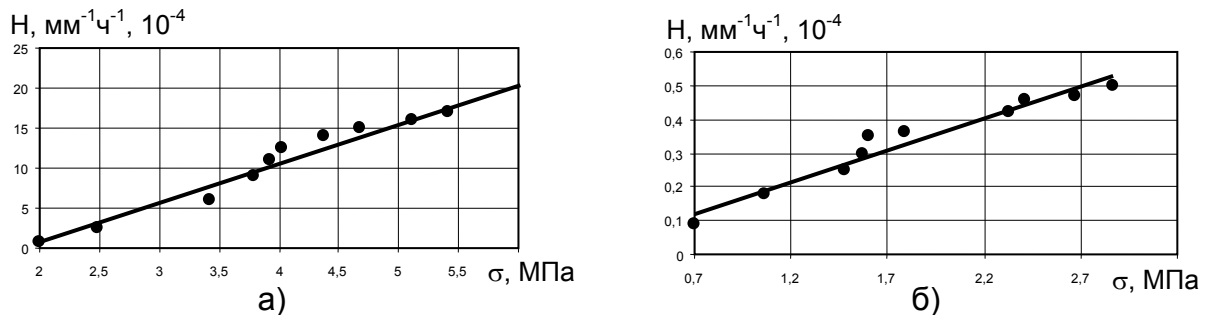


Рис. 9. Зависимость изменения скорости дефектообразования систем а) ПЭТВ+МЛ-92; б) ПЭТ-155+КО916К от внутренних механических напряжений возникающих в пропиточных составах

На основании данных, представленных на рис. 3 и 5, определена энергия активации процесса образования внутренних механических напряжений для пропиточного состава МЛ-92. Этот параметр оказался равным 0,35эВ. С другой стороны, энергия активации процесса дефектообразования для того же состава, рассчитанная из зависимостей приведенных на рис. 6 и 7, не превышает 0,42эВ. Близкие значения этих параметров подтверждает положение об ответственности внутренних механических напряжений за образование трещин, и в итоге, за потерю электрической прочности изоляции. То есть и эти результаты подтверждают взаимосвязь электрической и механической стойкости полимерных материалов.

Четвертая глава посвящена созданию метода оценки долговечности системы изоляции низковольтной электрической машины на основе термофлуктуационной теории разрушения твердых тел.

В основе предлагаемого метода определения долговечности электрической изоляции низковольтных электрических машин лежит идея о взаимосвязи трещинообразования и электрической прочности полимерных структур, являющихся материалом электрической изоляции. Другими словами, электрическая прочность материала определяется его механической прочностью.

В работе выполнены эксперименты, свидетельствующие о том, что напряжение пробоя макетов изоляционной системы электрических машин уменьшается с ростом числа механических дефектов, искусственно созданных в изоляции эмальпроводов.

Суть экспериментов состояла в следующем: из трех партий обмоточных проводов марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭТМ-180 было изготовлено по пятьдесят образцов длиной 200 мм с искусственно нанесенным дефектом (сквозной кольцевой порез эмаль слоя обмоточного провода) и по пятьдесят образцов длиной 200 мм без искусственных повреждений эмаль слоя. Поочередно каждый образец обмоточного провода подвергали воздействию повышенного напряжения до пробоя в системе электродов «провод – дробь». По результатам испытаний определены средние значения пробивного напряжения дефектных проводников ($\bar{U}_{прд}$) и образцов без дефектов ($\bar{U}_{пр0}$). Рассчитано среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения дефектных (σ_d) и бездефектных (σ_0) образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Пробивные напряжения эмальпроводов различных партий.

Марка провода	Значения пробивных напряжений и среднеквадратических отклонений			
	для дефектных образцов		для бездефектных образцов	
	$\bar{U}_{прд}$ (кВ)	σ_d	$\bar{U}_{пр0}$ (кВ)	σ_0
ПЭТВ	2,048	0,084	8,5	0,095
ПЭТ-155	2,3	0,020	9,05	0,047
ПЭТМ-180	2,3	0,020	9,05	0,047

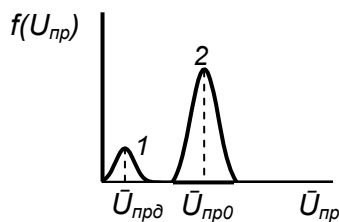


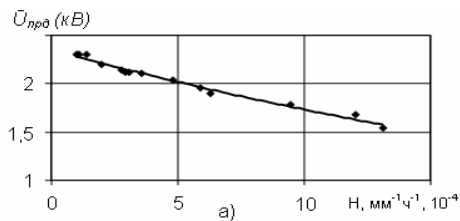
Рис.10. Плотности распределений пробивных напряжений образцов эмальпровода: 1-для образцов эмальпровода с искусственно нанесенными сквозными повреждениями; 2- для без дефектных образцов эмальпровода.

Статистическая обработка результатов эксперимента свидетельствует о том, что плотность распределения пробивного напряжения образцов с искусственно нанесенными дефектами подчиняется нормальному закону распределения с достоверностью 0,95 (по критерию согласия хи-квадрат), а плотность распределения пробивного напряжения бездефектных образцов подчиняется закону Вейбула с достоверностью 0,9 (по критерию согласия хи-квадрат).

Качественные зависимости этих распределений представлены на рисунке 10.

Кроме того, в настоящей работе при исследовании скорости дефектообразования на модельных образцах, имитирующих реальную конструкцию межвитковой изоляции электрических машин, установлено уменьшение испытательного пробивного напряжения с увеличением числа дефектных образцов для исследуемых систем, таких как ПЭТМ+МЛ-92; ПЭТ-155+КО916К; ПЭТМ-

180+КО916К (рис. 11 а,б,в). То есть, увеличение числа дефектов в межвитковой изоляции приводит к уменьшению электрической прочности изоляции. С помощью метода наименьших квадратов установлена математическая зависимость



ческих связей. Анализ результатов исследований позволяет математически описать вероятностную модель процесса образования микротрещин в полимерных материалах при их тепловом старении и одновременном воздействии на них механических нагрузок, а долговечность определить по выражению, предложенным Журковым:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (5)$$

где τ_0 —период колебания атомов ($\approx 10^{-13}$ с); γ —структурно-чувствительный коэффициент; σ —напряжения, действующие на материал; k —постоянная Больцмана. U — энергия активации процесса разрушения; T —температура окружающей среды.

В нашем методе оценки долговечности электрической изоляции используется формула (5), в которой введены следующие изменения.

Первопричиной образования субмикротрещины служит разрыв любой химической связи, имеющейся в полимерном веществе. Поэтому, в качестве энергетической характеристики процесса разрыва сплошности полимера можно использовать среднюю энергию мономерного звена:

$$U_{cp} = \frac{\sum n_i \cdot U_{oi}}{n_o}, \quad (6)$$

где n_i — число химических связей i — типа; U_{oi} — энергия химической связи i — типа; n_o — общее число химических связей в мономерном звене.

Однако, в полимере имеются и межмолекулярные связи, энергия которых намного ниже, чем у химических. На первый взгляд, кажется, что образование трещины пойдет по межмолекулярным связям. Однако, отвержденный пропиточный состав является сшитой структурой, а в этом случае роль межмолекулярного взаимодействия на процесс образования субмикротрещин минимальна. Поэтому вероятность механического разрушения полимера в условиях термомеханических воздействий описывается выражением:

$$P = e^{-\frac{U_{cp} - \gamma\sigma}{kT}}, \quad (7)$$

где γ —структурно-чувствительный коэффициент; σ —напряжения, действующие на материал; k —постоянная Больцмана. U_{cp} — средняя энергия мономерного звена; T —температура окружающей среды.

Таким образом, разрушение полимерного материала носит вероятностный характер и зависит от его структурных особенностей и механических нагрузок, действующих на него, а вероятность появления дефектов (трещин) в межвитковой изоляции может быть описана экспоненциальным законом типа (7).

Тогда долговечность межвитковой изоляции можно оценивать в свете термофлуктуационной теории Журкова, заменив в выражении (5) величину энергии активации процесса разрушения (U) величиной средней энергии мономерного звена (U_{cp}), так как данная характеристика определяет усредненную величину процесса разрыва химической связи в веществе. В этом случае оконча-

тельная формула для расчета долговечности межвитковой изоляции электрической машины примет вид:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{cp} - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (8)$$

где τ_0 —период колебания атомов ($\approx 10^{-13}$ с); γ —структурно-чувствительный коэффициент; σ —напряжения, действующие на материал; k —постоянная Больцмана. U_{cp} —средняя энергия мономерного звена; T —температура окружающей среды.

Идеология расчета по формуле (8) сводится к нахождению трех основных величин, это γ —структурно-чувствительный коэффициент, σ —напряжения, действующие на материал и U_{cp} —средняя энергия мономерного звена пленки пропиточного состава.

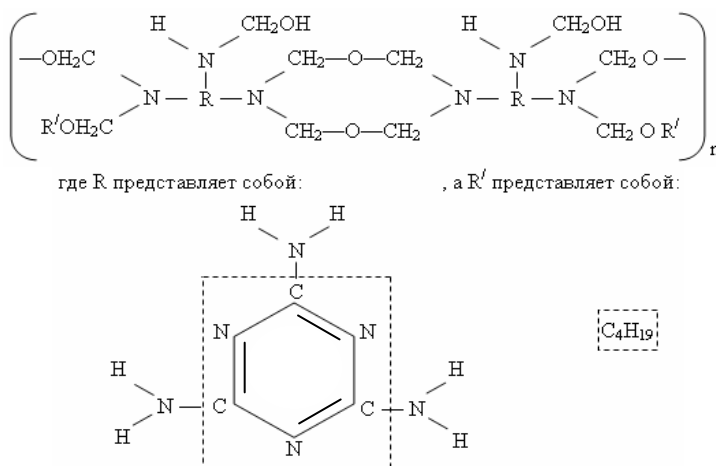


Рис. 12. Структурная формула мономерного звена пленки пропиточного состава МЛ-92

Значение средней энергии мономерного звена выражается формулой (6). В качестве примера приведем расчет средней энергии мономерного звена для пропиточного состава МЛ-92.

Химическая формула мономерного звена пропиточного состава МЛ-92 представлена на рисунке 12.

Таким образом, в структуру мономерного звена входят пять групп химических

связей, это связи: С – Н (20 связей); С – О (10 связей); С – N (12 связей); О – Н (2 связи); N – Н (2 связи), общее количество химических связей в мономерном звене равно пятидесяти. Для расчета средней энергии мономерного звена из таблицы 3 найдем значения энергий этих связей (U_o), используя выражение (6), рассчитаем среднюю энергию мономерного звена, и результаты расчета сводим в таблицу 2.

Таблица 2. Средняя энергия мономерного звена для МЛ-92

Тип связи	Число связей	Энергия одной связи, эВ	Средняя энергия мономерного звена, эВ	Средняя энергия мономерного звена, ккал/моль
С – Н	20	4.37	3,7112	84,34
С – О	10	3.46		
С – N	16	2.88		
О – Н	2	4.75		
N – Н	2	3.99		

Таким образом, для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалах необходимо знать: химическую формулу мономерного звена и значения энергий связи.

Значения энергий некоторых химических связей U_o для различных материалов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения энергий связи U_0 .

Вид связи	Энергия связи, Эв	Вид связи	Энергия связи, Эв	Вид связи	Энергия связи, Эв
1	2	3	4	5	6
N $\equiv$ N	9.76	C - N	2.88; 2.86	I - F	2.77
C $\equiv$ N	9.02	Mn - F	4.77; 4.43	Br - F	2.77; 2.08
C $\equiv$ C	8.53	O - H	4.75; 4.54	S - S	2.75
C = O	8.29; 7.32	Sb - F	4.64	C - Br	2.75
B - F	6.64	B - N	4.56	Al - C	2.7
Al - F	6.64; 6.03	N = O	4.51	C - S	2.69
N $\equiv$ O	6.48	S - S	4.45	Si - S	2.67
N - O	6.48	H - Cl	4.43	Cl - F	2.65
Si - F	6.2; 6.16; 5.59	C - H	4.37; 4.28	C - Si	2.52
C = C	6.09	P - O	3.57	Cl - Cl	2.51
Ti - F	6.07	C - C	3.5	P - P	2.31
H - F	5.9; 5.82	C - O	3.46	Se - Se	2.17

На межвитковую изоляцию низковольтной электрической машины действуют как внешние ($\sigma_{\text{внеш}}$), так и внутренние механические нагрузки ($\sigma_{\text{вн}}$). К основной внешней механической нагрузке, оказывающей действие на изоляцию электрической машины, относится вибрация. Во многих работах проводилось исследование влияние вибрации на величину дефектности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин. Выяснилось, что при нормальной эксплуатации электрической машины величина напряжений вызванных, вибрацией, остается постоянной и составляет величину порядка 0,05 МПа [работы Похолкова Ю.П., Бесперстова П.П.]. Результаты исследований, приведенных в данной работе, свидетельствуют о том, что внутренние механические напряжения в пропиточном составе, возникшие из-за физических и химических изменений (усадка, взаимодействие реакционно-способных групп, окислительно – полимеризационные процессы), постоянно растут от величины, порядка, 0,1 МПа и выше. Поэтому вклад внутренних механических напряжений на процесс разрушения межвитковой изоляции оказывается больше, чем вклад от внешних нагрузок. Тогда на этапе развития разрушения межвитковой изоляции можно принять за величину напряжения, действующего на материал, (σ) (выражение (8)) нагрузку, возникающую в материале за счет гетерогенности структуры ($\sigma_{\text{вн}}$). Для нахождения величины внутренних механических напряжений, на сегодняшний день, разработано большое количество экспериментальных методов, которые разбиваются на две группы это : а) поляризационно-оптический методы, пригодные лишь для сравнительно ограниченного круга пропиточных составов - прозрачных и оптически активных, т. е. приобретающих оптическую анизотропию под воздействием механических нагрузок; б) термомеханические методы, к которым относятся: консольный метод; метод термометра; метод магнитоупругих датчиков; метод кольца; метод проволоочной тензометрии. Все термомеханические методы имеют ряд недостатков, общим из которых является то, что внутренние напряжения в покрытиях определяются на модельных образцах, которые не используются на практике. Несмотря на недостатки термомеханических методов, в настоящей работе (глава 2) для оценки внутренних

механических напряжений, возникающих в различных пропиточных составах, применен консольный метод. Этот метод основан на измерении отклонения от первоначального положения свободного конца консольно закрепленной упругой металлической пластины с полимерным покрытием под влиянием внутренних напряжений в покрытии. Чувствительность метода составляет около $0,3 \text{ кг/м}^2$. Этим способом оценивается тангенциальная составляющая внутренних механических напряжений. Применение этого метода для оценки внутренних механических напряжений в пленках пропиточных составов оправдано, так как в реальной конструкции межвитковой изоляции наибольшее влияние на процесс трещинообразования оказывает именно тангенциальная составляющая внутренних механических напряжений. Кроме того, при выборе геометрии образцов и технологии их изготовления учитываются масштабные факторы и технология запечки пропиточного состава, которые приближены к реальным условиям изготовления обмотки. Достоверность результатов полученным данным методом на модельных образцах составляет $0,92$ [работы Галушко А.И., Оснача Р.Г.].

Таким образом, определив экспериментально значения внутренних меха-

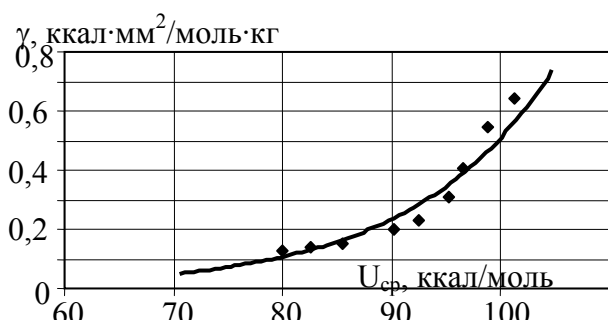


Рис. 13. Зависимость коэффициента γ от средней энергии мономерного звена для полимерных материалов.

нических напряжений, величина σ , входящая в выражение (8), будет известна.

В термофлуктуационной теории разрушения материалов по Журкову коэффициент γ рассматривается, как прочностная характеристика материала, зависящая от его структурных особенностей. На первоначальном этапе в теории Журкова было принято, что коэффициент γ равен объему занимае-

мым химической связью. Для всех материалов этот объем равен, примерно, 10^{-23} см^3 , то и коэффициенты γ для различных тел принимались, приблизительно, равными 10^{-23} см^3 [работы Журкова С.Н. и его учеников]. Однако, проведя большой объем эксперимента, выяснилось, что коэффициенты γ очень сильно варьируются в зависимости от исследуемых материалов. При этом оказалось, что значение коэффициента γ для различных материалов во много раз больше, чем 10^{-23} см^3 , и зависит от величин σ и U . Для нахождения коэффициента γ необходимо проводить большой объем экспериментальных работ, что не всегда выгодно и удобно. Однако, в работах Журкова и его учеников имеются экспериментальные данные для коэффициента γ , различных полимерных материалов. На основании данных по γ , приведенным в работах Журкова С.Н., Регеля В.Р., Слуцкера А.И., Цоя Б., построена тарировочная зависимость $\gamma = f(U_{cp})$, представленная на рисунке 13. Использование этой кривой позволяет найти параметр γ практически для любых пропиточных составов.

Таким образом, для определения величины γ исследуемого материала, необходимо лишь рассчитать значения средней энергии мономерного звена и по

тарировочной кривой, представленной на рис.13, определить величину коэффициента γ .

Определив величины U_{cp} , γ и σ , можно вычислить долговечность витковой изоляции обмоток низковольтных электрических машин (τ) по выражению (8). После расчета величины τ найти вероятность безотказной работы (ВБР) системы межвитковой изоляции низковольтной электрической машины по выражению:

$$ВБР = 1 - \frac{\tau_{cm}}{\tau}, \quad (9)$$

где τ_{cm} —время старения витковой изоляции.

Схематически методику расчета ВБР межвитковой изоляции низковольтной электрической машины можно представить так:

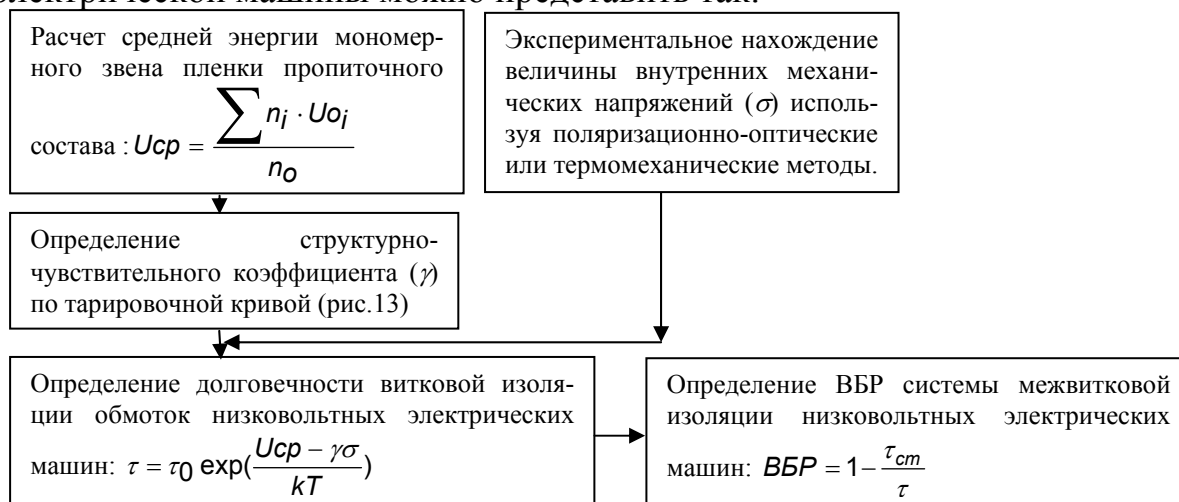


Рис. 14. Блок-схема экспресс прогноза времени безотказной работы межвитковой изоляции низковольтной электрической машины.

В результате по описанной методике был произведен расчет ВБР межвитковой изоляции конструкции провод ПЭТВ, пропиточный состав МЛ-92, и ПЭТ-155, пропиточный состав КО916К. Результаты расчета сведены в таблицу 4, кроме того, в таблице 4 приведены результаты расчета ВБР этих же систем по методике описанной в ОСТ16.0.800.821-88.

Таблица 4. ВБР межвитковой изоляции различных систем.

Время старения, ч	ВБР межвитковой изоляции различных систем			
	Система ПЭТВ+МЛ92		Система ПЭТ-155+КО-916К	
	По предлагаемой методике	по ОСТ16.0.800.821-88	По предлагаемой методике	по ОСТ16.0.800.821-88
1000	0.9998	0.9999	0.999	0.999
2000	0.9786	0.9999	0.999	0.999
3000	0.9464	0.9999	0.999	0.999
4000	0.8998	0.9523	0.999	0.999
5000	0.8457	0.8988	0.998	0.999
6000	0.7867	0.8346	0.998	0.999
7000	0.7125	0.7597	0.998	0.999
8000	0.6546	0.6955	0.987	0.999
9000	0.5892	0.6206	0.987	0.999
10000	0.5132	0.5457	0.986	0.999

Расхождение результатов, полученных по ОСТовской методике с результатами, полученными по вновь созданной методике, примерно, 7%. Расхождение значений результатов расчета ВБР по двум методикам можно объяснить тем, что в расчете по предлагаемой методике не учитывается взаимодействие между пропиточным составом и эмалевой изоляцией.

Заключение по работе:

Основными результатами работы являются:

- Установлена общая закономерность дефектообразования для различных систем низковольтной межвитковой изоляции электрических машин. С увеличением условной вязкости пропиточного состава ускоряются процессы дефектообразования в диэлектрических материалах. С ростом внутренних механических напряжений интенсивность появления дефектов увеличивается по линейному закону.

- При увеличении скорости охлаждения и вязкости пропиточных составов увеличивается уровень внутренних механических напряжений, варьируя вязкости пропиточных составов в оптимальных границах, можно эффективно повысить ресурс работы межвитковой изоляции.

- Для различных систем межвитковой изоляции выявлена общая закономерность уменьшения их пробивного испытательного напряжения с ростом скорости дефектообразования по следующему закону
$$\bar{U}_{прд} = 2,37 - 0,08 \cdot H + 1,553 \cdot 10^{-3} \cdot H^2.$$

- На основе термофлуктуационной теории прочности полимеров разработана экспресс-методика определения долговечности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин. Разработанная методика позволяет в короткий срок оценить ВБР межвитковой изоляции. Предлагаемая методика не требует больших материальных и временных затрат и пригодна для реализации в заводских условиях.

- Использование результатов исследований на предприятиях электротехнической промышленности г. Томска подтверждает практическую ценность проведенной работы.

- Рекомендуются, для уменьшения уровня внутренних механических напряжений, возникающих в пленках пропиточных составов, применять пропиточные составы с вязкостью 19-20с по ВЗ-4 и выдерживать скорость охлаждения после полимеризации пропиточного состава в пределах 2°С/мин.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Марьин С.С., Дудкин А.Н., Леонов А.П. Влияние смачивания пропиточного состава на развитие трещин в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин// Труды V международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000 т. 3. - Новосибирск 2000 г. -с. 140-141.

2. Марьин С.С., Дудкин А.Н., Леонов А.П. Оценка вероятности образования сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин.// Сборник трудов 6-й всероссийской научно-

технической конференции «Материалы, технологии, конструкции, экономика». -Красноярск 2000 г. -с. 504-505.

3. Марьин С.С., Дудкин А.Н., Леонов А.П. О механизме образования сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин.// Сборник тезисов докладов XVI научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» -Томск: НПЦ «Полюс», 2000 г. -с. 232-233.

4. Марьин С.С., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Леонов А.П. Расчетное определение стойкости к растрескиванию системы «пропиточный состав – эмаль-изоляция обмоточного провода»// Сборник докладов международной конференции “Полимер-2001” –Москва: МИРЭА, 2001, с. 215-218.

5. Марьин С.С., Дудкин А.П., Леонов А.П. О развитии сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин// 7-ая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» -Томск: ТПУ, 2001. т.2, -с.44-45.

6. Марьин С.С., Леонов А.П., Износ межвитковой изоляции намоточных изделий под действием эксплуатационных факторов.// Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» -Томск: ТПУ 2001 г., 3-5 сентября, -с.161.

7. Марьин С.С., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Леонов А.П. Процесс образования и рост трещин в системе межвитковой изоляции намоточных изделий в период эксплуатации.// Сб. научных трудов 7 Всероссийской научно-технической конференции «Материалы, технологии, конструкции, экономика» -Красноярск, 2001. -с.401-403.

8. Марьин С.С., Леонов А.П., Дудкин А.Н. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на надежность межвитковой изоляции намоточных изделий.// Сб. научных трудов 7 Всероссийской научно-технической конференции «Материалы, технологии, конструкции, экономика» -Красноярск, 2001. -с. 404-405.

9. S.S. Maryin, A.P. Leonov, A.N. Dudkin. Through defect development in interterm insulation of low voltage windings of electric machines// Modern techniques and technology, 2001, February 26 – March 2, Tomsk, Russia. p. 122-124.

10. S.S. Maryin, A.P. Leonov, Yu.P. Pokholkov, A.N. Dudkin. Estimation of reliability of the system insulation of low-voltage electric machines at a stage of designing, manufacture and while in service.// The 5th Korea-Russia International Symposium on Science and technology (KORUS 2001), Tomsk, Tomsk Polytechnic University, v. 2, p. 282-283.

11. Марьин С.С., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Влияние структуры пропиточного состава на процесс дефектообразования в изоляции низковольтных обмоток намоточных изделий // Труды третьей международной конференции «Электрическая изоляция - 2002» Санкт-Петербург, 2000 г. -с. 284-285.

12. Марьин С.С., Айзадуллин Л.Н., Шуликин С.Н. Причины разрушения межвитковой изоляции низковольтных намоточных изделий // Сб. научных

трудов 8 Всероссийской научно-технической конференции «Материалы, технологии, конструкции, экономика» -Красноярск, 2002. -с.41-42.

13. Марьин С.С., Леонов А.П., Киселёва А.В. Влияние взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность//Сборник трудов 9-й всероссийской научно-технической конференции «Материалы, технологии, конструкции, экономика» -Красноярск 2003 г. -с. 504-505.

14. Марьин С.С., Ким В.С., Дудкин А.Н. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках. Известия ТПУ. – г.Томск: изд.ТПУ, 2005. - №7 - с. 171-174.

15. Марьин С.С., Леонов А.П., Ким В.С. Влияние взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность // Известия высших учебных заведений. Журнал «Электромеханика». – г. Новочеркасск: изд.ЮРГТУ (НПИ), 2006. - №3 – с. 127-128.