

На правах рукописи

ЛЕОНОВ АНДРЕЙ ПЕТРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОВМЕСТИМОСТИ ПРОПИТОЧНЫХ
СОСТАВОВ И ЭМАЛИРОВАННЫХ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ**

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 - 2003

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

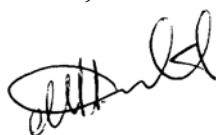
Защита состоится 25 декабря 2003 года в 16 часов в аудитории 312 на заседании диссертационного совета К 212.696.02 в Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 24 ноября 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

кандидат технических наук



Соловьев М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях развития современного производства и рынка предъявляются все более строгие требования к качеству выпускаемой продукции. Низковольтные электрические машины являются одним из самых массовых изделий электротехнической промышленности и широко используются во всех без исключения отраслях. В связи с этим вопрос об их надежности и качестве изготовления становится особенно важным.

В комплексе задач, стоящих перед разработчиками изоляции электрических машин, наиболее трудной и ответственной считается выбор электроизоляционных материалов. Анализ отказов асинхронных двигателей показывает, что значительная часть их (до 90%) происходит в результате отказа обмоток. Система изоляции электрических машин включает в себя корпусную, междуфазную, междуслойную и межвитковую изоляции. Наиболее слабым элементом изоляции обмотки является межвитковая, представляющая композицию из двух слоев эмалевой изоляции обмоточных проводов и слоя отвержденного пропиточного состава между ними. Поскольку на долю межвитковой изоляции приходится около 90% от всех отказов обмоток, можно отметить: надежная работа обмотки и всей электрической машины во многом определяется надежностью межвитковой изоляции. В свою очередь надежность системы изоляции обуславливается качеством технологии изготовления, воздействующими нагрузками, свойствами и совместимостью самих электроизоляционных материалов. Под совместимостью понимается свойство многокомпонентной системы совместно работать в одной конструкции без снижения надежности.

Решению проблемы обеспечения высокой надежности систем изоляции электрических машин посвящено множество исследований. В этих работах рассматриваются вопросы влияния пропитки на отдельные характеристики электроизоляционных систем, таких как электрическая прочность, стойкость к растрескиванию, цементирующая способность, адгезионная способность, затронуты вопросы совместимости пропиточных материалов с изоляцией эмальпроводов, описана микроконструкция межвитковой изоляции обмоток электрических машин, рассмотрены факторы, влияющие на процесс дефектообразования в межвитковой изоляции, предложены методики оценки совместимости пропиточных составов с изоляцией эмальпроводов. Также установлено, что использование эмалированных проводов при неправильно подобранном пропиточном составе резко снижает срок службы и надежность полученной композиции.

К сожалению, в рассмотренной литературе отсутствует информация о четкой взаимосвязи между изученными характеристиками и различными факторами, влияющими на надежную совместную работу пропиточных составов и эмалированных проводов; предложенные методы исследования совместимости либо не учитывают эксплуатационные и технологические условия, воздействующие на систему изоляции, либо дают оценку совместимости как работоспособности системы изоляции без объяснения процесса взаимодействия между материалами; до настоящего времени не разработан какой-либо четкий критерий совместимости. Все это позволяет сделать вывод, что исследование влияния взаимодействия между отдельными компонентами электрической изоляции на ее надежность, создание единых научно-обоснованных комплексных методов оценки совместимости этих компонентов, разработка критерия совместимости является актуальной задачей.

Цель работы: создание и внедрение методов оценки совместимости компонентов межвитковой изоляции обмоток низковольтных электрических машин.

Методы исследования. Поставленные в работе цели решились с использованием оригинальных и рекомендуемых различными ГОСТами методиками. Изучение влияния взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность - путем физического моделирования обмоток низковольтных электрических машин, имитацией технологических и эксплуатационных воздействий. При проведении экспериментов использовались применяющиеся в реальном производстве пропиточные материалы и обмоточные провода. Расчеты проводились на персональном компьютере с использованием математического пакета MathCad Professional 2000.

Научная новизна работы:

1. Установлена новая закономерность изменения скорости дефектообразования в низковольтной межвитковой изоляции при изменении смачивающих свойств пропиточного состава: с увеличением энергии смачивания пропиточного состава ускоряются процессы дефектообразования;
2. Предложен метод расчета внутренних механических напряжений в пропиточном составе с учетом его реального распределения в объеме обмотки. Использование предложенных выражений позволяет более точно оценить внутренние напряжения, как основной нагрузки, приводящей к разрушению низковольтной межвитковой изоляции;
3. На основании результатов исследования взаимодействия пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов разработаны критерии их совместимости. Предлагаемые критерии количественно оценены, учитывают величины внутренних

напряжений в пропиточном составе, его адгезию к эмали провода и предел прочности эмалевой изоляции на разрыв;

4. На основе определенных в работе критериев, создана методика оценки совместимости пропиточных составов с эмалированными проводами. Предложенная методика учитывает технологические и эксплуатационные воздействия на реальные обмотки и позволяет определить совместимость компонентов для любых систем низковольтной межвитковой изоляции.

Практическая ценность работы:

1. Получены справочные данные по скорости дефектообразования наиболее широко применяемых систем межвитковой изоляции: "ПЭТВ+МЛ-92", "ПЭТ-155+КО-964Н", "ПЭТ-155+КО-916К", "ПЭТ-180+КО-916К", необходимые для определения показателей надежности систем изоляции обмоток.
2. Разработан и сведен в общую методику комплекс мероприятий, позволяющий определить влияние взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность. Реализация методики сокращает время и материальные затраты при выборе материалов для низковольтной межвитковой изоляции.
3. Результаты работы внедрены на предприятиях электротехнической промышленности и используются для оценки совместимости пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов.

Защищаемые положения:

1. Интенсивность образования дефектов в межвитковой изоляции определяется смачивающими свойствами пропиточного состава: с увеличением энергии смачивания пропиточного состава происходит ускорение процессов дефектообразования в межвитковой изоляции.
2. Совместимость пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов определяется величиной внутренних механических напряжений в объеме пропиточного состава и его адгезией к пленке эмали провода.
3. Оценка совместимости пропиточных составов и эмалированных проводов проводится с использованием разработанных критериев, в основе которых лежит сопоставление величин внутренних напряжений в пропиточном составе, прочности на разрыв эмали провода и адгезии в системе.

Апробация работы:

Основные результаты экспериментальных и теоретических исследований были доложены и обсуждались:

1. На III Международной конференции «Физико-технические проблемы электро-технических материалов и компонентов» г. Москва, 1999 г.
2. На V областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» г.Томск: ТПУ, 1999 г.
3. На V международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000, г. Новосибирск 2000 г.
4. На XVI Всероссийской научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск: НПП «Полюс», 2000 г.
5. 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.
6. На 5th Korea-Russia International Symposium on Science and technology (KORUS 2001), г. Томск, ТПУ, 2001 г.
7. На международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, ТПУ, 2001г.
8. На третьей международной конференции «Электрическая изоляция - 2002», Санкт Петербург, 18-21 июня, 2002 г.
9. На VII, VIII и IX Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2001, 2002 и 2003 г.
10. На международной научно-технической конференции "Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы", г. Томск, 3-5 сентября, 2003 г.

Реализация результатов работы: результаты диссертационной работы внедрены и используются: на ЗАО «Сибкабель», г. Томск и на ООО «Сибирская электротехническая компания», г. Томск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержащих 127 страниц текста, 12 таблиц, 42 рисунка, списка литературы, включающего в себя 135 наименований и приложения на 6 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность полученных результатов, проведена краткая аннотация диссертации по главам.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации: рассмотрены и проанализированы причины отказов обмоток низковольтных электрических машин, микроконструкция межвитковой изоляции низковольтных обмоток, обозначена проблема совместимости пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов, проанализированы существующие методы оценки их совместимости.

Как показывает опыт эксплуатации, большое влияние на надежность межвитковой изоляции оказывает взаимодействие пропиточного состава с эмалевой изоляцией обмоточного провода. Критерием отказа межвитковой изоляции является наличие сквозного дефекта на двух соприкасающихся витках обмотки (рис. 1) так как низковольтная изоляция даже в состаренном состоянии обладает электрической прочностью выше воздействующих напряжений и перенапряжений. Очевидно, что в

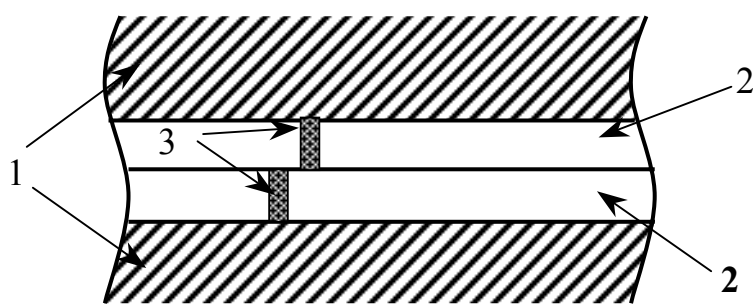


Рис. 1. Физическая модель низковольтной межвитковой изоляции: 1 - провод; 2 - эмалевая изоляция; 3 - сквозное повреждение эмали.

системах с плохой совместимостью процессы образования таких дефектов значительно ускоряются, и снижается надежность композиции "пропиточный состав - эмалевая изоляция". Краткий анализ работ, посвященных совместимости компонентов

межвитковой изоляции, позволяет поставить ряд конкретных задач, решение которых позволит создать единую систему методов оценки их совместимости:

- исследовать влияние взаимодействия между компонентами межвитковой изоляции на ее надежность с учетом технологических и эксплуатационных факторов;
- на основе исследования взаимодействия между пропиточным составом и эмалевой изоляцией обмоточного провода определить критерии их совместимости, учитывающие основные технологические и эксплуатационные факторы;
- разработать способы количественной оценки критериев совместимости;
- разработать и внедрить на предприятиях электротехнической промышленности рекомендации по выбору оптимальных компонентов для межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

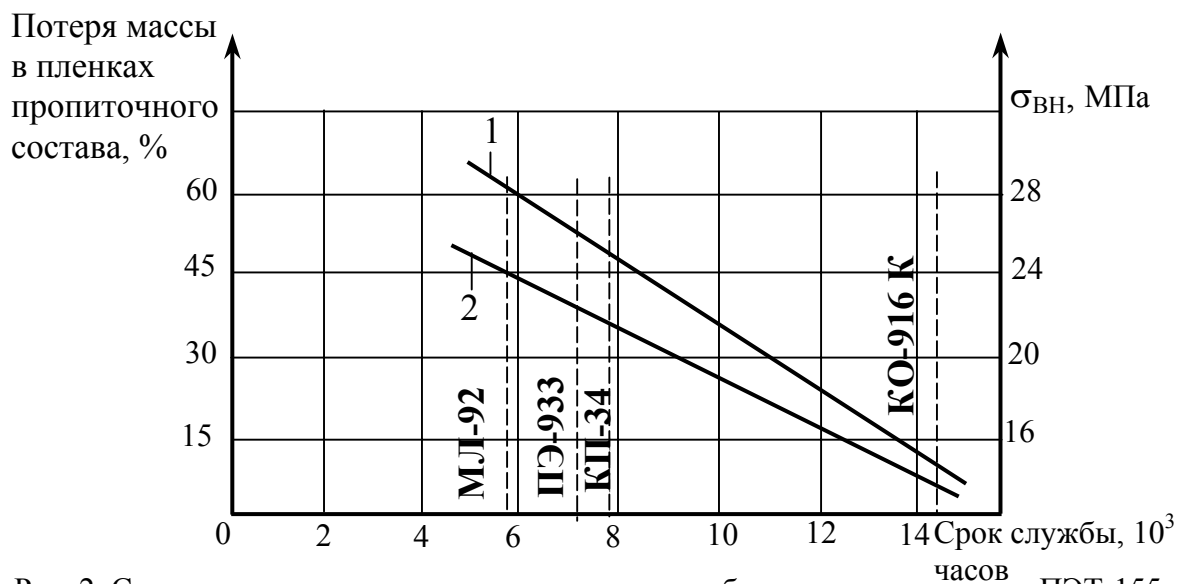


Рис. 2. Сравнительные данные среднего срока службы скруток из провода ПЭТ-155 в сочетании с различными пропиточными составами: 1 - внутренние механические напряжения в объеме пропиточного состава (после теплового старения при 170°C в течение 70 суток), 2 - потери массы в пропиточном составе (после теплового старения при 170°C в течение 80 суток).

Во второй главе определены основные факторы, влияющие на образование и развитие дефектов в низковольтной межвитковой изоляции. Отмечено: минимальное дефектообразование и наибольший средний срок службы в композиции «пропиточный состав – эмалированный провод» возможны при следующем сочетании свойств: небольшой уровень внутренних механических напряжений и малая потеря массы в пропиточном составе в процессе теплового старения, а также сравнительно небольшая адгезия между пропиточным составом и эмалью провода. При несовпадении этих свойств процессы дефектообразования в межвитковой изоляции заметно ускоряются: высокий уровень внутренних напряжений приведет к растрескиванию пропиточного состава с возможным последующим развитием трещины в эмалевую изоляцию. На рис. 2 показана обработка литературных данных, характеризующих влияние перечисленных параметров на средний срок службы различных композиций «пропиточный состав – эмалевая изоляция».

Процесс разрушения межвитковой изоляции начинается с растрескивания пропиточного состава под действием внутренних напряжений. Согласно современным представлениям о прочности твердых тел, образование дефектов происходит следующим образом.

При достижении трещиной эмалевой изоляции значительно усложняется механизм ее развития. Перед острием трещины, являющимся концентратором напряжений, расположена область локального перенапряжения материала, в которой величина внутренних механических напряжений существенно выше, чем в остальном объеме полимера. При разрушении композитных материалов, в данном случае системы "пропиточный состав - эмалированный провод", развитие трещины (рис.3, б) может быть приостановлено, если напряженная зона, перемещающаяся в виде волны

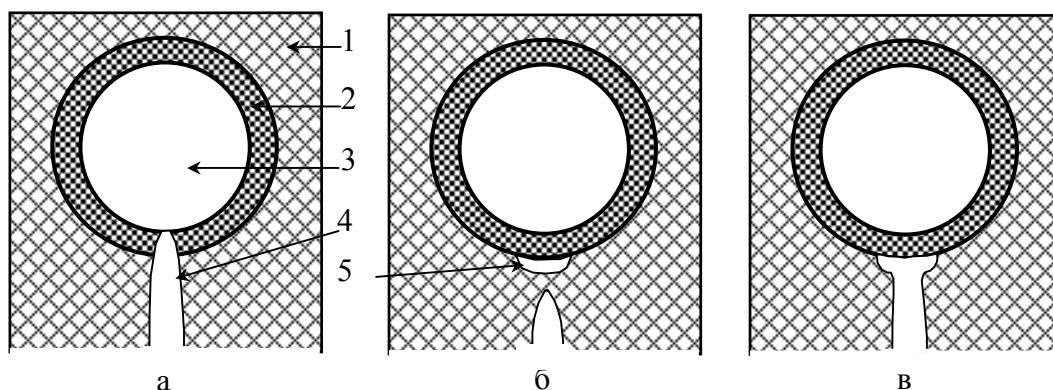


Рис. 3. Развитие трещины в межвитковой изоляции: 1 – пропиточный состав; 2 – эмалевая изоляция; 3 – обмоточный провод; 4 – трещина в пропиточном составе; 5 – отслаивание пропиточного состава от эмалевой изоляции (вторичная трещина).

перед бегущей трещиной, вызывает появление полости на границе раздела фаз. Возникшая полость становится ловушкой для трещины, и дальнейшее продвижение трещины приостанавливается (рис.3, в). Торможение трещины по описанному механизму возможно только при условии, если сила адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз не превышает определенного уровня, иначе трещина может прорасти в пленку эмальлака, рис.3, а. Подбор компонентов для межвитковой изоляции с учетом их физико-механических параметров и уровня адгезии между ними позволит замедлить процессы дефектообразования и повысит надежность полученной композиции.

Исследовано влияние смачивающих свойств пропиточного состава на величину адгезии между компонентами межвитковой изоляции. Адгезия в системе "пропиточный состав - эмалированный провод" оценивалась по величине усилия вырыва центрального проводника из пучка предварительно пропитанных отрезков обмоточного провода. Установлено: увеличение энергии смачивания повышает цементирующую способность пропиточного состава. Пропиточный состав с большей энергией смачивания образует более прочный адгезионный контакт с эмалью провода за

счет лучшего заполнения микронеровностей, что приводит к увеличению числа связей, определяющих адгезию.

Микроконструкция межвитковой изоляции может быть двух видов: монолитная - при полном заполнении межвиткового пространства пропиточным материалом и сотовая - пропиточный состав располагается в виде тонкой пленки вокруг провода. Предложен расчетный метод определения величин внутренних на-

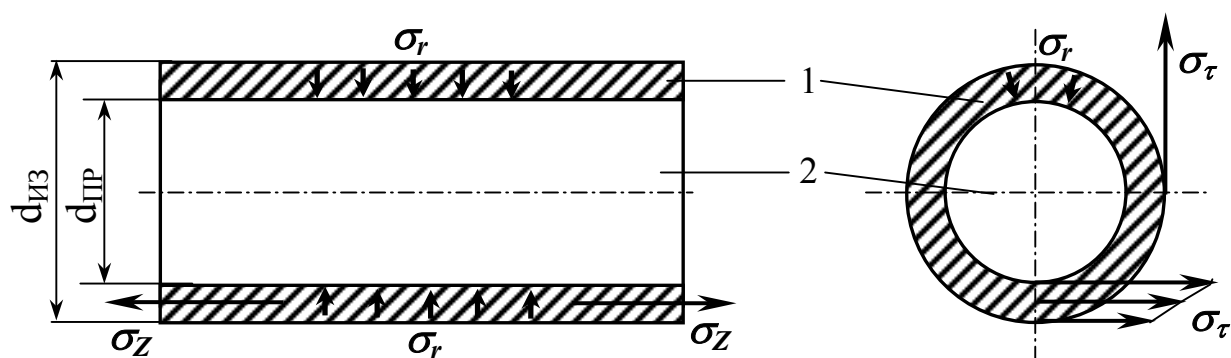
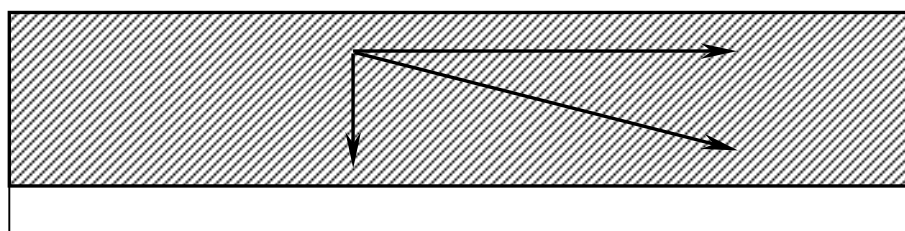


Рис. 4. Внутренние механические напряжения в пропиточном составе (1), расположенном в виде тонкой пленки вокруг круглого обмоточного провода (2).



пряжений в объеме пропиточного состава для сотовой микроконструкции. Внутренние напряжения в такой системе будут обусловлены, главным образом, σ_τ , σ_r и σ_z (рис. 4): внутренние напряжения σ_z действуют по образующей провода, σ_r представляют собой радиальные напряжения сжатия, направленные к центру проводника, а σ_τ - тангенсальные, направленные по окружности провода. Величина σ_r может быть определена по выражению:

$$\sigma_r = \frac{E_{\text{пр.с.}}(\alpha_{\text{пр.с.}} - \alpha_{\text{Cu}})\Delta T}{\mu + [(1 + k^2) \cdot (1 - k^2)]} \quad (1)$$

где $E_{\text{пр.с.}}$ и μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона пропиточного состава; ΔT - разность температур между температурой отверждения пленки полимера и расчетной; $k = d_{\text{из}}/d_{\text{пр}}$ (рис. 4).

В рассматриваемом случае длина проводника ℓ много больше его радиуса r , а толщина эмалевой пленки $h_{эм.уз.}$ много меньше диаметра проводника $d_{np.}$, т.е. $\ell \gg r$; $h_{эм.уз.} \ll d_{np.}$ (2)

Следовательно

$$\sigma_z \gg \sigma_r \quad (3)$$

и величиной σ_r можно пренебречь. Значение осевых термомеханических напряжений σ_z определяются по выражению:

$$\sigma_z = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot E_{пп.с.}}{1 - \mu} \quad (4)$$

В целом под действием σ_r и σ_z в пленке пропиточного состава возникает равнодействующая внутренних напряжений $\sigma_{BH.COT.}$ (рис. 5):

$$\sigma_{BH.COT.} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_z^2} \quad (5)$$

Проведенный по выражению (5) расчет внутренних напряжений в пропиточном составе МЛ-92 для сотовой микроконструкции межвитковой изоляции (рис. 6) показал хорошую сходимость результатов с литературными данными. Более высокая расчетная величина внутренних напряжений по сравнению с литературными данными, по-видимому, обусловлена некоторой релаксацией внутренних напряжений в объеме полимера на консоли за счет микроотслаиваний пленки пропиточного состава от подложки.

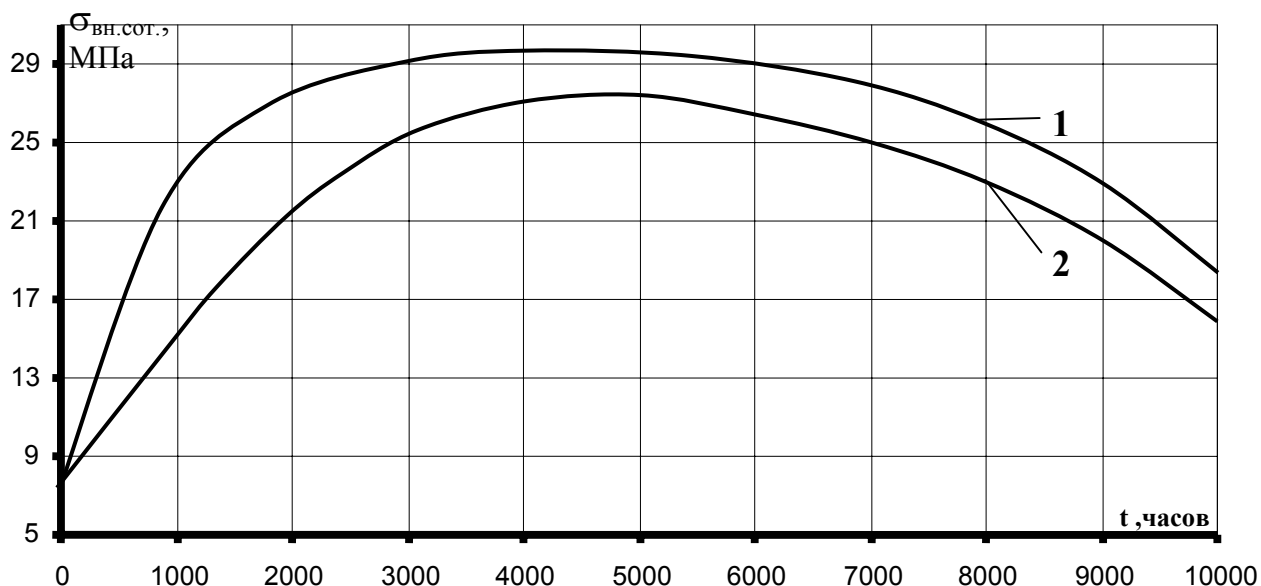


Рис. 6. Изменение величин внутренних механических напряжений в пленке пропиточного лака МЛ-92 от времени теплового старения:

1 - рассчитаны по выражению (5); 2 - измеренные консольным методом.

Используя данную модель можно на стадии проектирования систем изоляции обмотки более точно оценить величины внутренних механических напряжений в пропиточном составе, как основной нагрузки, приводящей к разрушению межвитковой изоляции.

В третьей главе проведено исследование влияния взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность.

В первую очередь оценено действие растворителей различного типа на эмалевую изоляцию. Установлено: степень изменения свойств эмалевой изоляции зависит от полярности применяемого растворителя. Чем выше относительная диэлектрическая проницаемость, тем заметнее необратимое ухудшение электрической и механической прочности эмали провода. Сильнополярные молекулы растворителя активно проникают в объем эмалевой пленки, приводя к ее набуханию и разрыву наиболее слабых химических связей. Эти процессы приводят к необратимому ухудшению свойств эмалевой изоляции.

Оценка взаимодействия пропиточных составов с эмалированными проводами под действием технологических и эксплуатационных факторов проводилась на макетах, имитирующих обмотку низковольтной электрической машины. Макеты первой группы представляют собой части пакета статора, в которые укладывались витки обмотки (рис. 7). Макеты второй группы представляют собой пучки попарно связанных отрезков провода с различного типа ("кольцевой - кольцевой", "кольцевой - протяженный", "протяженный - протяженный") искусственно нанесенными дефектами на соседних витках. Каждый макет второй группы обматывался фторопластовой лентой для уменьшения вытекания лака после пропитки и термообработки. Термообработка проводилась в соответствии с нормативно-технической документацией на пропиточный состав. Макеты

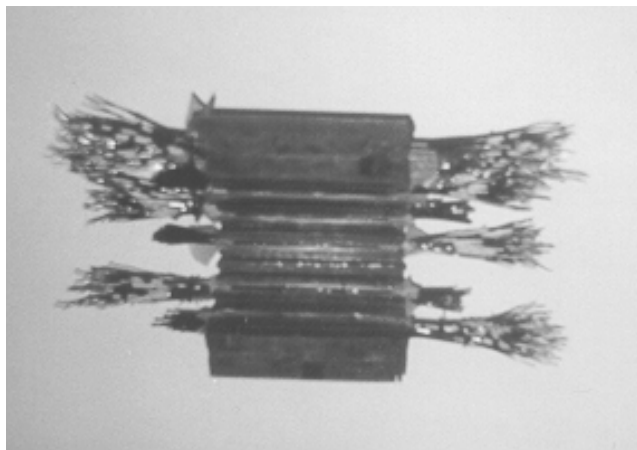


Рис. 7. Макет низковольтной межвитковой изоляции.

пропитывались методом погружения пропиточным составом с различной величиной энергии смачивания. Энергия смачивания пропиточных составов варьировалась изменением процентного содержания растворителя и измерялась методом погружения. Испытания макетов проводились циклически. Длительность цикла теплового старения

составляла 50-150 часов, после чего охлажденные до температуры окружающей среды макеты подвергались испытанию повышенным напряжением $U_{исп}$. Результаты испытаний макетов приведены в виде зависимостей интегральной вероятности образования дефекта на образце от времени старения на рис. 8 - 9. Оценка влияния взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность в процессе эксплуатации проводилась на макетах, изготовленных из бездефектного провода. Результаты испытаний макетов приведены на рис. 10 - 12 в виде зависимостей дефектности макетов от времени теплового старения. Макеты представляют собой пучки из попарно связанных отрезков бездефектного провода (перед пропиткой каждая пара испытывалась испытательным напряжением $U_{исп}$). Макеты пропитывались пропиточным составом с различной вязкостью и энергией смачивания.

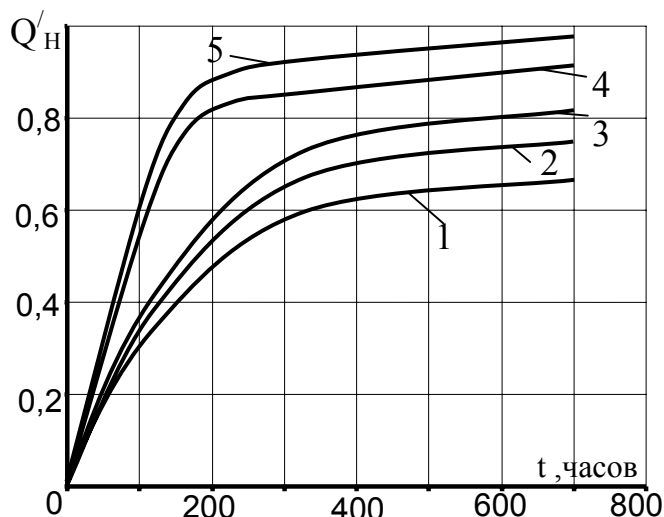


Рис. 8 Зависимость интегральной вероятности образования дефекта в системе пропиточный лак МЛ-92 - провод ПЭТ-155 от времени теплового старения. Энергия смачивания пропиточного состава: 1 - $24,6 \cdot 10^{-3}$; 2 - $24,9 \cdot 10^{-3}$; 3 - $25,2 \cdot 10^{-3}$; 4 - $25,5 \cdot 10^{-3}$; 5 - $25,8 \cdot 10^{-3}$ кг/с². Сквозные дефекты типа "кольцевой - кольцевой".

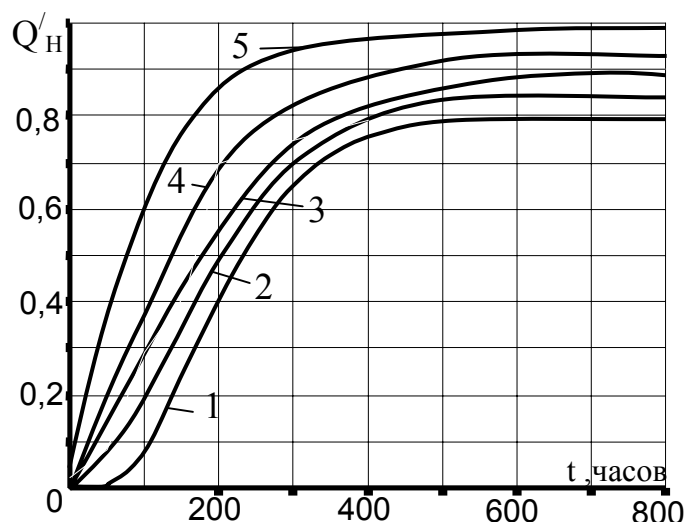


Рис. 9. Зависимость интегральной вероятности образования дефекта в системе пропиточный лак МЛ-92 - провод ПЭТВ-2 от времени теплового старения. Энергия смачивания пропиточного состава: 1 - $25,8 \cdot 10^{-3}$; 2 - $26,0 \cdot 10^{-3}$; 3 - $26,5 \cdot 10^{-3}$; 4 - $27,0 \cdot 10^{-3}$; 5 - $27,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с². Сквозные дефекты типа "кольцевой - кольцевой".

Дефектность в макетах определялась по выражению:

$$\lambda_g = -\frac{1}{\ell_{исп}} \ln \left(1 - \frac{n_{qi}}{n_{ui}} \right) \quad (6)$$

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

Результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы: скрытие пропиткой сквозных повреждений на эмалевой изоляции во многом зависит от типа дефекта и смачивания пропиточного состава. Отмечено: наибольшую опасность с точки зрения надежности представляют дефекты типа "протяженный", так как они практически не заживают при пропитке, либо выявляются в начальный период теплового старения. Наибольшее дефектообразование среди исследованных композиций отмечено в системе ПЭТВ+МЛ-92. Для этого сочетания характерен высокий уровень внутренних механических напряжений,

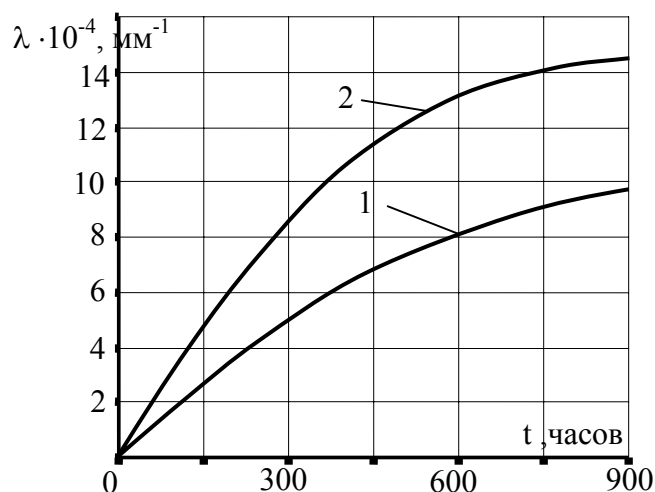


Рис. 10. Изменение дефектности макетов от времени теплового старения в системе пропиточный лак КО-916К - провод ПЭТ-180 (температура старения 205⁰ С).

Энергия смачивания пропиточного состава:
1 - $16,5 \cdot 10^{-3}$; 2 - $21,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с².

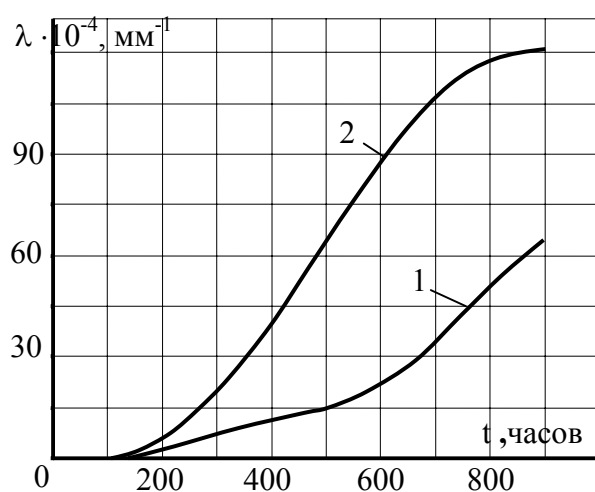


Рис. 11. Изменение дефектности макетов от времени теплового старения в системе пропиточный лак КО-916К - провод ПЭТ-155 (температура старения 175⁰ С).

Энергия смачивания пропиточного состава:
1 - $18,2 \cdot 10^{-3}$; 2 - $22,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с².

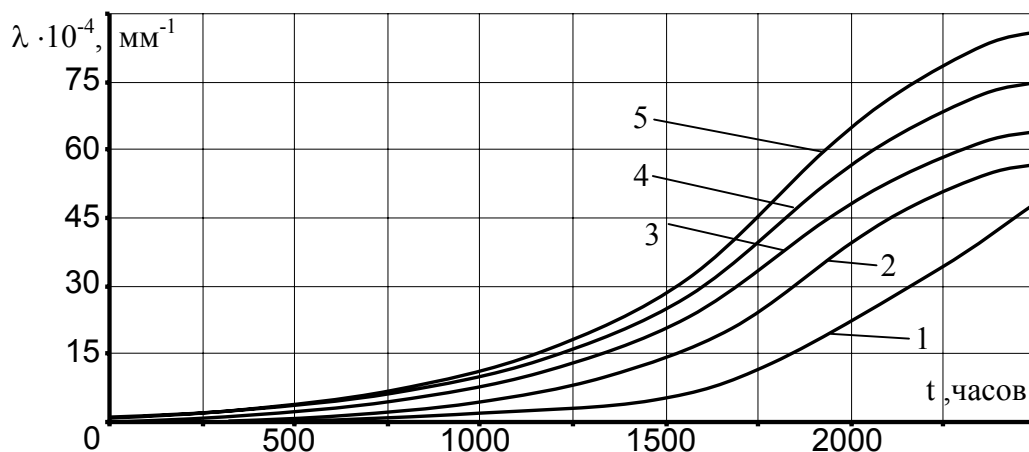


Рис. 12. Изменение дефектности макетов от времени теплового старения в системе пропиточный лак МЛ-92 - провод ПЭТВ (температура старения 145⁰ С). Энергия смачивания пропиточного состава: 1 - $25,8 \cdot 10^{-3}$; 2 - $26,0 \cdot 10^{-3}$; 3 - $26,5 \cdot 10^{-3}$; 4 - $27,0 \cdot 10^{-3}$; 5 - $27,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с².

большая потеря массы пропиточным составом в процессе теплового старения и максимальное смачивание пропиточным составом эмалевой изоляции. При пропитке макетов кремнийорганическими составами КО-916К и КО-964Н отмечено меньшее количество отказов. В этих пропиточных составах малая потеря массы, меньшая величина внутренних механических напряжений по сравнению с большинством других пропиточных составов, а также меньшая адгезия между пропиточным составом и эмалевой изоляцией. Такое сочетание физико-механических свойств обуславливает малое дефектообразование в межвитковой изоляции и хорошую совместимость ее компонентов. При увеличении энергии смачивания пропиточного состава ускоряются процессы дефектообразования в макетах. Большее смачивание обуславливает более прочную адгезию и повышает вероятность развития сквозного дефекта. Интен-

сивность процесса разрушения под действием эксплуатационных нагрузок определяется величиной внутренних механических напряжений в пропиточном составе и его адгезией к эмали провода.

Четвертая глава посвящена созданию методики, обеспечивающей оптимальное, с точки зрения совместимости, сочетание пропиточных составов и эмалированных проводов.

Результаты исследования взаимодействия компонентов межвитковой изоляции позволяют выделить химическую (технологическую) и эксплуатационную совместимость. Химическая совместимость определяется способностью пленки эмалевой изоляции обмоточного провода сохранять свои электрические и механические свойства после действия растворителя и горячих пропиточных составов. Эксплуатационная - способностью эмалевой изоляции и пропиточного состава совместно работать в одной системе без ускоренного износа. Наиболее просто и адекватно оценить технологическую совместимость можно определяя изменение величин пробивного напряжения и механической прочности эмалевой изоляции до и после воздействия растворителей, используя критерии C_{T1} и C_{T2} :

$$C_{T1} = \frac{\Delta\lambda_{2d} - \Delta\lambda_{2d.P}}{\Delta\lambda_{2d}} \quad (7)$$

где $\Delta\lambda_{2d}$ и $\Delta\lambda_{2d.P}$ - соответственно технологическая устойчивость эмалевой изоляции до и после воздействия растворителя. Определение $\Delta\lambda_{2d}$ производится по результатам испытаний в электролите. Технологические нагрузки имитируются путем навивания провода на металлический стержень диаметром $2d_{из}$. Электролитом служит раствор поваренной соли. Один электрод заземлен, на образец провода подается напряжение 30-60 В. В местах сквозных повреждений эмали выделяются пузырьки газа. Подсчитывается количество сквозных повреждений и определяется дефектность:

$$\lambda = \frac{q}{n \cdot \ell_{исп}}, [1/мм] \quad (8)$$

где: q – суммарное число выявленных повреждений во всей партии; n – число испытанных образцов; $\ell_{исп}$ - испытательная длина образца провода, мм.

Если критерий C_{T1} больше или равен 0,7 эмаль провода сохраняет механические свойства и уровень технологии изготовления обмоток удовлетворителен. Если же C_{T1} меньше 0,7, то необходимо выбирать другие материалы для межвитковой изоляции. Электрическую прочность эмали провода следует проводить по долевого изменению величин пробивного напряжения до и после воздействия растворителей:

$$C_{T2} = \frac{U_{ПР.О} - U_{ПР.Р}}{U_{ПР.О}} \quad (9)$$

где $U_{ПР.О}$ и $U_{ПР.Р}$ - соответственно пробивное напряжение эмалевой изоляции до и после воздействия растворителя. Величина C_{T2} выбирается в соответствии с нормативно-технической документацией на обмоточный провод. При удовлетворении значений C_{T1} и C_{T2} требуемым, необходимо оценить эксплуатационную совместимость. С этой целью проводят определение и сравнение величин внутренних напряжений в пропиточном составе $\sigma_{ВН}$, его адгезии A к эмали провода, а также предел прочности на разрыв пленки эмалевой изоляции $\sigma_{Р.Э}$. Верхний предел допустимой адгезии в межвитковой изоляции с учетом величин внутренних напряжений в пропиточном составе $\sigma_{ВН}$ можно представить как:

$$A_{\max} \leq \sigma_{ВН} \quad (10)$$

Согласно механизму Гордона-Кука разрушение композиционных материалов может быть приостановлено, если адгезионная прочность на границе раздела фаз не превышает 1/5 когезионной прочности второго материала (в данном случае – прочности на разрыв $\sigma_{Р.Э}$ пленки эмали провода). В этом случае оптимальную, с точки зрения торможения процессов разрушения, величину адгезии между компонентами межвитковой изоляции можно представить как:

$$A_{\text{ОПТ}} \leq 1/5 \sigma_{Р.Э} \quad (11)$$

В качестве критериев эксплуатационной совместимости принимают отношения (10) - (11). При этом используются литературные данные, либо при их отсутствии:

- определение $\sigma_{ВН}$ проводят: для сотовой микроконструкции по выражению (5). Предлагаемый расчетный способ не сложен и пригоден для реализации в производственных условиях.

- величину адгезии в системе «пропиточный состав – эмалированный провод» следует оценивать по усилию вырыва центрального проводника из пучка таких же предварительно пропитанных проводников. Указанная методика проста в реализации и выполнима в короткое время. При сопоставлении полученных результатов возможны следующие варианты сочетания свойств:

- величина $\sigma_{ВН}$ превышает $\sigma_{Р.ПС}$, а $A \geq 1/5 \sigma_{Р.Э}$. В такой системе будет ускоренное дефектообразование, следовательно низкая надежность и плохая совместимость. Необходим выбор других материалов.

- в случае если $\sigma_{ВН}$ превышает $\sigma_{Р.ПС}$, а $A \leq 1/5 \sigma_{Р.Э}$. Пропиточный состав будет иметь склонность к растрескиванию, однако за счет умеренной адгезии его к пленке

эмали в такой композиции не будет ускоренного дефектообразования, система характеризуется средней совместимостью. Рекомендуется выбор других материалов.

- σ_{BH} меньше $\sigma_{P,PC}$, а $A \leq 1/5 \sigma_{P,Э}$. Пропиточный состав не обладает склонностью к растрескиванию, дефектообразование минимально, компоненты обладают хорошей совместимостью и рекомендуются для совместного использования в системе изоляции.

Изложенные выше мероприятия сведены в общую методику оценки совместимости пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов, блок схема которой приведена на рис. 13.

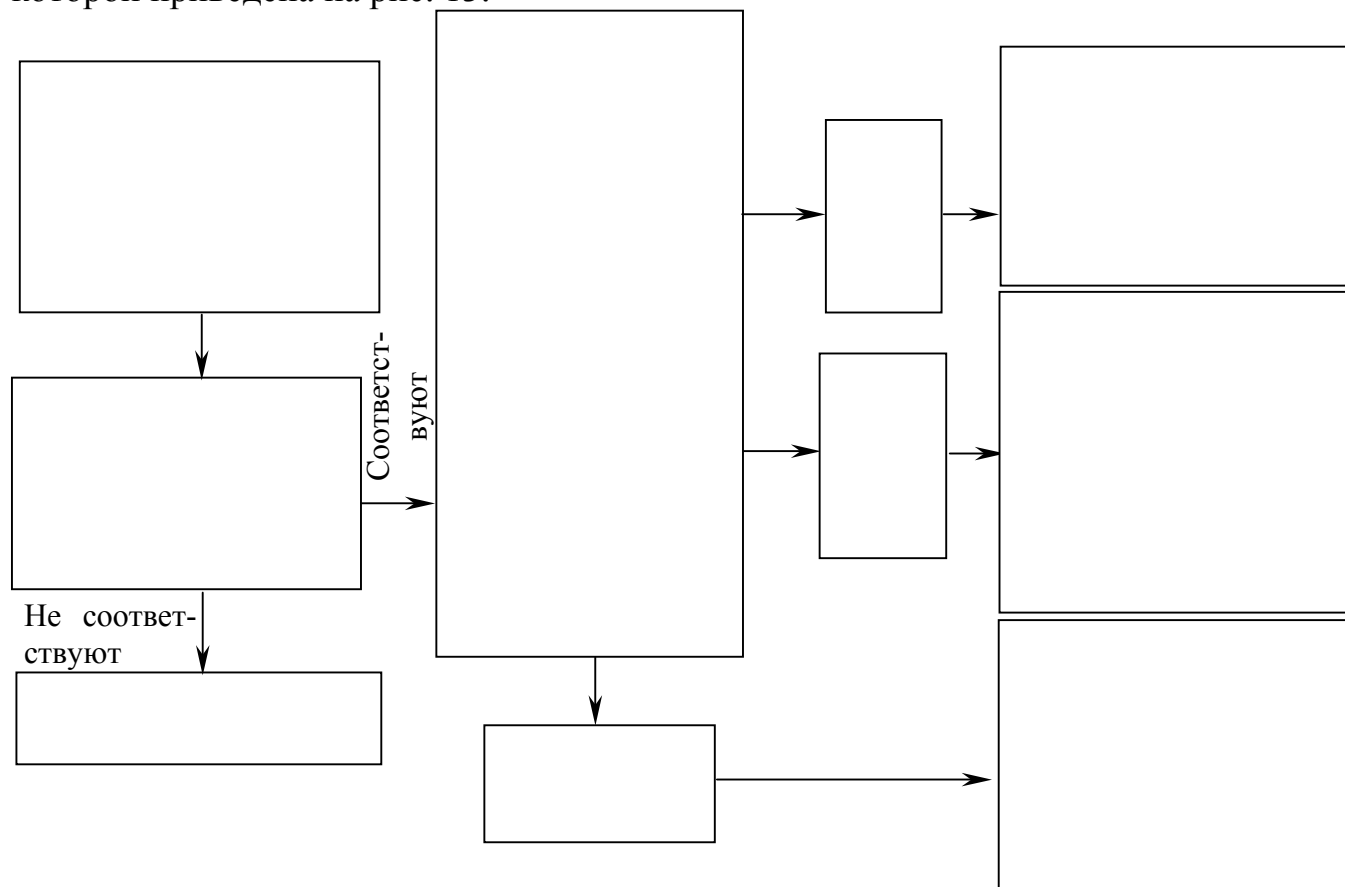


Рис. 13. Схема проведения мероприятий для определения совместимости пропиточных составов с эмалированными обмоточными проводами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основными результатами работы является обобщение литературных и экспериментальных данных влияния взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность, разработка критериев их совместимости, создание и внедрение экспресс-методики определения совместимости пропиточных составов и эмалированных обмоточных проводов. Разработан расчетный метод определения внутренних механических напряжений в пропиточном составе с учетом его реального расположения в обмотке, позволяющий более точно оценить механические нагрузки и их влияние на надежность межвитковой изоляции. Проведенное на

имитирующих низковольтную обмотку макетах исследование влияния взаимодействия пропиточных составов и эмалированных проводов на надежность полученной композиции позволило установить факторы, определяющие ускоренное деформообразование в случае плохой совместимости. Разработаны и количественно оценены критерии совместимости, учитывающие физико-механические свойства компонентов межвитковой изоляции, а также технологические и эксплуатационные воздействия на обмотки реальных электрических машин. Используя определенные в работе критерии, разработан и сведен в общую методику комплекс мероприятий, позволяющий определить совместимость пропиточных составов с эмалированными проводами. 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 проведенного объема работ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Леонов А.П., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Матялис А.П., Калыгина С.В. Обеспечение надежности электроизоляционных систем низковольтных обмоток на стадиях проектирования и изготовления// МКЭМК-99 Труды III Международной конференции «Физико-технические проблемы электротехнических материалов и компонентов». Москва, 1999 г. стр. 109.
2. Леонов А.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. 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 2000г., стр. 140-141.
3. Леонов А.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. Оценка вероятности образования сквозного дефекта в межвитковой изоляции низковольтных обмоток электрических машин// Сборник трудов 6-й всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск 2000 г., стр. 504-505.
4. Леонов А.П., Марьин С.С. Износ межвитковой изоляции намоточных изделий под действием эксплуатационных факторов// Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2001 г., ТПУ. стр.161.
5. Леонов А.П., Айзадуллин Л.Н. Оценка стойкости межвитковой изоляции к растрескиванию// Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2001 г., ТПУ. стр.162.

6. Леонов А.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. 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., стр. 232-233.
7. A.P. Leonov, A. N. Dudkin, S. S. Maryin. 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.
8. Леонов А.П., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. Процесс образования и рост трещин в системе межвитковой изоляции намоточных изделий в период эксплуатации// Сб. научных трудов 7 Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск, 2001, стр.401-403.
9. Леонов А.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на надежность межвитковой изоляции намоточных изделий// Сб. научных трудов 7 Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск, 2001, стр. 404-405.
10. Леонов А.П., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н., Марьин С.С. Расчетное определение стойкости к растрескиванию системы «пропиточный состав – эмальизоляция обмоточного провода»// Материалы Международной научно-технической конференции «Полиматериалы – 2001», Москва, МИРЭА – 2001, стр. 215-218.
11. A.P. Leonov, Yu. P. Pokholkov, A. N. Dudkin, S. S. Maryin. 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.
12. Леонов А.П., Айзадуллин Л.Н., Петухов П.Ю. Взаимодействие пропиточных составов с эмалевой изоляцией обмоточных проводов в процессе изготовления обмоток низковольтных электрических машин// 8-ая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2002, т.2, стр.44-45.
13. Леонов А.П., Музыкин Я.О. Изучение механических свойств композиции «пропиточный состав – эмалированный провод»// Сб. научных трудов 8 Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск, 2002, стр.41-42.

14. Леонов А.П., Похолков Ю.П., Дудкин А.Н. О совместимости пропиточных составов с эмалевой изоляцией обмоточных проводов// Труды третьей международной конференции «Электрическая изоляция - 2002», 18-21 июня, Санкт-Петербург, стр. 284-285.
15. Леонов А.П., Бухарева Е.А. Оценка стойкости эмалированных проводов к действию растворителей// Материалы международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», 2003 г, 3-5 сентября, г. Томск, ТПУ. стр.215-216.
16. Леонов А.П., Чернецова О.В., Шмырин Т.А. Оценка влияния технологических факторов на надежность межвитковой изоляции// Материалы международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», 2003 г, 3-5 сентября, г. Томск, ТПУ. стр. 216-219.
17. Леонов А.П., Марьин С.С., Киселева А.В. Влияние взаимодействия компонентов межвитковой изоляции на ее надежность// Сборник трудов 9-й Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика», Красноярск 2003 г., стр. 504-505.