

ждения. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн Л.М. Изоляция электрических машин общего назначения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.
2. Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Through defect development in interterm insulation of low voltage windings of electric machines // Proc. of the 6th Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists. – Tomsk, 2001. – P. 122–124.
3. 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.
4. Pokholkov Yu.P., Dudkin A.N., Maryin S.S., Leonov A.P. Estimation of reliability of the system insulation of low-voltage electric

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.

machines at a stage of designing, manufacture and while in service // Proc. of the 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and technology. – Tomsk, 2001. – V. 2. – P. 282–283.

5. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоиздат, 1993. – 592 с.
6. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г. Надежность изоляции электрических машин. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.
7. Дудкин А.Н., Ким В.С., Марьин С.С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливаемых лаках // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 171–174.

Поступила 24.11.2010 г.

УДК 621.3.048.81

МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С.С. Марьин, С.Н. Шуликин, И.Н. Шуликин

Томский политехнический университет
E-mail: mss_tpu@mail.ru

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.

Ключевые слова:

Эмальпровод, дефектообразование, вероятность безотказной работы.

Key words:

Enameled wire, formation of defects, reliabilities.

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 [1–3].

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

В основе предлагаемого метода определения долговечности лежит идея о взаимосвязи трещино-

образования 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 повышен-

ного напряжения до пробоя, в системе электродов «провод — дробь» [2]. 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 табл. 1.

Таблица 1. Пробивное напряжение и среднеквадратическое отклонение дефектных и бездефектных образцов различных партий эмалипроводов

Марка провода	$\bar{U}_{прд}$, кВ	σ_d	$\bar{U}_{пр0}$, кВ	σ_0
ПЭТВ	2,048	0,084	8,500	0,095
ПЭТ-155	2,300	0,020	9,050	0,047
ПЭТМ-180	2,300	0,020	9,050	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). Качественные зависимости этих распределений представлены на рис. 1.

При исследовании скорости дефектообразования H на модельных образцах, имитирующих реальную конструкцию межвитковой изоляции [3], установлено уменьшение испытательного пробивного напряжения с увеличением числа дефектных образцов для исследуемых систем, рис. 2.

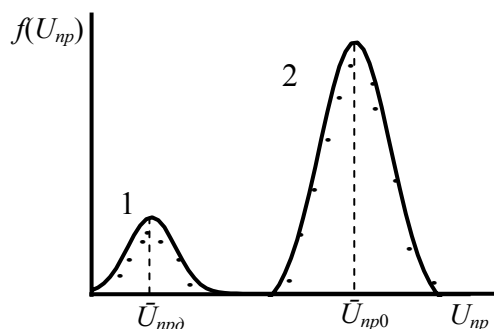


Рис. 1. Плотности распределений пробивных напряжений исследуемых эмалипроводов: 1) с искусственно нанесенными сквозными повреждениями; 2) бездефектные образцы

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:

$$\bar{U}_{пр0} = 2,37 - 0,08H + 0,001553H^2. \quad (1)$$

Таким образом, из зависимостей, рис. 1, 2, следует, что с ростом дефектности изоляционного слоя кривая пробивного напряжения будет смещаться в область низких напряжений по закону (1). Следовательно, избыточные трещины в диэлектрике являются причиной потери материалом изоляционных свойств.

В работе проведена оценка дефектности межвитковой изоляции низковольтных электрических машин, при этом под дефектностью λ понималось число сквозных дефектов на единицу длины изоляции

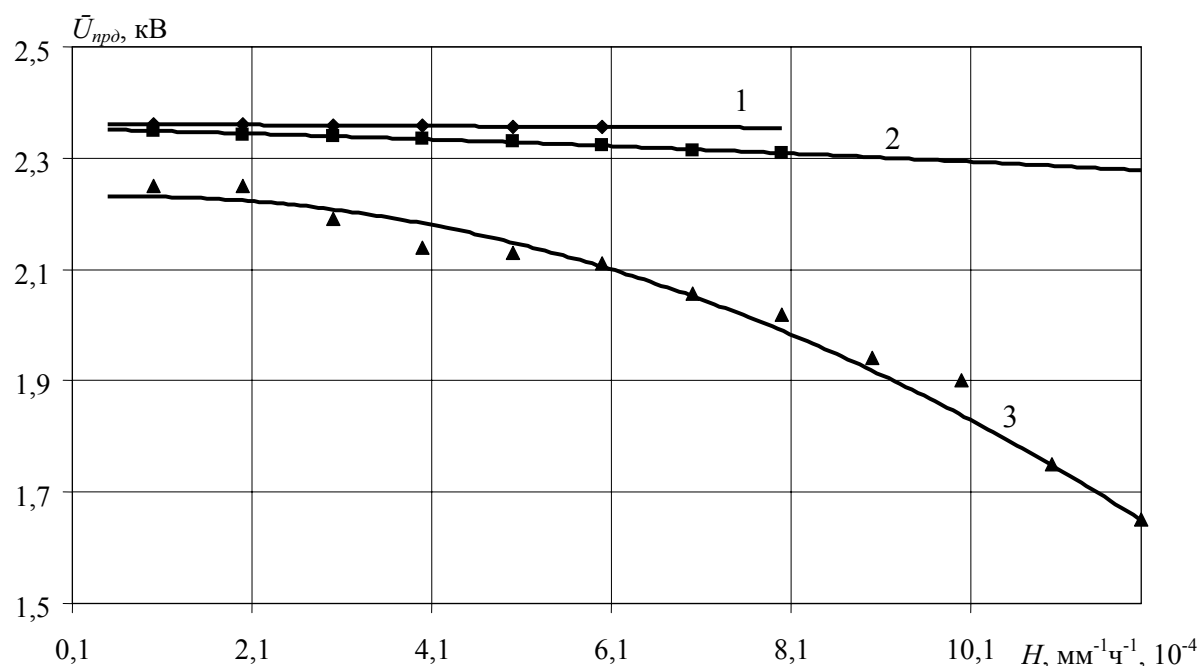


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения от скорости дефектообразования для систем: 1) ПЭТ-155+КО916К; 2) ПЭТМ-180+КО916К; 3) ПЭТВ+МЛ-92

$$\lambda = -\frac{1}{l_{\text{исп}}} \ln(1-q),$$

где $l_{\text{исп}}$ – длина образца; q – вероятность появления сквозного дефекта (трещины) на единице длины.

Значение q 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 [3] 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 [4], 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

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (2)$$

где τ_0 – время ожидания распада одной связи; γ – структурно-чувствительный коэффициент; σ – 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 [4]. Таким образом, в качестве энергетической характеристики процесса разрыва сплошности полимера можно использовать среднюю энергию мономерного звена:

$$E_{cp} = \frac{\sum n_i E_{0i}}{n_0}, \quad (3)$$

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

$$P = \exp\left(-\frac{E_{cp} - \gamma\sigma}{kT}\right). \quad (4)$$

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 (4).

Тогда долговечность межвитковой изоляции можно оценивать в свете термофлуктуационной теории заменив в выражении (2) 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:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_{cp} - \gamma\sigma}{kT}\right). \quad (5)$$

В (5) входят три основные величины, характеризующие прочностные свойства межвитковой изоляции электрической машины, это E_{cp} , σ и γ . Рассмотрим основные методы оценки этих величин.

Значение средней энергии мономерного звена выражается формулой (3). В качестве примера приведем расчет средней энергии мономерного звена для полиэтилена.

В структуру мономерного звена полиэтилена входят три группы химических связей, это связи: C–C (2 связи); C–H (2 связи); C–H–H (2 связи), общее количество химических связей в мономерном звене полиэтилена равно шести. Для расчета средней энергии мономерного звена полиэтилена из [4, 5] найдем значения энергий этих связей E_0 . Так, для связи C–C $E_0=80,5$ ккал/моль, для C–H $E_0=128$ ккал/моль, для C–H–H $E_0=81$ ккал/моль.

Используя выражение (2), рассчитаем среднюю энергию мономерного звена полиэтилена:

$$E_{cp} = \frac{80,5 \cdot 2 + 128 \cdot 2 + 81 \cdot 2}{6} = 96,5 \text{ ккал/моль.}$$

Значения энергий химических связей E_0 для различных материалов представлены в табл. 2 на основании [4, 5].

Таблица 2. Значения энергий связи, ккал/моль

Вид связи	Энергия связи	Вид связи	Энергия связи	Вид связи	Энергия связи
N≡N	224,48	O–H	109,25	C–S	61,87
C≡N	207,46	S–S	63,25	C=C	140,07
C≡C	196,19	N=O	149,04	H–F	133,86
C=O	190,67	N–O	149,04	Cl–F	60,95
N=O	103,73	H–Cl	101,89	Cl–Cl	57,73
O–O	34,04	S=O	125,58	S–H	86,71
C–Cl	75,90	CH–H	81,00	N–N	42,32
C–C	80,50	C–F	116,84	C–H	128,00
C–O	79,58	O=O	116,84	C–N	66,24

Таким образом, 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. В [1] проводилось исследование влияния 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. Результаты исследований, приведенных в [3], свидетельствуют о том, что внутренние механические напряжения в пропиточном составе, возникшие из-за физических и химических изменений (усадка; окислительно-полимеризационные процессы), постоянно растут, начиная 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 в (5) нагрузку, возникающую в материале за счет гетерогенности структуры $\sigma_{вн}$.

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, проволоочной тензометрии.

Таким образом, определив экспериментально, значения внутренних механических напряжений, величина σ , входящая в выражение (5), будет известна.

В термофлуктуационной теории разрушения материалов коэффициент γ рассматривается как прочностная характеристика материала, зависящая от его структурных особенностей.

Для нахождения коэффициента γ необходимо проводить большой объем экспериментальных работ, что не всегда выгодно и удобно. Однако, в работах [4, 5] имеются экспериментальные данные для структурно-чувствительного коэффициента, различных полимерных материалов. В работе определена тарировочная кривая для нахождения коэффициента γ , рис. 3. Таким образом, для определения величины структурно-чувствительного коэф-

фициента исследуемого материала необходимо рассчитать значения средней энергии мономерного звена, и по рис. 3 определить его величину.

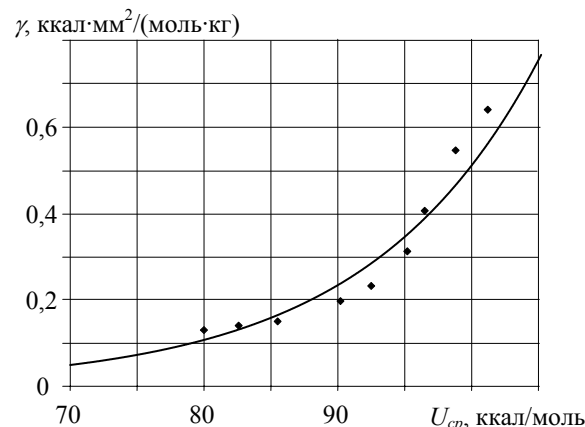


Рис. 3. Зависимость коэффициента γ от средней энергии мономерного звена для полимерных материалов

По предложенному методу произведена оценка долговечности различных систем низковольтной межвитковой изоляции электрической машины марки АИР112М, табл. 3.

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, табл. 3.

Таблица 3. Долговечность межвитковой изоляции электрической машины марки АИР112М

Время наработки, тыс. ч	Система изоляции ПЭТВ+МЛ-92		Система изоляции ПЭТ-155+КО-916К	
	По предлагаемой методике	По ОСТ16.0.800.821-88	По предлагаемой методике	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. Установлено, что испытательное пробивное напряжение межвитковой изоляции низковольтных электротехнических устройств зависит

- от ее механической прочности и уменьшается с ростом скорости дефектообразования по параболическому закону.
2. Определено, что избыточное появление трещин в межвитковой изоляции является причиной потери материалом изоляционных свойств.
 3. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. ОСТ16.0.800.821–88. Машины электрические асинхронные мощностью свыше 1 кВт до 400 кВт включительно. Двигатели. Надежность. Расчетно-экспериментальные методы определения.
3. Марьин С.С. Разработка метода оценки долговечности изоляции низковольтных электрических машин: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007. – 133 с.
4. Цой Б., Карташов Э.М., Шевелев В.В. Прочность и разрушение полимерных пленок и волокон. – М.: Химия, 1999. – 496 с.
5. Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

Поступила 01.12.2010 г.

УДК 621.313.4

ТЯГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

И.А. Бербиренков, В.В. Лохнин

Московский государственный технический университет «МАМИ»
E-mail: i7v7a7n@inbox.ru

Проведен анализ и сравнение тяговых электроприводов с различными типами тяговых электродвигателей (постоянного тока, асинхронный, вентильный с возбуждением от постоянных магнитов). Показано, что наиболее перспективным является тяговый электропривод с вентильным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов. Для вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов предложены новые конструкции роторов коллекторного и когтеобразного типов, обеспечивающих максимально достижимую концентрацию магнитного потока в рабочем воздушном зазоре.

Ключевые слова:

Вентильный тяговый двигатель, тяговый электропривод, электромобиль, тяговая аккумуляторная батарея, двигатели с возбуждением от постоянных магнитов.

Key words:

Valve tractive motor, tractive electric drive, electromobile, tractive storage battery, permanent magnet motor.

Выбор того или иного тягового электродвигателя в электроприводе электромобиля прежде всего, зависят от области применения электромобилей и требований, предъявляемых к нему. Несмотря на то, что каждый тяговый электропривод предъявляет собственные требования к системе управления и имеет оптимальные характеристики лишь в определенном диапазоне частот вращения, к нему предъявляются следующие основные требования: простота изготовления, надежность, удобство обслуживания, легкость регулирования, простота системы управления, высокий момент во всем диапазоне частот вращения, пригодность для рекуперативного торможения, высокий КПД.

При сравнении различных вариантов тяговых электроприводов электромобилей их КПД наряду с собственной массой является одним из решающих факторов, так как применяемые в настоящее время тяговые аккумуляторные батареи имеют ограниченный запас энергии и значительную массу.

Целью работы является сравнение тяговых электроприводов с различными типами тяговых электродвигателей (постоянного тока, асинхронный, вентильный с возбуждением от постоянных магнитов) и выбора наилучшего варианта для использования в электромобиле.

При всех достоинствах тяговых электроприводов с тяговыми электродвигателями постоянного тока отметим их основной и заметный недостаток — наличие механического контакта в щеточно-коллекторном узле тягового электродвигателя.

Поэтому, несмотря на сложную и дорогую систему регулирования тягового электропривода с тяговым электродвигателем переменного тока (асинхронными и синхронными) указанные тяговые электроприводы оказываются более надежными, легкими и долговечными.

Преимущества асинхронных тяговых электродвигателей были реализованы фирмой General Mo-