

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Разработан стенд и предложена методика идентификации опытной партии высококоэрцитивных постоянных магнитов (ВкПМ), изготовленных из одной и той же марки сплава неодим-железо-бор (NdFeB). Испытуемые образцы из опытной партии ВкПМ имеют форму диска, прямоугольной призмы и аксиальное направление намагничивания. Критерием идентификации ВкПМ в каждой опытной партии является их одинаковая объемная намагниченность, которая учитывается среднеквадратичным отклонением построенных экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы взаимодействия каждого испытуемого образца постоянного магнита из опытной партии с магнитным отражателем при изменении расстояния между ними. В качестве магнитного отражателя используется более мощный постоянный магнит, имеющий форму диска и высоту, превышающую высоту испытуемого образца постоянного магнита. Пренебрежение процедурой идентификации ВкПМ из опытной партии ведет к нарушению работы электромагнитных систем с их участием. Так, например, при разработке индукторов синхронных электрических машин на основе постоянных магнитов наблюдаются биения вала, повышенные вибрации рабочих органов, увеличение радиальной и осевой нагрузки на подшипники, сокращается срок службы и происходит отказ работы электрических машин в период эксплуатации.

**Ключевые слова:** высококоэрцитивные постоянные магниты, сплав неодим-железо-бор, опытный образец в форме диска и прямоугольной призмы, экспериментальный стенд, электромагнитная сила.

В настоящее время высококоэрцитивные постоянные магниты используются для решения многих научно-практических задач электротехники, электромеханики и электротехнологии [1]. Примерами такого утверждения являются современные разработки по созданию специальных электромеханических преобразователей энергии в авиационной технике, низкооборотных синхронных генераторов в малой энергетике, магнитных подшипников в силовых энергетических установках, устройств магнитной левитации в транспортном машиностроении, в устройствах медицинской техники [2–5]. При разработке подобных систем наибольшую известность получили ВкПМ, изготавливаемые на основе сплава неодим-железо-бор (Nd-Fe-B). При их применении значительно повышаются удельные энергетические показатели работы электротехнических устройств, сокращается масса используемых активных материалов, уменьшаются габарит-

ные размеры, исключаются электрические потери на возбуждение рабочего магнитного потока. Достоинство постоянных магнитов заключается также в том, что в обычных условиях они практически не размагничиваются и сохраняют свои магнитные свойства длительное время. Однако при изготовлении электротехнических систем с постоянными магнитами возникает необходимость проведения процедуры идентификации постоянных магнитов. Традиционно эта процедура проводится перед установкой испытываемых образцов постоянных магнитов, имеющих одинаковую геометрию и форму, изготовленных из одной и той же марки сплава, в рабочий узел электротехнического устройства [6–8]. Традиционный метод идентификации с одновременной отбраковкой постоянных магнитов в опытной партии сводится к измерению магнитной индукции на поверхности полюса постоянного магнита и при удалении от него на разные расстоя-

ния датчиком Холла, входящего в комплект поставки миллесламетра, например, исполнения ТПУ. При этом используемая процедура идентификации ВкПМ и постоянных магнитов, изготовленных из других сплавов, имеет ряд существенных недостатков, обусловленных локальностью результатов измерений магнитной индукции в отдельных точках на поверхности полюса постоянного магнита и за его пределами. Известно, что магнитное поле постоянного магнита не является однородным, при этом на результаты измерений магнитной индукции на поверхности полюса постоянных магнитов разных конфигураций и размеров могут оказывать существенное влияние геометрические размеры самого датчика Холла. Исключение процедуры идентификации постоянных магнитов перед их установкой в узел того или иного электротехнического устройства сопровождается негативными последствиями. Например, при создании индуктора синхронной электрической машины с использованием ВкПМ, как указывалось ранее, наблюдается биение вала, повышенная вибрация подвижных частей, отклонение от заданных техническими условиями энергетических показателей работы изделия.

В данной работе предложена методика идентификации опытных образцов ВкПМ и постоянных магнитов, изготовленных из других сплавов, основанная на удовлетворении их критерию одинаковой объемной намагниченности, которая учитывается среднеквадратичным отклонением экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими опытными образцами постоянных магнитов (для каждого в отдельности) с магнитным отражателем.

Объектами проводимого исследования являлись две группы ВкПМ, изготовленные из сплава неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) марки N38 со следующими параметрами [9], а именно остаточной индукцией 1,2 Тл, коэрцитивной силой 955 кА/м, магнитной энергией 300 кДж/м.

В первой группе представлены девять опытных образцов постоянных магнитов, имеющих форму

диска диаметром 30 мм и высоту 10 мм. Вторую группу представляют четырнадцать опытных образцов постоянных магнитов, имеющих форму прямоугольной призмы (куба) со сторонами 20 мм. В обеих группах используется аксиальное направление намагничивания опытных образцов. Разное число опытных образцов постоянных магнитов в группах обусловлено исследованием влияния формы постоянного магнита (диск, прямоугольная призма) на результаты идентификации их по критерию объемной намагниченности.

На испытательном стенде, внешний вид которого показан на рис. 1, в качестве магнитного отражателя (7) используется более мощный постоянный магнит дискообразной формы диаметром 30 мм и высотой 30 мм, изготовленный из сплава Nd-Fe-B той же марки, что и испытываемые образцы постоянных магнитов. Испытуемый образец (6) и магнитный отражатель расположены относительно друг друга одноименными полюсами в цилиндрическом контейнере (из капролактана) с плоским глухим дном (5) с навинчивающейся сверху крышкой. В крышке предусмотрено отверстие для перемещения подвижного штока (10). Внутренняя поверхность стенки цилиндрического контейнера выполняет функцию направляющей для перемещения испытуемого образца постоянного магнита. На подвижном штоке закреплена плоская стальная насадка, с помощью которой постоянный магнит фиксируется силой магнитного притяжения. Подвижный шток выполняет функцию осевой центровки приложенного внешнего усилия через регулировочный винт (11) и стальную стойку (4), закрепленную в основание (1) испытательного стенда для изменения зазора между постоянным магнитом и магнитным отражателем. В цилиндрическом контейнере предусмотрена вертикальная прорезь для визуализации зазора между испытуемым образцом постоянного магнита и магнитным отражателем и немагнитная линейка (8). Цилиндрический контейнер вместе с взаимодействующими объектами устанавливается на подставку (9) с направляющей, обеспечивающей

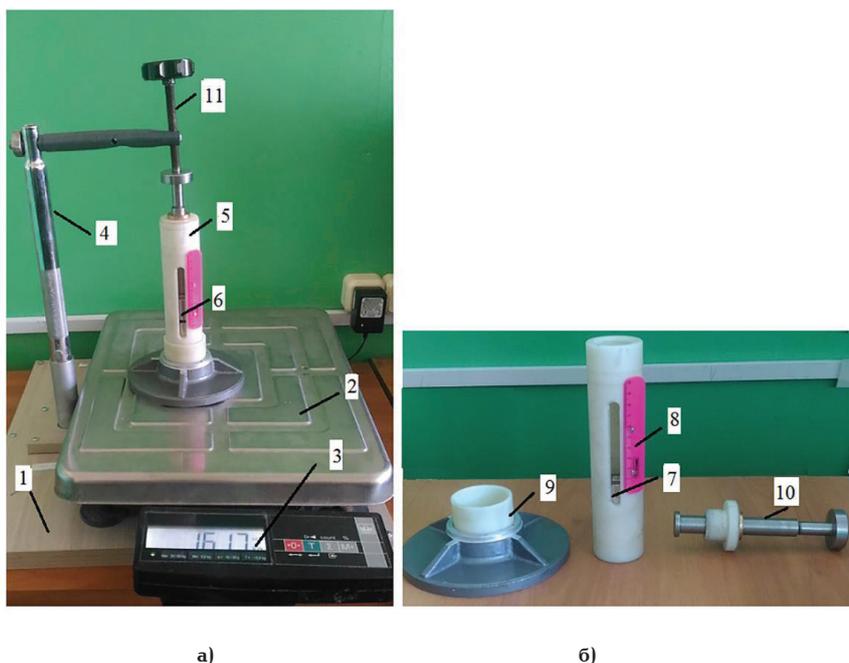


Рис. 1. Испытательный стенд: а — внешний вид стенда, б — пластиковый контейнер с подставкой и направляющей

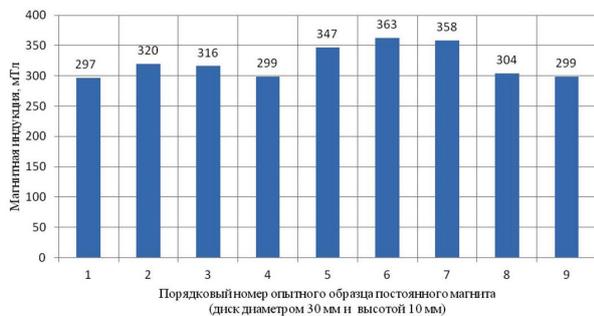


Рис. 2. Магнитная индукция на поверхности полюса опытных образцов постоянных магнитов в центральной области (диск)

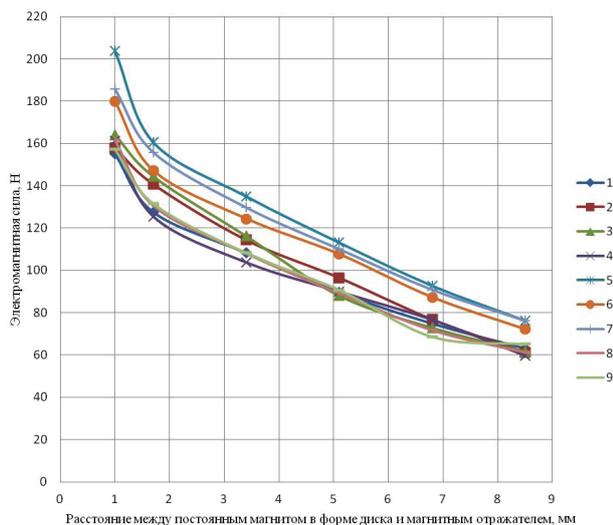


Рис. 3. Экспериментальные кривые зависимости электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими объектами

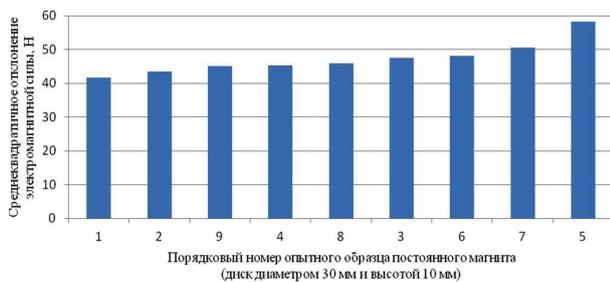


Рис. 4. Идентификация опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности (диск)

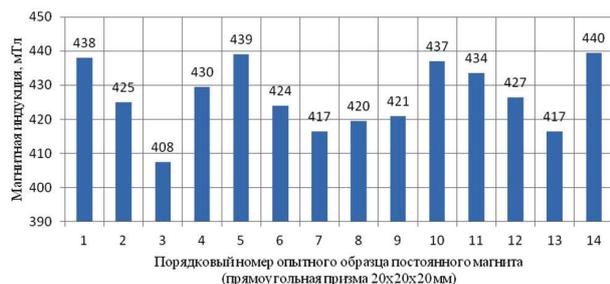


Рис. 5. Магнитная индукция на поверхности полюса опытных образцов постоянных магнитов в центральной области (прямоугольная призма)

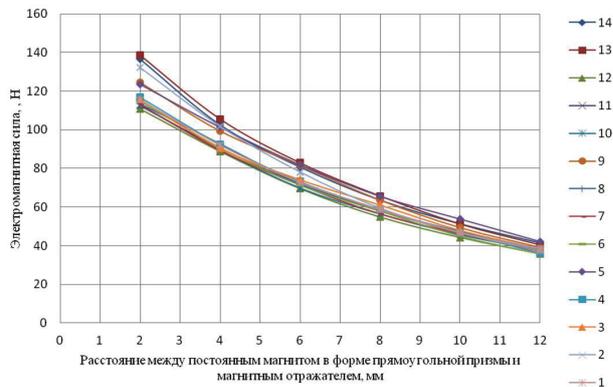


Рис. 6. Экспериментальные кривые зависимости электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими объектами (прямоугольная призма)

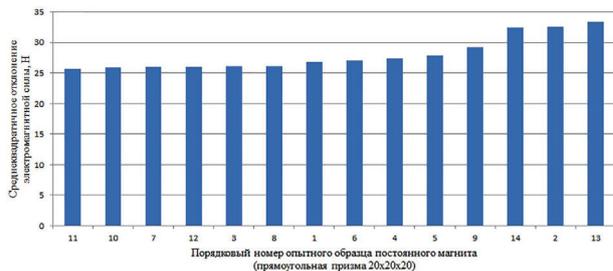


Рис. 7. Идентификация опытных образцов постоянных магнитов по критерию одинаковой объемной намагниченности (прямоугольная призма)

устойчивость контейнера и равномерное распределение силовой нагрузки на платформе настольных электронных весов (2), снабженных светодиодным дисплеем с сенсорными кнопками управления (3). Электронные весы вместе с используемым оборудованием для проведения эксперимента размещаются на основании испытательного стенда.

Методика идентификации опытных образцов высококоэрцитивных постоянных магнитов сводится к выполнению последовательности следующих шагов:

- осмотр постоянных магнитов на наличие дефектов;

- формирование группы испытуемых образцов постоянных магнитов с присвоением порядкового номера, имеющих одинаковую геометрию, форму и марку сплава Nd-Fe-B;

- измерение магнитной индукции на поверхности полюсов испытуемых образцов постоянных магнитов датчиком Холла с помощью цифрового милитесламетра исполнения ТПУ;

- установка цилиндрического контейнера вместе с испытуемым образцом постоянного магнита и магнитным отражателем на платформу настольных электронных весов с фиксацией массы установленного оборудования (тары);

- исключение массы тары нажатием на сенсорную кнопку управления электронных весов «Т», чтобы на цифровом индикаторе весов высветились нули;

- измерение электромагнитной силы взаимодействия опытного образца постоянного магнита и магнитного отражателя при различных расстояниях между ними, устанавливаемого вращением ручки регулировочного винта, передающим внеш-

Идентификация опытных образцов постоянных магнитов

Методика идентификации	Порядковый номер опытного образца постоянного магнита		Градации опытных образцов постоянных магнитов по магнитным свойствам
	Форма опытного образца постоянного магнита		
	Диск	Прямоугольная призма (куб)	
По магнитной индукции на поверхности полюса постоянного магнита (рис. 2, рис. 5)	1, 4, 9	3, 7, 13	Низкая
	2, 3, 8	2, 6, 8, 9, 12	Средняя
	5, 6, 7	1, 4, 5, 10, 11, 14	Высокая
По критерию одинаковой объемной намагниченности (рис. 4, рис. 7)	1, 2	3, 7, 8, 10, 11, 12	Низкая
	4, 8, 9	1, 4, 5, 6, 9	Средняя
	3, 5, 6, 7	2, 13, 14	Высокая

нее усилие на испытуемый образец постоянного магнита;

— построение экспериментальных кривых электромагнитной силы взаимодействия испытуемых образцов постоянных магнитов в зависимости от расстояния до магнитного отражателя;

— расчет среднеквадратичных отклонений экспериментальных кривых зависимостей электромагнитной силы от расстояния между взаимодействующими испытуемыми образцами постоянных магнитов и магнитным отражателем.

Экспериментальные исследования опытных образцов постоянных магнитов, входящих в первую и вторую группу, показаны на рис. 2–4 и рис. 5–7 соответственно.

Результаты идентификации испытуемых образцов постоянных магнитов в группах по традиционной и предлагаемой методике представлены в виде таблицы.

#### Выводы

1. Предложенная методика идентификации ВкПМ, обеспечивает отбраковку ВкПМ и постоянных магнитов других сплавов из опытных партий, приобретаемых у поставщиков для проектируемых и/или приобретаемых для выпускаемых образцов электротехнических изделий.

2. Установлено, что ВкПМ в каждой опытной партии имеют существенные отклонения по рассмотренным показателям, характеризующим их магнитные свойства, достигающим 15%, что может отразиться на работоспособности создаваемых с их помощью электромагнитных систем.

3. Вновь созданный испытательный стенд позволяет надежно идентифицировать с достаточной точностью постоянные магниты и обеспечивает отбраковку не прошедших испытаний ВкПМ из опытных партий и исключает их использование в изделиях, тем самым повышая их надежность в дальнейшем.

4. Полученные данные по существующему разбросу ВкПМ побуждают введение в обязательном порядке проверку приобретаемых партий ВкПМ и постоянных магнитов из других сплавов для их использования на стадии приобретения комплектующих у поставщика для разработки новых изделий, тем самым исключив в дальнейшем несоответ-

ствие разрабатываемых изделий его техническим условиям.

5. Результаты, полученные в данной работе, требуют проведения дальнейших исследований по созданию специализированного портативного устройства для идентификации опытных партий ВкПМ и постоянных магнитов из других сплавов.

#### Библиографический список

- Исмагилов Ф. Р., Герасин А. А., Хайруллин И. Х. [и др.]. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с. ISBN 978-5-94275-755-7.
- Никитенко Г. В., Коноплев Е. В., Деведеркин И. В. Высокоэффективный синхронный генератор на постоянных магнитах для ветроэнергетической установки // Вестник АПК Ставрополя. 2013. № 4 (12). С. 80–84.
- Вавилов В. Е. Выбор магнитной системы ротора электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными магнитами // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 26–29.
- Пат. 2565775 Российская Федерация, МПК Н 02 к 21/14. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / Татевосян А. А., Татевосян А. С. № 2014140005/07; заявл. 02.10.14; опубл. 20.10.15.
- Адалёв А. С., Кучинский В. Г. Линейный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов для грузовой магнитолевитационной транспортной платформы // Транспортные системы и технологии. 2015. Т. 1 (1). С. 77–90. DOI: 10.17816/transsyst20151177-90.
- Жильцов А. В., Стадник И. П. Измерение намагниченности однородно намагниченных постоянных магнитов // Известия вузов. Электромеханика. 2000. № 2. С. 83–86.
- Денисов П. А. Метод идентификации намагниченности постоянных магнитов электромагнитной системы // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 12 марта 2013 г. Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 84–86.
- Uehara M. Microstructure and permanent magnet properties of a perpendicular anisotropic NdFeB/Ta multilayered thin film prepared by magnetron sputtering // Journal of Magnetism and Magnetic. 2004. Vol. 284. P. 281–286.

9. Магазин магнитов «Мидора». URL: [https://www.midora.ru/neodimovye\\_magnity/](https://www.midora.ru/neodimovye_magnity/) (дата обращения: 22.10.18 г.).

**ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ). SPIN-код: 5995-1778

AuthorID (РИНЦ): 166166

AuthorID (SCOPUS): 56503744900

ORCID: 0000-0002-8581-7436

**ПЕДДЕР Валерий Викторович**, кандидат технических наук, генеральный директор научно-производственного предприятия «Метромед», г. Омск.

SPIN-код: 4399-4905

AuthorID (РИНЦ): 697514

AuthorID (SCOPUS): 6603605090

УДК 621.315.1

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-98-102

**БУРЯКОВ Никита Дмитриевич**, магистрант гр. ЭЭМ-175 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ.

**ПАСТУШЕНКО Инесса Александровна**, инженер-конструктор научно-производственного предприятия «Метромед», г. Омск.

Адрес для переписки: [ast\\_51@mail.ru](mailto:ast_51@mail.ru)

#### Для цитирования

Татевосян А. С., Педдер В. В., Буряков Н. Д., Пастушенко И. А. Экспериментальная методика идентификации высококоэрцитивных постоянных магнитов // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 94–98. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-94-98.

Статья поступила в редакцию 30.10.2018 г.

© А. С. Татевосян, В. В. Педдер, Н. Д. Буряков,

И. А. Пастушенко

**Д. Г. САФОНОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ДУГОГАСЯЩИМ РЕАКТОРОМ

В статье представлена имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью совместно с системой управления дугогасящим реактором. В основе работы системы управления используется принцип создания искусственного смещения нейтрали и последующей настройки реактора по экстремуму кривой напряжения нулевой последовательности.

Помимо параметров сети в модели можно изменять величину и характер нагрузки, что позволит проверить работоспособность системы управления дугогасящим реактором при возникновении однофазного замыкания на землю.

**Ключевые слова:** дугогасящий реактор, компенсированная нейтраль, система управления, распределительная сеть, напряжение нулевой последовательности.

Распределительная сеть с компенсированной нейтралью совместно с системой управления ДГР представляет собой сложную электротехническую систему, которая требует подробного анализа влияющих факторов и особенностей рабочих режимов на этапе проектирования.

Наименее затратным как по времени, так и по капитальным вложениям является создание имитационной модели системы в профильных программных средствах. При этом главная цель разработки подобной модели заключается в подтверждении теоретически описанных процессов, происходящих в рассматриваемой системе и принятых при расчетах допущений.

Имитационная модель трехфазной распределительной сети с компенсированной нейтралью с системой управления ДГР реализована в приложении Simulink программного комплекса MATLAB (рис. 1),

который позволяет из имеющихся элементов создавать необходимые блоки и модели для построения электрических сетей требуемой конфигурации [1].

Создание имитационной модели распределительной сети с компенсированной нейтралью совместно с системой управления ДГР решает следующие задачи:

— подтверждение основных теоретических положений при разработке системы управления дугогасящим реактором;

— оценка качества компенсации емкостных токов при различных возмущающих факторах — однофазном замыкании на землю.

Для моделирования трёхфазной распределительной сети в среде MATLAB использовались из базы данных SimPowerSystems следующие блоки:

— блок ACVoltageSource используется для моделирования питающей сети в качестве источника