

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
КОРТОКЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

С. Н. МАРУХИН, О. П. МУРАВЛЕВ, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

При проектировании и исследованиях асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором одним из основных параметров является активное сопротивление обмотки ротора, которое зависит, как известно, от удельной электропроводности γ материала обмотки. Обмотки короткозамкнутых роторов подавляющего большинства асинхронных двигателей мощностью от нескольких сот Вт до нескольких сот кВт выполняются заливкой пазов ротора чистым алюминием под давлением [1, 2].

В заводских методиках расчета [3, 4, 5], в руководствах по проектированию электрических машин [6, 7, 8] и справочно-технической литературе [1, 9, 10] приводятся самые разнообразные данные по удельной электропроводности алюминия (от 27,5 до 33,3 м/Ом·мм²). Кроме этого, как показывает многолетний опыт изготовления короткозамкнутых роторов, удельная электропроводность чистого алюминия в процессе заливки изменяется. На это указывают многие авторы публикаций [1, 2, 6]. Однако комплексных исследований одновременного влияния различных технологических и конструктивно-технологических факторов на удельную электропроводность алюминия обмотки ротора до сих пор не проводилось.

Цель настоящей работы — получить количественную связь между различными технологическими и конструктивно-технологическими факторами при изготовлении короткозамкнутых роторов и величиной удельной электропроводности алюминия обмотки ротора.

Для исследования выбраны асинхронные двигатели серий АО и АО2, выпускаемые заводом «Сибэлектромотор» (г. Томск) длительное время. Технологический процесс их изготовления достаточно хорошо отработан и является вполне установившимся. Для изготовления роторов этих двигателей применяется электротехническая сталь марки Э12 (или Э13) по ГОСТу 802—58 и чистый (первичный) алюминий марки А6 (или А6П) по ГОСТу 11069—64.

На величину удельной электропроводности алюминия обмотки ротора влияют многие технологические и конструктивно-технологические факторы: температура заливаемого алюминия, содержание примесей в алюминии, скорость прессования при заливке, сечение и конфигурация пазов ротора, длина пакета ротора и др. Так как эти факторы действуют одновременно, а двигатели изготавливаются серийно, т. е. представляют статистическую совокупность, то наиболее эффективным методом исследования является экспериментально-статистический, в основе которого лежит математическая теория планирования экспериментов [11]. На основании детального изучения технологии заливки роторов на за-

воде «Сибэлектромотор», многочисленных опубликованных данных по удельной электропроводности, а также различных статистических методов планирования экспериментов выбрано ротатабельное планирование второго порядка.

Уравнение регрессии, которое должны получить в результате спланированного эксперимента, имеет в общем случае такой вид:

$$\hat{\gamma} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ (i < j)}}^{C_k^2} b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

где $\hat{\gamma}$ — значения удельной электропроводности алюминия, предсказанные уравнением (1); x_i — факторы (варьируемые переменные); $b_0, b_i, \dots$ — коэффициенты регрессии; k — число факторов; C_k^2 — число сочетаний из k по 2.

Был составлен центральный композиционный ротатабельный униформ-план второго порядка [11]. В качестве независимых переменных (факторов) выбраны следующие: x_1 — температура алюминия при заливке; x_2 — содержание железа в алюминии; x_3 — длина пакета ротора; x_4 — суммарное поперечное сечение пазов ротора. Варьирование переменных производилось на пяти уровнях. В условном (кодовом) масштабе эти уровни равны: —2; —1; 0; 1; 2, где 0 — соответствует середине пределов варьирования; 1 — шаг варьирования. В табл. 1 приведены значения независимых переменных с допусками.

Таблица 1

Факторы	Уровни варьирования				
	—2	—1	0	1	2
$X_1, ^\circ\text{C}$	670 ± 5	720 ± 5	770 ± 5	820 ± 5	870 ± 5
$X_2, \%$	$0,2 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$	$0,8 \pm 0,05$	$1,1 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,1$
$X_3, \text{мм}$	102 ± 1	113 ± 1	$126,5 \pm 1$	139 ± 1	151 ± 1
$X_4, \text{мм}^2$	855,8	1482	2024	2830	3374,8

При назначении пределов варьирования руководствовались следующими соображениями:

1. Нижний предел температуры алюминия при заливке 670°C определяется температурой плавления чистого алюминия. Верхний предел 870°C выбран по литературным данным [1, 10]. При превышении этой температуры в алюминии происходят необратимые физико-химические превращения, существенно изменяющие его свойства.

2. Нижний предел содержания железа 0,2% выбран по результатам статистической обработки химсостава первичного алюминия в состоянии поставки (по сертификатам заводов-поставщиков). Верхний предел 1,4% определяется техническими возможностями оборудования лаборатории завода «Сибэлектромотор», где предполагалось производить замеры содержания железа в алюминии.

3. Длины пакетов и сечения пазов роторов выбирались так, чтобы охватить наибольшее число типоразмеров двигателей и чтобы максимально использовать готовую технологическую оснастку. Суммарное поперечное сечение пазов рассчитывалось по номинальным размерам пазов базовых двигателей, т. е. таких серийных двигателей, штампы которых использовались при изготовлении экспериментальных роторов.

Таблица 2

Тип ротора	Факторы				Тип базового двигателя	Число роторов
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
1	-1	-1	-1	-1	АО2-2-6	4
2	1	-1	-1	-1	»	4
3	-1	1	-1	-1	»	5
4	1	1	-1	-1	»	5
5	-1	-1	1	-1	»	4
6	1	-1	1	-1	»	4
7	-1	1	1	-1	»	4
8	1	1	1	-1	»	4
9	-1	-1	-1	1	АО2-4-2	4
10	1	-1	-1	1	»	4
11	-1	1	-1	1	»	4
12	1	1	-1	1	»	4
13	-1	-1	1	1	»	4
14	1	-1	1	1	»	4
15	-1	1	1	1	»	5
16	1	1	1	1	»	4
17	-2	0	0	0	АОС2-4-4	4
18	2	0	0	0	»	4
19	0	-2	0	0	»	4
20	0	2	0	0	»	4
21	0	0	-2	0	»	5
22	0	0	2	0	»	4
23	0	0	0	-2	АОС-3-4	4
24	0	0	0	2	АО2-4-4	5
25 ÷ 31	0	0	0	0	АОС2-4-4	15

В табл. 2 приведен план эксперимента в условных единицах, число параллельных опытов (количество одинаковых роторов) и типы базовых двигателей. Экспериментальные роторы изготовлялись на заводе «Сибэлектромотор» в условиях, максимально приближенных к серийному производству. Заливка роторов производилась на машинах литья под давлением типа «POLAK».

Алюминий для заливки роторов марки А6П Иркутского алюминиевого завода готовился в плавильно-раздаточной печи с обмазанным чугуном тиглем емкостью 200 кг. Железо в алюминий постепенно добавлялось (от 0,2 до 1,4%) в виде мелкой стружки серого чугуна. Содержание железа определялось спектральным методом в заводской лаборатории на специально отливаемых в кокиль образцах. Контроль температуры алюминия в тигле производился хромо-алюмелевой термопарой с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$.

Всего было изготовлено 116 экспериментальных роторов. Так как заливка была связана с перестановкой форм для литья, длительным растворением чугунной стружки в алюминии, установкой соответствующей температуры в тигле и т. д., то процесс заливки всех роторов занял около 12 часов. После заливки были измерены длины пакетов роторов при нормальной окружающей температуре. Они находились в пределах, указанных в табл. 1. На короткозамыкающих кольцах обмотки ротора (на торцовых площадках между вентиляционными крыльями) в трех различных местах для каждого кольца была измерена удельная электропроводность γ . Затем от каждого ротора были отрезаны по восемь вентиляционных крыльев (по четыре с каждой стороны ротора) и на этих крыльях с двух сторон была также измерена удельная электропроводность. После этого короткозамыкающие кольца отрезались и из каждого ротора с помощью фрезерования были извлечены по три стержня обмотки. Извлечение было сделано осторожно, чтобы исключить

деформацию стержней. Каждый стержень сфрезеровывался примерно до половины толщины и на образовавшейся площадке в пяти местах (по осевой длине стержня) была измерена удельная электропроводность. Все замеры * удельной электропроводности γ были произведены в лаборатории завода «Сибэлектромотор» прибором типа ИЭ-1 [12]. На вентиляционных крыльях было получено всего 1856 замеров, на стержнях — 1740 и на короткозамыкающих кольцах — 696. Общее число замеров удельной электропроводности прибором ИЭ-1 на всех экспериментальных роторах составило 4292.

Таблица 3

Тип ротора	Вентиляционные крылья		Короткозамыкающие кольца		Стержни обмотки
	со стороны литника	с другой стороны	со стороны литника	с другой стороны	
2	32,2	32,1	33,5	33,5	31,6
2	31,8	31,2	32,6	32,3	28,3
3	28,0	27,3	29,4	28,7	25,7
4	27,9	27,4	30,1	29,6	26,2
5	32,0	31,8	33,6	33,5	30,7
6	32,1	31,6	33,0	32,9	27,9
7	28,6	27,9	29,6	29,6	24,8
8	28,7	28,4	30,5	29,5	25,7
9	32,0	30,7	34,0	33,6	27,7
10	31,6	30,9	33,5	33,7	30,7
11	28,2	26,9	30,5	29,7	25,8
12	27,8	27,1	30,2	29,9	26,4
13	31,5	30,4	33,4	33,2	28,0
14	32,1	31,3	33,5	33,4	29,1
15	28,7	27,4	30,6	29,9	26,6
16	28,2	27,3	30,4	30,3	28,8
17	31,6	30,8	33,0	32,2	26,3
18	31,0	30,6	31,7	32,2	26,7
19	34,6	34,6	34,7	35,2	29,5
20	28,5	27,3	29,6	29,3	25,2
21	31,3	30,4	31,3	31,4	27,1
22	30,8	30,3	31,5	31,4	26,7
23	30,3	29,3	30,7	31,4	28,7
24	31,6	30,5	32,0	31,7	29,5
25 ÷ 31	31,2	30,2	31,5	31,5	26,7

Были подсчитаны средние значения γ и приведены к температуре $+20^\circ\text{C}$. Результаты помещены в табл. 3, в которой значения удельной электропроводности выражены в $\text{м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$. Из табл. 3 видно, что наибольшие значения γ имеют короткозамыкающие кольца, наименьшие — стержни, а вентиляционные крылья занимают промежуточное положение. Причем значения γ со стороны входа алюминия в ротор при заливке (со стороны литника), как правило, превышают соответствующие значения γ с противоположной стороны ротора.

При работе асинхронного двигателя вентиляционные крылья в проведении электрического тока ротора практически не участвуют. Как видно из табл. 3., значения γ для короткозамыкающих колец с двух сторон каждого типа ротора отличаются незначительно. Значения же γ для стержней обмотки существенно отличаются от соответствующих значений γ для короткозамыкающих колец. Поэтому уравнения регрессии вида (1) были получены отдельно для короткозамыкающих колец (для

* При измерении большую помощь оказала старший инженер лаборатории завода «Сибэлектромотор» Л. Н. Селивченко.

средних значений γ) и для стержней обмотки ротора. При этом в расчете использовались величины:

$$\text{для короткозамыкающих колец} — \gamma_{\text{кк}} = \gamma_{\text{Ав}} - \gamma_{\text{кк}} \quad (2)$$

$$\text{для стержней обмотки} — \gamma_{\text{ст}} = \gamma_{\text{Ав}} - \gamma_{\text{ст}} \quad (3)$$

где $\gamma_{\text{кк}}$ и $\gamma_{\text{ст}}$ — средние значения удельной электропроводности для короткозамыкающих колец и стержней соответственно (табл. 3), а $\gamma_{\text{Ав}} = 35,5 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$ — базовая величина. За базовую величину принята удельная электропроводность технически чистого (рафинированного) алюминия [6, 9].

В результате статистической обработки экспериментальных данных по методике [11, 13] получены уравнения регрессии в виде полинома второго порядка (в кодовом масштабе):

для короткозамыкающих колец —

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_{\text{кк}} = & 3,9714 + 0,07083x_1 + 1,6125x_2 - 0,05417x_3 - \\ & - 0,2292x_4 - 0,1564x_1^2 - 0,1314x_2^2 + 0,0686x_3^2 + \\ & + 0,0686x_4^2 - 0,1938x_1x_2 - 0,0438x_1x_3 - 0,0312x_1x_4 - \\ & - 0,0812x_2x_3 - 0,0438x_2x_4 + 0,1062x_3x_4; \end{aligned} \quad (4)$$

для стержней обмотки —

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_{\text{ст}} = & 8,7571 - 0,1292x_1 + 1,3625x_2 + 0,0625x_3 - \\ & - 0,1542x_4 + 0,0118x_1^2 - 0,2007x_2^2 - 0,0882x_3^2 - \\ & - 0,6382x_4^2 - 0,3812x_1x_2 - 0,0438x_1x_3 - 0,7188x_1x_4 - \\ & - 0,2688x_2x_3 - 0,5188x_2x_4 - 0,2812x_3x_4. \end{aligned} \quad (5)$$

Проверка на адекватность по F-критерию Фишера [11, 13] показала, что уравнения (4) и (5) адекватны при 5%-ном уровне значимости, т. е. эти уравнения являются математическими моделями рассматриваемого процесса.

При проверке коэффициентов регрессий на значимость по критерию Стьюдента [11, 13] оказалось, что при 5%-ном уровне большинство коэффициентов уравнений (4) и (5) являются незначимыми, т. е. они могут быть заменены нулями. Тогда уравнения регрессии принимают простой и удобный для практических расчетов вид:

для короткозамыкающих колец —

$$\hat{\gamma}_{\text{кк}} = 3,9714 + 1,6125x_2 - 0,2292x_4 - 0,1564x_1^2; \quad (6)$$

для стержней обмотки —

$$\hat{\gamma}_{\text{ст}} = 8,7571 + 1,3625x_2 - 0,6382x_4^2 - 0,7188x_1x_4. \quad (7)$$

Для получения зависимостей удельных электропроводностей $\gamma_{\text{кк}}$ и $\gamma_{\text{ст}}$ от факторов нужно в уравнения (4) ÷ (7) сделать подстановку:

$$\hat{\gamma}_{\text{кк}} = 35,5 - \hat{\gamma}_{\text{кк}}; \quad \hat{\gamma}_{\text{ст}} = 35,5 - \hat{\gamma}_{\text{ст}}. \quad (8)$$

Для перевода уравнений (4) ÷ (7) в натуральный масштаб нужно воспользоваться формулами:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{X_1 - 770}{50}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 0,8}{0,3}; \\ x_3 &= \frac{X_3 - 126,5}{12,25}; \quad x_4 = \frac{X_4 - 2024}{630}, \end{aligned} \quad (9)$$

где X_1, X_2, X_3 и X_4 — факторы в физических единицах измерения.

Основные выводы

1. Получены количественные зависимости (4)÷(7) между отклонениями от базовой величины удельной электропроводности алюминия обмотки ротора и следующими факторами: температурой и чистотой алюминия, длиной пакета и сечением пазов роторов. Эти зависимости являются нелинейными функциями.

2. Удельные электропроводности алюминия короткозамыкающих колец и стержней обмотки существенно различны.

3. Уравнения (4)÷(7) позволяют учесть технологические и конструктивно-технологические факторы при проектировании асинхронных двигателей, аналогичных по конструкции исследованным, и тем самым повысить точность расчета их характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Г. Любецкий, Л. С. Макаров, И. З. Урецкий. Литые обмотки роторов асинхронных электродвигателей. М., «Энергия», 1969.
2. Г. Г. Пуцыкин. О способах заливки роторов. «Электротехника», 1965, № 1.
3. Заводские расчеты трехфазных асинхронных электродвигателей. Сборник формул. Под общей редакцией Б. И. Кузнецова и Р. А. Лютера, Баранча, 1943.
4. Методика расчета асинхронных электродвигателей. Завод «Динамо» им. С. М. Кирова, М., 1951.
5. Вопросы расчета электрических машин. Труды НИИ ЭП, т. III, вып. 1, М., 1959.
6. П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, М., «Энергия», 1969.
7. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. ГИТЛ УССР, Киев, 1960.
8. В. П. Шуйский. Расчет электрических машин. Перевод с нем. Л., «Энергия», 1968.
9. А. П. Смирягин. Промышленные цветные металлы и сплавы. Изд. 2-е, Metallurgizdat, 1956.
10. Г. Г. Пуцыкин, П. И. Федотов, Е. А. Гончарова. Алюминиевые сплавы для заливки роторов. Труды ВНИИЭМ, т. VI, М., 1960.
11. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
12. А. Л. Дорофеев. Электроиндуктивная (индукционная) дефектоскопия. М., «Машиностроение», 1967.
13. А. К. Митропольский. Техника статистических вычислений, Изд. 2-е, М., «Наука», 1971.