

Иванов С. Н., Буньков Н. А., Горбунов А. В., Дадынский А. А.
S. N. Ivanov, N. A. Bunkov, A. V. Gorbunov, A. A. Dadynsky

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ**

DESIGN FEATURES OF LOW-INERTIA ELECTROMECHANICAL DRIVES

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, professor of electromechanics Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Буньков Николай Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Nikolai A. – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Горбунов Александр Владимирович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Alexander V. Gorbunov – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Дадынский Алексей Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Aleksey A. Dadynsky – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются особенности проектирования малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором, предназначенных для использования в технических системах с повышенными динамическими характеристиками. Приведены результаты анализа существующих теоретических методов расчёта параметров полых роторов. Обоснована постановка задачи выбора конструктивных факторов применительно к объекту исследования. Рассмотрена физическая реализация электромеханических преобразователей и приведены рекомендации по их проектированию. Приведено описание и пример реализации экспериментальной установки для исследования варьируемых исполнений роторов. Установлены основные направления для обоснования выбора адаптированной методики проектирования. В статье показано, что данный класс устройств может проектироваться и исследоваться на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока, но с учётом особенностей конструктивного исполнения короткозамкнутого полого ротора. Определены основные этапы разработки и установления соответствия между техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором.

Summary. The article deals with the design features of low-inertia electromechanical drives based on asynchronous motors with a hollow non-magnetic rotor, designed for use in technical systems with high dynamic characteristics. The results of the analysis of existing theoretical methods for calculating the parameters of hollow rotors are presented. The statement of a problem of the choice of constructive factors in relation to object of research

is proved. Physical realization of electromechanical transducers is considered and recommendations on its design are given. The description and an example of the experimental setup for the study of variable rotor designs are given. The main directions for justification of the choice of the adapted design technique are established. The article shows that this class of devices can be designed and studied on the basis of the classical electromechanical AC converter, but taking into account the design features of the short-circuited hollow rotor. The main stages of development and establishment of correspondence between technical characteristics of basic electromechanical converters and output parameters of low-inertia electromechanical drives based on asynchronous motors with hollow non-magnetic rotor are determined.

Ключевые слова: проектирование, малоинерционный электромеханический привод, полый немагнитный ротор.

Key words: design, low-inertia electromechanical drive, hollow non-magnetic rotor.

УДК 621.31: 621.25

Введение

В современных технических комплексах максимальное применение находят приводные устройства на основе управляемых электромеханических преобразователей [5; 6; 4]. При этом следует отметить, что в связи с широким использованием в электротехнических комплексах информационных управляющих систем разработка маломощных приводов с высокими динамическими параметрами является актуальной задачей. Предварительный анализ известных подходов к проектированию малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей с полым немагнитным ротором (МЭП) показывает, что использование существующих методик не учитывает ряд их принципиальных конструктивных особенностей, что свидетельствует о невысокой эффективности таких приводов.

В работе [3] показано, что основной проблемой, возникающей на этапе обоснования размерных и конструктивных соотношений полого немагнитного ротора, является сложный характер распределения электромагнитных и, как следствие, тепловых полей в полом роторе, что не позволяет получить адаптированные проектные методики. Следует отметить, что вопросы обоснованного выбора проектных параметров возникают при расчёте стандартных электромеханических преобразователей [10]. В частности, методика определения обмоточных данных короткозамкнутых роторов в виде стержневой конструкции, приведённой на рис. 1, допускает различное соотношение между числом пазов статора и ротора [7].

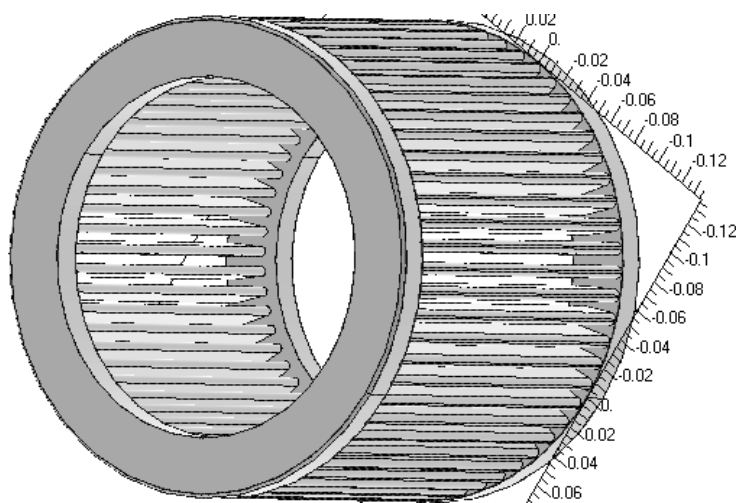


Рис. 1. Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя

Постановка задачи исследования

Теоретической основой проектирования МЭП на начальном этапе является известный аналитический алгоритм, предложенный в [8]. В качестве исходных данных при проектировании полого немагнитного ротора выбираются удельное электрическое сопротивление материала ротора при рабочей температуре ρ (например, алюминий марки А5 ГОСТ 11069-2001¹ $\rho_{Al;100} = 0,392 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) и его размерные соотношения, м: наружный диаметр D , осевая длина l и толщина стенки полого ротора Δ .

При технологически детерминированной величине воздушного зазора δ_0 внешний диаметр D рассчитывается исходя из внутреннего диаметра статора, уменьшенного на величину двухстороннего зазора δ_0 . Длина l ротора может быть принята на 10...12 % больше, чем длина пакета магнитопровода (стали) статора ($l \approx 1,10 \dots 1,12 l_{ст}$). Толщина стенки полого ротора определяется номенклатурой сортамента заготовок, используемых для изготовления ротора в соответствии с ГОСТ 18475-82 «Трубы холоднодеформированные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия».

Активное сопротивление полого ротора r , приведённое к обмотке фазы статора, Ом:

$$r = \frac{4m \cdot \rho \cdot l \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2 \cdot k_r}{\pi \cdot D \cdot l},$$

где m – число фаз обмотки статора; $w, k_{обм}$ – число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора; k_r – эмпирический коэффициент, учитывающий распределение тока в полом роторе.

При питании обмотки статора от источника промышленной частоты индуктивное сопротивление рассеяния маловиткового полого ротора принимается равным нулю.

Сопротивление взаимоиנדукции статора и ротора, Ом:

$$x = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2 \cdot D_1 \cdot l \cdot f}{k_{\mu} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot p^2},$$

где k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи; k_{δ} – коэффициент воздушного зазора; p – число пар полюсов.

Для сравнения можно отметить, что для расчёта активного сопротивления короткозамкнутого ротора с «беличьей» клеткой r_2 используется формула для расчёта активного сопротивления обмотки статора, хотя конструктивно они существенно отличаются, что делает выбор числа фаз и проводников ротора неоднозначным.

Это же имеет место и при дальнейшем приведении параметров короткозамкнутого ротора с использованием в практике проектирования промышленных асинхронных электродвигателей выражения:

$$r_2^* = r_2 \frac{4m \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2},$$

где r_2 – активное сопротивление короткозамкнутого ротора; Z_2 – количество зубцов (пазов) ротора; $k_{ск}$ – коэффициент скоса.

Данные выражения показывают, что очевидным недостатком существующего подхода [8] является существенное упрощение научной задачи, в то же время её решение с учётом конструктивных особенностей малоинерционных электромеханических приводов является одним из направлений повышения их эффективности на этапе проектирования.

¹ ГОСТ 11069-2001 «Алюминий первичный. Марки»

Отмеченные особенности могут быть учтены за счёт анализа и развития теоретических и экспериментальных исследований, нашедших отражение в фундаментальных работах, в различной степени касающихся рассматриваемых вопросов [8; 1; 2].

Аналитические методы исследования асинхронных двигателей с полым ротором связаны с гипотезами о распределении вихревого тока в роторе или с решением задач о распределении поля и вихревого тока. Например, расчёты в работе [8] проведены в предположении о том, что токи ротора ориентированы параллельно оси статора, а полный ток замкнут в элементах ротора, выступающих за длину пакета статора (как в короткозамкнутых кольцах).

Для плоской магнитной системы («стоячая волна» тока статора) и массивного ротора из ферромагнитного материала И. С. Бруком найдено распределение вихревых токов [1]. Для двигателей с полым немагнитным ротором без учёта влияния краевых эффектов в роторе эта задача была решена в 1946 году.

И. А. Вевюрко предложил принять для ротора ограниченной длины радиальную составляющую напряжённости магнитного поля и плотность вихревого тока по толщине цилиндра постоянными [2].

В ряде работ ротор представлен сложной структурой и эквивалентной схемой замещения, составленной из простых конфигураций, для которых из условия минимального пути протекания вихревого тока достаточно просто определить отдельные сопротивления ротора. Однако эти гипотезы дают очень низкую точность расчёта сопротивления ротора.

Аналитическое определение параметров полого ротора в виде решения полевой задачи приведено С. В. Поклоновым [9]. Но и в этой работе приняты существенные допущения (вне осевой длины воздушного зазора отсутствует магнитная связь между статором и ротором, то есть в лобовых частях ротора индукция равна нулю; по длине зазора поле равномерно и ограничено неизменной по толщине нормальной компонентой; расчёт проводится для синусоидального поля и т. п.).

Для аналитических методов сформировалась общая последовательность вычислительных операций. Первоначально система разбивается на характеристические области – занятые током ротора и зоны воздушных зазоров. Далее для обобщения поля в бестоковой и токовой областях вводится векторный магнитный потенциал и для каждой области составляются уравнения Максвелла, причём для бестоковых областей последние сводятся к уравнениям Лапласа, для области вихревых токов – Пуассона. Решение этих уравнений позволяет для каждой области найти векторный потенциал, а далее – плотность вихревого тока. Нахождение действительной части вектора Пойтинга позволяет определить активные потери в роторе, дальнейший переход от выражений, полученных для «стоячей волны» к вращающемуся полю «бегущей волны». По приведённому току ротора и электрическим потерям определяется приведённое к числу витков обмотки и фаз статора активное сопротивление.

Однако аналитические методики, полученные при существенных допущениях и упрощениях физической картины электромагнитных взаимодействий в расчётных областях, дают существенное расхождение теоретических результатов с экспериментальными данными при различных конструктивных особенностях и режимах работы двигателя.

Более того, сканирование номинальных параметров МЭП аппаратными средствами при общепринятых допущениях не позволяет установить существенного влияния полого немагнитного ротора на процессы преобразования мощности (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры рабочего режима

Параметр	Статор	Статор – полый ротор
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	6,07238	6,07238
Индуктивность обмотки статора, мГн	17,625	17,625
Приведённое вторичное активное сопротивление, Ом	4,0625	4,0625

Приведённая вторичная индуктивность, мГн	18,125	18,125
Взаимная индуктивность, мГн	586,0	586,0
Суммарное активное сопротивление статора, Ом	14,5737	14,5737

Развитие современных информационных технологий позволяет провести анализ возможных подходов решения рассматриваемой задачи методами имитационного моделирования с использованием пакета Ansys Maxwell, как это сделано в [3]. Хотя такой вариант представляет самостоятельное научное направление, требующее отдельного рассмотрения, но даже предварительные результаты показывают, что для их верификации необходима экспериментальная проверка.

Физическое моделирование процессов электромагнитного преобразования энергии применительно к МЭП сводится к двум подзадачам. Первая сводится к проверке теоретических гипотез, адекватности математических моделей и полученных аналитических результатов, вторая – к поиску субоптимальных проектных параметров и разработке новых направлений решения рассматриваемой задачи. В качестве физической модели использован трёхфазный асинхронный электродвигатель со сменным ротором (см. рис. 2).



Рис. 2. Физическая модель МЭП

Заключение

В статье проведён анализ основных подходов, позволяющих учесть конструктивные особенности малоинерционных электродвигателей при проектировании. Полученные результаты являются основой для создания автоматизированных систем проектирования и определения основных путей совершенствования МЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
2. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник промышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
3. Анализ влияния конструкционных факторов на надёжность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № I-4(16). – С. 29-34.
4. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: Изд-во «ОМ-Пресс», 2009. – 347 с.
5. Ким, К. К. Рыхление смёрзшегося угля электрогидравлическим методом / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 2(46). – С. 48-55.

6. Ким, К. К. Модель взаимодействия токоприёмника с контактным проводом / К. К. Ким, Ю. А. Антонов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 9-12.
7. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 767 с.
8. Лопухина, Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е. М. Лопухина. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.
9. Поклонов, С. В. Асинхронные двигатели герметичных электронасосов / С. В. Поклонов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 64 с.
10. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.