

УДК 537.62:621.31

## ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ТОРЦЕВОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

© 2024 г. С. Ю. Останин<sup>1</sup>, \*, Н. И. Абдугалиев<sup>1</sup>, А. С. Лискин<sup>1</sup>,  
И. М. Миляев<sup>2</sup>, Цуй Шумэй<sup>3</sup>, Чжу Чунбо<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт металлургии и материаловедения  
имени А.А. Байкова», Москва, Россия

<sup>3</sup> Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

\* E-mail: OstaninSY@mpei.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Исследованы вопросы применения новых материалов для магнитных цепей статора и ротора гистерезисных электромеханических преобразователей энергии торцевого исполнения с целью повышения энергетических показателей преобразователей. Изучены магнитные и гистерезисные свойства новых материалов статора и ротора. Определены электромагнитные потери и их влияние на показатели преобразователей.

DOI: 10.31857/S0367676524110111, EDN: FKXYEG

### ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисные электромеханические преобразователи энергии торцевого исполнения (ГЭПТ) в двигательном режиме [1] успешно используются и имеют большие перспективы расширения областей применения в электроприводах технологических и производственных агрегатов, машин и линий в химической, текстильной, пищевой, биотехнологической и взаимосвязанных с ними отраслях промышленности [1–4]. Электропривод указанных отраслей промышленности, как правило, многодвигательный, состоящий из набора структур, в каждой из которых один, мощный электронный преобразователь частоты и (или) напряжения промышленной электрической сети обеспечивает электропитание большого количества одинаковых электродвигателей, каждый из которых приводит во вращение один рабочий механизм, реализуя режим электрического синхронного вала.

Совершенствование ГЭПТ, в том числе в плане повышения их коэффициента полезного действия (КПД), актуальная научная задача. В указанных структурах электропривода, содержащих большое количество электродвигателей, даже незначительное, на проценты и доли процентов, повышение

КПД обеспечивает значительное уменьшение потребляемой электрической энергии и за счет этого существенный экономический эффект.

Важным направлением совершенствования ГЭПТ является создание и применение новых материалов и сплавов для магнитопроводов статоров и дисков роторов [1–4]. В рамках исследований решались следующие задачи:

- анализ преимуществ, получаемых при замене традиционного материала магнитной цепи статора – стали 3431 аморфным материалом;
- увеличение гистерезисного вращающего момента путем модернизации обмотки статора в комплексе с применением новых материалов;
- анализ преимуществ, получаемых за счет применения для диска ротора ГЭПТ новых материалов, имеющих повышенные характеристики;
- выбор рабочего режима ГЭПТ, обеспечивающего наиболее высокие энергетические показатели и лучшее управление в составе электропривода;
- исследование состава и уровня электромагнитных потерь в ГЭПТ.

Для исследования применялись математическое моделирование физических процессов в ГЭПТ

и в их основных конструкционных элементах и расчетный анализ, проводимые в НИУ «МЭИ», в том числе для несимметричных режимов работы. Также в базовой организации выполнялось физическое моделирование при работе ГЭПТ во взаимодействии с технологическим механизмом в условиях конкретного производства.

Качество материалов и сплавов для диска ротора ГЭПТ определяется совокупностью их магнитных и гистерезисных характеристик [4–7]. К магнитным характеристикам относится, в первую очередь, зависимость уровней максимальной индукции семейства симметричных основных циклов перемагничивания диска ротора  $B_m$  от уровней максимальной напряженности семейства указанных циклов  $H_m : B_m (H_m)$ . Гистерезисные характеристики определяются совокупностью нелинейных зависимостей:

$$b_r(B_m) = B_r(B_m)/B_m; \quad (1)$$

$$h_c(B_m) = H_c(B_m)/H_m; \quad (2)$$

$$k_B(B_m) = S_{\text{цг}}/(4 \cdot B_m \cdot H_m) \approx b_r(B_m) \times h_c(B_m). \quad (3)$$

Здесь  $b_r$  – относительные,  $B_r$  – абсолютные значения остаточной индукции симметричных основных циклов перемагничивания диска ротора;  $h_c$  – относительные,  $H_c$  – абсолютные значения коэрцитивной силы указанных циклов перемагничивания;  $k_B$  – значения коэффициента выпуклости,  $S_{\text{цг}}$  – значения площади этих основных циклов перемагничивания.

Методы и средства для улучшения магнитных и гистерезисных свойств и характеристик магнитных материалов активно совершенствуются [7–11]. Диски роторов серийно выпускаемых классов ГЭПТ выполняются из стали 70С2ХА, имеющей химический состав в соответствии с ГОСТ 14959-79 в сортаменте холоднокатаная лента по ГОСТ 2283-79. Этот материал обладает высокой прочностью, приемлемыми уровнями и пологим характером зависимостей гистерезисных характеристик  $b_r$ ,  $h_c$ ,  $k_B$  от  $B_m$

в требуемом диапазоне изменения  $(0.50 \dots 1.10) B_{\text{мц}}$ , хорошо согласующимся с неравномерным распределением  $B_m$  и  $H_m$  по радиусу диска ротора ГЭПТ. Магнитные и гистерезисные свойства этого материала при его максимальной магнитной проницаемости  $\mu_m$  (индекс «м») приведены в табл. 1.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ТОРЦЕВОГО ИСПОЛНЕНИЯ С НОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ МАГНИТОПРОВОДА СТАТОРА И ДИСКА РОТОРА

Основные параметры и показатели ГЭПТ в двигательном режиме и используемые в исследовании и докладе их обозначения.

1. Текущий уровень линейного напряжения электропитания,  $U$ .
2. Повышенное напряжение на обмотке статора при управлении,  $U_1$ .
3. Пониженное напряжение на обмотке статора при управлении,  $U_2$ .
4. Усредненное интегральное значение индукции магнитного поля в зубцах магнитопровода статора преобразователя,  $B_Z$ .
5. Усредненное интегральное значение индукции магнитного поля в ярме магнитопровода статора преобразователя,  $B_Y$ .
6. Магнитные потери в зубцах магнитной цепи статора,  $\Delta P_{\text{маг.з.}}$ .
7. Магнитные потери в ярме магнитной цепи статора,  $\Delta P_{\text{маг.я.}}$ .
8. Сумма магнитных потерь в ярме и зубцах магнитной цепи статора:

$$\Delta P_{\text{маг.я.з.}} = \Delta P_{\text{маг.я.}} + \Delta P_{\text{маг.з.}} B_Z. \quad (4)$$

В НИУ «МЭИ» с применением математического моделирования и комплексных расчетов нелинейных электромагнитных и электромеханических

**Таблица 1.** Магнитные и гистерезисные свойства серийно используемого материала – стали 70С2ХА – при его максимальной магнитной проницаемости

№	Параметр, характеризующий свойства	Единица измерения	Значение
1	Индукция $B_{\text{мц}}$	Тл	1.050
2	Относительная коэрцитивная сила $h_{\text{цм}}$ , не менее	Отн. ед.	0.818
3	Относительная остаточная индукция $b_{\text{тц}}$	Отн. ед.	0.855
4	Коэффициент выпуклости $k_{\text{вм}}$	Отн. ед.	0.700
5	Сортамент поставки материала	—	холоднокатаная лента – С по ГОСТ 2283-79

процессов проведено оптимальное проектирование и исследование ГЭПТ, в том числе в несимметричных режимах, его качество подтверждено физическим моделированием с натурным макетированием в базовой организации.

Для оптимального проведения анализа и обобщения результатов исследования все численные данные в докладе и во всех таблицах представлены в виде отношений фактических значений напряжения  $U$  и частоты  $f$  к их номинальным значениям  $U_H$  и  $f_H$ ; в виде отношений фактических значений индукции магнитного поля к  $B_m$ ; в виде отношения магнитных потерь  $\Delta P_{\text{маг}} = \Delta P_{\text{маг.з.я}} + \Delta P_{\text{доб}}$ , в зубцах и ярме  $\Delta P_{\text{маг.з.я}} = \Delta P_{\text{маг.з}} + \Delta P_{\text{маг.я}}$  к активной потребляемой мощности ГЭПТ  $P_1$ . Результаты расчетного и экспериментального исследования

ГЭПТ с учетом нелинейных физических процессов и несимметричных режимов даны в табл. 2.

Физическое моделирование с натурным макетированием в базовой организации показали, что значения магнитных потерь, полученные расчетным и экспериментальным путем, при замене магнитопровода статора из стали 3431 на магнитопровод из аморфного материала практически совпали. Такая замена обеспечивает увеличение КПД ГЭПТ на 2–3%, что является важным способом увеличения КПД систем многодвигательного электропривода и соответствует перспективным тенденциям современного электромашиностроения с учетом уменьшения стоимости аморфных материалов и преодоления проблем их технологической обработки [4–7]. Установлено, что возможно дальнейшее

**Таблица 2.** Расчетные данные для вариантов ГЭПТ с диском ротора номинальной толщины  $\Delta_{\text{рн}}$  с номинальным наружным диаметром  $D_{\text{рнн}}$

Параметр	Единица измерения	Базовый вариант ГЭПТ		Новый вариант ГЭПТ № 1		Новый вариант ГЭПТ № 2	
		Ст. 3431	ГМ-14ДС	Ст. 3431	ГМ-14ДС	Ст. 3431	ГМ-14ДС
$U$	Отн. ед.	$U = U_H$ (синхронный режим без управления), $f = 0.912 \cdot f_H$					
$B_Z$	Отн. ед.	0.076	0.103	—	—	0.084	0.114
$B_{\text{я}}$	Отн. ед.	0.161	0.235	—	—	0.178	0.260
$\Delta P_{\text{маг.з}}$	Отн. ед.	0.006857	0.000686	—	—	0.008571	0.000829
$\Delta P_{\text{маг.я}}$	Отн. ед.	0.046286	0.004743	—	—	0.057143	0.005629
$\Delta P_{\text{маг.з.я}}$	Отн. ед.	0.053143	0.005429	—	—	0.065714	0.006457
$U_1/U_2$	Отн. ед.	1.000/0.737 (синхронный режим с управлением), $f = 0.912 \cdot f_H$					
$B_Z$	Отн. ед.	0.061	0.083	—	—	0.067	0.098
$B_{\text{я}}$	Отн. ед.	0.128	0.187	—	—	0.141	0.206
$\Delta P_{\text{маг.з}}$	Отн. ед.	0.004571	0.000486	—	—	0.005429	0.000629
$\Delta P_{\text{маг.я}}$	Отн. ед.	0.029429	0.003229	—	—	0.035714	0.003800
$\Delta P_{\text{маг.з.я}}$	Отн. ед.	0.034000	0.005429	—	—	0.041143	0.004429
$U$	Отн. ед.	$U = U_H$ (синхронный режим без управления), $f = f_H$					
$B_Z$	Отн. ед.	0.069	0.093	0.080	0.108	0.076	0.098
$B_{\text{я}}$	Отн. ед.	0.145	0.212	0.169	0.247	0.160	0.234
$\Delta P_{\text{маг.з}}$	Отн. ед.	0.006286	0.000657	0.008571	0.000857	0.007714	0.000771
$\Delta P_{\text{маг.я}}$	Отн. ед.	0.042857	0.004514	0.058286	0.005857	0.052286	0.005343
$\Delta P_{\text{маг.з.я}}$	Отн. ед.	0.049143	0.005171	0.066857	0.006714	0.060000	0.006114
$U_1/U_2$	Отн. ед.	1.000/0.737 (синхронный режим с управлением), $f = f_H$					
$B_Z$	Отн. ед.	0.055	0.074	0.064	0.087	0.061	0.083
$B_{\text{я}}$	Отн. ед.	0.155	0.168	0.135	0.197	0.128	0.187
$\Delta P_{\text{маг.з}}$	Отн. ед.	0.004000	0.000457	0.005429	0.000571	0.005143	0.000543
$\Delta P_{\text{маг.я}}$	Отн. ед.	0.027143	0.003057	0.037143	0.004000	0.033429	0.003657
$\Delta P_{\text{маг.з.я}}$	Отн. ед.	0.031143	0.003514	0.042571	0.004571	0.038571	0.004200

повышение КПД ГЭПТ на основе уменьшения дополнительных потерь.

Были выполнены оптимизационные расчеты спроектированных новых вариантов ГЭПТ с анализом увеличения КПД за счет изменения магнитной твердости  $H_{\text{мц}}$  материала ротора при обеспечении гистерезисных характеристик ( $b_r$ ,  $h_c$ ,  $k_B$ ) на уровне не ниже чем у материала 70C2XA. Расчетные исследования установили, что наилучшее значение  $H_{\text{мц}}$  на 44% больше, чем значение при  $B_{\text{мц}} = 1.05$  Тл. В совокупности с оптимизацией обмотки статора и величины рабочего зазора это обеспечивает улучшение показателей ГЭПТ с диском ротора, выполняемым из новых материалов, по сравнению с вариантом ГЭПТ с диском ротора из традиционных материалов:

1. Повышение КПД в режиме без управления ГЭПТ на 1.6 (3.7)%, в режиме с управлением ГЭПТ в составе электропривода – на 4.3 (4.9)%, повышение мощности опрокидывания  $W_{\text{опр}}$  в этих режимах – на 5.6 (2.4) и на 26.0 (21.8)% для диска ротора из нового материала. Здесь и далее численные значения без скобок для варианта ГЭПТ с традиционными параметрами паза, активных и лобовых частей обмотки статора, а значения в скобках – для варианта с новыми параметрами паза, активных и лобовых частей обмотки.

2. Путем уменьшения потокоцепления на 2.7% можно еще уменьшить дополнительные потери на 6–9% и соответственно повысить КПД.

3. Посредством увеличения  $H_{\text{мц}}$  на 18.5% можно обеспечить добавочное повышение мощности опрокидывания  $W_{\text{опр}}$ : в режиме без управления ГЭПТ – на 8.3 (8.8)%, в режиме с управлением ГЭПТ – на 14.1 (13.0)%, но с увеличением КПД только на 0.8 (3.1) и 3.3 (3.6)%.

Проведенные исследования и математическое моделирование физических процессов в ГЭПТ позволили сформировать требования к материалу дисков роторов, обеспечивающему наилучшие показатели ГЭПТ. Физико-механические свойства, требуемые для материала дисков роторов:

1. Предел прочности на разрыв, не менее, 1800 (2100) МПа.
2. Предел текучести, не менее, 1600 (1800) МПа.
3. Относительное удлинение, не менее, 5%.
4. Твердость по методу Бринелля, МПа, уточнение.
5. Коэффициент линейного расширения,  $\cong 1.2 \cdot 10^{-6}$ .
6. Электрическое сопротивление, Ом, максимально высокое.

Магнитные и гистерезисные свойства, требуемые для материала дисков роторов, обеспечивающего наилучшие показатели ГЭПТ, даны в табл. 3.

**Таблица 3.** Магнитные и гистерезисные свойства, требуемые для материала дисков роторов

№	Параметр, характеризующий свойства	Единица измерения	Значение
1	Индукция насыщения $B_s$ , не менее	Тл	1.4
2	Индукция $B_{\text{мц}}$	Тл	0.95...1.10
3	Относительная коэрцитивная сила $h_{\text{см}}$ , не менее	Отн. ед.	0.82
4	Относительная остаточная индукция $b_{\text{п}}$	Отн. ед.	0.86...0.90
5	Коэффициент выпуклости $k_{\text{вм}}$	Отн. ед.	0.70...0.80
6	Характер зависимостей $h_c$ , $b_r$ , $k_B$ от индукции $B_{\text{мц}}$	—	как у стали 70C2XA
7	Чувствительность зависимостей $h_c$ , $b_r$ , $k_B$ от индукции $B_{\text{мц}}$ к механической обработке резанием	—	не чувствительны
8	Чувствительность зависимостей $h_c$ , $b_r$ , $k_B$ от индукции $B_{\text{мц}}$ к механической обработке шлифованием	—	не чувствительны
9	Коэффициент магнитострикции	Отн. ед.	отрицательный, значение уточняется в процессе разработки материала
10	Необходимое время сохранения свойств, не менее	Год	10
11	Температура, при которой должны сохраняться свойства, $t$	°С	–40 – +130
12	Сортамент поставки материала	—	холоднокатаная лента – С по ГОСТ 2283-79



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что выполнение магнитопровода статора из аморфного материала важный способ увеличения КПД ГЭПТ с учетом несимметричных режимов, наряду со снижением дополнительных потерь.

Исследования материала диска ротора показали следующее:

1. Материал ЧС-35 применять неэффективно, так как его магнитные и гистерезисные характеристики не соответствуют перспективным требованиям. Характеристики отечественных сверхпрочных материалов на базе мартенситно-старееющих сталей соответствуют требованиям частично.

2. Возможно повышение магнитных и гистерезисных свойств и характеристик новых материалов и сплавов дисков роторов ГЭПТ.

3. Выполнение дисков роторов ГЭПТ из новых материалов позволяет повысить их механическую прочность и гистерезисные характеристики.

Таким образом, математическое моделирование и расчеты обеспечили определение с высокой точностью магнитных и гистерезисных характеристик материала диска ротора ГЭПТ, обеспечивающего наиболее высокие энергетические показатели и лучшее управление ГЭПТ с учетом несимметричных режимов в электроприводе и формирование совокупности требований к оптимальному материалу. Расчетным путем с высокой точностью проведено исследование состава и уровня электромагнитных потерь в ГЭПТ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-29-00763.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иарасов В.Н., Останин С.Ю.* // В кн.: Доклады IX Междунар. выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.). С. 127.
2. *Мартынов И.А., Прошков А.Ф., Яскин А.П. и др.* Машины и агрегаты текстильной и легкой промышленности. Т. IV. М.: Машиностроение, 1997.
3. *Шнайдер А.Г., Пчелин И.К.* Динамика мотор-подшипников. М.: Наука, 2007. 276 с.
4. *Миляев И.М., Юсупов В.С., Стельмашок С.И., Миляев А.И.* // Приборы. 2016. № 7. С. 346.
5. *Ильин Н.В., Комогорцев В.С., Крайнова Г.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1234; *I'in N.V., Krainova G.S., Ivanov V.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 9. P. 945.
6. *Чулкина А.А., Ульянов А.Л., Ульянов А.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 9. С. 1325; *Chulkina A.A., Ulyanov A.L., Ulyanov A.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 9. P. 1131.
7. *Шевцов В.С., Кулезнев Н.Е., Поляков П.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 201; *Shevtsov V.S., Kuleznev N.E., Polyakov P.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 160.
8. *Поляков О.П., Акимов М.Л., Поляков П.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 207; *Polyakov O.P., Akimov M.L., Polyakov P.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 166.
9. *Николадзе Г.М., Матюнин А.В., Поляков П.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1559; *Nikoladze G.M., Matyunin A.V., Polyakov P.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1222.
10. *Семенов В.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 706; *Semenov V.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 592.
11. *Абрамовский И.Е., Власов В.С., Плешев Д.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 721; *Abramovski I.E., Vlasov V.S., Pleshev D.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 606.

## Application of new materials for nonlinear magnetic systems of in hysteretic electromechanical energy converters of the end face design for improve energy indicators

S. Y. Ostanin<sup>1</sup> \*, N. I. Abdugaliyev<sup>1</sup>, A. S. Liskin<sup>1</sup>, I. M. Milyaev<sup>2</sup>, Cui Shumei<sup>3</sup>, Zhu Chunbo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Research University «MPEI», Moscow, 111250, Russia

<sup>2</sup> Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia

<sup>3</sup> Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China

\* e-mail: OstaninSY@mpei.ru

We studied the application of new materials for the magnetic circuits of the stator and rotor of hysteretic electromechanical energy converters of the end face design to increase the energy performances of the converters. Magnetic and hysteresis properties of new stator and rotor materials are investigated. Electromagnetic losses and their effect on the indicators of converters are being investigated.