

МБ

На правах рукописи

Станислав Петрович АБРАМОВ

**И С С Л Е Д О В А Н И Е
СВЕРХВЫСОКОСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
С МАССИВНЫМ МАЛОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ**

Диссертация написана на русском языке
Специальность 05.09.03 — электрооборудование судов

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Работа выполнена в Ленинградском Высшем Инженерном Морском Училище имени адмирала С.О.Макарова.

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор Б.Е.Коник.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор В.В.Тихонов,
кандидат технических наук Д.В.Скачков.

Ведущее предприятие - НИИ ЛЭО "Электросила", г.Ленинград.

Автореферат разослан "3" *марта* 1975 г.

Защита диссертации состоится "17" *апреля* 1975 г. на заседании Совета электромеханического факультета ЛВМИУ им.адмирала С.О.Макарова, г.Ленинград, В.О., 21 линия, дом 14.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес Ученого Совета училища.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Ученый секретарь Совета, к.т.н., доцент

Э.П.Штумпф

Среди электрических машин, применяемых в различных отраслях промышленности, наибольшее распространение получили трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами (АДКЗ).

К недостаткам этих двигателей следует отнести значительный пусковой ток и небольшой пусковой момент, что затрудняет включение их в системах, где мощности двигателей сопоставимы с мощностями генераторов, например, в судовых электроустановках. АДКЗ отличаются повышенным уровнем магнитных вибраций и шума. Кроме того, наличие беличьей клетки снижает надежность асинхронного двигателя. Как показывает опыт их эксплуатации, при частых пусках и реверсах имеются случаи повреждения короткозамкнутых обмоток роторов двигателей судовых кранов и лебедок.

В этом отношении более рациональным может оказаться использование в электродвигателях "массивных", т.е. сплошных, не шихтованных роторов, не имеющих пазов и обмоток. АМР - асинхронные двигатели с массивными роторами - имеют пусковой ток в 1,5÷2,5 раза меньше, а пусковой момент примерно во столько же раз выше, чем у нормальных короткозамкнутых двигателей.

АМР создают возможность регулирования скорости величиной подводимого напряжения в широком диапазоне при хорошей стабильности работы и высокой экономичности. Кроме того, эти двигатели отличаются лучшими виброакустическими характеристиками.

На основании исследований АМР, выполненных В.С.Могильниковым и развитых в дальнейшем в работах Д.Е.Глухова, А.Н.Стрельникова, Е.Л.Лисицкого, Д.В.Скачкова и др., сделаны выводы, что эти машины могут найти широкое применение в электромеханических рулевых устройствах, судовых грузо-

подъемных механизмах и специальных высокоскоростных и маломощных электроприводах морского исполнения.

Однако, до сих пор АМР не нашли широкого применения, так как они в номинальном режиме имеют, по сравнению с нормальными АДКЗ, более низкие значения КПД и коэффициента мощности, а также повышенное скольжение.

Улучшение свойств массивного ротора может быть достигнуто применением короткозамкнутых торцевых колец, фрезерованием пазов на роторе, использованием многослойной конструкции ротора. Все это, разумеется, удорожает ротор, снижает его прочность; кроме того, наличие пазов приводит к появлению вибрационных сил.

В работах В.С.Могильникова было определено, что использование маломagnetного материала для массивного ротора существенно улучшает характеристики АМР при номинальной нагрузке.

И все же при частоте 50 Гц АМР с оптимальным материалом массивного ротора при номинальном моменте на валу, по данным Е.Л.Лисицкого, имеет ток статора на 60%, а скольжение в 5 раз большее, чем АДКЗ.

При повышенных частотах тока и больших скоростях вращения, как считают, например, И.М.Постников и В.М.Куцевалов, АМР должны обладать благоприятными механическими характеристиками.

С другой стороны, по экспериментальным данным В.С.Шарова, вследствие значительного поверхностного эффекта при большой частоте массивный стальной ротор сильно нагревается, вызывая перегрев обмотки статора и подшипников вплоть до их заклинивания.

Основной целью настоящей диссертационной работы является исследование возможности создания высокоскоростного асинхронного двигателя с массивным ротором, обладающего повышенной надежностью и характеристиками рабочего режима, приближающимися к характеристикам обычного короткозамкнутого двигателя.

Исходя из вышесказанного, были поставлены следующие задачи:

1) произвести экспериментальные исследования АМР с

целью определения оптимального материала для массивного сверхвысокоскоростного ротора;

2) сравнить существующие методы расчета АМР и сопоставить расчетные и опытные данные;

3) разработать методику расчета параметров и характеристик применительно к сверхвысокоскоростному асинхронному двигателю с маломagnetным массивным ротором;

4) разработать методику аналитического определения оптимального материала массивного ротора.

Экспериментальному исследованию подвергался электродвигатель шпинделя Э-72 производства Московского завода скоростных прецизионных электроприводов (МЗСПЭ), который с нормальным короткозамкнутым ротором имеет следующие номинальные данные:

фазное напряжение	U_1	= 127 В
фазный ток	I_{1H}	= 2,5 А
частота тока	f_1	= 1200 Гц
КПД	η	= 0,54
коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$	= 0,60
кратность пускового тока	$I_{1п}/I_{1H}$	= 3,40
кратность пускового момента	$M_{п}/M_H$	= 0,73.

Для проведения испытаний был изготовлен массивный ротор из сплава СМ-19 (19% меди, 79% железа, 2% технологических присадок), который, как отмечено в литературе, является оптимальным для двигателей малой и средней мощности при частоте тока 50 Гц. Были определены характеристики холостого хода, короткого замыкания и рабочие характеристики массивнороторного двигателя и выполнено их сравнение с характеристиками короткозамкнутого двигателя с шихтованным ротором. Анализ полученных данных показал, что существенное повышение КПД и коэффициента мощности АМР при номинальной нагрузке может быть достигнуто, если в качестве материала массивного ротора использовать сплав с большим, чем у СМ-19, содержанием меди.

Было изготовлено 15 сверхвысокоскоростных роторов, отличающихся друг от друга содержанием меди в железомедном сплаве, толщиной массивного цилиндра и величиной воздушного зазора между статором и ротором. Кроме того, испытыва-

лась двухслойная конструкция массивного ротора с внутренним шихтованным пакетом или сплошным стальным цилиндром.

Показано, что добротность пуска, т.е. отношение пускового момента к пусковому току, сверхвысокоскоростного АМР в 4-5 раз выше, чем у АДКЗ, что подтверждает результаты, полученные ранее при частоте 50 Гц.

Опытным путем найдены железомедные сплавы, обеспечивающие достижение оптимальных данных сверхвысокоскоростного АМР для рабочего режима. Впервые в практике создания электрических машин получен массивный ротор (из сплава М-50), с которым при номинальной мощности на валу АМР имеет скольжение меньшее, а значения коэффициента мощности и КПД близкие соответствующим величинам исходного АДКЗ, как показано в табл.1.

Таблица 1

Характеристики при $P_H = 300$ Вт	АДКЗ	АМР (М-50)
Ток статора I_1 , А	2,50	2,77
Скольжение	0,09	0,07
КПД	0,54	0,49
Коэффициент мощности	0,60	0,59

В данном случае коэффициент использования габаритной мощности K_p , под которым подразумевается отношение значений мощности АМР и исходного АДКЗ при номинальном токе статора, равен 0,9. Следует сказать, что возможности высокочастотного АМР использованы при этом далеко не полностью. По данным Е.Л.Лисицкого, при частоте 50 Гц рифление наружной поверхности ротора, применение двухслойной конструкции ротора с внутренним шихтованным цилиндром, а также магнитных клиньев в статоре увеличивают в совокупности значение K_p с 0,5 до 0,8.

Для высокоскоростного ротора представляло интерес теоретическое предположение В.С.Могильникова, согласно которому следует, что вместо внутреннего шихтованного цилиндра может применяться массивный из твердой стали. Толщина наруж-

ного маломagnetного слоя должна быть несколько меньше глубины проникновения поля в ротор Δ при скольжении рабочего режима.

Указанное предположение было проверено экспериментально для АМР (М-40). При расчетном значении $\Delta = 3$ мм уменьшение толщины маломagnetного цилиндра с 4,15 мм до 2 мм за счет увеличения диаметра вала, изготовленного из твердой стали ШХ-15, вызвало увеличение K_p с 0,79 до 0,92. Эти результаты позволяют определить, что значение K_p при использовании в двухслойной конструкции массивного ротора сплава М-50 возрастет до 1,03-1,07. Следовательно, по своим характеристикам сверхвысокоскоростной АМР может превосходить АДКЗ с шихтованным ротором не только в пусковом, но и в номинальном режиме.

Опытным путем было также установлено, что намагничивающий ток маломagnetного АМР существенно изменяется при изменении скольжения. С учетом этого изменения была предложена методика определения приведенных параметров ротора по экспериментальным данным.

Определение указанных параметров, позволяющих привести АМР к эквивалентной схеме обычного асинхронного двигателя, является одним из основных вопросов теории АМР.

При решении этой задачи необходимо учитывать нелинейный характер зависимости индукции и напряженности магнитного поля в роторе. Неодинаковый подход к данному вопросу вызвал появление разнообразных методов расчета.

В диссертации выполнен анализ трех известных методов расчета АМР - В.С.Могильникова, И.М.Постникова и В.М.Куцевалова. Показано, что расчетные характеристики АМР, полученные по указанным методам, значительно отличаются от опытных, так как авторы исследовали АМР с относительно высокими значениями магнитной проницаемости ротора. Для маломagnetного АМР имеет место более низкое значение отношения параметров ротора и значительное повышение намагничивающего тока при увеличении нагрузки.

В диссертации предлагается метод расчета параметров и характеристик маломagnetного сверхвысокоскоростного АМР. В основу метода положено определение глубины проникнове-

ния электромагнитного поля Δ в ротор, исходя из величины полного магнитного потока машины, замыкающегося через статор, воздушный зазор и ротор. Такой подход является наиболее общим, сближающим теорию АМР с классической теорией асинхронных машин.

Учет нелинейности магнитных характеристик материала ротора выполнен путем выражения известной формулы глубины проникновения поля в массивный ротор в функции величины $B_{кр}$ - индукции насыщения материала и s - скольжения.

В работе Л.Р.Неймана предложено кривую намагничивания ферромагнитного материала выразить аналитически формулой параболы

$$B = K H^{1/n}, \quad (1)$$

причем каждый ферромагнитный материал характеризуется своими значениями показателя степени n и коэффициента K .

Нами было установлено, что для маломagnetных железонед-ных сплавов с индукцией насыщения $B_{кр} = 0,5 \pm 1,0$ Т в диапазоне сильных полей $H = (12 \pm 50) \cdot 10^3$ А/м

$$n = 3; \quad K = 2,8 \cdot 10^{-2} B_{кр};$$

$$\rho = 1,05 \cdot 10^{-7} B_{кр}^{0,4}, \quad \text{Ом} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Интервал $0,5 \pm 1,0$ Т был выбран потому, что, согласно опытным данным, оптимальными материалами для сверхвысоко-скоростного массивного ротора являются железонедные сплавы, имеющие индукцию насыщения $B_{кр} = 0,6 \pm 0,7$ Т и содержание $40 \pm 50\%$ меди.

Задача определения эквивалентных параметров маломagnetного массивного ротора решается при следующих допущениях:

- 1) многофазная обмотка статора симметрична;
- 2) линии тока в роторе направлены вдоль его оси, влияние торцов может быть учтено коэффициентом при расчете сопротивлений;
- 3) радиус кривизны поверхности, линейные размеры ротора значительно превосходят глубину проникновения электромагнитной волны в тело ротора.

При указанных допущениях эквивалентное активное электрическое сопротивление, отнесенное к единице окружности ротора

$$\tau_2 = \rho \frac{L_i}{\frac{\Delta}{\sqrt{2}} \cdot 1}; \quad (3)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление материала ротора;

L_i - активная длина двигателя;

$\frac{\Delta}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \omega_1 s}}$ - эквивалентная глубина проникновения магнитного поля в ротор;

$\mu = \frac{B}{H}$ - магнитная проницаемость в активном слое ротора;

ω_1 - угловая частота тока статора;

s - скольжение.

Индукция в роторе определится исходя из величины магнитного потока на полюсное деление:

$$B = \frac{B_s \tau L_i}{\pi K'_y \Delta L_2}; \quad (4)$$

где $K'_y \Delta$ - согласно Л.Р.Нейману, так называемая полная глубина проникновения поля;

$$K'_y = \frac{\sqrt[4]{2n(3n+1)^2(n+1)}}{\sqrt{2}(n-1)}; \quad (5)$$

при $n = 3$, $K'_y = 2,47$.

Приведенные формулы позволяют определить значение глубины проникновения поля в ротор в виде:

$$\Delta = 0,63 \sqrt{\frac{B_{\delta} \tau L_i}{L_2}} \sqrt{\frac{\rho}{B_{\text{кр}}^3 \omega_1 s}}; \quad (6)$$

где B_{δ} - амплитуда индукции в воздушном зазоре;
 τ - полусное деление;
 L_2 - длина ротора.

После приведения сопротивления (3) к обмотке статора, оно определится, с учетом (6), как

$$\frac{z_2'}{s} = 1,7 \cdot 10^{-6} \frac{m_1 (w_1 K_{w1})^2}{D_2 s} K_2 K_t K_1 \sqrt{\frac{L_i L_2 B_{\text{кр}}^{2,1} \sqrt{\omega_1 s}}{B_{\delta} \tau}}; \quad (7)$$

где K_1 - коэффициент торцов;
 $K_2 \approx 1,4$ - коэффициент Л.Р.Неймана, учитывающий изменение магнитной проницаемости по глубине проникновения и наличие потерь на гистерезис;
 K_t - коэффициент приведения сопротивления к температуре поверхностного слоя ротора $80 \pm 100^\circ \text{C}$.

Принимая $B_{\text{кр}}^{1,05} \approx B_{\text{кр}}$, $L_2 \approx L_i$, получим

$$\frac{z_2'}{s} = \frac{C_2 B_{\text{кр}}}{\sqrt[4]{s^3}}; \quad (8)$$

где C_2 - величина, определяемая геометрическими размерами и обмоточными данными двигателя.

Приведенное реактивное сопротивление

$$x_2' = \operatorname{tg} \psi \cdot \frac{z_2'}{s}; \quad (9)$$

где ψ - аргумент комплекса полного сопротивления.

По нашим опытным данным, полученным при испытании двигателей с массивными роторами из различных железонедных маломagnetных сплавов, отношение параметров ротора может быть выражено приближенной эмпирической формулой

$$\operatorname{tg} \psi = C_{\psi} B_{\text{кр}}; \quad (10)$$

где $C_{\psi} = 0,3 \text{ 1/T}$.

Например, для сплава М-26 $\operatorname{tg} \psi = 0,31$, М-40 - 0,24, М-50 - 0,17.

Расчет магнитной цепи с учетом формул (4) и (6) позволяет определить индуктивное сопротивление току намагничивания ротора для различных значений скольжения:

$$x_{\text{мр}} = \frac{C_{\text{хм}} B_{\text{кр}}^{4/3}}{\sqrt[4]{s}}; \quad (11)$$

где постоянная величина для заданного АМР

$$C_{\text{хм}} = 0,4 \cdot 10^{-4} \frac{m_1 w_1 K_{w1}}{D_2} \sqrt{\frac{K_y' L_2}{B_{\delta} \tau L_i \sqrt{\omega_1 s}}}. \quad (12)$$

Выведенные формулы позволяют определить величину оптимального материала для массивного ротора с точки зрения получения наибольшей величины коэффициента мощности рабочей ветви

$$\cos \varphi_p = f_1(z_2', x_{\text{мр}}) = f_2(B_{\text{кр}}, s). \quad (13)$$

Исследуя зависимость $f_2(B_{\text{кр}}, s)$ на экстремум, получим уравнение:

$$C_2 - 0,4 C_2 B_{\text{кр}}^2 - 0,9 C_{\text{хм}} B_{\text{кр}}^{4/3} \sqrt{s} = 0; \quad (14)$$

что определяет значение оптимальной величины $B_{кр}$ при заданном скольжении. По рассчитанному значению $B_{кр}$ находят материал массивного ротора.

С учетом существующих методов расчета электрических машин, а также на основании выведенных выше формул, предложена методика расчета параметров и характеристик АМР.

Таблица 2

Материал ротора	М-26		М-40		М-50	
Скольжение	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт
Т о к с т а т о р а I_1 , А						
0,03	1,44	1,40	1,94	1,85	2,03	2,00
0,06	1,72	1,68	2,26	2,12	2,50	2,55
0,09	1,96	2,00	2,51	2,37	2,90	3,05
К о э ф ф и ц и е н т м о щ н о с т и						
0,03	0,36	0,36	0,30	0,32	0,44	0,42
0,06	0,45	0,45	0,41	0,43	0,54	0,59
0,09	0,51	0,52	0,47	0,49	0,61	0,64
К П Д						
0,03	0,13	0,18	0,10	0,13	0,28	0,25
0,06	0,36	0,31	0,36	0,39	0,46	0,46
0,09	0,45	0,39	0,42	0,46	0,51	0,49

Результаты расчета характеристик АМР по этой методике приведены в табл.2, там же для сравнения показаны данные опыта. Как видно из таблицы 2, имеется хорошая сходимость результатов расчета и опытных данных для различных материалов массивного ротора с индукцией насыщения $B_{кр}=0,5+1,0$ Т при мощности двигателя 0,3 кВт и частоте тока 1200 Гц.

В общем случае для двигателей при других мощностях, частотах и, соответственно, других материалах массивного ро-

тора изменение значения n и K в формуле (1) изменит только показатели степени и коэффициенты в формулах, определяющих параметры массивного ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные экспериментальные исследования сверхвысокоскоростного асинхронного двигателя подтвердили полученные ранее для частоты тока 50 Гц данные об улучшении характеристик АМР путем использования оптимального материала массивного ротора.

Для частоты 1200 Гц оптимальным оказался сплав М-50, на который получено авторское свидетельство № 423883.

2. Определена эмпирическая формула отношения приведенных параметров ротора $tg\psi$ для различных маломангнитных сплавов. Предложена методика расчета приведенных параметров ротора по опытным данным с учетом изменения намагничивающего тока в зависимости от скольжения. Экспериментально подтверждено предположение В.С.Могильникова, согласно которому следует, что в двухслойном роторе вместо внутреннего шихтованного цилиндра может применяться массивный из твердой стали с большим электрическим сопротивлением и высокой магнитной проницаемостью.

3. Произведен анализ существующих методов расчета двигателей с массивными роторами и сравнение результатов расчета с опытом. Показана необходимость уточнения этих методов при использовании маломангнитного материала для массивного ротора.

4. Предложен метод расчета параметров и характеристик массивнороторного двигателя, который, в отличие от известных методов, позволяет определить для заданных значений скольжения:

- намагничивающий ток с учетом изменения его составляющей, приходящейся на долю ротора;
- оптимальный материал ротора, обеспечивающий получение наибольшего значения коэффициента мощности.

5. Разработанная инженерная методика расчета асинхронных двигателей с массивными роторами дает хорошее совпадение с экспериментом для сплавов с индукцией насыщения $B_{кр} = 0,5 \div 1,0$ Т.

6. В целом, теоретические исследования, а также испытания опытно-промышленного образца электродвигателя Э-72 на Московском заводе скоростных прецизионных электроприводов показали, что применение маломагнитного материала для массивного ротора создает возможность получения высокоскоростного асинхронного двигателя, который превосходит двигатель с шихтованным короткозамкнутым ротором по ряду показателей (пусковые и виброакустические характеристики, надежность и простота устройства ротора), а по номинальным данным не уступает последнему.

Учитывая, кроме того, дешевизну и простоту технологии получения железомедных маломагнитных сплавов, можно сделать вывод о целесообразности промышленного внедрения полученных результатов.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. С.П.АБРАМОВ. Особенности эксплуатации судовых асинхронных электродвигателей, "Судостроение", 1967, № 10.

2. С.П.АБРАМОВ. Исследование электромеханического привода станка ЛЗ-87 с двухслойным ротором. Дополнение к тому II промежуточного отчета по теме № 282, Л., 1969.

3. Б.Е.КОНИК, С.П.АБРАМОВ, В.А.МИХАЙЛИДИ. Высокоскоростные асинхронные двигатели с массивными маломагнитными роторами, "Электротехника", 1974, № 3.

4. В.А.МИХАЙЛИДИ, С.П.АБРАМОВ, Б.Е.КОНИК. Сплав на основе железа, а.с. № 423883. Открытия, изобретения, промышленные образцы. Официальный бюллетень, 1974, № 14.

5. С.П.АБРАМОВ, Б.Е.КОНИК. Расчет асинхронного двигателя с массивным маломагнитным ротором. Судовые силовые установки. Научно-технический сборник, вып.14, М., "Транспорт", 1975, (УУЗ ММФ).