

УДК 537.62:621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ И ПУСКОВОГО РЕЖИМА ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КОНУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2021 г. И. М. Миляев¹, С. Ю. Останин², *, Н. С. Зубарев²,
Т. С. Латыпов², Цуй Шумэй³, Вэй Го³, Шаопен Ву³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова” Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

³Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

*E-mail: OstaninSY@mpei.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Исследованы физические процессы в магнитных цепях гистерезисных электромеханических преобразователей энергии конусной конструкции. Разработана методология для электромагнитного расчета пускового режима такого преобразователя энергии. Сформулированы предложения по применению полученных результатов при проектировании гистерезисных преобразователей конусной конструкции.

DOI: 10.31857/S0367676521110247

ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисные электромеханические преобразователи энергии в качестве гистерезисного электродвигателя [1–8] с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора [5–8], а также электродвигатели ряда других типов с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора применяются в значительной мере для электроприводов различного назначения. Электроприводы с такими электродвигателями используются, в частности, в мясомолочной, сахарной промышленности, в отраслях натуральных и искусственных волокон и нитей, различных изделий из них и др.

Коническая конфигурация рабочего воздушного зазора электродвигателей, в том числе, гистерезисных электродвигателей, обуславливает, с одной стороны их важные преимущества, в частности, при вертикальном направлении осей вращения [5–8]. Преимущества связаны с обеспечением решения средствами электропривода задач высоких частот вращения, трения, сопровождающих трение при реализации химических, биологических и электродинамических задач. Недостатки обусловлены сложностью протекающих электромагнитных процессов в электродвигателях, требующих дополнительных исследований в области магнитного поля.

Характерными объектами, для электропривода которых используются электродвигатели с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора, являются мотор-подшипники. Мотор-подшипники – это комплексные устройства, в структуре которых находится электропривод с газодинамической опорой. Непосредственно через структуру мотор-подшипника проходит с необходимой по условиям технологического, например, химического, процесса скоростью расплавленное или растворенное сырье. Кроме осуществления собственно технологии или производства, например, в отрасли искусственных волокон и нитей это имеет принципиально важное значение для решения вопросов опор электродвигателей, газодинамики, трения и др.

Научно-исследовательские работы в этой области проводятся в ряде государств Европы и Северной Америки, наиболее развитых в сфере науки и технологий. В России такие работы выполнялись и продолжают в организациях научно-исследовательского профиля, в учреждениях высшего образования и науки, в частности, в Москве, в Национальном исследовательском университете (НИУ) “МЭИ”, в Московском политехническом университете, в Нижнем Новгороде, Томске [6, 7]. Научно-исследовательские работы, рассматриваемые в статье, развивают исследования по гистерезисным электродвигателям и электроприводам на их

основе, в том числе для мотор-подшипников различного назначения, проведенные в НИУ “МЭИ” и в Московском политехническом университете [6].

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ
ДЛЯ РАСЧЕТА ПУСКОВОГО РЕЖИМА
ГИСТЕРЕЗИСНОГО
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
КОНУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

При расчетно-теоретических исследованиях гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора в первую очередь необходимо исследование пускового режима. Это обусловлено тем, что у гистерезисных электродвигателей, в том числе и рассматриваемой конструкции, именно магнитное состояние ротора в момент пуска определяет все последующие магнитные состояния ротора в процессе работы электродвигателя. Соответственно процессы в режиме пуска гистерезисного электродвигателя обуславливают все процессы, протекающие во всех дальнейших режимах его работы: асинхронном, синхронном без регулирования, синхронном с регулированием. Качество режима пуска определяет крутящий момент, требуемый для синхронизации вращения ротора и магнитного поля статора гистерезисного электродвигателя.

Для расчетно-теоретических исследований режима пуска гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора использовано эквивалентное представление такого электродвигателя набором электродвигателей с малыми осевыми размерами и цилиндрической формой зазора [9, 10] и методология, созданная на основе этого подхода и сеточных методов. Исходными данными являются: параметры электропитания и нагрузки; геометрические размеры; обмоточные данные статора; параметры материалов статора и ротора. В соответствии с подходом и методологией при расчете электродвигателя рассматриваемой конструкции в пусковом режиме:

1) По указанным исходным данным вычисляются параметры, включая геометрические параметры, эквивалентных гистерезисных электродвигателей.

2) Осуществляются полные электромагнитные расчеты всех эквивалентных электродвигателей для всего диапазона дискретного варьирования индукции магнитного поля в их роторах от минимальных до максимальных возможных рабочих значений указанной индукции.

Совокупность таких расчетов позволяет вычислить активные и реактивные составляющие, а также результирующие значения электромагнитных параметров, являющихся базовыми для расчетно-

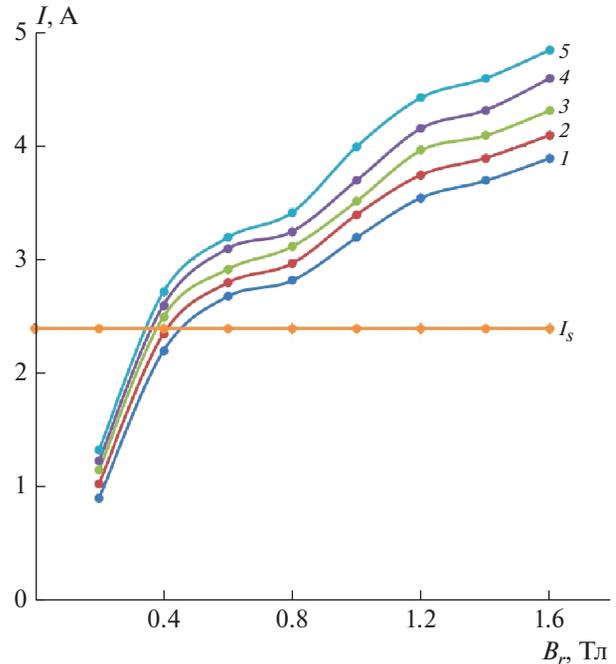


Рис. 1. Расчетные зависимости пусковых токов в обмотках статоров пяти (номера 1–5) эквивалентных электродвигателей в математической модели от рабочей индукции в роторах эквивалентных электродвигателей.

теоретического анализа гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора и приведенными в табл. 1.

3) Совокупность расчетов по п. 2 определяет дискретные функциональные зависимости базовых электромагнитных параметров:

$$\left. \begin{aligned}
 \vec{I}_{s1} &= \vec{I}_{s1}(B_r), \quad \vec{F}_{s1} = \vec{F}_{s1}(B_r), \\
 \vec{E}_{\delta 1} &= \vec{E}_{\delta 1}(B_r), \quad \varphi_{s\delta FE1} = \varphi_{s\delta FE1}(B_r); \\
 \vec{I}_{s2} &= \vec{I}_{s2}(B_r), \quad \vec{F}_{s2} = \vec{F}_{s2}(B_r), \\
 \vec{E}_{\delta 2} &= \vec{E}_{\delta 2}(B_r), \quad \varphi_{s\delta FE2} = \varphi_{s\delta FE2}(B_r); \\
 &\dots \\
 \vec{I}_{sk} &= \vec{I}_{sk}(B_r), \quad \vec{F}_{sk} = \vec{F}_{sk}(B_r), \\
 \vec{E}_{\delta k} &= \vec{E}_{\delta k}(B_r), \quad \varphi_{s\delta FEk} = \varphi_{s\delta FEk}(B_r); \\
 &\dots \\
 \vec{I}_{sN} &= \vec{I}_{sN}(B_r), \quad \vec{F}_{sN} = \vec{F}_{sN}(B_r), \\
 \vec{E}_{\delta N} &= \vec{E}_{\delta N}(B_r), \quad \varphi_{s\delta FEN} = \varphi_{s\delta FEN}(B_r).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Расчетные функциональные зависимости двух из базовых параметров эквивалентных гистерезисных электродвигателей: тока в обмотке статора и электродвижущей силы (ЭДС) намагнивающего контура, построенные для расчетно-теоретического анализа гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора в пусковом режиме, показаны на рис. 1 и 2. Цифрами от 1 до 5 отмечена принадлежность к

Таблица 1. Параметры, базовые для расчетно-теоретического анализа пуска гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора

№	Наименования параметров	Обозначения параметров	Принадлежность параметров
1	Количество эквивалентных гистерезисных преобразователей малой длины в математической модели гистерезисного электрохимического преобразователя конусной конструкции	N	Математическая модель
2	Порядковый номер эквивалентного гистерезисного преобразователя малой длины в математической модели	$k = 1, 2, \dots, N$	Математическая модель
3	Активная составляющая магнитодвижущей силы (МДС)	F_{rak}	Роторы
4	Реактивная составляющая МДС	$F_{r\mu k}$	Роторы
5	Результирующая МДС	\vec{F}_{rk}	Роторы
6	Активная составляющая МДС	$F_{\delta ak}$	Намагничивающие контуры
7	Реактивная составляющая МДС	$F_{\delta\mu k}$	Намагничивающие контуры
8	Результирующая МДС	$\vec{F}_{\delta k}$	Намагничивающие контуры
9	Электродвижущие силы	$\vec{E}_{\delta k}$	Намагничивающие контуры
10	Активная составляющая МДС	F_{sak}	Обмотки статоров
11	Реактивная составляющая МДС	$F_{s\mu k}$	Обмотки статоров
12	Результирующая МДС	\vec{F}_{sk}	Обмотки статоров
13	Активная составляющая тока	I_{sak}	Обмотки статоров
14	Реактивная составляющая тока	$I_{s\mu k}$	Обмотки статоров
15	Результирующий ток	\vec{I}_{sk}	Обмотки статоров
16	Электрические углы между электродвижущими силами намагничивающих контуров каждого из составных преобразователей и вектором результирующей магнитодвижущей силы (тока) в обмотке статора преобразователя конусной конструкции	$\varphi_{s\delta FEk}$	Намагничивающие контуры, обмотки статоров
17	Индукция магнитного поля в гистерезисном слое ротора k -го эквивалентного гистерезисного преобразователя малой длины в математической модели	B_{r1}	Гистерезисные слои роторов

соответствующим эквивалентным гистерезисным электродвигателям, для пяти из которых приведены эти зависимости. Зависимости рассчитаны в результате расчетно-теоретических исследований гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора при конусности 9%.

4) Формируются дискретные зависимости базовых параметров эквивалентных гистерезисных электродвигателей (табл. 1) в функции тока в обмотке статора гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора \vec{I}_s для всех возможных рабочих значений тока:

$$\left. \begin{aligned} B_{r1} &= B_{r1}(\vec{I}_s), \vec{F}_{s1} = \vec{F}_{s1}(\vec{I}_s), \varphi_{s\delta FE1} = \varphi_{s\delta FE1}(\vec{I}_s); \\ B_{r2} &= B_{r2}(\vec{I}_s), \vec{F}_{s2} = \vec{F}_{s2}(\vec{I}_s), \varphi_{s\delta FE2} = \varphi_{s\delta FE2}(\vec{I}_s); \\ &\dots \\ B_{rk} &= B_{rk}(\vec{I}_s), \vec{F}_{sk} = \vec{F}_{sk}(\vec{I}_s), \varphi_{s\delta FEk} = \varphi_{s\delta FEk}(\vec{I}_s); \\ &\dots \\ B_{rN} &= B_{rN}(\vec{I}_s), \vec{F}_{sN} = \vec{F}_{sN}(\vec{I}_s), \varphi_{s\delta FEN} = \varphi_{s\delta FEN}(\vec{I}_s). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

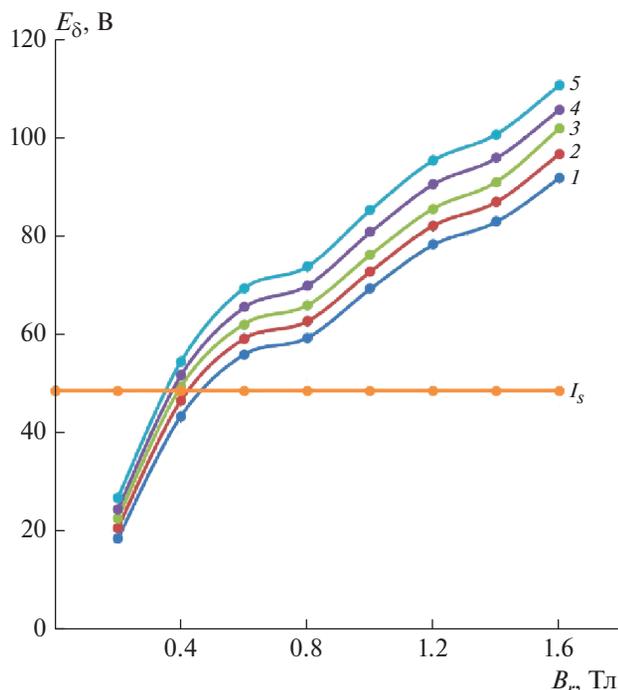


Рис. 2. Расчетные зависимости пусковых ЭДС пяти (номера 1–5) эквивалентных электродвигателей в математической модели от рабочей индукции в роторах эквивалентных электродвигателей.

5) Дискретные функциональные зависимости (2) преобразуются в соответствующие непрерывные функции посредством интерполяции, предложенной авторами на основе известного метода наименьших квадратов [11]. Предложенная интерполяция позволяет однозначно связать электромагнитные параметры эквивалентных электродвигателей с параметрами моделируемого электродвигателя. Авторы установили, что указанную интерполяцию наиболее целесообразно проводить кубическими параболоми:

$$P(I_s) = a_0 + a_1 I_s + a_2 I_s^2 + a_3 I_s^3. \quad (3)$$

Это обусловлено тем, что зависимости, для которых проводится интерполяция, во-первых, не имеют локальных и частных экстремумов и перегибов, а также незначительно отклоняются по нормальным в опорных точках. С другой стороны, квадратные параболы обеспечивают меньшую точность интерполяции по сравнению с кубическими параболоми. Вместе с тем, функции для интерполяции, имеющие степени выше третьей, менее устойчивы.

6) Вычисляются параметры и характеристики гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора посредством использования интерполяционных

функций (3) и итерационного численного решения нелинейного уравнения следующего вида:

$$|U_{s3} - U_s(I_s)| \leq \Delta U. \quad (4)$$

Здесь U_{s3} – требуемый уровень напряжения электропитания гистерезисного электродвигателя; $U_s(I_s)$ – нелинейная функциональная зависимость напряжения электропитания гистерезисного электродвигателя от тока в обмотке его статора; ΔU – требуемая точность решения уравнения.

7) Рассчитываются, на основе решения нелинейного уравнения (4) с применением функциональных зависимостей (1) и (2) и интерполяционных функций (3), параметры и характеристики эквивалентных гистерезисных электродвигателей в математической модели и моделируемого гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества гистерезисных электродвигателей с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора связаны с обеспечением решения средствами электропривода задач высоких частот вращения, трения, сопровождающих трение при реализации химических, биологических технологий, качества опор, газодинамических и электродинамических задач. Недостатки обусловлены сложностью протекающих электромагнитных процессов, требующих исследований в области магнитного поля.

При расчетно-теоретических исследованиях гистерезисного электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора в первую очередь необходимо исследование пускового режима. Это обусловлено тем, что у гистерезисных электродвигателей, в том числе и рассматриваемой конструкции, именно магнитное состояние ротора в момент пуска определяет все последующие магнитные состояния ротора в процессе работы.

Интерполяцию дискретных функциональных зависимостей базовых параметров эквивалентных электродвигателей для преобразования в непрерывные функции и однозначной связи параметров эквивалентных двигателей с параметрами электродвигателя с конической конфигурацией рабочего воздушного зазора, лучше всего проводить кубическими параболоми.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-08-01045_a и № 20-08-01106_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galluzzi R., Amati N., Tonoli A. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2020. V. 67. No. 2. P. 1171.

2. Zhou L., Gruber W., Trumper D.L. // IEEE Trans. Ind. Appl. 2018. V. 54. No. 4. P. 3197.
3. Zhou L., Gruber W., Trumper D.L. // Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. (IEMDC). 2017. P. 1.
4. Darabi A., Tahanian H., Amani S. et al. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. V. 64. No. 6. P. 4642.
5. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
6. Тарасов В.Н., Останин С.Ю. // Докл. IX Междунар. выст.-конгр. "Высок. технол. Инновации. Инвестиции" (Санкт-Петербург, 2004). С. 127.
7. Шнайдер А.Г., Пчелин И.К. Динамика мотор-подшипников. М.: Наука, 2007. 276 с.
8. Останин С.Ю., Zubarev M.S., Мильяев И.М. и др. // Мат. XXVII Междунар. конф. "Электромагн. поле и материалы" (Фунд. физ. иссл.): (Москва, 2019). С. 438.
9. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 720 с.
10. Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелева Г.А. // Электротехника. 2002. № 9. С. 5.
11. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.

Investigation of the initial state and starting mode of a hysteretic electromechanical energy converter of a conical structure

**I. M. Milyaev^a, S. Y. Ostanin^{b,*}, N. S. Zubarev^b, T. S. Latypov^b, Cui Shumei^c,
Wei Guo^c, Shaopeng Wu^c**

^a*Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^b*National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia*

^c*Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001 China*

^{*}*e-mail: Ostanin.SY@mpei.ru*

We studied the physical processes in magnetic circuits of hysteretic electromechanical energy converters of a conical structure. The methodology for the electromagnetic calculation of the starting mode of such an energy converter was developed. Proposals are being worked out on the application of the results obtained in the design of hysteretic converters of a conical structure.