

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБМОТОК НА ДЕФЕКТНОСТЬ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю. П. ПОХОЛКОВ, П. П. БЕСПЕРСТОВ, В. В. ПЫХТИН

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной  
и кабельной техники)

Анализ отказов электрических машин при эксплуатации показывает, что подавляющее большинство их обусловлено наличием скрытых дефектов в изоляции, которые выявляются в период приработки [1—4].

Дефекты типа сквозных проколов, сдиров, трещин могут появиться в изоляции либо в процессе ее изготовления, либо в процессе изготовления обмоток [3].

Целью данной работы является исследование влияния колебаний технологического режима работы статоробмоточного станка WST-660 фирмы «Elektromat» ГДР и пазоизолировочного станка ИПС-3 на качество корпусной изоляции обмоток.

За критерий качества корпусной изоляции принимаем уровень ее дефектности —  $q$  [4].

Пересчет дефектности корпусной изоляции на единицу площади можно провести следующим образом. Считая, что сквозное повреждение образца есть событие редкое, принимаем, что распределение дефектов по площади образца подчиняется закону Пуассона.

Тогда  $(1-q) = e^{-a}$ , где  $a$  — среднее число дефектов на площади образца  $S$ . Число дефектов на единицу площади будет равно

$$q' = \frac{a}{S} \left[ \frac{1}{\text{мм}^2} \right]. \quad (1)$$

Исследования проводились с использованием математических методов статистического факторного планирования эксперимента [6].

По предварительным исследованиям основными факторами, оказывающими существенное влияние на дефектообразование в корпусной изоляции, являются:

- 1) на намоточном станке — усилие натяжения ( $P$ ) и скорость намотки ( $v$ );
- 2) на пазоизолировочном станке — зазор между пуансоном и матрицей ( $\delta$ ) и скорость изолирования ( $v$ ).

Для исследований на намоточном станке эксперимент был спланирован по центральному, композиционному рототабельному плану второго порядка (табл. 1), уровни факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 2. Для изолировочного станка эксперимент спланирован по факторному плану для двух факторов первого порядка (табл. 3), уровни факторов и интервала их варьирования приведены в табл. 4.

Таблица 1

№ пп	V $\frac{\partial v/\text{ход}}{\text{мин}}$	P кгс	Параметр отклика $\Delta q_i$		
			$\Delta q_1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$	$\Delta q_2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$	$\Delta q_3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$
1	+1	+1	1,63	2,83	5,36
2	+1	-1	0,95	1,59	2,52
3	-1	+1	1,33	2,40	4,72
4	-1	-1	0,35	1,12	1,76
5	1,414	0	1,02	2,13	4,43
6	-1,414	0	0,42	1,33	2,24
7	0	1,414	1,72	3,22	5,68
8	0	-1,414	0,28	0,92	1,52
9	0	0	1,00	1,99	3,98
10	0	0	1,10	2,02	3,56
11	0	0	1,04	2,08	3,62
12	0	0	1,07	2,08	3,62

Таблица 2

Факторы	Интервал варьи- рования	Кодовое обозначение	Уровни факторов				
			-1,414	-1	0	+1	+1,414
V, $\frac{\partial v/\text{ход}}{\text{мин}}$	28	X <sub>1</sub>	40	52	80	108	120
P, кгс	0,7	X <sub>2</sub>	3	3,3	4	4,7	5

Таблица 3

№ пп	V $\frac{\text{паз}}{\text{мин}}$	$\delta$ мм	Параметр отклика $\Delta q_i$		
			$\Delta q_1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$	$\Delta q_2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$	$\Delta q_3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мм}^2}$
1	+1	+1	0,589	0,700	1,16
2	+1	-1	0,345	0,300	0,560
3	-1	+1	0,520	0,548	0,880
4	-1	-1	0,328	0,168	0,280

Таблица 4

Факторы	Интервал варьи- рования	Кодовое обозначение	Уровни факторов	
			+1	-1
V, паз/мин	7,5	X <sub>1</sub>	92	77
$\delta$ , мм	1,0	X <sub>2</sub>	3,5	5,5

После каждой технологической операции, т. е. после изолирования пазов статора и после намотки обмотки, корпусная изоляция осторожно извлекалась из пазов. Полученные образцы испытывались на пробой в цилиндрических электродах  $\varnothing 20$  мм. При реализации одной строки плана испытывалось 150 образцов. По величине пробивного напряжения определялось приращение дефектности корпусной изоляции при различных режимах работы намоточного и изолировочного станков в соответствии с планами.

В качестве объекта исследований была выбрана лакоткань ЛСК-0,17. Для оценки влияния качества поступающей на завод лакоткани на приращение дефектности при изготовлении обмотки были отобраны по три партии с разными уровнями дефектности на каждый станок:

а) для намоточного станка

$$q'_{1п} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad q'_{2п} = 1,98 \cdot 10^{-9} \text{ 1/мм}^2;$$

$$q'_{3п} = 6,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

б) для изолировочного станка

$$q'_{1п} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad q'_{2п} = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2;$$

$$q'_{3п} = 4,68 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2.$$

В результате реализации планов и обработки экспериментальных данных [7] получены уравнения регрессии для приращения дефектности корпусной изоляции в зависимости от режимов работы намоточного и изолировочного станков:

а) намоточный станок

$$\text{для } q'_{1п} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_1 = (1,05 + 0,218X_1 + 0,461 X_2 - 0,119 X_1^2 + 0,0865 X_2^2 - 0,075X_1 X_2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (2)$$

$$\text{для } q'_{2п} = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_2 = (2,07 + 0,254X_1 + 0,721 X_2 - 0,14X_1^2 + 0,047X_2^2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (3)$$

$$\text{для } q'_{3п} = 6,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_3 = (3,67 + 0,56X_1 + 1,46X_2 - 0,141 X_1^2 - 0,27 X_1 X_2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (4)$$

б) изолировочный станок

$$\text{для } q'_{1п} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_1 = (0,448 + 0,107X_2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (5)$$

$$\text{для } q'_{2п} = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_2 = (0,468 + 0,071X_1 + 0,19X_2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (6)$$

$$\text{для } q'_{3п} = 4,68 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$$

$$\Delta q_3 = (0,72 + 0,14X_1 + 0,3X_2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2. \quad (7)$$

Значения приращения дефектности приведены в табл. 1, 3.

После описания коэффициентов уравнений (2÷7) функциями от дефектности корпусной изоляции в состоянии поставки [5] и замены кодовых значений натуральными [6] получаем обобщенные модели приращения дефектности в корпусной изоляции после изолирования на станке ИПС-3:

$$\Delta q = (0,7866 \cdot q_n'^{-2,29} \cdot e^{0,655 \cdot q_n'} + 0,014 \cdot q_n'^{22} \cdot e^{-7,05 \cdot q_n'} V - 0,092 \cdot q_n'^{1,524} \cdot e^{-0,233 \cdot q_n'} \cdot \delta) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2; \quad (8)$$

и после намотки обмотки на станке WST-660 —

$$\begin{aligned} \Delta q = & (-0,9753 \cdot q_n'^{0,124} \cdot e^{0,42 \cdot q_n'} + 0,02522 \cdot q_n'^{-1,48} \cdot e^{0,657 \cdot q_n'} \cdot V + \\ & + 0,0854 \cdot q_n'^{-1,913} \cdot e^{1,183 \cdot q_n'} \cdot P - 0,000157 \cdot q_n'^{0,376} \cdot e^{-0,079 \cdot q_n'} V^2 + \\ & + 0,1423 \cdot q_n'^{-1,555} \cdot e^{0,284 \cdot q_n'} \cdot P^2 - 0,000512 \cdot q_n'^{-15,16} \times \\ & \times e^{4,94 \cdot q_n'} \cdot V \cdot P) \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Анализ уравнения (2—9) показывает, что режимы работы намоточного и изолировочного станков оказывают существенное влияние на качество корпусной изоляции.

Анализируя обобщенные уравнения (8—9), можно рекомендовать оптимальные режимы работы намоточных и изолировочных станков, добиться увеличения производительности оборудования и улучшения качества корпусной изоляции.

На рис. 1—3 приведены линии равного уровня дефектности корпусной изоляции после изолирования пазов и после намотки обмотки при различных дефектностях изоляции в состоянии поставки. Анализ зависимостей (рис. 1—3) показывает, что режимы работы изолировочных и обмоточных станков, которые существуют на заводе «Сибэлектромотор», не являются оптимальными.

Так, на пазоизолировочных станках скорость изолирования можно повысить с 77 паз/мин до 92 паз/мин, при повышении зазора между пуансоном и матрицей с 0,35 мм до 0,55 мм. При этом дефектность корпусной изоляции снизится на ~33%.

На обмоточных станках можно увеличить скорость намотки с 80 дв ход/мин до 110 дв ход/мин, при уменьшении усилия натяжения с 4 кгс до 3,44 кгс. При этом дефектность корпусной изоляции снизится на ~20%.

В табл. (5—6) приведены существующие и рекомендуемые режимы работы технологического оборудования на заводе «Сибэлектромотор» и соответственно для каждого режима дано приращение дефектности.

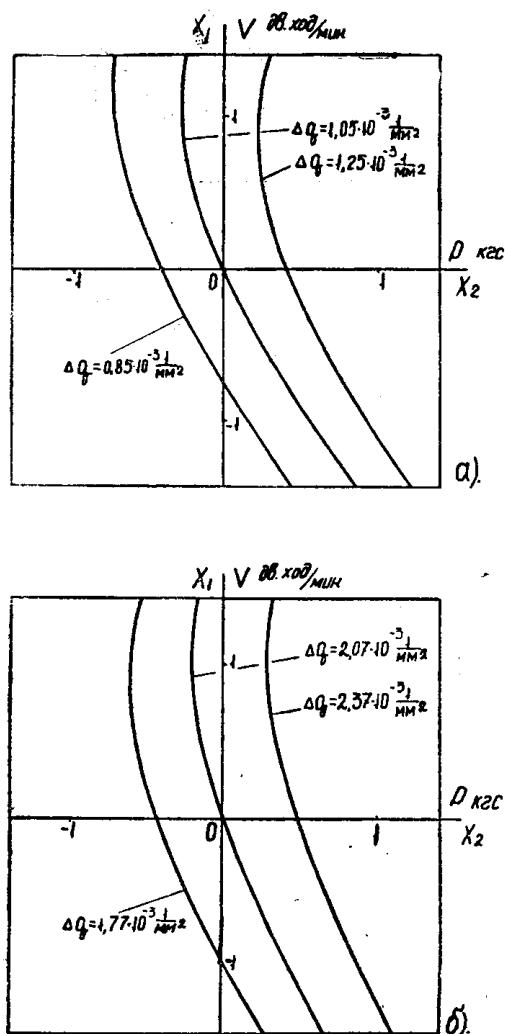


Рис. 1. Линии равного уровня дефектности корпусной изоляции обмотки: а)  $q_n' = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$ , б)  $q_n' = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$  обмоточный станок WST = 660

Полученные результаты работы позволяют сделать следующие выводы:

1. В данной работе получены математические модели дефектообразования в корпусной изоляции асинхронных двигателей при изолировании пазов на изолировочном станке ИПС-3 и при изготовлении обмоток на обмоточном станке WST-660, которые учитывают качество изоляции в состоянии поставки и режимы работы оборудования.

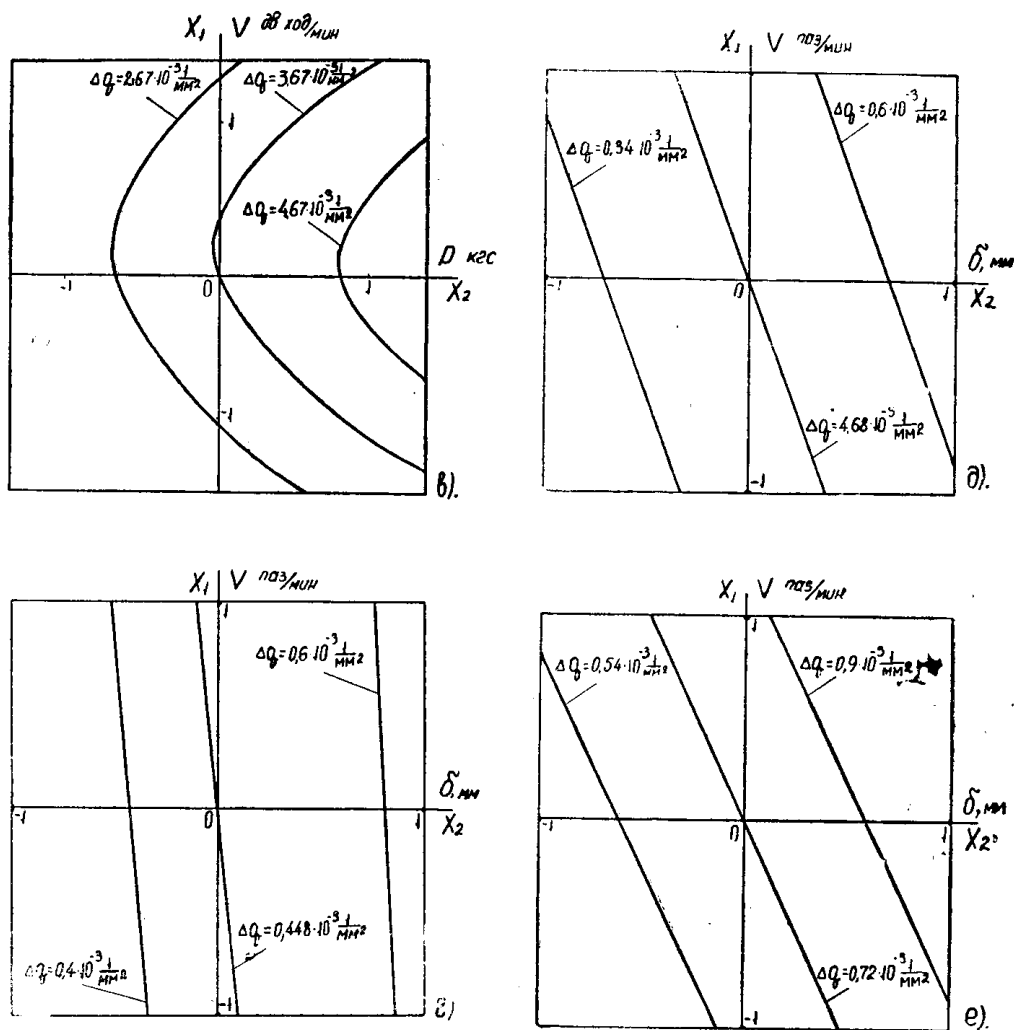


Рис. 2. Линии равного уровня дефектности корпусной изоляции обмотки: в) обмоточный станок WST-660  $q'_n = 6,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$ , г) изолировочный станок ИПС-3,  $q'_n = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$

Рис. 3. Линии равного уровня дефектности корпусной изоляции обмотки: д)  $q'_n = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$ , е)  $q'_n = 4,68 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$  изолировочный станок ИПС-3

2. На основании анализа полученных математических моделей предложены оптимальные режимы работы станков ИПС-3 и WST-660, позволяющие повысить производительность станка ИПС-3 на 20%, станка WST-660 на 37% и одновременно снизить дефектность соответственно на 33% и 20%.

3. Результаты проведенных исследований показывают, что отклонения режимов работы обмоточных и изолировочных станков оказывают существенное влияние на качество корпусной изоляции обмоток асинхронных двигателей.

## Обмоточный станок WST-660

$q'$ в состоянии поставки	Рекомендуемые режимы	Существующие режимы
$1,06 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 110 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 3,44 \text{ кгс}$ $\Delta q = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 80 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 4,00 \text{ кгс}$ $\Delta q = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$
$1,98 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 110 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 3,58 \text{ кгс}$ $\Delta q = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 80 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 4 \text{ кгс}$ $\Delta q = 2,07 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$
$6,92 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 110 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 3,51 \text{ кгс}$ $\Delta b = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 80 \frac{\text{дв/ход}}{\text{мин}}$ $P = 4 \text{ кгс}$ $\Delta q = 3,67 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$

Таблица 6

## Изолировочный станок ИПС-3

$q'$ в состоянии поставки	Рекомендуемые режимы	Существующие режимы
$1,4 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 92 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,55 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 92 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,35 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$
$2,42 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 92 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,55 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,336 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 77 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,35 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$
$4,68 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 92 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,55 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$	$V = 77 \text{ паз/мин}$ $\delta = 0,35 \text{ мм}$ $\Delta q = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ л/мм}^2$

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. З. Барский. О надежности электрических машин. «Вестник электропромышленности», 1963, № 2.
2. Л. М. Бернштейн. Изоляция электрических машин общепромышленного применения. М., «Энергия», 1971.
3. Ю. П. Похолков. Надежность изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей. Известия ТПИ, т. 242, Томск, изд-во ТГУ, 1972.
4. Э. К. Стрельбицкий, О. П. Муравлев, Ю. П. Похолков, А. С. Гитман. Исследование дефектности витковой и корпусной изоляции всыпных обмоток асинхронных электродвигателей. Известия ТПИ, т. 180, Томск, изд-во ТГУ, 1966.
5. Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., «Наука», 1971.
6. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, М., «Наука», 1965.
7. Л. З. Румшиский. Математическая обработка результатов эксперимента. М., «Наука», 1971.