

УДК 537.62:621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РОТОРЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

© 2021 г. С. Ю. Останин^{1, *}, И. М. Миляев², Н. С. Зубарев¹, Т. С. Латыпов¹, Цуй Шумэй³, Вэй Го³, Шаопен Ву³

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова” Российской академии наук, 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 роторе гистерезисного электромеханического преобразователя энергии. Предложена методология аналитического исследования электромагнитных процессов в роторе с учетом высших гармоник магнитного поля. Разрабатываются вопросы построения и решения системы векторных уравнений равновесия напряжений для гистерезисного преобразователя.

DOI: 10.31857/S0367676521110296

ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисный электромеханический преобразователь энергии в режиме гистерезисного электродвигателя [1–8] создает вращающий момент благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля, образуемого обмоткой статора, с ротором, перемагничиваемым указанным полем и приобретающим собственную намагниченность. В работах [1, 3], а также некоторых других трудах показано и подтверждено, что исследования гистерезисного электродвигателя по ряду направлений можно проводить, исследуя процессы в его роторе. Это обусловлено тем, что конструкция ротора и процессы в нем прямо определяют особенности и эффективность работы электродвигателя.

При исследовании процессов в роторе гистерезисного электродвигателя необходимо корректно определить граничные условия, соответствующие магнитным состояниям ротора во взаимосвязи со статором электродвигателя. Как показывает опыт [1, 3], граничные условия могут соответствовать, во-первых, ситуации, когда рабочий материал ротора полностью размагничен. Во-вторых, такому сочетанию частных циклов гистерезиса, когда основной цикл гистерезиса материала сужается до цикла с формой основного цикла, но сжатой практически до кривой. В-третьих, ситуации намагничивания рабочего материала первой полувольтной напряжением (тока) электропитания.

Соотношение [1, 3] позволяет найти гармонический состав индукции магнитного поля в гистерезисном слое ротора (или далее, для краткости, просто в роторе) по гармоническому составу напряжения электропитания:

$$B_{rAk} = C B_{rAl} \frac{U_{sAk}}{U_{sAl}} \cdot \frac{1}{k}. \quad (1)$$

Здесь U_{sAl} , U_{sAk} , B_{rAl} , B_{rAk} – амплитуды 1-й и высших k -х гармонических составляющих напряжения, подаваемого на электродвигатель и индукции магнитного поля в рабочем материале; C – коэффициент.

МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В РОТОРЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Принципиальные особенности конструкции, показателей гистерезисного электромеханического преобразователя энергии и физических процессов в нем обусловлены конструкцией и материалами ротора. Параметры традиционных материалов, их основные недостатки – высокая стоимость или дефицитность, даны в табл. 1, где: H_c – коэрцитивная сила, B_r – остаточная индукция, $k_{вц}$ – коэффициент выпуклости, d – плотность, α – коэффициент линейного расширения, ρ – удельное сопротивление, σ – предел прочности, H – твердость.

Таблица 1. Параметры традиционных магнитно-твердых материалов роторов гистерезисных электродвигателей

Параметр	Единица измерения	Значение						
Сплав	—	52КФ11-13	25Х15К	12К16М	12КМ14В	5ХМ18В	Х9К15М2	Х-15
Сортамент	—	лист, проволока	пруток, лист	пруток	пруток	пруток	пруток	пруток, труба
H_C	А/см	100–400	100–400	150	180	230	120	40–60
B_r	Тл	1.00–1.10	0.90–1.2	0.70	0.75	0.65	0.80	0.70
$k_{вм}$	отн. ед.	0.6–0.8	0.5–0.8	0.5–0.6	0.5–0.6	0.5–0.6	0.5	0.5
d	г/см ³	8	8	8	8	8	8	8
$\alpha \cdot 10^6$	1/°С	11–13	11–12	10–11	10–11	10–11	10–11	10–11
ρ	мкОм · см	60–67	60	40–45	45	50	40–50	30–40
σ	Н/мм ²	1200–2400	800–900	600–1000	600–1000	900–1200	1000	2000
H	—	55–60	38–45	50–60	50–60	40–50	40–50	50

Для замены этих сплавов менее дорогими и (или) дефицитными созданы новые или усовершенствованные материалы, табл. 2, где параметры приведены при максимальной магнитной проницаемости материалов (индекс “μ”): $H_{m\mu}$ и $B_{m\mu}$ – максимальные индукция и напряженность; h_{cm} и $b_{r\mu}$ – относительные коэрцитивная сила и остаточная индукция; $k_{вм}$ – коэффициент выпуклости.

Анализ показал, что большинству требований к роторам гистерезисных электромеханических преобразователей энергии удовлетворяют кобальтовые сплавы, подвергаемые специальной термообработке, например, термомагнитной, в первую очередь, Fe–Cr–Co (ХК) и Fe–Ni–Co–Al (ЮНК).

Предложен подход к расчетно-теоретическому исследованию процессов в роторе гистерезисного электродвигателя, содержащий основные этапы:

1) Функции, математически описывающие напряжения в фазах обмотки статора электродвигателя раскладываются на гармонические составляющие, которые, в свою очередь, раскладываются на симметричные составляющие:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{s1}(t) &= \sum_{k=-l}^l \left[U_{sk1+} e^{j\psi_{k1+}} + U_{sk1-} e^{j\psi_{k1-}} \right]; \\
 U_{s2}(t) &= \sum_{k=-l}^l \left[U_{sk2+} e^{j\psi_{k2+}} + U_{sk2-} e^{j\psi_{k2-}} \right]; \\
 &\dots \\
 U_{s\xi}(t) &= \sum_{k=-l}^l \left[U_{sk\xi+} e^{j\psi_{k\xi+}} + U_{sk\xi-} e^{j\psi_{k\xi-}} \right]; \\
 &\dots \\
 U_{sm}(t) &= \sum_{k=-l}^l \left[U_{skm+} e^{j\psi_{km+}} + U_{skm-} e^{j\psi_{km-}} \right].
 \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь $U_{s\xi} = f_{\xi}(t)$, – функция, описывающая напряжение, для которой $\xi = 1, 2, \dots, m$ – фаза и симметричная составляющая, в частности, если $m = 3$, то $U_{s1} = U_{sA}$, $U_{s2} = U_{sB}$, $U_{s3} = U_{sC}$; t – время; $k = 1, 2, \dots, l$ – номера временных гармонических составляющих функции; $U_{sk\xi+}$ и $U_{sk\xi-}$ – максимальные уровни, а $\psi_{k\xi+}$ и $\psi_{k\xi-}$ – фазные сдвиги прямой и обратной составляющей k -й гармонической составляющей ξ -й функции.

2) Посредством соотношений (1) и (2) формируется функция, математически описывающая полную индукцию магнитного поля в роторе:

$$\begin{aligned}
 B_r(t, \varphi_r) &= \\
 &= \sum_{k=1}^l \sum_{v=1}^n \left\{ B_{rAk_{v+}} \sin \{ [k - v(1-s)] \omega t - v p \varphi_r + \psi_{kv+} \} + \right. \\
 &\quad \left. + B_{rAk_{v-}} \sin \{ [k + v(1-s)] \omega t + v p \varphi_r + \psi_{kv-} \} \right\}.
 \end{aligned} (3)$$

Здесь φ_r – переменный угол, отсчитываемый по окружности ротора; $v = 1, 2, \dots, n$ – номера пространственных гармонических составляющих;

$B_{rAk_{v+}}$, ψ_{kv+} , $B_{rAk_{v-}}$, ψ_{kv-} – максимальные уровни и фазные сдвиги прямой и обратной симметричной составляющей гармонической составляющей индукции с номерами k во времени и v в пространстве; s – скольжение ротора относительно поля статора; ω – круговая частота; p – число пар полюсов.

3) Полупериод функции (3) $0.5T_{\varphi} = \pi/p$ разделяется в пространстве на N элементов – малых объемов, поле в которых можно считать равномерным, а значения индукции и напряженности поля – равными значениям в их центрах. Полупериод изменения этой функции во времени $0.5T_t$ разделяется на L интервалов времени с границами в точках $t_0 = 0, \dots, t_N = 0.5T_t$.

Таблица 2. Параметры усовершенствованных и новых магнитно-твердых деформируемых, ковких, отливаемых, спекаемых, прессуемых, прокатываемых, листовых, ленточных, проволочных, прутковых материалов роторов

Марка сплава	Состав, %	$H_{\text{мц}}, \text{А/см}$	$B_{\text{мц}}, \text{Тл}$	$k_{\text{вц}}, \text{отн. ед.}$	$b_{\text{гц}}, \text{отн. ед.}$	$h_{\text{сц}}, \text{отн. ед.}$
5XB10	5Cr10W	25–35	1.10	0.50–0.53	0.80	0.65–0.70
5XB12	5Cr12W	45–55	1.10	0.50–0.53	0.80	0.65–0.70
5XB14	5Cr14W	53–70	1.00	0.50–0.53	0.80	0.65–0.70
5XB16	5Cr16W	70–90	0.85	0.50–0.53	0.80	0.65–0.70
5XMB	5Cr1Mo8W	100–200	–	0.45–0.55	–	0.65–0.70
12XКМВ	12Cr1Mo8W	80–200	1.10	0.45–0.55	–	0.65–0.70
25X15KA	25Cr15Co	30–350	0.10–1.10	0.70–0.85	0.75–0.80	0.80–0.95
Ю9Н10	9Al10Ni	40	0.90	0.60	0.82	0.75
Ю9Н13	9Al113Ni	60	0.90	0.60	0.82	0.75
Ю9Н15	9Al15Ni	120	0.90	0.60	0.82	0.75
Ю11Н16	9Al16Ni	200	0.90	0.60	0.82	0.75
ЮН11	Ост.	30	1.05	0.60	0.82	0.75
	1.80393-79	50	1.05	0.60	0.82	0.75
		80	1.05	0.60	0.82	0.75
		50	1.05	0.60	0.82	0.75
52КФ5-13	52Co5-13V	40–200	1.00	0.55–0.60	0.80	0.75
52КФ11*	52Co11V	40–200	1.00–1.10	0.70–0.80	0.90	0.85
ЮН13К7	8Al13Ni7Co	20–60	1.10	0.65–0.70	0.80–0.85	0.80–0.85
ЮН13К9	8Al13Ni9Co	20–80	1.10	0.65–0.72	0.80–0.72	0.80–0.85
ЮН12К11	8Al12Ni11Co	20–100	1.10	0.70–0.75	0.85–0.90	0.80–0.85
ЮН13К13	8Al13Ni13Co	40–150	1.00	–	–	–
ЮН14К15	8Al14Ni15Co	40–200	1.00	0.70–0.80	0.80–0.90	0.80–0.90
ЮН16К15	8Al16Ni15Co	40–250	1.00	0.70	0.80	0.85
ЮН17К17	8Al17Ni17Co	100–350	0.90–1.00	0.70	0.80	0.85

Период функции, математически описывающей полную индукцию магнитного поля в роторе, во времени равен периоду ее 1-й гармонической составляющей $2\pi/\omega$ если целыми числами для всех номеров высших пространственных и временных гармонических составляющих поля являются:

$$\lambda_{kv+} = \frac{k - v(1 - s)}{s}, \quad \lambda_{kv-} = \frac{k + v(1 - s)}{s}. \quad (4)$$

4) Расчет для всех выбранных моментов времени и для всех пространственных элементов значений функции (3) дает матрицу:

$$\|B_r\| = \begin{pmatrix} B_r(t_1, \varphi_1) & B_r(t_1, \varphi_2) & \dots & B_r(t_1, \varphi_K) & \dots & B_r(t_1, \varphi_N) \\ B_r(t_2, \varphi_1) & B_r(t_2, \varphi_2) & \dots & B_r(t_2, \varphi_K) & \dots & B_r(t_2, \varphi_N) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ B_r(t_I, \varphi_1) & B_r(t_I, \varphi_2) & \dots & B_r(t_I, \varphi_K) & \dots & B_r(t_I, \varphi_N) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ B_r(t_L, \varphi_1) & B_r(t_L, \varphi_2) & \dots & B_r(t_L, \varphi_K) & \dots & B_r(t_L, \varphi_N) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

5) Формирование с использованием расчетно-аналитической модели из [9] первоначального основного цикла гистерезиса рабочего материала ротора.

6) Расчет с использованием модели из [9] по матрице (5) для каждого момента времени пространственного цикла гистерезиса и получение матрицы:

$$\|H_r\| = \begin{pmatrix} H_r(t_1, \varphi_1) & H_r(t_1, \varphi_2) & \dots & H_r(t_1, \varphi_K) & \dots & H_r(t_1, \varphi_N) \\ H_r(t_2, \varphi_1) & H_r(t_2, \varphi_2) & \dots & H_r(t_2, \varphi_K) & \dots & H_r(t_2, \varphi_N) \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ H_r(t_l, \varphi_1) & H_r(t_l, \varphi_2) & \dots & H_r(t_l, \varphi_K) & \dots & H_r(t_l, \varphi_N) \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ H_r(t_L, \varphi_1) & H_r(t_L, \varphi_2) & \dots & H_r(t_L, \varphi_K) & \dots & H_r(t_L, \varphi_N) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

7) Разложение на гармонические составляющие функций, математически описывающих полную индукцию и напряженность магнитного поля в роторе, дискретно характеризуемые матрицами (5) и (6). При этом вследствие принципиальной нелинейности этих функций в пространстве и времени необходимо применение кратных рядов Фурье [9, 10].

8) Расчет потерь мощности на перемагничивание ротора временными (номер k) и пространственными (v) гармоническими составляющими поля:

$$P_{kv} = K_p \pi (B_{rAkvc} H_{rAkvs} - B_{rAkvs} H_{rAkvc}). \quad (7)$$

9) Вычисление гармонических составляющих вращающего момента, создаваемых временными (k) и пространственными (v) гармоническими составляющими магнитного поля ротора гистерезисного электродвигателя:

$$M_{kv} = K_M \pi (B_{rAkvc} H_{rAkvs} - B_{rAkvs} H_{rAkvc}). \quad (8)$$

В (7) и (8) K_p и K_M – коэффициенты, определяемые геометрией.

10) Определение суммарных потерь мощности на перемагничивание ротора и вращающего момента, развиваемого в электродвигательном режиме с учетом всего спектра высших гармонических составляющих магнитного поля:

$$P_{\text{МГ}} = \sum_{k=1}^l \sum_{v=1}^n P_{kv}. \quad (9)$$

$$M_{\text{ЭГ}} = \sum_{k=1}^l \sum_{v=1}^n M_{kv}. \quad (10)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требованиям к рабочим материалам роторов гистерезисных электродвигателей наиболее полно из числа современных магнитных материалов удовлетворяют кобальтовые сплавы, подвергаемые специальной термообработке, в частности, термомагнитной и механической обработке для сплавов класса Fe–Cr–Co и термомагнитной обработке для сплавов Fe–Ni–Co–Al.

Ротор и его рабочие материалы определяют основные особенности конструкции, протекающих процессов, технических параметров гистерезисного электродвигателя, поэтому ротор является главным объектом при исследовании, проектировании и совершенствовании гистерезисного электродвигателя и электротехнических систем на его основе. Потери мощности на перемагничивание ротора и вращающий момент, развиваемый гистерезисным электродвигателем, необходимо рассчитывать с учетом всего спектра высших гармонических составляющих магнитного поля.

Функции, математически описывающие полную индукцию и напряженность магнитного поля в роторе в дискретном и непрерывном виде, обладают вследствие значительного гистерезиса магнитных процессов в роторе принципиальной нелинейностью. Поэтому при их разложении на гармонические составляющие необходимо применение кратных рядов Фурье.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
2. Кавалерова Л.А., Миляев И.М., Михеев Н.И. // Приб. и сист. упр. 1976. № 6. С. 48.
3. Тарасов В.Н., Останин С.Ю. // Докл. IX Междунар. выст.-конгр. “Высокие технологии. Инновации. Инвестиции” (Санкт-Петербург, 2004). С. 127.
4. Gao X., Sun B. // Proc. IEEE 8th Int. Conf. CYBER Technol. Autom. Control Intell. Syst. (Harbin, 2018). P. 1563.
5. Kim H.S., Hong S., Han J.H. et al. // Proc. 21st Int. Conf. Electr. Mach. Syst. (ICEMS) (Harbin, 2018). P. 560.
6. Padilha J.B., Kuo-Peng P., Sadowski N. et al. // IEEE Trans. Magn. 2017. V. 53. No. 6. Art No. 7402004.
7. Nasiri-Zarandi R., Mirsalim M., Tenconi A. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016. V. 63. No. 3. P. 1684.
8. Останин С.Ю., Миляев И.М., Рудник П.С. и др. // Мат. XXVII Междунар. конф. “Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)” (Москва, 2019). С. 463.
9. Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелева Г.А. // Электротехника. 2002. № 9. С. 5.
10. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.

Research of processes in the rotor of a hysteretic electromechanical energy converter

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

^a*National Research University “MPEI”, Moscow, 111250 Russia*

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

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

**e-mail: OstaninSY@mpei.ru*

We study physical processes in the rotor of a hysteretic electromechanical energy converter. A methodology for the analytical study of electromagnetic processes in the rotor, taking into account the higher harmonics of the magnetic field, is proposed. The issues of formation and solution of the system of vector equations of stress equilibrium for a hysteretic converter are being developed.