

УДК 537.62:621.31

## ОСОБЕННОСТИ И ПОДХОД К РАСЧЕТУ СИНХРОННОГО РЕЖИМА ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КОНУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2021 г. В. Б. Никаноров<sup>1</sup>, С. Ю. Останин<sup>2, \*</sup>, И. М. Миляев<sup>3</sup>, Н. С. Зубарев<sup>2</sup>, Т. С. Латыпов<sup>2</sup>, Цуй Шумэй<sup>4</sup>, Вэй Го<sup>4</sup>, Шаопен Ву<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский политехнический университет”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

<sup>4</sup>Харбинский 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, включая магнитные цепи их роторов. Разработана методология для электромагнитного расчета синхронного режима такого типа преобразователя энергии. Сформулированы предложения по применению полученных результатов при проектировании приборов.

DOI: 10.31857/S0367676521110259

### ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисные электромеханические преобразователи энергии, в том числе конусной конструкции [1–7], наиболее часто используются в синхронном режиме. Практическая важность синхронного режима преобразователя, в частности, в режиме гистерезисного электродвигателя, обусловлена тем, что многие современные и новые технологические и производственные процессы объективно требуют режима электрического синхронного вала [1–7]. Гистерезисный электродвигатель без каких-либо пусковых устройств и систем обеспечивает разгон до синхронного режима нагрузки с любым значением момента инерции при условии, что вращательный момент, создаваемый им, превосходит момент сопротивления нагрузки на его валу.

Для моделирования и исследования синхронного режима гистерезисного электродвигателя конусной конструкции целесообразен сеточный метод [8, 9] с сеткой в осевом направлении. В этом случае для моделирования электродвигателя с любой степенью конусности достаточно иметь адекватную модель электродвигателя цилиндрической конструкции, которая к настоящему времени разра-

ботана авторами статьи и детально апробирована. На практике для выбора наилучшей сетки оптимальным является использование сочетания “сгущения” адаптивной сетки, инженерного анализа и статистических данных.

Исследование эффекта от сгущения сетки целесообразно проверять на основе статистической обработки информации и сравнительного анализа сеток различных размеров. Практически удобно предварительно выбирать достаточно грубую исходную сетку, а затем увеличивать ее плотность с учетом погрешности геометрической дискретизации магнитной цепи электродвигателя. Для того чтобы сделать сетку более плотной, целесообразно применять метод дробления адаптивной сетки или инженерные средства оценки.

### ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА СИНХРОННОГО РЕЖИМА ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КОНУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ

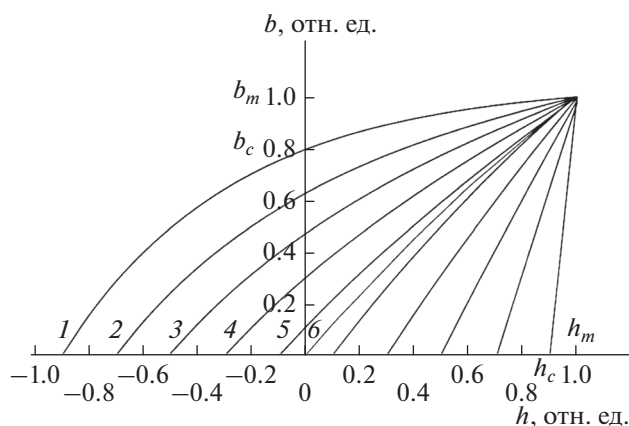
При математическом моделировании и расчетно-теоретических исследованиях гистерезис-

**Таблица 1.** Основные группы параметров – исходных данных для электромагнитного расчета синхронного режима гистерезисного электродвигателя конусной конструкции

№	Группа данных	Принадлежность данных	Примеры
1	Параметры электропитания преобразователя	Электрическая подсистема	Цепь электропитания статора
2	Параметры механической нагрузки на валу преобразователя	Механическая подсистема	Механическая нагрузка на валу
3	Геометрические размеры	Статор, рабочий воздушный зазор, ротор	Радиальные и осевые размеры
4	Обмоточные данные статора	Статор	Параметры обмотки статора
5	Параметры и характеристики материалов	Статор: магнитопроводы, электрические проводники, изоляция проводников, пазов, слоев обмотки, немагнитные клинья; ротор: активная часть – гистерезисный слой, конструкционная переходная втулка, вал	Кривые намагничивания, удельная магнитная энергия, удельные магнитные потери ферромагнитных материалов; удельное электрическое сопротивление проводников; параметры и свойства изоляционных материалов
6	Совокупность числовых данных, отражающих все предыдущие магнитные состояния ротора преобразователя, начиная с первичного намагничивания ротора при пуске	Ротор	Геометрические координаты траекторий перемагничивания точек гистерезисного слоя по частным циклам гистерезиса, ответвляющимся от начального цикла гистерезиса
7	Совокупность числовых данных, отражающих значения параметров всех предыдущих режимов работы преобразователя	Статор, рабочий воздушный зазор, ротор	Параметры асинхронного режима при фиксированном скольжении ротора относительно магнитного поля статора

ного электродвигателя конусной конструкции в синхронном режиме он в модели заменяется совокупностью эквивалентных электродвигателей меньшей длины с цилиндрическими роторами, имеющих общий вал и последовательно соединенные обмотки статоров. Эквивалентных элек-

тродвигателей выбирается столько, чтобы можно было пренебречь конусностью каждого из этих электродвигателей. Исходными данными для расчета синхронного режима гистерезисного электродвигателя исследуемой конструкции являются группы параметров, приведенные в табл. 1.

**Рис. 1.** Результаты аналитического расчета семейства промежуточных циклов распределения.

Принципиальные отличительные особенности методологии и алгоритма для расчета синхронного режима гистерезисного электродвигателя конусной конструкции связаны с тем, что во всех режимах, кроме пускового, магнитное состояние ротора характеризуется промежуточными циклами распределения (рис. 1). Эти циклы образуются как траектории перемагничивания точек ротора по частным циклам, ответвляющимся от начального цикла гистерезиса. Промежуточные циклы распределения характеризуются следующим:

- они имеют форму, близкую к форме начального цикла, но отличающуюся степенью сжатия, определяемой размерами частных циклов;
- их ширина изменяется от ширины начального цикла до величины, стремящейся к нулю, когда площадь цикла также стремится к нулю;

• при идеальном, то есть совершенно симметричном по фазам и синусоидальном, напряжении электропитания электродвигателя максимальные значения индукции и напряженности магнитного поля начального и промежуточного циклов распределения ротора электродвигателя равны.

Точки начального цикла гистерезиса, расположенные в области положительных значений индукции магнитного поля, имеют следующие координаты (координаты точек, расположенных в области отрицательных значений индукции, симметричны относительно горизонтальной оси – оси напряженности магнитного поля – с поворотом на 180 градусов):

$$\left. \begin{aligned} &(B_{\text{мнцг}}, H_{\text{мнцг}}), (B_{\text{нцг}12}, H_{\text{нцг}12}), \\ &(B_{\text{нцг}13}, H_{\text{нцг}13}), \dots, (B_{\text{нцг}1k_1}, H_{\text{нцг}1k_1}), \dots, \\ &(B_{\text{нцг}1n_1-1}, H_{\text{нцг}1n_1-1}), (B_{r_{\text{нцг}}}, 0), \\ &(B_{r_{\text{нцг}}}, 0), (B_{\text{нцг}112}, H_{\text{нцг}112}), \\ &(B_{\text{нцг}113}, H_{\text{нцг}113}), \dots, (B_{\text{нцг}11k_{11}}, H_{\text{нцг}11k_{11}}), \dots, \\ &(B_{\text{нцг}11n_1-1}, H_{\text{нцг}11n_1-1}), (0, H_{\text{снцг}}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $B_{\text{мнцг}}, H_{\text{мнцг}}$  – максимальные значения индукции и напряженности магнитного поля начального цикла гистерезиса;  $B_{\text{нцг}1k_1}, H_{\text{нцг}1k_1}$  – текущие значения индукции и напряженности магнитного поля в  $k_1$ -й точке начального цикла гистерезиса в первой (индекс “I”) координатной четверти (в первом квадранте),  $k_1 = 1, 2, \dots, n_1$ ;  $B_{r_{\text{нцг}}}$  – остаточная индукция начального цикла гистерезиса;  $B_{\text{нцг}1k_{11}}, H_{\text{нцг}1k_{11}}$  – текущие значения индукции и напряженности магнитного поля в  $k_{11}$ -й точке начального цикла гистерезиса во второй (индекс “II”) координатной четверти (во втором квадранте),  $k_{11} = 1, 2, \dots, n_{11}$ ;  $H_{\text{снцг}}$  – коэрцитивная сила начального цикла.

Точки каждого промежуточного цикла распределения, расположенные в области положитель-

ных значений индукции магнитного поля, имеют следующие координаты (координаты точек в области отрицательных значений индукции магнитного поля, симметричны относительно горизонтальной оси – оси напряженности магнитного поля – с поворотом на 180 градусов):

$$\left. \begin{aligned} &(B_{\text{мпци}i}, H_{\text{мпци}i}), (B_{\text{пци}12}, H_{\text{пци}12}), \\ &(B_{\text{пци}13}, H_{\text{пци}13}), \dots, (B_{\text{пци}1k_1}, H_{\text{пци}1k_1}), \dots, \\ &(B_{\text{пци}1n_1-1}, H_{\text{пци}1n_1-1}), \dots, (B_{r_{\text{пци}}}, 0), \\ &(B_{r_{\text{пци}}}, 0), (B_{\text{пци}112}, H_{\text{пци}112}), \\ &(B_{\text{пци}113}, H_{\text{пци}113}), \dots, (B_{\text{пци}11k_{11}}, H_{\text{пци}11k_{11}}), \dots, \\ &(B_{\text{пци}11n_1-1}, H_{\text{пци}11n_1-1}), (0, H_{\text{спци}}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $B_{\text{мпци}i}, H_{\text{мпци}i}$  – максимальные значения индукции и напряженности магнитного поля  $i$ -го промежуточного цикла распределения;  $B_{\text{пци}1k_1}, H_{\text{пци}1k_1}$  – текущие значения индукции и напряженности магнитного поля в  $k_1$ -й точке  $i$ -го промежуточного цикла распределения в первой (индекс “I”) координатной четверти (в первом квадранте),  $i = 1, 2, \dots, l, k_1 = 1, 2, \dots, n_1$ ;  $B_{r_{\text{пци}}}$  – остаточная индукция  $i$ -го промежуточного цикла распределения;  $B_{\text{пци}1k_{11}}, H_{\text{пци}1k_{11}}$  – текущие значения индукции и напряженности магнитного поля в  $k_{11}$ -й точке  $i$ -го промежуточного цикла распределения во второй (индекс “II”) координатной четверти (во втором квадранте);  $k_{11} = 1, 2, \dots, n_{11}$ ;  $H_{\text{спци}}$  – коэрцитивная сила  $i$ -го промежуточного цикла распределения.

Точки безгистерезисной кривой намагничивания, расположенные в области положительных значений индукции магнитного поля, имеют следующие координаты (координаты точек в области отрицательных значений индукции, симметричны относительно горизонтальной оси – оси напряженности магнитного поля – с поворотом на 180 градусов):

$$\left. \begin{aligned} &(B_{\text{тбгкн}}, H_{\text{тбгкн}}), (B_{\text{бгкн}12}, H_{\text{бгкн}12}), \\ &(B_{\text{бгкн}13}, H_{\text{бгкн}13}), \dots, (B_{\text{бгкн}1k_1}, H_{\text{бгкн}1k_1}), \dots, \\ &(B_{\text{бгкн}1n_1-1}, H_{\text{бгкн}1n_1-1}), \dots, (B_{r_{\text{бгкн}}} \rightarrow 0, 0), (0, H_{\text{сбгкн}} \rightarrow 0). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $B_{\text{тбгкн}}, H_{\text{тбгкн}}$  – значения индукции и напряженности магнитного поля безгистерезисной кривой намагничивания в точке ее пересечения со статической кривой намагничивания, являющейся совокупностью геометрических мест вершин основных начальных циклов гистерезиса;  $B_{\text{бгкн}1k_1}, H_{\text{бгкн}1k_1}$  – текущие значения индукции и напряженности магнитного поля в  $k_1$ -й точке безгистерезисной кривой намагничивания в первой (индекс “I”) координатной четверти (в первом

квадранте),  $k_1 = 1, 2, \dots, n_1$ ;  $B_{r_{\text{бгкн}}} \rightarrow 0$  – остаточная индукция безгистерезисной кривой намагничивания;  $H_{\text{сбгкн}} \rightarrow 0$  – коэрцитивная сила безгистерезисной кривой намагничивания.

После расчетно-аналитического построения всего семейства промежуточных циклов распределения (рис. 1) возможны электромагнитные расчеты всех составных эквивалентных электродвигателей в синхронном режиме с вычислением активных и реактивных составляющих и резуль-

**Таблица 2.** Основные электромагнитные параметры, требуемые для моделирования, расчета и теоретического исследования синхронного режима гистерезисного электродвигателя с конусным ротором

№	Наименование параметра	Обозначение параметра	Единица измерения
1	Активная составляющая МДС ротора	$F_{rak\text{ син}}$	А
2	Реактивная составляющая МДС ротора	$F_{r\mu k\text{ син}}$	А
3	Результирующий вектор МДС ротора	$F_{rk\text{ син}}$	А
4	Активная составляющая МДС намагничивающего контура	$F_{\delta ak\text{ син}}$	А
5	Реактивная составляющая МДС намагничивающего контура	$F_{\delta\mu k\text{ син}}$	А
6	Результирующий вектор МДС намагничивающего контура	$\vec{F}_{\delta k\text{ син}}$	А
7	Вектор ЭДС намагничивающего контура	$\vec{E}_{\delta k\text{ син}}$	В
8	Активная составляющая МДС обмотки статора	$F_{sak\text{ син}}$	А
9	Реактивная составляющая МДС обмотки статора	$F_{s\mu k\text{ син}}$	А
10	Результирующий вектор МДС обмотки статора	$\vec{F}_{sk\text{ син}}$	А
11	Активная составляющая тока в обмотке статора	$I_{sak\text{ син}}$	А
12	Реактивная составляющая тока в обмотке статора	$I_{s\mu k\text{ син}}$	А
13	Результирующий вектор тока в обмотке статора	$\vec{I}_{sk\text{ син}}$	А
14	Электрические углы между ЭДС намагничивающих контуров каждого из составных преобразователей и вектором результирующей МДС (тока) в обмотке статора преобразователя конусной конструкции	$\Phi_{s\delta FEk\text{ син}}$	Рад

тирующих величин основных электромагнитных параметров, приведенных в табл. 2. Это обеспечивает расчет синхронного режима гистерезисного электродвигателя энергии с конусным ротором. Таким образом, для моделирования и исследования синхронного режима такого электродвигателя необходимо решение двух принципиальных задач. Во-первых, построение всего семейства промежуточных циклов распределения для ротора электродвигателя. Во-вторых, адаптивное применение сеточного метода в осевом направлении с использованием статистического анализа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальные отличительные особенности методологии и алгоритма для расчета синхронного режима гистерезисного электромеханического преобразователя энергии конусной конструкции состоят в расчете процессов перемагничивания ротора преобразователя. Эти отличия связаны с тем, что во всех режимах работы преобразователя магнитное состояние ротора характеризуется промежуточными циклами распределения магнитного поля.

Для моделирования и исследования синхронного режима гистерезисного электромеханического преобразователя энергии целесообразен сеточный метод с сеткой в осевом направлении. На практике для выбора наилучшей сетки оптимальным является использование сочетание “сгущения” адаптивной сетки, инженерного анализа и статистических данных. Эффективность сеточного моделирования целесообразно проверять на основе статистической обработки расчетных данных и сравнительного анализа сеток различных размеров.

Разработанный подход к расчетно-теоретическим исследованиям и математическому моделированию гистерезисного электромеханического преобразователя энергии конусной конструкции обеспечивает учет выявленных особенностей и электромагнитный расчет синхронного режима его работы с учетом перемагничивания точек ротора по частным циклам гистерезиса.

Исследования 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 // IEEE Trans. Industr. Electron. 2016. V. 63. No. 3. P. 1684.
8. Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелева Г.А. // Электротехника. 2002. № 9. С. 5.
9. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.

## Features and approach to the calculation of the synchronous mode of a hysteretic electromechanical energy converter of a conical structure

V. B. Nikanorov<sup>a</sup>, S. Y. Ostanin<sup>b,\*</sup>, I. M. Milyaev<sup>c</sup>, N. S. Zubarev<sup>b</sup>, T. S. Latypov<sup>b</sup>,  
Cui Shumei<sup>d</sup>, Wei Guo<sup>d</sup>, Shaopeng Wu<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023 Russia

<sup>b</sup>National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia

<sup>c</sup>Institute of Metallurgy and Material Science, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

<sup>d</sup>Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001 China

\*e-mail: OstaninSY@mpei.ru

We study physical processes in the magnetic circuits of hysteresis electromechanical energy converters of a conical structure, including the magnetic circuits of their rotors. The issues of forming a methodology for the electromagnetic calculation of the synchronous mode of this type of energy converter are being developed. Proposals are being worked out on the application of the results obtained in the design.