

УДК 537.62,621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПРОЦЕССОВ В ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ КОНУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2020 г. С. Ю. Останин^{1, *}, В. Б. Никаноров², М. С. Зубарев¹, Т. С. Латыпов¹, Е. Н. Павкин³, Цуй Шумэй⁴, Вэй Го⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский политехнический университет”, Москва, Россия

³Публичное акционерное общество “Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королёва”, Москва, Россия

⁴Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

*E-mail: OstaninSY@mpei.ru

Поступила в редакцию 02.12.2019 г.

После доработки 23.12.2019 г.

Принята к публикации 27.01.2020 г.

Исследованы распределения индукции магнитного поля при гистерезисном электромеханическом преобразовании энергии с преобразователем конусной конструкции. Проведено математическое моделирование преобразования энергии, рассмотрено формирование полной схемы замещения, составление и решение системы векторных уравнений равновесия напряжений для соответствующего преобразователя энергии.

DOI: 10.31857/S0367676520050257

ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисное электромеханическое преобразование энергии с помощью преобразователей конусной конструкции достаточно широко применяется в химической, текстильной и других высокотехнологичных наукоемких отраслях. Соответствующие преобразователи энергии используются преимущественно в режиме гистерезисного электродвигателя [1, 2] в составе электроприводов механизмов, в частности, мотор-подшипников [3]. Особенности расчетов и исследования электродвигателей конусной конструкции обусловлены тем, что поверхности статора и ротора, обращенные к рабочему воздушному зазору, коаксиальные конические поверхности, что схематично показано на рис. 1.

Тензор магнитной проницаемости $\|\vec{\mu}\|$ [4], отражающий анизотропию магнитных свойств в магнитных материалах, для таких систем надо рассматривать в общем виде с учетом анизотропии свойств по осям $X Y Z$. Качество материалов для активных частей роторов гистерезисных электродвигателей характеризуется параметрами, определяемыми всей совокупностью основных и частных циклов (петель) перемагничивания (рис. 2).

Были проведены экспериментальные исследования, которые установили, что распределения индукции магнитного поля в конусной конструк-

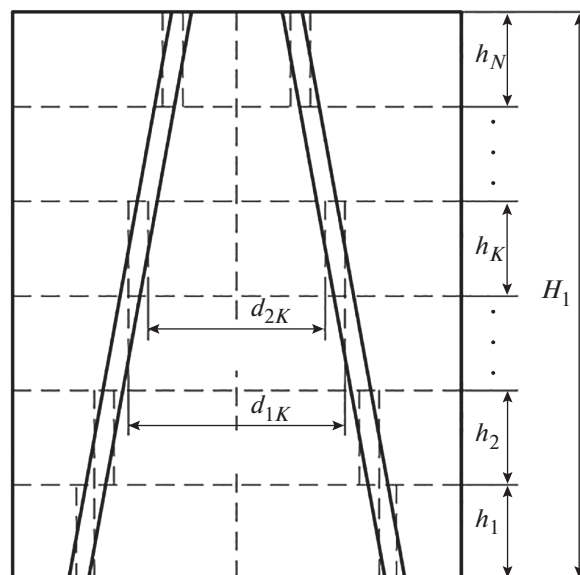


Рис. 1. Схематичное изображение гистерезисного электродвигателя с конусным ротором и его эквивалентная замена набором условных электродвигателей меньшей длины.

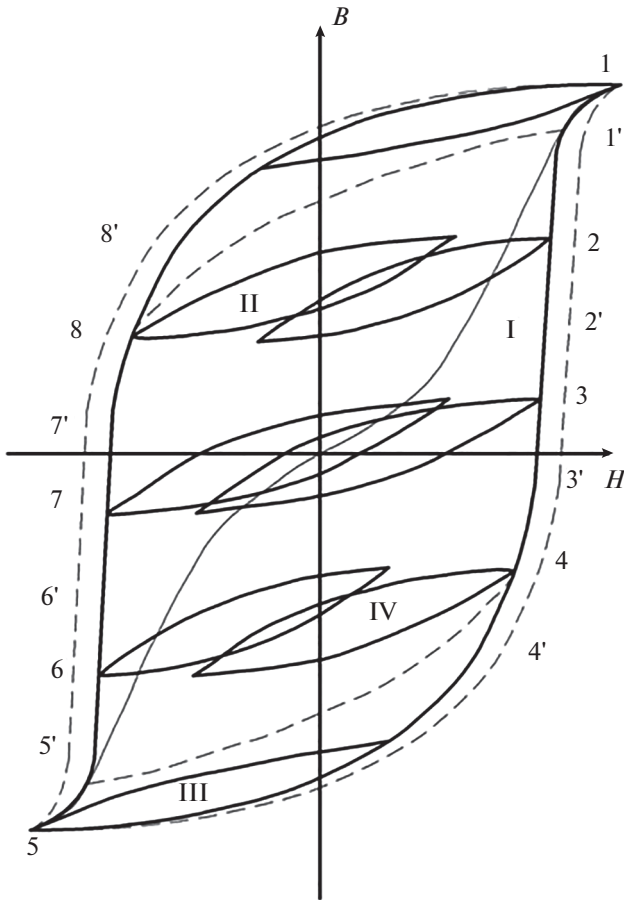


Рис. 2. Петли распределения активного материала ротора гистерезисного электродвигателя.

ции гистерезисных электродвигателей являются в значительной степени неравномерными даже при небольшой конусности (табл. 1).

ИССЛЕДОВАНИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с предложенным подходом и моделями электродвигателя цилиндрической конструкции [5–7] гистерезисный электродвигатель конусной конструкции можно заменить набором N эквивалентных двигателей меньшей длины, рис. 1, где: H_1 – активная длина, или высота при вертикальном расположении двигателя конусной конструкции; $h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_N$ – высоты, а $d_{1k}, d_{2k}, k = 1, 2, \dots, N$ – средние наружные и внутренние диаметры гистерезисных слоёв роторов эквивалентных электродвигателей.

Для предложенной эквивалентной схемы замещения определяются: Z_s – активно-индуктивный элемент с электрическим сопротивлением, равным полному электрическому сопротивлению обмотки статора электродвигателя конусной конструкции: $Z_s = R_s + jZ_s$; U_{sdi}, U_{sqi} – проекции на

продольную d и поперечную q оси вектора i -й временной гармоники напряжения электропитания гистерезисного электродвигателя; $i = 1, 2, \dots, L$ – порядковые номера и количество временных гармоник напряжения электропитания, которые необходимо учесть; I_{sdi}, I_{sqi} – проекции на продольную d и поперечную q оси вектора i -й временной гармоники тока в обмотке статора электродвигателя; $C3d_1, \dots, C3d_N, C3q_1, \dots, C3q_N$ – блоки схем замещения эквивалентных электродвигателей по осям d и q [5, 6].

В соответствии с предложенным подходом при математическом моделировании гистерезисного электродвигателя конусной конструкции сначала строится полное пространственно-временное распределение магнитного поля в каждом эквивалентном двигателе. Только после этого можно составить систему векторных уравнений равновесия напряжений для электродвигателя конусной конструкции по каждой i -й временной гармонике:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_{s1} &= \vec{I}_{s1} \cdot Z_s + \sum_{k=1}^N \vec{E}_{\delta k1}, \\ \vec{U}_{s2} &= \vec{I}_{s2} \cdot Z_s + \sum_{k=1}^N \vec{E}_{\delta k2}, \\ &\dots \\ \vec{U}_{si} &= \vec{I}_{si} \cdot Z_s + \sum_{k=1}^N \vec{E}_{\delta ki}, \\ &\dots \\ \vec{U}_{sL} &= \vec{I}_{sL} \cdot Z_s + \sum_{k=1}^N \vec{E}_{\delta kL}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\vec{U}_{si}, \vec{I}_{si}$ – векторы i -х временных гармоник напряжения электропитания и тока в обмотке статора, $\vec{E}_{\delta ki}$ – векторы i -х временных гармоник электродвижущей силы (ЭДС), соответствующей рабочему воздушному зазору, k -го эквивалентного электродвигателя. Векторы $\vec{U}_{si}, \vec{I}_{si}$ соответствующим образом раскладываются по осям координат d и q :

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_{s1} &= U_{sd1} + j \cdot U_{sq1}, \quad \vec{I}_{s1} = I_{sd1} + j \cdot I_{sq1}; \\ \vec{U}_{s2} &= U_{sd2} + j \cdot U_{sq2}, \quad \vec{I}_{s2} = I_{sd2} + j \cdot I_{sq2}; \\ &\dots \\ \vec{U}_{si} &= U_{sdi} + j \cdot U_{sqi}, \quad \vec{I}_{si} = I_{sdi} + j \cdot I_{sqi}; \\ &\dots \\ \vec{U}_{sN} &= U_{sdN} + j \cdot U_{sqN}, \quad \vec{I}_{sN} = I_{sdN} + j \cdot I_{sqN}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для вычисления вектора напряжения, приложенного к обмотке статора электродвигателя конусной конструкции \vec{U}_s , по соотношениям [5, 6], можно определить составляющие векторов МДС каждого k -го эквивалентного двигателя: гистерезисного слоя $\vec{F}_{rk}: F_{rak}, F_{ruk}$; намагничивающего контура $\vec{F}_{\delta k}: F_{\delta ak}, F_{\delta uk}$; обмотки статора $\vec{F}_{sk}: F_{sak}, F_{suk}$.

Таблица 1. Распределения индукции магнитного поля в гистерезисном слое конусного ротора гистерезисного электродвигателя по длине ротора

Параметры, показатели	Обозначение	Единица измерения	Значения				
Напряжение электропитания	U_s	В	21.0				
Координата по длине ротора	l_r	м	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
Индукция магнитного поля в роторе	B_r	Тл	0.125	0.220	0.315	0.335	0.195
Напряжение электропитания	U_s	В	29.0				
Координата по длине ротора	l_r	м	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
Индукция магнитного поля в роторе	B_r	Тл	0.175	0.340	0.485	0.580	0.280
Напряжение электропитания	U_s	В	38.0				
Координата по длине ротора	l_r	м	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
Индукция магнитного поля в роторе	B_r	Тл	0.220	0.480	0.725	0.845	0.420
Напряжение электропитания	U_s	В	51.5				
Координата по длине ротора	l_r	м	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
Индукция магнитного поля в роторе	B_r	Тл	0.285	0.780	1.150	1.205	0.525
Напряжение электропитания	U_s	В	55.0				
Координата по длине ротора	l_r	м	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050
Индукция магнитного поля в роторе	B_r	Тл	0.360	0.875	1.275	1.255	0.690

При известных указанных составляющих МДС для всех эквивалентных электродвигателей находится, в соответствии с методами векторного анализа, углы между вектором тока, или вектором МДС,

обмотки статора гистерезисного электродвигателя конусной конструкции и векторами ЭДС намагничивающих контуров эквивалентных электродвигателей:

$$\left. \begin{aligned}
 \varphi_{s\delta FE1} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{sF1} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{sa1}}{F_{su1}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{\delta a1} + F_{ra1}}{F_{\delta \mu 1} + F_{r\mu 1}}, \\
 \varphi_{s\delta FE2} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{sF2} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{sa2}}{F_{su2}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{\delta a2} + F_{ra2}}{F_{\delta \mu 2} + F_{r\mu 2}}, \\
 &\dots \\
 \varphi_{s\delta FEk} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{sFk} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{sak}}{F_{s\mu k}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{\delta ak} + F_{rak}}{F_{\delta \mu k} + F_{r\mu k}}, \\
 &\dots \\
 \varphi_{s\delta FEN} &= \frac{\pi}{2} - \varphi_{sFN} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{saN}}{F_{s\mu N}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{F_{\delta aN} + F_{raN}}{F_{\delta \mu N} + F_{r\mu N}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь $\varphi_{s\delta FE1}, \varphi_{s\delta FE2}, \dots, \varphi_{s\delta FEk}, \dots, \varphi_{s\delta FEN}$ — углы между векторами МДС обмотки статора \vec{F}_{sk} и векторами ЭДС, соответствующих воздушным зазорам, $\vec{E}_{\delta ki}$ каждого из эквивалентных двигателей; $\varphi_{sF1}, \varphi_{sF2}, \dots, \varphi_{sFk}, \dots, \varphi_{sFN}$ — углы между векторами МДС обмотки статора \vec{F}_{sk} и реактивными составляющими векторов МДС намагничивающего контура $F_{\delta \mu k}$ каждого из эквивалентных двигателей.

активную U_{sa} и реактивную U_{su} составляющие вектора напряжения электропитания \vec{U}_s моделируемого гистерезисного электродвигателя конусной конструкции по соотношениям:

$$U_{sa} = I_s r_s + \sum_{k=1}^N E_{\delta k} \cos \varphi_{s\delta FEk}, \quad (4)$$

$$U_{su} = I_s x_{s\sigma} + \sum_{k=1}^N E_{\delta k} \sin \varphi_{s\delta FEk}. \quad (5)$$

Здесь I_s и r_s – соответственно модуль вектора тока в обмотке статора моделируемого гистерезисного электродвигателя конусной конструкции и активное электрическое сопротивление этой обмотки; $E_{\delta k}$ – модули векторов МДС обмоток статоров каждого из эквивалентных двигателей; x_{σ} – индуктивное сопротивление обмотки статора гистерезисного двигателя конусной конструкции, эквивалентное магнитным полям рассеяния обмотки.

Затем находится модуль вектора напряжения электропитания \vec{U}_s моделируемого гистерезисного электродвигателя конусной конструкции:

$$U_s = \sqrt{(U_{sa})^2 + (U_{su})^2}. \quad (6)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При математическом моделировании гистерезисных электродвигателей конусной конструкции, в отличие от электродвигателей цилиндрической конструкции, недопустимо считать магнитное поле в них плоскопараллельным. Из-за неравномерности распределения магнитного поля в электродвигателе конусной конструкции в нем существует взаимосвязь уровней электромагнитного момента и центрирующей электромагнитной силы.

При одном и том же значении вектора тока в обмотках статоров эквивалентных гистерезисных электродвигателей малой длины, используемых для математического моделирования электродвигателя конусной конструкции, углы между вектором тока или вектором МДС обмотки статора электродвигателя конусной конструкции и векторами ЭДС намагничивающих контуров эквивалентных электродвигателей различны из-за различного магнит-

ного состояния магнитных цепей эквивалентных электродвигателей.

Разработанный подход к расчетно-теоретическим исследованиям и математическому моделированию гистерезисного электродвигателя конусной конструкции обеспечивает, после построения полного пространственно-временного распределения магнитного поля в каждом эквивалентном гистерезисном электродвигателе, формирование полной эквивалентной электрической схемы замещения, составление в соответствии с ней и решение системы векторных уравнений равновесия электрических напряжений для электродвигателя конусной конструкции по всем временным гармоникам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 19-58-53025 ГФЕН-а и № 18-58-53047 ГФЕН-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
2. Тарасов В.Н., Останин С.Ю. // Докл. IX Международ. выст. "НИ-ТЕСН" (Санкт-Петербург, 2004). С. 127.
3. Шнайдер А.Г., Пчелин И.К. Динамика мотор-подшипников. М.: Наука, 2007. 276 с.
4. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 720 с.
5. Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелёва Г.А. // Электротехн. 2002. № 9. С. 5.
6. Останин С.Ю., Акиншин С.С. // Вестник МЭИ. 2002. № 4. С. 24.
7. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.