

**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 (δ) 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 $\frac{дв/ход}{мин}$	P кгс	Параметр отклика Δq_i		
			$\Delta q_1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$	$\Delta q_2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$	$\Delta q_3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$
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 варьиро- вания	Кодовое обозначение	Уровни факторов				
			-1,414	-1	0	+1	+1,414
V, $\frac{дв/ход}{мин}$	28	X ₁	40	52	80	108	120
P, кгс	0,7	X ₂	3	3,3	4	4,7	5

Таблица 3

№ пп	V $\frac{паз}{мин}$	δ мм	Параметр отклика Δq_i		
			$\Delta q_1 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$	$\Delta q_2 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$	$\Delta q_3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{мм^2}$
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 варьиро- вания	Кодовое обозначение	Уровни факторов	
			+1	-1
V, паз/мин	7,5	X ₁	92	77
δ , мм	1,0	X ₂	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 наматочного и изолировочного станков оказывают существенное влияние на качество корпусной изоляции.

Анализируя обобщенные уравнения (8—9), можно рекомендовать оптимальные режимы работы наматочных 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.

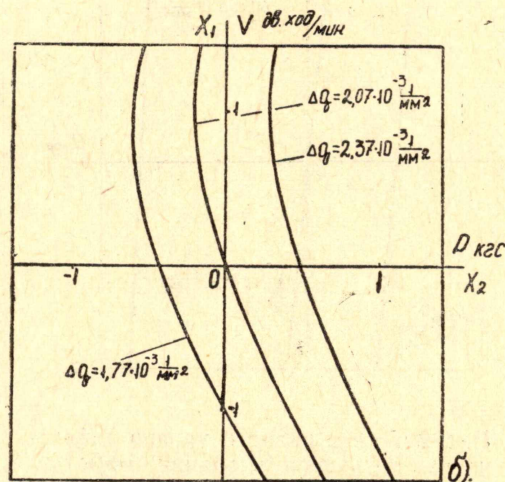
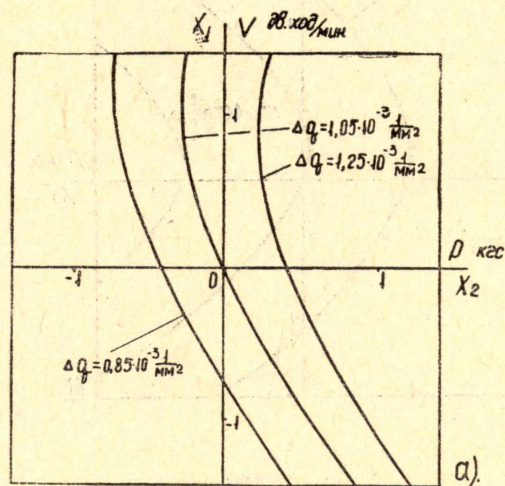


Рис. 1. Линии равного уровня дефектности корпусной изоляции обмотки: а) $q_n' = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$, б) $q_n' = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$ обмоточный станок WST = 660

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.

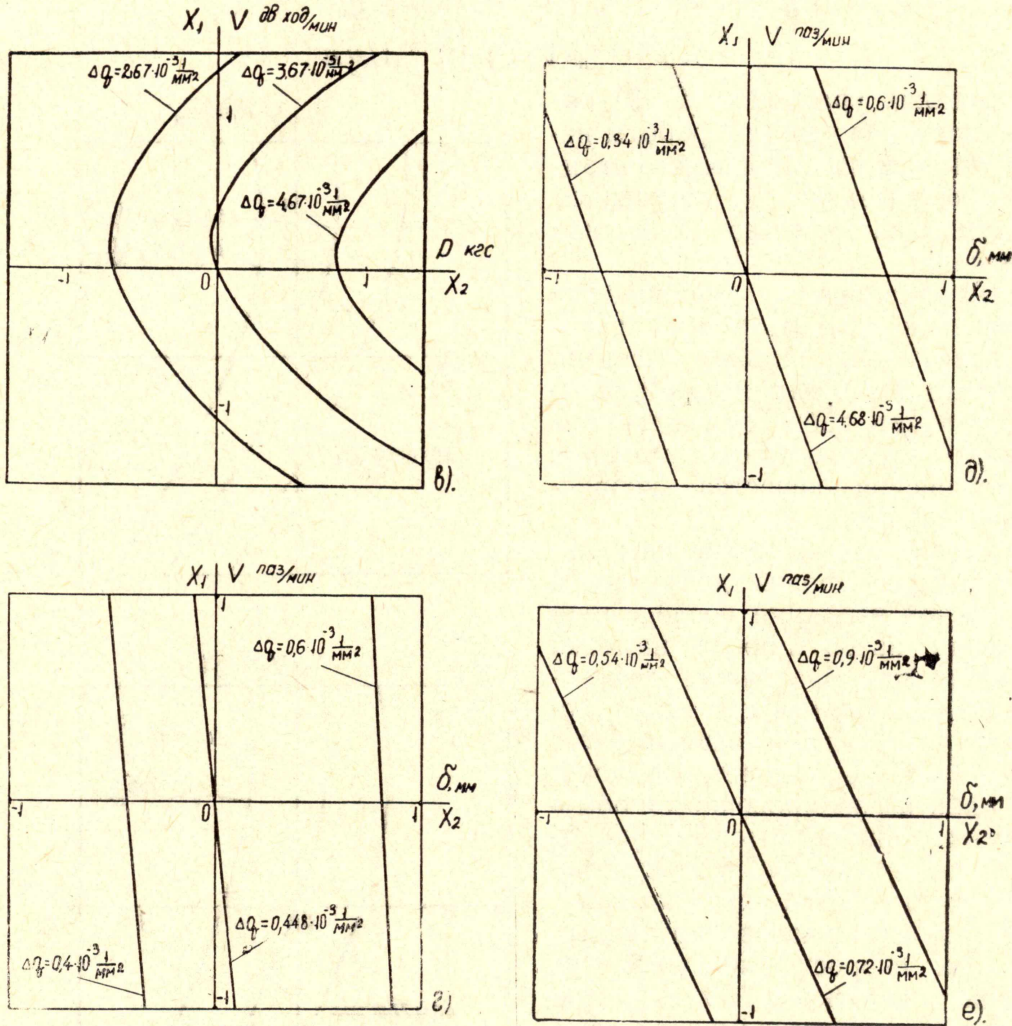


Рис. 2. Линии равного уровня дефектности корпусной изоляции обмотки: в) обмоточный станок WST-660 $q'_n = 6,32 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$, г) изолировочный станок ИПС-3, $q'_n = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}^2$

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

- С. З. Барский. О надежности электрических машин. «Вестник электропромышленности», 1963, № 2.
- Л. М. Бернштейн. Изоляция электрических машин общепромышленного применения. М., «Энергия», 1971.
- Ю. П. Похолков. Надежность изоляции всыпных обмоток асинхронных двигателей. Известия ТПИ, т. 242, Томск, изд-во ТГУ, 1972.
- 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.
- Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., «Наука», 1971.
- В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов, М., «Наука», 1965.
- Л. З. Румшиский. Математическая обработка результатов эксперимента. М., «Наука», 1971.