

УДК 537.62:621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ТОРЦЕВОГО ИСПОЛНЕНИЯ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ

© 2024 г. С. Ю. Останин¹, *, Н. И. Абдугалиев¹, И. А. Федоров¹,
Цуй Шумэй², Чжу Чунбо²

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

² 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

Изучены нелинейные физические процессы в гистерезисных электромеханических преобразователях энергии торцевого исполнения и несимметричных режимов их работы, особенности их математического моделирования и расчетов. Проводятся исследования различных видов потерь мощности в преобразователях. Прорабатываются предложения по применению полученных результатов на практике.

DOI: 10.31857/S0367676524110103, EDN: FLMUBW

ВВЕДЕНИЕ

Исследования и моделирование нелинейных электромагнитных и электромеханических процессов в электромеханических преобразователях энергии и несимметричных режимов их работы являются важными направлениями фундаментальных исследований, поскольку несимметричные режимы являются наиболее общим случаем работы преобразователей, в частности в составе электропривода, так как в любой электрической системе имеется тот или иной вид несимметрии [1–3]. Наиболее сильно нелинейность физических процессов и несимметричные режимы проявляются в гистерезисных электромеханических преобразователях энергии (ГЭП) [1, 2], в том числе в преобразователях этого типа торцевого исполнения (ГЭПТ) [2].

Указанные преобразователи имеют широкие перспективы практического применения в новых областях, в частности, в электроприводах машин и агрегатов химической, текстильной, пищевой, медицинской, биотехнологической и смежных с ними отраслей [1–3]. Объективно эти перспективы связаны с тем, что для оптимальной работы машин и механизмов в указанных отраслях необходим режим электрического синхронного вала.

С позиций реализации этого режима ГЭП, в том числе ГЭПТ, превосходит другие электромеханические преобразователи энергии: индукционные

(асинхронные), магнитоэлектрические, синхронные реактивные [1, 2], но торцевое исполнение характеризуется трехмерным пространственным распределением магнитного поля и, наряду с преобразователями конусного исполнения, ГЭПТ наиболее сложны для исследования и проектирования.

Задача работы состояла в совершенствовании ГЭПТ с учетом несимметричных режимов для работы в электроприводах широкого класса механизмов и агрегатов на основе исследования физических процессов в ГЭПТ в следующих направлениях:

1. Исследование состава и минимизация потерь в ГЭПТ.
2. Анализ и выявление возможностей оптимизации ГЭПТ.
3. Анализ возможностей конструкционных изменений ГЭПТ на основе исследования нелинейных физических процессов в них.
4. Изменения конструкции технологического механизма.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ТОРЦЕВОГО ИСПОЛНЕНИЯ

При исследовании потерь мощности в ГЭПТ с целью их минимизации был проведен анализ структуры и составляющих потерь с учетом нелинейности магнитных процессов [4–7] и несимметрии режимов работы. В соответствии с принятой традиционной методологией определения потерь находились механические потери и электрические потери, а оставшиеся потери условно относились к магнитным потерям. Исследованиями было установлено, что потери мощности, условно классифицируемые как магнитные потери, содержат не только сами магнитные потери, но и еще три следующие составляющие:

1. Добавочные потери в роторе преобразователя от высших гармоник магнитного поля, создаваемого обмоткой статора преобразователя.

2. Дополнительные потери в роторе, обусловленные модуляцией величины рабочего воздушного зазора и перемещениями ротора в радиальном направлении относительно статора при вращении ротора в составе механизма.

3. Дополнительные потери, связанные с конструкцией механизма.

Для исследования дополнительных потерь мощности и решения проблем, обусловленных возникновением этих потерь, применялись математические и экспериментальные методы и средства [8–10]. При проведении исследований были разработаны и продуктивно использованы:

- методология определения потерь в магнитной цепи статора ГЭПТ, как при размещении статора в корпусе, так и расположении его вне корпуса;
- стенд для проведения экспериментальных исследований;
- методология определения электромагнитных потерь в корпусе, обусловленных магнитными полями рассеяния; с помощью методики проведены детальные исследования этой составляющей потерь.

При проведении исследований в НИУ «МЭИ» выполнялось математическое моделирование и расчетно-теоретические исследования, направленные на повышение показателей ГЭПТ, анализ и обобщение экспериментальных данных, полученных на предприятиях в реальных производственных условиях. Расчеты и эксперименты позволили исследовать:

- возможности повышения гистерезисного электромагнитного момента ГЭПТ, в частности, посредством параметрической оптимизации;
- наилучшие с позиций энергосбережения режимы, в том числе несимметричные режимы, работы ГЭПТ при управлении им в электроприводе;

- причины появления и значения всех типов дополнительных потерь.

В работе исследовались следующие основные параметры и показатели:

1. Величина воздушного зазора, δ .
 2. Высота активной части ротора, Δ .
 3. Наружный диаметр активной части ротора, $D_{\text{РН}}$.
 4. Внутренний диаметр активной части ротора, $D_{\text{РВ}}$.
 5. Напряжение электропитания преобразователя, U .
 6. Ток в фазе обмотки статора преобразователя, I_{Φ} .
 7. Магнитодвижущая сила, МДС.
 8. Гистерезисный электромагнитный момент, $M_{\text{ЭГ}}$.
 9. Момент сопротивления, создаваемый механизмом, M_{C} .
 10. Электрические потери, $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$.
 11. Магнитные потери в ярме магнитной цепи статора, $\Delta P_{\text{Я}}$.
 12. Магнитные потери в зубцах магнитной цепи статора, ΔP_{Z} .
 13. Сумма магнитных потерь в статоре, $\Delta P_{\text{Я, Z}} = \Delta P_{\text{Я}} + \Delta P_{\text{Z}}$.
 14. Добавочные потери в роторе преобразователя, $\Delta P_{\text{ДОБ}}$.
 15. Сумма магнитных потерь, $\Delta P_{\text{МАГ}} = \Delta P_{\text{Я, Z}} + \Delta P_{\text{ДОБ}}$.
 16. Дополнительные потери, вызываемые механизмом, $\Delta P_{\text{доп}}$.
 17. Сумма добавочных и дополнительных потерь, $\Delta P_{\text{д}}$.
 18. Механические потери, $\Delta P_{\text{МЕХ}}$.
 19. Коэффициент полезного действия, КПД.
- В НИУ «МЭИ» было проведено математическое моделирование и расчетно-теоретическое исследование ГЭПТ, результаты которых приведены в табл. 1, анализ и обобщение экспериментальных данных, полученных на предприятиях в реальных производственных условиях для базовых вариантов ГЭПТ. Эти варианты обладают следующими конструкционными особенностями: новые варианты обмотки статора при серийном магнитопроводе статора, активная часть ротора из стали 70С2ХА с $D_{\text{РВ}} = D_{\text{РВН}}$.
- С целью облегчения проведения анализа и обобщения результатов исследования во всех таблицах даны относительные значения. Эти значения получены как отношения реальных значений параметров и показателей к номинальным значениям (индекс «Н») этих параметров и показателей: $\delta_{\text{Н}}$, $\Delta_{\text{Н}}$, $D_{\text{РН}}$, $D_{\text{РВН}}$, $U_{\text{Н}}$, $I_{\Phi\text{Н}}$, $M_{\text{ЭГН}}$, $M_{\text{CН}}$. Также во всех таблицах даны относительные значения составляющих потерь при использовании в качестве базовой величины активной потребляемой мощности преобразователя P_1 . Это электрические потери, магнитные

Таблица 1. Результаты расчета и испытаний базового варианта ГЭПТ при $U = 0.947 \cdot U_{\text{Н}}$ и частоте тока электропитания электродвигателя $f = f_{\text{Н}}$

Параметр, показатель	Единица измерения	Ротор номинальн. толщины $\Delta_{\text{РН}}$				Ротор толщиной $\Delta_{\text{Р}} = 0.875 \cdot \Delta_{\text{РН}}$								
		профилированный		плоский		плоский				с $D_{\text{РН}} = D_{\text{РНН}}$		с $D_{\text{РН}} = D_{\text{РНН}}$		
		с $D_{\text{РН}} = D_{\text{РНН}}$		с $D_{\text{РН}} = 0.956 \cdot D_{\text{РНН}}$										
		Расчет		Опыт		Расчет		$\delta = 0.968 \cdot \delta_{\text{Н}}$		$\delta = 1.080 \cdot \delta_{\text{Н}}$		$\delta = 1.108 \cdot \delta_{\text{Н}}$		Опыт*
Режим	—	Пуск	Синх.	Синх.	Пуск	Синх.	Пуск	Синх.	Пуск	Синх.	Пуск	Синх.	Синх.	
I_{Φ}	Отн. ед.	0.913	0.835	0.757	0.991	0.891	0.917	0.826	0.865	0.770	0.970	0.887	0.774	
КПД	Отн. ед.	0.785	0.765	0.720	0.755	0.709	0.803	0.774	0.824	0.792	0.781	0.756	0.60**	
$\text{Cos}\phi$	Отн. ед.	0.252	0.221	0.258	0.232	0.185	0.275	0.229	0.300	0.241	0.255	0.219	0.235	
$M_{\text{ЭГ}}$	Отн. ед.	0.747	0.716	0.739	0.717	0.687	0.840	0.807	0.885	0.845	0.801	0.774	0.794	
M_{C}	Отн. ед.	—	0.582	0.582	—	0.485	—	0.606	—	0.606	—	0.606	0.552	
P_1	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
$\Delta P_{\text{МЕХ}}$	%	78.5	76.5	72.3	75.5	70.9	80.2	77.3	82.4	79.3	78.1	75.5	60.8**	
$\Delta P_{\text{ЭЛ}}$	%	17.0	17.8	20.9	20.1	22.6	15.7	17.0	13.5	14.9	17.9	19.0	12.5**	
$\Delta P_{\text{МАГ}}$	%	4.5	5.7	6.8	4.4	6.5	4.1	5.7	4.1	5.8	4.0	5.5	26.7**	
$\Delta P_{Z,\text{я}}$	%	4.5	5.7	—	4.4	6.5	4.1	5.7	4.1	5.8	4.0	5.5	—	
$\Delta P_{\text{ДОБ}}$	%	<0.05	<0.05	—	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	

потери в ярме, зубцах, их сумма, добавочные потери, суммарные магнитные потери в преобразователе, дополнительные потери, сумма добавочных и дополнительных потерь, механические потери.

Знаком «*» в табл. 1 обозначены средние значения экспериментальных данных для опытной партии ГЭПТ (20 единиц), изготовленной по результатам математического моделирования и проектных расчетов электродвигателя. Знаком «**» в табл. 1 отмечено то обстоятельство, что отличия по КПД и относительным уровням разных типов потерь по

отношению к потребляемой мощности объясняется более строгим расчетом магнитных потерь в статоре: если применять традиционные методики, в которых остаточные потери $\Delta P = P_1 - \Delta P_{\text{МЕХ}} - \Delta P_{\text{ЭЛ}}$ относятся к магнитным потерям, то расчетные значения КПД и уровней составляющих потерь отличаются от экспериментальных значений на 3–5%, но это скрывает реальное распределение потерь в ГЭПТ.

Проведено оптимальное проектирование нового типа ГЭПТ, по результатам которого был изготовлен и испытан в ведущей организации макет

Таблица 2. Результаты расчета и испытаний спроектированного нового типа ГЭПТ

Параметр, показатель	U	I_{Φ}	КПД	$\text{Cos}\phi$	M_{mc}	M_{c}	P_1	$\Delta P_{\text{ЭЛ}}$	$\Delta P_{\text{маг}}$	$\Delta P_{\text{мех}}$
Единица измерения	Отн. ед.	Отн. ед.	Отн. ед.	Отн. ед.	Отн. ед.	Отн. ед.	%	%	%	%
Режим	Синхронный режим без перевозбуждения									
Расчет	1.000	0.939	0.595	0.271	0.877	0.661	100	14.4	26.1	59.5
Эксперимент	1.003	0.926	0.602	0.274	0.867	0.677	100	14.0	25.8	60.2
Режим	Синхронный режим с перевозбуждением									
Расчет	0.741	0.580	0.762	0.452	0.837	0.661	100	6.9	16.9	76.2
Эксперимент	0.741	0.543	0.784	0.486	0.852	0.677	100	6.3	15.3	78.4

Таблица 3. Показатели нового типа ГЭПТ при разных размерах воздушного зазора при $f = f_H$

Параметр, показатель	Единица измерения	Значения в относительных единицах (отн. ед.) и %					
		$\delta = 0.980 \cdot \delta_H$		$\delta = 0.840 \cdot \delta_H$		$\delta = 1.116 \cdot \delta_H$	
Режим	—	Синхрон.	Перевозб.	Синхрон.	Перевозб.	Синхрон.	Перевозб.
U	Отн. ед.	0.947	1.079/0.737	0.947	1.079/0.737	0.947	1.079/0.737
I_Φ	Отн. ед.	1.130	0.674	1.039	0.578	1.209	0.761
M_{MC}	Отн. ед.	0.828	1.023	0.861	1.065	0.799	0.982
M_C	Отн. ед.	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664	0.664
КПД	Отн. ед.	0.591	0.762	0.602	0.774	0.580	0.751
Cosф	Отн. ед.	0.241	0.401	0.256	0.460	0.229	0.362
P_1	%	100	100	100	100	100	100
$\Delta P_{MEХ}$	%	59.0	76.2	60.2	77.4	57.9	75.1
$\Delta P_{ЭЛ}$	%	13.8	6.4	11.9	4.8	15.5	7.9
$\Delta P_{МАГ:}$	%	27.2	17.4	27.9	17.8	26.6	17.0
$\Delta P_{Z,я}$	%	7.2	6.5	7.4	6.7	6.9	6.2
ΔP_Z	%	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	0.9
$\Delta P_Я$	%	6.1	5.5	6.3	5.7	5.9	5.3
$\Delta P_{доп}$	%	20.0	10.9	20.5	11.1	19.7	10.8

ГЭПТ с магнитопроводом статора из стали 3431; новой обмоткой; ротором из стали 70С2ХА с D_{PVH} , $\Delta_p = 1.25 \cdot \Delta_{PH}$. Результаты его расчетов и испытаний даны в табл. 2, показатели при различных размерах воздушного зазора – в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что в новом спроектированном и исследованном базовом варианте ГЭПТ электрические потери в режиме без управления 13.8%, в режиме с управлением – 6.4%. Было установлено, что электрические потери можно уменьшить путем снижения активного сопротивления обмотки статора. В базовом варианте ГЭПТ повышение диаметра обмоточного провода на 12.5% уменьшает это сопротивление на 21% и повышает объем проводов в пазах и лобовых частях на 21.7%.

Для выполнения обмотки статора проводом с большим диаметром важны конструкторско-технологические решения: снижение высоты клиновой зоны и увеличение ширины паза. Повышение толщины внутренней лобовой части обмотки статора, вылета ее наружной лобовой части и степени обжатия лобовых частей обеспечивает оптимальное выполнение лобовых частей.

Электрические потери могут быть также уменьшены путем снижения тока в обмотке статора. Математическое моделирование и расчеты ГЭПТ показали, что основная составляющая МДС – МДС

рабочего зазора, в связи с чем для уменьшения этого тока надо, в первую очередь, уменьшить МДС рабочего зазора. Ток в обмотке статора можно дополнительно снизить путем снижения пульсаций индукции магнитного поля в рабочем зазоре посредством размещения в клиновой зоне пазов статора магнитных клиньев.

В новом спроектированном и исследованном базовом варианте ГЭПТ магнитные потери составляют в режиме без управления 41.0%, в режиме с управлением – 23.8% от активной потребляемой мощности. Дополнительные потери образуют в нем основную часть магнитных потерь: в режиме без управления 20.0%, в режиме с управлением – 10.9%. В зубцах и ярме статора базового варианта ГЭПТ магнитные потери в режиме без управления 7.2%, в режиме с управлением 6.5%, а их основная доля – потери в ярме.

Таким образом, по каждому из направлений исследования ГЭПТ с учетом нелинейности физических процессов в них и несимметричных режимов работы (исследование состава и минимизация потерь в ГЭПТ, анализ и выявление возможностей оптимизации ГЭПТ, исследование возможностей конструкционных изменений ГЭПТ, изменения конструкции технологического механизма) разработаны научно-технические предложения. Предложения по первому и второму направлениям уже реализуются в базовых организациях. Предложения по третьему и четвертому направлениям взаимо-

связаны с электродвигателем и механизмом и требуют существенной модернизации системы электропитания, электропривода и технологического механизма, поэтому их осуществление планируется в ходе дальнейших исследований.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
2. Тарасов В.Н., Останин С.Ю. // В кн.: Доклады IX Международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2004 г.) С. 127.
3. Руковицын И.Г., Сарычев А.П. // Компрессор. техн. и пневматика. 2008. № 1. С. 12.
4. Ковалевская Т.А., Данейко О.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 1002; Kovalevskaya T.A., Daneyko O.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 7. P. 776.
5. Хрипливец И.А., Глезер А.М., Сундеев Р.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 1008; Khrilivets I.A., Glezer A.M., Pogozhev Y.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 7. P. 782.
6. Филиппова В.П., Блинова Е.Н., Жуков О.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 7. С. 1053; Filippova V.P., Blinova E.N., Zhukov O.P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 7. P. 818.
7. Герус С.В., Локк Э.Г., Анненков А.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1538; Gerus S.V., Lock E.H., Annenkov A.Y. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1201.
8. Пятаков М.А., Акимов М.Л., Поляков П.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1568; Piatak M.A., Akimov M.L., Polyakov P.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1230.
9. Алексина Ю.А., Перов Н.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 170; Alekhina Y.A., Perov N.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 120.
10. Пашиева И.М., Бондарев А.В., Батаронов И.Л. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 682; Pashueva I.M., Bataronov I.L., Bondarev A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 569.

Investigation of nonlinear processes in hysteretic electromechanical energy converters of the end face design and of no symmetric modes of their operation

S. Y. Ostanin¹, *, N. I. Abdugaliyev¹, I. A. Fyodorov¹, Cui Shumei², Zhu Chunbo²

¹ National Research University «MPEI», Moscow, 111250, Russia

² Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China

* e-mail: OstaninSY@mpei.ru

We studied the issues of nonlinear physical processes in hysteretic electromechanical energy converters of the end face design and of no symmetric modes of their operation, the features of their mathematical modelling and calculations. Various types of power losses in converters are being investigated. Proposals are being worked out on the application of the results obtained in practice.