

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ ВИТКОВОЙ И КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. П. ПОХОЛКОВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ, А. С. ГИТМАН, О. П. МУРАВЛЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей  
электротехники)

Анализ отказов асинхронных двигателей в эксплуатации показывает наличие явно выраженного периода приработки [1], причем большая часть отказов происходит из-за пробоя витковой изоляции.

Надежность витковой изоляции в период приработки может быть оценена с помощью выражения

$$R = 1 - K + K(1 - mq^2)^N,$$

где  $q$  — доля провода длиной  $l$ , имеющих оголения;

$m$  — вероятность совпадения оголений в 2-х соприкасающихся проводниках;

$N$  — число пар соприкасающихся проводов длиной  $l$ ;

$K$  — коэффициент выявления дефектов в период приработки. Зависит от условий работы двигателя и качества пропитывающего состава.

Подобную формулу можно записать и для надежности корпусной изоляции.

Обычно  $q = 0,001 \dots 0,20$  и может быть оценена по результатам испытания одиночного провода в дробь.

Величина  $mq^2$  представляет собой дефектность скрутки из проводов длиной  $l$ .

Предпочтительно вести испытания в скрутках из-за нестабильности коэффициента  $m$ . Экспериментальная оценка  $q$  дается при фиксированном испытательном напряжении выражением

$$q = \frac{n_q}{n}, \quad (2)$$

где  $n_q$  — количество дефектных образцов,

$n$  — количество испытанных образцов.

Необходимый объем испытаний для определения  $q$  с заданной точностью  $\varepsilon_q$  при достоверности  $\alpha$  подсчитывается по формуле

$$n = \left( \frac{\arg \Phi_\alpha}{\varepsilon \sqrt{q'}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\arg \Phi_\alpha$  — аргумент функции Лапласа для значения  $\alpha$ ;  
 $q'$  — фактическое значение дефектности.

Значения  $n$  для  $\alpha = 0,95$  и  $\varepsilon = 0,1$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

$q'$	0,08	0,04	0,02	0,01	0,004	0,001
$n$	99	141	197	281	364	884

При очень малых значениях  $q$  и тем более  $mq^2$  объем испытаний при ориентации на определение числа пробоев получается недопустимо большим.

В связи с этим представляется целесообразным использовать информацию о законе распределения пробивных напряжений и определять  $q$  и  $mq^2$  по формуле

$$q = \int_{u_1}^{u_2} f(u) du, \quad (4)$$

где  $f(u)$  — функция распределения пробивного напряжения;

$u_1$  — нижняя граница распределения пробивного напряжения;

$u_2$  — испытательное напряжение.

Формула (4) написана в предположении, что  $f(u)$  монотонна в интервале  $(u_1, u_2)$ . Следовательно, основной задачей при определении дефектности обмоток является установление закона распределения пробивного напряжения.

Для исследования дефектности изоляционных материалов Томский политехнический институт совместно с СКБЭ при заводе «Сибэлектро-мотор» провел изучение технологического процесса изготовления обмоток статоров двигателей АО 32-4А на следующих этапах: 1) входной контроль, 2) после подготовительной операции, 3) после укладки обмотки.

При извлечении изоляции из пазов были приняты меры против дополнительного ее повреждения. Испытание материалов проводилось в соответствии с существующими стандартами.

На основании полученных результатов были вычислены статистики:  $\bar{u}$  — среднее значение пробивного напряжения,  $\sigma$  — стандартное отклонение, основные моменты  $r_2$  и  $r_4$ , которые показали, что распределение пробивного напряжения материалов и изоляции провода может быть описано кривыми К. Пирсона (табл. 2).

Расчеты параметров кривых проводились на ЭЦВМ «Проминь». Оценка сходимости полученных распределений пробивного напряжения с экспериментом была проведена с помощью критерия  $\chi^2$ . Величина  $P(\chi^2) > 0,05$  для всех кривых, что позволяет признать расхождение между теоретическими и экспериментальными кривыми несущественным [2].

Полученные уравнения кривых были использованы для вычисления доли дефектной изоляции по формуле (4) методом численного интегрирования на ЭЦВМ.

Наиболее сильно изоляция провода повреждается в процессе укладки обмотки в пазы статора. Очевидно, это вызвано применяемым при укладке металлическим инструментом.

Для определения пути повышения надежности нами была сделана попытка уменьшить дефектность изоляции путем применения «мягкого» инструмента и уменьшения коэффициента заполнения паза  $K_3$  на 2,6%.

Таблица 2

## Изменение параметров распределения пробивного напряжения корпусной и витковой изоляции

Тип и параметры распределения	Материалы и операции										
	провод ПЭВА 2			электрокартон 0,1		лакоткань ЛСЭ 15-0,15			электрокартон 0,15		
	с барабана	после намотки на шаблон	после укладки обмотки	из пачки	после укладки обмотки	из рулона	после формовки коробочек	после укладки обмотки	из рулона	после формовки пазовых коробочек	после укладки обмотки
Тип кривой Пирсона	IV	IV	IV	I	I	I	I	I	VII	IV	VII
$\bar{U}_{пр} (кв)$	3,83	3,13	2,52	2,27	1,78	8,94	8,46	5,99	3,02	2,43	1,97
$\bar{\sigma}$	0,934	1,007	1,185	0,517	0,426	1,184	1,107	1,261	0,575	0,581	0,592
$r_3$	0,661	0,102	0,493	0,623	0,588	-0,586	-0,507	-1,293	-0,078	0,061	0,295
$r_4$	4,224	3,549	3,685	2,791	3,107	2,905	2,856	5,085	3,939	4,190	3,678
$f_0$	0,0267	0,0262	0,0730	0,3728	0,4772	0,1820	0,1755	0,2034	0,3799	0,3776	0,3621
$l_1$	8,380	7,308	10,839	0,965	1,478	11,244	11,652	36,534	0,845	3,086	1,530
$l_2$	—	—	—	4,744	5,877	2,931	3,693	1,279	—	—	—
$q_1$	5,698	8,132	8,875	0,563	2,173	4,502	5,348	14,582	5,700]	5,028	6,924
$q_2$	—	—	—	2,768	8,672	1,173	1,695	0,510	—	—	—
$P(\chi^2)$	0,49	0,95	0,6	—	—	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2

В качестве «мягкого» инструмента были применены:

- 1) покрытый резиной молоток,
- 2) фибровая укладочная пластина,
- 3) стальной обратный клин, покрытый тонким слоем эпоксидного компаунда.

Значения  $q$ , подсчитанные по опытным данным, приведены в табл. 3 для изоляции после укладки обмотки.

Таблица 3

Технология	Вид изоляции			
	провод ПЭВА-2	электрокартон 0,1	лакоткань ЛСЭО, 15	электрокартон 0,15
Жесткий инструмент, нормальн. $K_3$	0,0182	0,00586	0,00307	0,0496
Мягкий инструмент, норм. $K_3$	0,0035	0,00225	0,00234	0,0375
Жесткий инструмент, сниженный $K_3$	0,0075	0,0130	0,000	0,0250
Мягкий инструмент, снижен. $K_3$	0,0009	0,0038	0,000	0,0170

Применение мягкого инструмента существенно снижает дефектность изоляции провода и мало влияет на основную корпусную изоляцию — лакоткань ЛСЭ 0,15 и электрокартон 0,15. Снижение коэффициента заполнения заметно уменьшает дефектность электрокартона 0,15, который прилегает к стенкам паза.

Описанный метод определения доли дефектной изоляции позволил существенно снизить объем и погрешность испытаний при оценке эффективности влияния различных пропитывающих составов на дефектность изоляции. В табл. 4 представлены результаты испытаний скруток провода ПЭВА-2, извлеченного из машин. Испытания проводились в нормальных условиях и при повышенной влажности. Объем выборки — 250 образцов. Распределение  $u_{пр}$  описывается кривой Пирсона I типа.

Таблица 4

Условия испытаний	Пропитывающий состав			
	не пропитанные	лак 447	лак 321 <i>m</i>	эпоксид. компаунд (ЭД-6, фталев. ангид.)
Нормальные	$0,132 \cdot 10^{-3}$	0	0	0
После 48 час. выдержки в условиях 100% влажности	$0,584 \cdot 10^{-2}$	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,70 \cdot 10^{-3}$	0

### Выводы

1. Использование закона распределения пробивного напряжения позволяет существенно снизить объем испытаний при оценке дефектности изоляции по сравнению с испытаниями фиксированным напряжением.

2. Применение «мягкого» инструмента и снижение коэффициента заполнения паза позволяет наметить пути повышения надежности выпных обмоток электрических машин.

3. Дефектность изоляции можно рассматривать как критерий при исследовании эффективности применения новых материалов и технологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет ВНИИЭМ № ОАБ 143, 673, 1963.
2. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений. Физматгиз, 1961.