

УДК 621.3.049

**А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева**

## Оценка влияния уровня дефектности эмалированных проводов на надежность межвитковой изоляции

Проведен сравнительный анализ существующих методов оценки стойкости эмалевой изоляции к образованию дефектов. Отмечено, что используемые критерии и стандартные методы не всегда выявляют провода с низкой устойчивостью к действующим нагрузкам. Результаты исследований показали: дефектность – наиболее информативная и адекватная характеристика, отражающая качество и свойства эмалевой изоляции. Проведена оценка величины вероятности безотказной работы для ряда систем межвитковой изоляции с различной величиной дефектности. Обоснован допустимый уровень дефектности с учетом требований научно-технической документации на низковольтные асинхронные электродвигатели.

**Ключевые слова:** эмалированный провод, межвитковая изоляция, дефектность, низковольтная обмотка, надежность, вероятность безотказной работы.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-2-123-126

Широкое применение низковольтных асинхронных электродвигателей предопределяет необходимость повышения и обеспечения их безаварийности. Как показывают данные эксплуатации, надежность этих изделий остается недостаточно высокой. В среднем ежегодно капитальному ремонту подвергается порядка 2% установленных электродвигателей [1–6].

Основными причинами выхода из строя системы изоляции являются неудовлетворительное качество применяемых эмалированных проводов и электроизоляционных материалов, несовершенство и нарушение технологического процесса обмоточно-изолировочных работ, а также несоответствие режимов эксплуатации. В подавляющем большинстве случаев отказы происходят из-за повреждения обмотки или, точнее, её межвитковой изоляции. Критерием отказа является наличие сквозного повреждения изоляции – дефекта [1–3, 5, 6].

Для количественной оценки повреждаемости изоляции принято использовать дефектность  $\lambda$ , которая определяет количество дефектов на единицу длины или площади изоляции.

Сквозные дефекты могут существовать в изоляции обмоточных проводов в состоянии поставки, а также возникать под действием технологических и эксплуатационных нагрузок, в связи с этим различают дефектность в состоянии поставки  $\lambda_{\Pi}$ , технологическую  $\lambda_T$  и эксплуатационную дефектность  $\lambda_{\mathcal{E}}$ .

Прежде всего эксплуатационная надежность обеспечивается минимальной дефектностью и способностью эмалевой пленки выдерживать технологические нагрузки. Главной причиной образования дефектов в изоляции является недостаточная механическая прочность эмалевого покрытия к технологическим и эксплуатационным факторам.

В настоящее время качество и устойчивость изоляции к действующим нагрузкам оцениваются по стандартным методам, основанным на определении механической прочности по числу двойных ходов иглы, стойкости к процарапыванию иглой изоляции под постоянно увеличивающейся нагрузкой;

электрической прочности – по пробивному напряжению [7, 8].

Таким образом, несмотря на большое число работ, посвященных исследованиям механизма отказа низковольтных обмоток и процессов дефектообразования, остается актуальным вопрос о допустимом уровне дефектности изоляции. Это позволит на начальном этапе выявить и исключить провода с низкой стойкостью к образованию дефектов.

В работе проведено сравнительное определение устойчивости эмалевой изоляции к дефектообразованию по стандартным и оригинальной методикам, а также оценен уровень надежности межвитковой изоляции с учетом ее дефектности.

### Экспериментальное определение дефектности изоляции эмалированных проводов

Стойкость эмалевой изоляции к технологическим воздействиям оценивалась путем испытания механической прочности изоляции эмалированных проводов на истирание под постоянной и под постепенно возрастающей нагрузкой [9, 10].

Пробивное напряжение определялось на стандартных скрутках эмалированного провода, изготовленных и испытанных согласно [11].

Оценка дефектности изоляции эмалированных проводов проводилась в электролите; за основу взята методика, описанная в [12].

Дефектность эмалевой изоляции рассчитывалась по выражению (1):

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

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

Результаты испытаний сведены в табл. 1, показаны на рис. 1.

Сравнительный анализ результатов показывает: для метода, основанного на определении числа двойных ходов иглы до истирания изоляции характерны малая статистическая устойчивость и большой разброс результатов в силу высокой чувстви-

тельности к случайным колебаниям условий испытаний; критерии оценки условны, малоинформативны и совершенно не позволяют учесть изменение дефектности. Также серьезным недостатком является малая испытуемая площадь образца. Это отрицательно сказывается на точности и достоверности полученных результатов, так как для эмалевой изоляции характерна большая неоднородность свойств по длине провода.

Таблица 1

**Стойкость к истиранию и пробивное напряжение изоляции испытанных образцов**

Марка провода	Число двойных ходов иглы $N$		Пробивное напряжение $U_{\text{пр}}$ , кВ	
	допустимое	фактическое	допустимое	фактическое
ПЭЭА-155	12	40	2,7	5,2
ПЭТ-155	20	80	4,4	6,1
ПЭТД-180	35	250	4,7	6,8
ПЭТД2-К-180	35	393	4,5	8,3

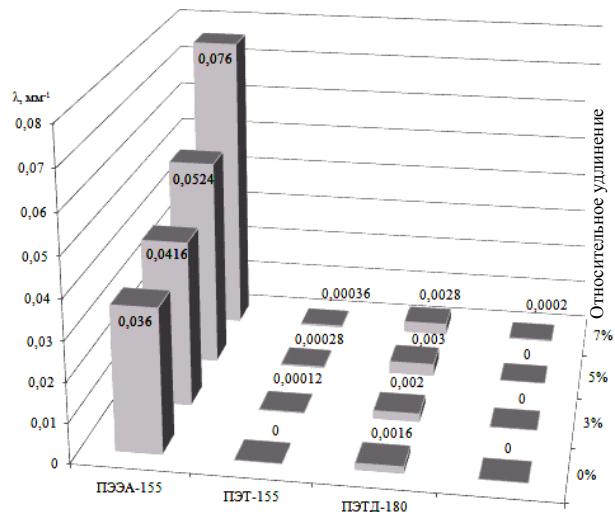


Рис. 1. Дефектность изоляции эмалированных проводов после механических воздействий и выдержки в растворителе

При этом следует отметить, что испытываются провода только в состоянии поставки. В процессе же изготовления реальных обмоток провода подвергаются растяжению при намотке, истиранию поверхности при укладке, изгибанию, что может снизить механическую прочность изоляции. Результаты испытаний предварительно растянутых образцов провода подтверждают: с увеличением относительного удлинения образца может снижаться число двойных ходов иглы по поверхности провода до разрушения изоляции [5, 13].

Контроль величины пробивного напряжения  $U_{\text{пр}}$  дает возможность выявить провода с низкой электрической прочностью. Однако результаты лишь констатируют факт наличия или отсутствия разрушения изоляции без анализа физических или химических процессов, которые протекают в эмалевой изоляции и определяют ее механические свойства. В связи с этим пробивное напряжение не может быть принято в качестве критерия стойкости изоляции к

появлению дефектов, несмотря на прямую связь между наличием повреждений в изоляции и величиной  $U_{\text{пр}}$ .

Помимо этого, определение пробивного напряжения не позволяет оценить скорость появления дефектов, возникающих при изготовлении и во время эксплуатации реальных обмоток и их влияния на уровень надежности.

Результаты экспериментальных данных (см. табл. 1) только позволяют отметить: эмалевая изоляция всех исследуемых проводов обладает достаточной электрической прочностью. В то время как при определении дефектности в электролите обеспечивается точная количественная оценка стойкости эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам.

На образование дефектов оказывает влияние действие растворителей и реакционноспособных компонентов пропиточных материалов в процессе пропитки и сушки обмоток. Это может привести к размягчению и набуханию эмали, что также снижает прочность изоляции.

В работе проведено исследование совместного влияния механических нагрузок и растворителей на дефектность изоляции эмалированных проводов (см. рис. 1). Испытывались образцы провода с относительным удлинением 3, 5, 7%. Навивание образцов провода, имитирующее изгиб, осуществлялось согласно [11]. Образцы провода помещались в ёмкость с растворителем, загружались в термошкаф и выдерживались 30 мин; перед испытанием просушивались и протирались. Следует отметить, что подобные комплексные испытания обеспечивают оценку как механической стойкости эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам, так и степень ее повреждаемости. Только в этом случае определяется точное количество дефектов.

Например, провод ПЭЭА-155 показал очень высокую дефектность  $\lambda$  после растяжения, что свидетельствует о минимальной устойчивости к технологическим воздействиям. Это характерно для проводов с алюминиевой жилой, так как адгезия эмалевой пленки к алюминию намного меньше, чем к меди. Поэтому при растяжении эмалевая изоляция утоньшается и растрескивается, что является причиной роста дефектности.

В то же время результаты стандартных испытаний (см. табл. 1) показали, что эмалевая изоляция обладает достаточной стойкостью к истиранию. В результате можно сделать неверный вывод о механической прочности изоляции данного провода.

Для проводов марок ПЭТ-155, ПЭТД-180, ПЭТД2-К-180 хорошая механическая прочность, определенная по стандартным методам, подтверждается низкой величиной дефектности  $\lambda$ .

Все выше изложенное позволяет рекомендовать дефектность  $\lambda$  как оптимальную характеристику, объективно и точно отражающую уровень электрических и механических свойств эмалевой изоляции в любых состояниях. Сравнительный анализ по различным критериям, приведенный выше, подтвер-

ждает адекватность оценки устойчивости эмалевой изоляции к воздействующим нагрузкам по дефектности  $\lambda$ , определенной в электролите.

#### Расчетная оценка влияния дефектности на показатели надежности межвитковой изоляции

В настоящее время отсутствует информация по обоснованию значения допустимой дефектности изоляции эмалированных проводов.

Допустимую границу уровня дефектности  $\lambda$  следует определять с учетом показателей надежности межвитковой изоляции, так как количество дефектов критически влияет на вероятность её отказа [1, 2, 5].

Расчет вероятности безотказной работы межвитковой изоляции  $P_{\text{MBI}}$  проводился с учетом конструктивных параметров обмоток нескольких габаритов асинхронных электродвигателей серии АИР (высота оси вращения 71, 90 и 160 мм), уровня воздействующих нагрузок и дефектности изоляции по методике, описанной в [12].

Основные исходные параметры для расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные исходные параметры для расчета вероятности безотказной работы систем межвитковой изоляции

Конструктивные параметры обмотки	Число фаз обмотки $m_\phi$ Число пазов статора $Z_1$ Число слоев обмотки статора $N_{\text{sl}}$ Диаметр изолированного провода $d_{\text{из}}$ Коэффициент пропитки $K_{\text{пр}}$ Геометрические размеры паза
Воздействующие нагрузки	Давление окружающей среды $P$ Влажность в полости двигателя $\varphi_{\text{n}}$ Температура в полости двигателя $\theta_{\text{n}}$ Средняя температура обмотки $\theta_{\text{об}}$ Вибрационное ускорение $G_{\text{в}}$ Частота включения двигателя $f_{\text{вкл}}$
Характеристики системы изоляции	Класс нагревостойкости изоляции $\theta_0$ Дефектность эмалевой изоляции $\lambda$ Коэффициенты уравнения скорости дефектообразования $H_{\text{в}}$ и $a_{\text{в}}$ Коэффициент скорости дефектообразования $a_{\text{в}}$

Обмоточные данные принимались согласно [14]. Коэффициенты уравнения скорости дефектообразования  $H_{\text{в}}$  и  $a_{\text{в}}$  выбраны с учетом систем изоляции согласно литературным и экспериментально полученным данным [5, 12]. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

В качестве примера приведен сравнительный анализ влияния дефектности  $\lambda$  на вероятность безотказной работы  $P_{\text{MBI}}$  для различных габаритов асинхронного двигателя серии АИР (рис. 2).

Результаты показывают, что для всех рассмотренных вариантов при дефектности  $\lambda > 0,006 \text{ mm}^{-1}$  вероятность безотказной работы снижается ниже допустимого уровня, т.е. ниже 90% при времени наработки 20000 ч.

Это позволяет принять данную величину в качестве критерия, превышение которого приводит к

необратимому снижению надежности межвитковой изоляции и всей обмотки в целом.

Таблица 3  
Результаты расчетов вероятности безотказной работы для систем межвитковой изоляции при времени наработки 20000 ч

Система межвитковой изоляции	Класс нагревостойкости	Высота оси вращения $h$ , мм	Вероятность безотказной работы при дефектности эмалевой изоляции $\lambda$ , $\text{mm}^{-1}$		
			0,005	0,006	0,007
ПЭТВ – МЛ-92	В	71	0,925	0,918	0,893
		90	0,917	0,913	0,887
		160	0,908	0,902	0,883
		71	0,945	0,915	0,879
		90	0,948	0,918	0,882
		160	0,959	0,931	0,895
ПЭТВМ – КП-34	F	71	0,924	0,908	0,89
		90	0,928	0,913	0,896
		160	0,921	0,903	0,884
		71	0,913	0,904	0,88
		90	0,91	0,902	0,877
		160	0,908	0,90	0,87
ПЭТ-155 – ПЭ-933	H	71	0,918	0,901	0,86
		90	0,91	0,903	0,86
		160	0,918	0,904	0,856
ПЭТ-180 – КО-916К	H	71	0,918	0,901	0,86
		90	0,91	0,903	0,86
		160	0,918	0,904	0,856

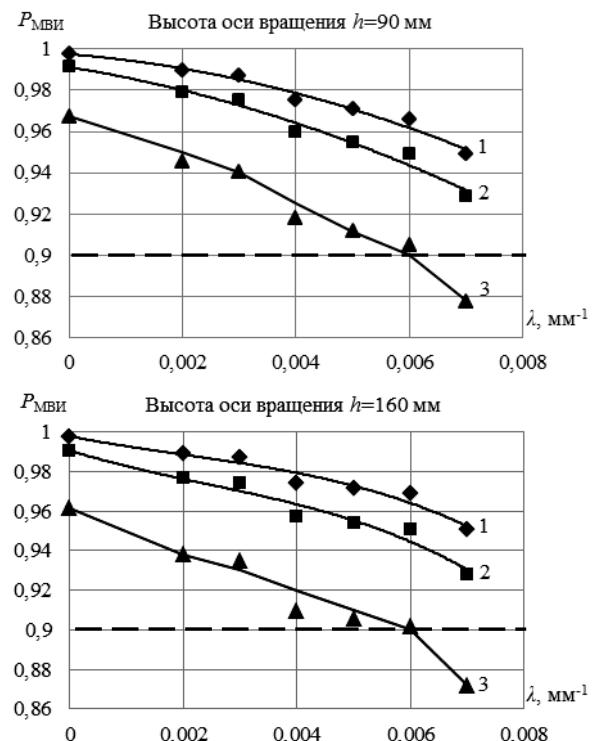


Рис. 2. Влияние дефектности  $\lambda$  на вероятность безотказной работы межвитковой изоляции с учетом времени наработки (система изоляции ПЭТ-155 – КО-916К):  
1 – 5000 ч; 2 – 10000 ч; 3 – 20000 ч

#### Выходы

1. Существующие методы не всегда позволяют адекватно судить о свойствах эмалевой изоляции по всей длине провода, даже несмотря на количественное увеличение выборки образцов исследуемых

проводов в несколько раз. Кроме того, применяемые методы не позволяют в полной мере оценить устойчивость к воздействующим эксплуатационным нагрузкам реальных обмоток, так как во многих случаях выявляются лишь образцы с грубыми дефектами либо обладающие недопустимо низкими электроизоляционными свойствами.

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

3. Необходимый уровень вероятности безотказной работы межвитковой изоляции обеспечивается при дефектности эмалевой изоляции не более  $0,006 \text{ mm}^{-1}$ . В этом случае уровень вероятности безотказной работы остается в допустимых пределах (90 % при времени наработки 20000 ч).

#### Литература

- Смирнов Г.В. Надежность изоляции обмоток электротехнических изделий. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 1990. – 192 с.
- Смирнов Г.В. Основы неразрушающего контроля изоляции обмоток электрических машин / Г.В. Смирнов, Д.Г. Смирнов // Изв. Том. политехн. ун-та. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 11. – С. 24–36.
- Похолков Ю.П. К вопросу о совместности пропиточных составов и эмалированных проводов / Ю.П. Похолков, А.П. Леонов, И.Н. Шуликин // Электротехника. – 2009. – № 7. – С. 30–33.
- Измерительный комплекс по определению остаточного ресурса изоляции электрических машин / Г.В. Суханкин, О.К. Никольский, Н.Т. Герцен, Н.П. Воробьев // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4-1. – С. 254–259.
- Супуева А.С. Снижение дефектности межвитковой изоляции обмоток низковольтных асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.02. – Томск, 2016. – 121 с.
- Дудкин А.Н. Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием / А.Н. Дудкин, А.П. Леонов, А.С. Супуева // Томск: Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326, № 11. – С. 83–89.
- Андрянов А.В. Пробивное напряжение как критерий годности обмоточных проводов / А.В. Андрианов, В.К. Андрианов, Е.В. Быков // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 17–20.
- Андрянов В.К. К оценке стойкости к истиранию изоляции обмоточных проводов / В.К. Андрианов, О.Б. Бураков, Е.В. Быков // Кабели и провода. – 2008. – № 5. – С. 26–29.

9. ГОСТ 14340.10–69. Провода эмалированные круглые. Методы испытания механической прочности изоляции на истирание. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 6 с.

10. ГОСТ Р МЭК 60851-3–2002. Провода обмоточные. Методы испытаний. – Ч. 3. Механические свойства. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 26 с.

11. ГОСТ Р МЭК 60851-5–2008. Провода обмоточные. Методы испытаний. – Ч. 5. Электрические свойства. – М.: Стандартинформ, 2008. – 17 с.

12. Кириллов Ю.А. Обеспечение надежности электрической изоляции асинхронных двигателей на стадии проектирования и изготовления: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1990. – 233 с.

13. Leonov A. The comparison of methods of testing enameled wire to mechanical stress / A. Leonov, A. Supueva // Trans Tech Publication, Switzerland: Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792. – P. 33–37.

14. Петров Л.В. Асинхронные электродвигатели. Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация / Л.В. Петров, Г.Н. Корначенко. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 496 с.

#### Дудкин Анатолий Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭКМ  
Национального исследовательского  
Томского политехнического университета (НИТПУ)  
Тел.: +7-903-915-31-32  
Эл. почта: dan@tpu.ru

#### Леонов Андрей Петрович

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭКМ НИТПУ  
Тел.: +7-903-953-08-24  
Эл. почта: leonov\_ap@tpu.ru

#### Супуева Аделя Сагынбековна

Канд. техн. наук, ассистент каф. ЭКМ НИТПУ  
Тел.: +7-952-804-34-34  
Эл. почта: supu\_as@mail.ru

Dudkin A.N., Leonov A.P., Supueva A.S.

#### Estimating of the influence of defectiveness level of the enameled wires on reliability of interturn insulation

The article contains a comparative analysis of existing evaluation methods for defects resistance of enamel insulation. The standard methods do not always reveal the wires with a low resistance to loads. It was observed that, the defectiveness is the most informative and adequate characteristic reflecting the quality and properties of enamel insulation. The estimation of the probability of failure-free operation for some systems of interturn insulation having number of defects is carried out. The allowable defect rate to meet the requirements of scientific and technical documentation for low-voltage induction motors is provided.

**Keywords:** enamel wire, turn insulation, defects, low-voltage winding, reliability function.