

**Марьин Сергей Сергеевич**  
Maryin Sergey Sergeevich  
ООО «Газпром трансгаз Томск»  
Gazprom Transgaz Tomsk  
Ведущий инженер ООО «Газпром трансгаз Томск»  
Leading Engineer of Gazprom Transgaz Tomsk  
к.т.н.  
E-Mail: mss\_tpu@mail.ru

**Тарасов Евгений Владимирович**  
Tarasov Evgeniy Vladimirovich  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
National Research Tomsk Polytechnic University  
студент группы 7A92  
student group 7A92  
E-Mail: hupy@mail.ru

**Шуликин Сергей Николаевич**  
Shulikin Sergey Nikolaevich  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
National Research Tomsk Polytechnic University  
Старший преподаватель кафедры  
«Электромеханических комплексов и материалов»  
Senior Lecturer «Department of Electromechanical Plants and Materials»  
E-Mail: hupy@tpu.ru

05.09.02 – Материаловедение в электротехнике и радиоэлектронике

**Исследование дефектообразования в межвитковой изоляции  
низковольтных электрических машин и оценка её долговечности**

The study of defects in interturn insulation of low-voltage electrical equipment and  
assessment of its durability

**Аннотация:** Исследованы возможные причины разрушения межвитковой изоляции. Установлено влияние вязкости пропиточных составов МЛ-92 и КО-916К на уровень внутренних механических напряжений и скорость образования дефектов в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин. Установлена зависимость пробивного напряжения межвитковой изоляции от механической прочности изоляционных материалов. Показано, что избыточное появление трещин в межвитковой изоляции является причиной потери материалом изоляционных свойств. На основе теории прочности твердых тел создан метод расчета долговечности низковольтной межвитковой изоляции.

**The Abstract:** The possible causes of destruction interturn insulation. The influence of viscosity preservatives ML-92 and CO-916K on the level of internal stress and the rate of defects in in-

terturn insulation of low-voltage electrical equipment. The dependence of the breakdown voltage in interturn insulation of the mechanical strength of insulating materials. Shown that excessive cracks in interturn insulation material is the cause of the loss of insulating properties. Based on the theory of strength of solids created by the method of calculating longevity LV interturn insulation.

**Ключевые слова:** Электроизоляционный пропиточный состав, эмальпровод, дефектообразование, внутренние механические напряжения, вероятность безотказной работы.

**Keywords:** Elektroizolyatsionny impregnating composition, enameled wire, defect, internal stresses, the probability of failure-free operation.

\*\*\*

### **Исследование дефектообразования в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин**

Надежность электротехнических устройств является необходимым условием эффективной работы различных автоматизированных систем, комплексов и оборудования, работающих в различных отраслях промышленности. Отказ большинства низковольтных электрических машин в процессе эксплуатации происходит в результате отказа системы изоляции обмоток [2].

Эксплуатационная надежность низковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования определяется в первую очередь их рабочей температурой и нагревостойкостью примененных электроизоляционных материалов, а также их электрической прочностью, влагостойкостью и механической прочностью.

Изменение свойств низковольтных систем электрической изоляции обмоток электрооборудования происходит под влиянием таких основных факторов как тепловые, электрические, механические нагрузки и воздействие окружающей среды [10,11,7]. Степень воздействия каждого из этих факторов на изоляционные системы различная. Наиболее слабым элементом системы изоляции электрической машины является витковая изоляция.

Выход из строя витковой изоляции обусловлен наличием в ней сквозных дефектов в пропиточном составе и эмалевой изоляции обмоточного провода, причем частота их появления возрастает по мере физического износа изоляции 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. Проблемой образования и роста трещины в полимерных материалах посвящено множество исследований, однако в них отсутствует информация о четкой взаимосвязи между изученными явлениями и реальной работой материалов в конкретном изделии.

Для оценки скорости дефектообразования в межвитковой изоляции в качестве исследуемых материалов были выбраны обмоточные провода диаметром 1,0 мм с эмалевой изоляцией марок ПЭТВ и ПЭТМ-180, а также пропиточные составы марок МЛ-92 и КО-916К с различной вязкостью (выбор данных пропиточных составов обосновывается классами нагревостойкости выбранных обмоточных проводов и хорошей с ними совместимостью).

Выявление причин разрушения межвитковой изоляции и оценки скорости дефектообразования проводилось с помощью двух методов – консольным, для оценки внутренних механических напряжений возникающих в пленки пропиточного состава, и методом, описанном в ОСТ16.0.800.821-88 для оценки скорости дефектообразования.

Для оценки внутренних механических напряжений возникающих в пленках пропиточных составов применен консольный метод, основанный 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 0,03 МПа [7].

При выборе геометрии образцов и технологии их изготовления были приняты во внимание следующие основные требования: учет масштабного фактора; в реальных конструкциях толщина пропиточного и заливочного материала находится в пределах 0,03...0,1 мм; поэтому толщина образцов для испытаний принята равной 0,1 мм; учет технологического фактора; в первую очередь технология запечки пропиточного состава.

Металлическая подложка представляла собой следующую конструкцию: две пластины из нержавеющей стали 1Х18Н9Т размером 0,08×0,015 м, толщиной 0,1 мм (пластина-подложка) и 1 мм (пластина-основание), соединенные точечной сваркой через стальную прокладку из нержавеющей стали размером 0,02×0,015 м, толщиной 1 мм. В пластине-основании имелись четыре отверстия диаметром 10 мм для измерения толщины покрытия микрометром [11].

Для устранения статистической погрешности каждое измерение проводилось на пяти образцах. После сушки и в процессе теплового старения через интервалы времени в 100 ч образцы охлаждались до 20 °С. Возникающие в покрытии внутренние напряжения рассчитывались по величине отклонения свободного конца пластинки  $\Delta h$ :

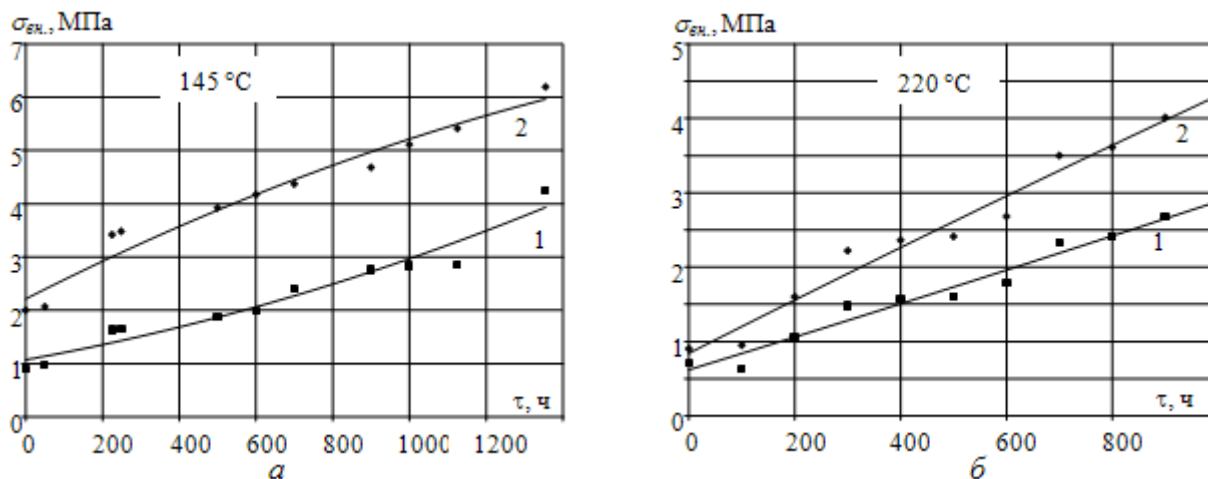
$$\sigma_{вн} = \frac{\Delta h E h_k^3}{3l^2 \Delta h_k (h_k + \Delta h_k)} \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – отклонение пластины подложки от первоначального положения, м;  $E$  – модуль упругости пластины ( $E = 1,96 \cdot 10^5$  МПа);  $l$ ,  $\Delta h_k$  – длина и толщина полимерного покрытия, м;  $h_k$  – толщина пластины-подложки, м.

Результаты измерений представлены на рис. 1.

Оценка скорости дефектообразования проводилась на образцах, имитирующих низковольтную межвитковую изоляцию намоточного изделия.

Образцы представляли собой макеты, изготовленные из 50-и попарно связанных отрезков бездефектного обмоточного провода длиной 330 мм. Макеты пропитывались составом с различной величиной условной вязкости от 19 до 40 с по ВЗ-4. Пропитка макетов проводилась двукратно методом погружения. Режим сушки проводился в соответствии с нормативно-технической документацией на пропиточные составы [2]. После сушки и в процессе теплового старения в термошкафах конвекционного типа через интервалы времени в 100 ч макеты вынимались, охлаждались до 20 °С и исследовались испытательным напряжением. При исследовании учитывалось количество пар, пробитых испытательным напряжением. Испытания проводились на следующих сочетаниях: провод ПЭТВ + МЛ-92, провод ПЭТМ-180 + КО-916К. Результаты испытаний приведены в виде зависимостей скоростей дефектообразования  $H$  от времени старения, рис. 2.



**Рис. 1.** Изменение величин внутренних механических напряжений в пленке пропиточного состава МЛ-92 (а) КО-916К (б) от времени теплового старения и условной вязкости пропиточного состава по ВЗ-4: 1) 19 с; 2) 40 с

По результатам исследования внутренних механических напряжений в пропиточных составах установлено, что внутренние механические напряжения возникают в процессе отверждения составов. Кроме того, уровень этих напряжений постоянно растет с увеличением времени теплового старения. Этот процесс происходит за счет дополнительной сшивки макромолекул, непрореагировавших активных групп и двойных связей, а также структурирования, обусловленного термоокислительными процессами.

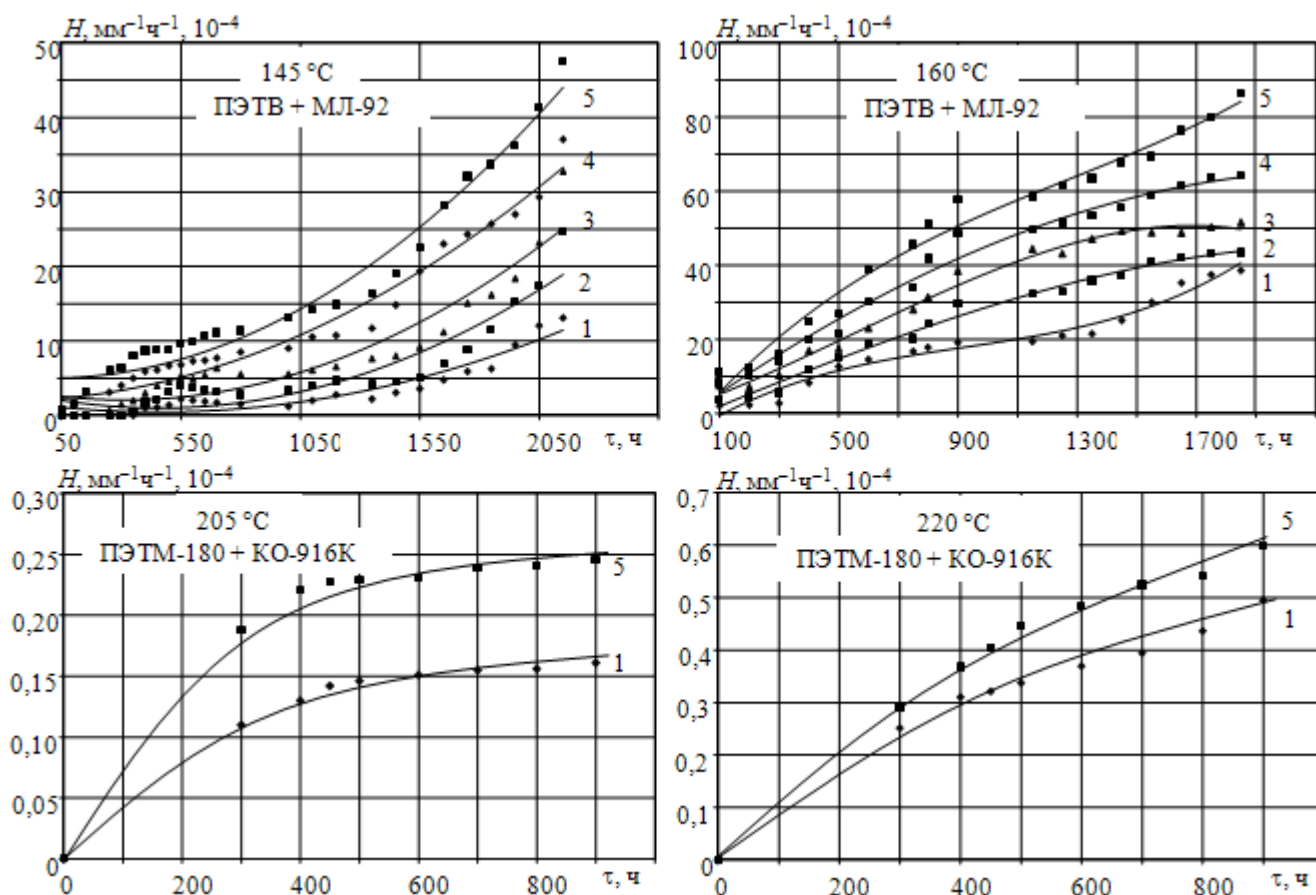
Плотность сшивки макромолекул возрастает, и усиливается физическое взаимодействие между межузловыми отрезками пространственной сетки. Все это приводит к повышению жесткости пропиточного состава и увеличению числа перенапряженных участков в объеме полимера.

С увеличением условной вязкости пропиточного состава внутренние механические напряжения также растут. Этот рост связан с уменьшением времени полимеризации пропиточного состава с большей вязкостью. При меньшей вязкости количество летучих веществ возрастает, следовательно, времени для их испарения требуется больше, а поскольку условия запечки для всех образцов одинаковы, то молекулярная структура полимера с меньшей вязкостью становится более упорядоченной, тем самым внутренние напряжения в такой структуре уменьшаются.

Чем выше начальная вязкость пропиточных составов, тем выше уровень внутренних механических напряжений, так как при большей вязкости, после отверждения остается больше сухого остатка, в объеме которого концентрируются данные напряжения.

На рис. 2 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.

Процесс дефектообразования межвитковой изоляции начинается с растрескивания пропиточного состава под действием внутренних механических напряжений в его объеме, величина которых главным образом зависит от разницы в физико-механических параметрах (модуля упругости, температурного коэффициента линейного расширения, адгезии) между ее компонентами.



**Рис. 2.** Изменение скорости дефектообразования от времени теплового старения для изоляционных систем с различной условной вязкостью пропиточных составов по ВЗ-4: 1) 19, 2) 25, 3) 30, 4) 35, 5) 40 с

Наибольшей скоростью дефектообразования среди исследованных композиций отмечено в системе ПЭТВ + МЛ-92. Для этого сочетания характерен высокий уровень внутренних механических напряжений.

При пропитке обмоточных проводов кремнийорганическим составом КО-916К отмечено меньшее количество отказов. В этом пропиточном составе меньшая величина внутренних механических напряжений по сравнению с меламиноформальдегидным составом.

Изменение условной вязкости пропиточных составов с 19 до 40 с 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.

На основании данных, рис. 1, в диапазоне температур  $20 \dots 145^\circ\text{C}$ , определена энергия активации процесса образования внутренних механических напряжений для пропиточного состава МЛ-92, равная 0,35 эВ. Для процесса дефектообразования, рис. 2, эта величина не превышает 0,42 эВ. Близкие значения энергий активации подтверждает положение об ответственности внутренних механических напряжений за образование трещин, и в итоге, за потерю электрической прочности изоляции. Эти результаты подтверждают взаимосвязь электрической и механической стойкости полимерных материалов, применяемых в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин.

## Оценки долговечности низковольтной межвитковой изоляции

Оценка показателей надежности и долговечности низковольтной межвитковой изоляции электротехнических устройств в современных условиях осуществляется путем сравнения параметров внешних воздействий (электрическое напряжение, температура) и электрической прочности материала изоляции. Принято считать, что выход из строя электротехнических устройств происходит при превышении величины коммутационных перенапряжений межвитковой изоляции, а причиной этого является образование сквозных дефектов (трещин) в изоляционной структуре [5,6,7].

На основании изложенного разработан новый метод диагностики низковольтной межвитковой изоляции электротехнических устройств.

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

В работе выполнены эксперименты, свидетельствующие о том, что напряжение пробоя межвитковой изоляции уменьшается с ростом скорости дефектообразования.

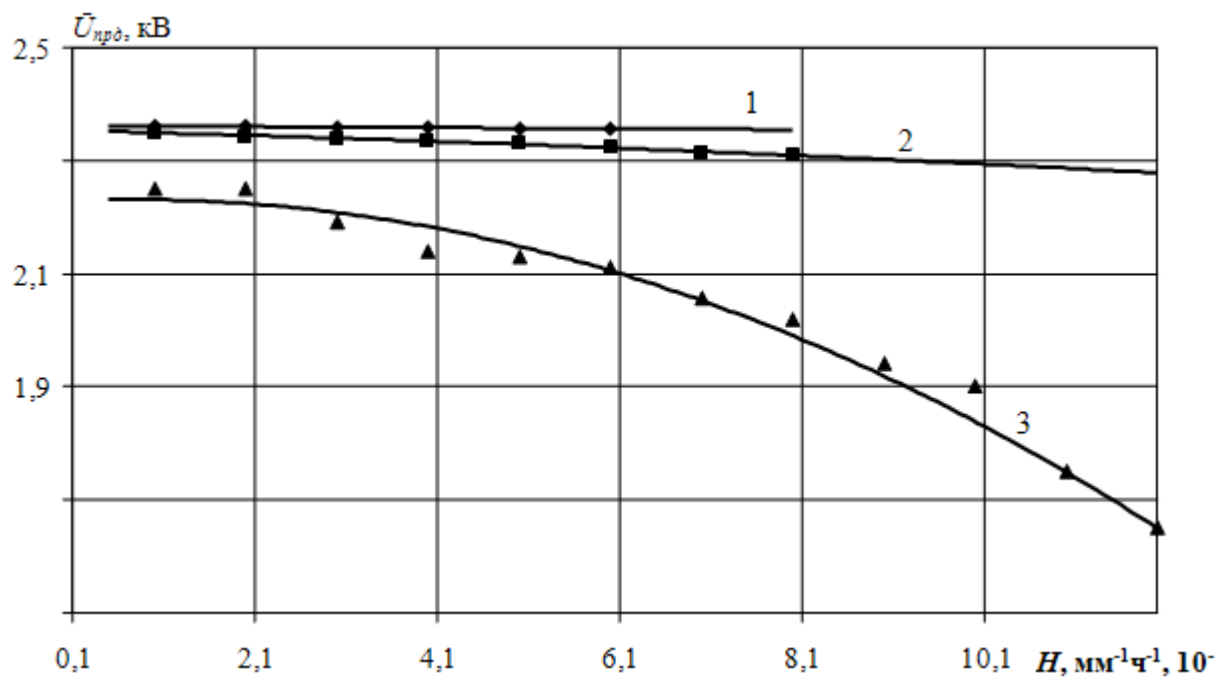
Для экспериментов были выбраны три партии обмоточных проводов диаметром 1,0 мм марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПЭТМ-180. Изготовлено по 50 отрезков провода длиной 200 мм с искусственно нанесенным дефектом (сквозной кольцевой порез эмальслоя обмоточного провода) и по 50 образцов длиной 200 мм без искусственных повреждений эмальслоя. Поочередно каждый образец обмоточного провода подвергали воздействию повышенного напряжения до пробоя, в системе электродов «провод – дробь» [6]. По результатам испытаний определены средние значения пробивного напряжения дефектных проводников  $\bar{U}_{пр0}$  и образцов без дефектов  $\bar{U}_{пр0}$ . Рассчитано среднеквадратическое отклонение пробивного напряжения дефектных  $\sigma_0$  и бездефектных  $\sigma_0$  образцов. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пробивное напряжение и среднеквадратическое отклонение дефектных и бездефектных образцов различных партий эмальпроводов

Марка провода	$\bar{U}_{пр0}$ , кВ	$\sigma_0$	$\bar{U}_{пр0}$ , кВ	$\sigma_0$
ПЭТВ	2,048	0,084	8,50	0,095
ПЭТ-155	2,300	0,020	9,05	0,047
ПЭТМ-180	2,300	0,020	9,05	0,047

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).



**Рис. 3.** Зависимость пробивного напряжения от скорости дефектообразования для систем: 1) ПЭТ-155 + КО916К; 2) ПЭТМ-180 + КО916К; 3) ПЭТВ + МЛ-92

При исследовании скорости дефектообразования  $H$  на модельных образцах, имитирующих реальную конструкцию межвитковой изоляции [5], установлено уменьшение испытательного пробивного напряжения с увеличением числа дефектных образцов для исследуемых систем, рис. 3.

С помощью метода наименьших квадратов установлена математическая зависимость изменения пробивного напряжения от скорости дефектообразования. Эта зависимость имеет вид полинома второго порядка с достоверностью 0,99 по критерию Фишера:

$$\bar{U}_{проб} = 2,37 - 0,08H + 0,001553H^2. \quad (2)$$

Таким образом, из зависимости, рис. 3, следует, что с ростом дефектности изоляционного слоя кривая пробивного напряжения будет смещаться в область низких напряжений по закону (2). Следовательно, избыточные трещины в диэлектрике являются причиной потери материалом изоляционных свойств.

Вероятность появления сквозного дефекта (трещины) на единице длины в соответствии с термофлуктуационной теорией прочности представляет собой значение вероятности разрыва химических связей. Сквозные дефекты (трещины) в межвитковой изоляции низковольтных электрических машин могут образовываться как на стадии изготовления обмоток, так и в процессе эксплуатации. Механизм возникновения трещин в межвитковой изоляции при эксплуатации электрической машины можно рассматривать в свете современных кинетических представлений о прочности твердых тел, так как основными воздействующими факторами на изоляцию являются тепловые и механические нагрузки. В [5] показано, что скорость образования дефектов (трещин) в межвитковой изоляции напрямую зависит от величины механических напряжений, возникающих внутри межвитковой изоляции.

Согласно термофлуктуационным представлениям разрушения твердого тела, первой фазой разрушения материалов принято считать появление трещин на микро уровне (субмикротрещин), вызванное термофлуктуационным разрывом химических связей. Анализ результатов исследований [9], 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

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $\tau_0$  – время ожидания распада одной связи;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;  $\sigma$  – напряжения, действующие на материал;  $E_a$  – энергия активации процесса разрушения;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

Оценивая вероятность разрыва химических связей в полимере, обычно принимают во внимание только углерод–углеродную связь (C–C). В действительности первопричиной образования субмикротрещины может служить разрыв любой химической связи, имеющийся в полимерном веществе [8]. Таким образом, в качестве энергетической характеристики процесса разрыва сплошности полимера можно использовать среднюю энергию мономерного звена:

$$E_{cp} = \frac{\sum n_i E_{0i}}{n_0}, \quad (4)$$

где  $n_i$  – число химических связей  $i$ -типа;  $E_{0i}$  – энергия химической связи  $i$ -типа;  $n_0$  – общее число химических связей в мономерном звене.

Тогда вероятность механического разрушения полимера в условиях термомеханических воздействий описывается выражением

$$P = \exp\left(-\frac{E_{cp} - \gamma\sigma}{kT}\right). \quad (5)$$

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 (5).

Тогда долговечность межвитковой изоляции можно оценивать в свете термофлуктуационной теории заменив в выражении (3) величину энергии активации процесса разрушения  $E_a$  величиной средней энергии мономерного звена  $E_{cp}$ , т.к. данная характеристика определяет усредненную величину процесса разрыва химической связи в веществе. В этом случае окончательная формула для расчета долговечности межвитковой изоляции электрической машины примет вид:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_{cp} - \gamma\sigma}{kT}\right). \quad (6)$$

В (6) входят три основные величины, характеризующие прочностные свойства межвитковой изоляции электрической машины, это  $E_{cp}$ ,  $\sigma$  и  $\gamma$ .

Значение средней энергии мономерного звена выражается формулой (4), т.е. для расчета средней энергии мономерного звена различных полимерных материалов необходимо знать химическую формулу мономерного звена и значения энергий связи.

На межвитковую изоляцию низковольтной электрической машины действуют как внешние, так и внутренние механические нагрузки  $\sigma_{вн}$ .

К основной внешней механической нагрузке, оказывающей действие на изоляцию электрической машины, относится вибрация. При нормальной эксплуатации электрической машины величина напряжений, вызванных вибрацией, остается постоянной и составляет величину порядка 0,05 МПа [7].

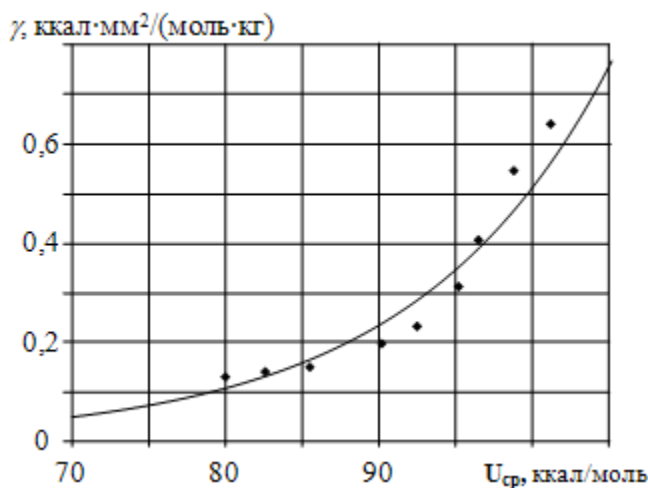


Внутренние механические напряжения в пропиточном составе, возникшие из-за физических и химических изменений (усадка; взаимодействие реакционно-способных групп; окислительно-полимеризационные процессы), постоянно растут, начиная от величины порядка 0,1 МПа и выше [5]. Поэтому вклад внутренних механических 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  $\sigma$  в (6) нагрузку, возникающую в материале за счет гетерогенности структуры  $\sigma_{\text{вн}}$ .

Для нахождения величины внутренних механических напряжений разработано большое количество экспериментальных методов, которые можно разбить на две группы:

1. Поляризационно-оптические методы, пригодные лишь для сравнительно ограниченного круга пропиточных составов – прозрачных и оптически активных, т.е. приобретающих оптическую анизотропию под воздействием механических нагрузок.
2. Термомеханические методы, к которым относятся: консольный, термометрический, магнитоупругих датчиков, кольца, проволочной тензометрии.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента  $\gamma$  от средней энергии мономерного звена для полимерных материалов

Таким образом, определив экспериментально, значения внутренних механических напряжений, величина  $\sigma$ , входящая в выражение (6), будет известна.

В термofлуктуационной теории разрушения материалов коэффициент  $\gamma$  рассматривается как прочностная характеристика материала, зависящая от его структурных особенностей.

Для нахождения коэффициента  $\gamma$  необходимо проводить большой объем экспериментальных работ, что не всегда выгодно и удобно. Однако, в работах [11, 12] имеются экспериментальные данные для структурно-чувствительного коэффициента, различных полимерных материалов. В работе определена тарировочная кривая для нахождения коэффициента  $\gamma$ ; рис. 4., определение которого для исследуемого материала выполняется через рассчитанное значение средней энергии мономерного звена.

Для проверки достоверности полученных результатов, был произведен расчет долговечности низковольтной межвитковой изоляции электрической машины марки АИР112М по методике, предложенной в ОСТ16.0.800.821-88 и по разработанной методике, результаты сведены в табл. 3.

**Таблица 3**

Долговечность межвитковой изоляции электрической машины марки АИР112М

Время на- работки, тыс. ч	Система изоляции ПЭТВ + МЛ-92		Система изоляции ПЭТ-155 + КО-916К	
	По предла- гаемой мето- дике	По ОСТ16.0.800.821- 88	По предла- гаемой мето- дике	По ОСТ16.0.800.821-88
1	0,9998	0,9999	0,9990	0,9990
2	0,9786	0,9999	0,9990	0,9990
3	0,9464	0,9999	0,9990	0,9990
4	0,8998	0,9523	0,9990	0,9990
5	0,8457	0,8988	0,9980	0,9990
6	0,7867	0,8346	0,9980	0,9990
7	0,7125	0,7597	0,9980	0,9990
8	0,6546	0,6955	0,9870	0,9990
9	0,5892	0,6206	0,9870	0,9990
10	0,5132	0,5457	0,9860	0,9990

По результатам сравнительной оценки долговечности видна хорошая корреляция данных. Расхождение результатов, полученных по методике, описанной в ОСТ16.0.800.821-88, с результатами, полученными по предлагаемому методу, примерно 7 %. Это объясняется тем, что в расчете не учтено взаимодействие между пропиточным составом и эмалевой изоляцией.

### Выводы

1. При исследовании обмоток низковольтных электрических машин установлено, что внутренние механические напряжения в их пропиточных составах возникают в процессе отверждения. Уровень этих напряжений зависит от температуры, времени теплового старения и вязкости пропиточных составов.
2. Установлено, что характер изменения скорости дефектообразования от времени старения и вязкости пропиточных составов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов остается неизменным. Изменение вязкости пропиточных составов для различных сочетаний марок обмоточных проводов и пропиточных составов увеличивает скорость дефектообразования.
3. Электрическая прочность межвитковой изоляции зависит от уровня внутренних механических напряжений, возникающих в пропиточном составе после отверждения.
4. Установлено, что испытательное пробивное напряжение межвитковой изоляции низковольтных электротехнических устройств зависит от ее механической прочности и уменьшается с ростом скорости дефектообразования по параболическому закону.
5. Определено, что избыточное появление трещин в межвитковой изоляции является причиной потери материалом изоляционных свойств.
6. На основе теории прочности твердых тел создан метод расчета долговечности низковольтной межвитковой изоляции электротехнических устройств. Метод позволяет оценить надежность межвитковой изоляции с учетом технологических и эксплуатационных воздействий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоиздат, 1993. – 592 с.
2. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
3. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
4. Дудкин А.Н., Ким В.С., Марьин С.С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 171–174.
5. Марьин С.С. Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 133 с.
6. ОСТ16.0.800.821-88. Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1 кВт до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения.
7. Похолков Ю.П. Разработка методов исследования, расчета и обеспечения показателей надежности и долговечности изоляции обмоток асинхронных двигателей: Дис. ... докт. техн. наук. – Томск, 1977. – 482 с.
8. Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
9. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
10. Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Through defect development in interterm insulation of low voltage windings of electric machines // Modern techniques and technology. – Tomsk, 2001. – P. 122-124.
11. Pokholkov Yu.P., Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Estimation of reliability of the system insulation of low-voltage electric machines at a stage of designing, manufacture and while in service // The 5<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium on Science and technology. – Tomsk, 2001. – V. 2. – P. 282-283.

**Рецензент:** Троян Павел Ефимович, Заведующий кафедрой Физической электроники, профессор, доктор технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники