



ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ БЕЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Майоров¹ А.А., Сафин² А.Р.

¹ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань, Россия

²Казанский Государственный Энергетический Университет,
г. Казань, Россия

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Использование редкоземельных постоянных магнитов в электродвигателях стало обычным явлением. Применение редкоземельных магнитов в электродвигателях, таких как неодим (NdFeB), дает значительные прирост в характеристиках электродвигателя. Цены на электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов сильно зависят от цен на магниты. Так в 2012 году резко возросли цены на редкоземельные магниты, что в свою очередь привело к резкому увеличению стоимости электродвигателей. Тяжелая ситуация в мире, а также возможный новый скачок цен на редкоземельные магниты вызывает беспокойство. Поэтому необходимо рассмотреть возможность применения альтернатив редкоземельным постоянным магнитам. Целью исследования является изучение и сравнение различных альтернативных вариантов редкоземельным постоянным магнитам. Провести сравнение различных видов электродвигателей. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач производился сравнительный анализ магнитов из различных материалов, которые могли бы заменить неодимовые магниты, наиболее часто применяемых в электродвигателях. Также производилось сравнение различных видов электродвигателей. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность рассматриваемой темы. Рассмотрены проблемы, связанные с применением редкоземельных магнитов. Рассмотрены альтернативные варианты редкоземельным магнитам, которые применяются в электродвигателях. Рассмотрены различные виды электродвигателей, приведены плюсы и минусы различных видов электродвигателей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье описаны причины, по которой необходимо отказаться от применения в электродвигателях редкоземельных магнитов (наиболее распространённые неодимовые магниты). Описаны негативные моменты использования редкоземельных магнитов в электродвигателях. Описаны альтернативные варианты применения редкоземельным магнитам в электродвигателях. Так описывается возможность восстановления редкоземельных магнитов, а также возможности применения различных материалов для создания постоянных магнитов. После изучения проблем с применением редкоземельных магнитов в электродвигателях, пришли к выводу, что необходимо рассматривать различные варианты электродвигателей, в которых использовались бы магниты без применения редкоземельных элементов. Или рассматривать различные виды электродвигателей, в которых не применяются постоянные магниты. Так на замену применяемых повсеместно неодимовых магнитов, может прийти ферритовые магниты.

Ключевые слова: электродвигатели; ферритовые магниты; неодимовые магниты; редкоземельные магниты; реактивные электродвигатели; синхронные электродвигатели.

Для цитирования: Майоров А.А., Сафин А.Р. Возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 116-130. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-116-130.

THE POSSIBILITY OF USING PERMANENT MAGNETS WITHOUT RARE EARTH ELEMENTS IN ELECTRIC MOTORS

AA. Maiorov¹, AR. Safin²

¹REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The use of rare earth permanent magnets in electric motors has become commonplace. The use of rare earth magnets in electric motors, such as neodymium (NdFeB), gives a significant increase in the characteristics of the electric motor. The prices of permanent magnet motors made of rare earth elements are highly dependent on the prices of magnets. So in 2012, prices for rare earth magnets increased sharply, which in turn led to a sharp increase in the cost of electric motors. The difficult situation in the world, as well as a possible new price hike for rare earth magnets, is worrying. Therefore, alternatives to rare earth permanent magnets should be considered. The aim of the study is to study and compare various alternatives to rare earth permanent magnets. Compare different types of electric motors. *METHODS.* When solving the tasks set, a comparative analysis of magnets made of various materials was carried out, which could replace neodymium magnets, which are most often used in electric motors. A comparison of different types of electric motors was also made. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic under consideration. The problems associated with the use of rare earth magnets are considered. Alternative options for rare-earth magnets, which are used in electric motors, are considered. Various types of electric motors are considered, the pros and cons of various types of electric motors are given. *CONCLUSION.* The article describes the reasons why it is necessary to abandon the use of rare earth magnets in electric motors (the most common neodymium magnets). The negative aspects of the use of rare earth magnets in electric motors are described. Alternative applications of rare-earth magnets in electric motors are described. This describes the possibility of restoring rare earth magnets, as well as the possibility of using various materials to create permanent magnets. After studying the problems with the use of rare earth magnets in electric motors, they came to the conclusion that it is necessary to consider various options for electric motors that would use magnets without the use of rare earth elements. Or consider different types of electric motors that do not use permanent magnets. So to replace the widely used neodymium magnets, ferrite magnets can come.

Keywords: *electric motors; ferrite magnets; neodymium magnets; rare earth magnets; reactive electric motors; synchronous electric motors.*

For citation: Maiorov AA, Safin AR. The possibility of using permanent magnets without rare earth elements in electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):116-130. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-116-130.

Введение

Первый магнитотвердый материал из спеченного неодима, железа и бора (NdFeB) был разработан в 1983 году компанией *Sumitomo Special Metals*. Такие магниты обладает высокими характеристиками по сравнению с другими магнитами. Сравним магнитные энергии постоянных магнитов из различных материалов. На рисунке 1 показано сравнение магнитной энергии ферритового магнита (30PA190), неодимового магнита (N50), альникового магнита (Alnico 9), самариевого магнита (Sm-Co).

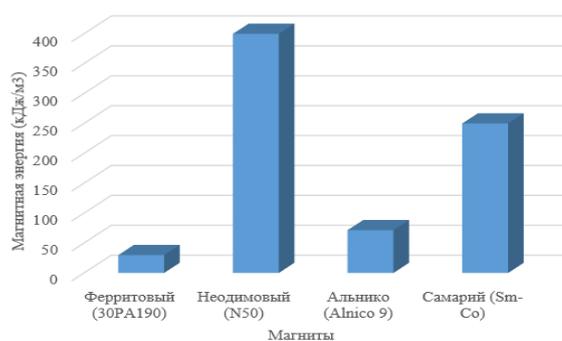


Рис. 1. Сравнение магнитной энергии ферритового магнита (30PA190), неодимового магнита (N50), альникового магнита (Alnico 9), самариевого магнита (Sm-Co).

Магнитная энергия – это энергия, заключенная в электромагнитном поле.

Для того что бы неодимовые магниты ($NdFeB$) могли работать при высоких температурах окружающей среды в них добавляют диспрозий [1]. Диспрозий – это тяжелый редкоземельный элемент, являющимся ферримагнитном. Добавление диспрозия позволяет повысить коэрцитивные силы. Добавление такого элемента сыграло важную роль, возможности применения неодимовых магнитов в условиях высокой температуры, например, применение электродвигателей с неодимовыми магнитами в электромобилях.

Применение в электродвигателях неодимовых магнитов ($NdFeB$) позволяет достичь сильного магнитного поля при маленьком размере магнитов, следовательно, при маленьких размерах электродвигателя. Если сравнивать неодимовый магнит ($NdFeB$) толщиной 3 мм и катушку с 220 витками медного провода, по которому проходит ток равным 13А, то они производят одинаковое количество магнитного поля. Сравним теперь площадь, если в проводнике предполагается плотность тока 10 А/мм^2 , то эквивалентная электромагнитная катушка будет иметь в 5-6 раз больше площадь поперечного сечения чем неодимовый магнит ($NdFeB$). Потери же в медной обмотке составит примерно 50 Вт и более на один метр обмотки электродвигателя, возникающий из-за сопротивления проводника.

В настоящее время из-за энергетических, и экологических проблем, и быстрого истощения полезных ископаемых электротранспортная промышленность получило бурное развитие. В электротранспорте на сегодняшний день в большинстве применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами. Такие электродвигатели используются в качестве тяговых двигателей, в которых применяются магниты из редкоземельных элементов. В настоящее время в тяговых двигателях применяются постоянные магниты из неодима ($Nd-Fe-B$). У неодимовых магнитов есть следующие недостатки:

- 1) Отсутствие стойкости к физическим нагрузкам;
- 2) Отсутствие стойкости к высоким температурам;
- 3) Относительно высокая скорость размагничивания;
- 4) Сложность производства;
- 5) Постоянное увеличение цены [2].

В последнее годы цена на неодимовые магниты резко возросло. Поэтому необходимо разработать альтернативные двигатели, которые не зависят от редкоземельных магнитов.

Применяемые редкоземельные материалы в электродвигателях, таких как неодим ($NdFeB$), обладает преимуществом в производительности [3]. Главным поставщиком редкоземельных материалов для электродвигателей в мире является Китай. Китай производит примерно 90-95 % редкоземельных элементов [4]. Так в 2011 и 2012 годах Китай угрожал прекратить поставки редкоземельных элементов, это очень сильно обеспокоило все другие страны. После такого заявления цены на редкоземельные материалы резко возросли, причем цены на неодим возросли в несколько раз. На сегодняшний день цены восстановились и вернулись приблизительно к уровню 2011-2012 года. После такого скачка многие организации начали искать и открывать новые шахты.

Необходимо отказаться от применения редкоземельных магнитов в электродвигателях, отказ от таких магнитов приведет к уменьшению стоимости электродвигателя. Однако нужно учесть, что применение другого вида магнита может привести к изменению конструкции электродвигателя, что может привести к дополнительным тратам. Однако удаление редкоземельных магнитов из электродвигателя может привести к нерентабельности.

Одним из основных особенностей электродвигателей с редкоземельными магнитами является то, что редкоземельные магниты (и другие типы постоянных магнитов) всегда включены, вне зависимости работает ли электродвигатель или нет. Это означает, что, когда редкоземельные магниты (или другие типы магнитов) вращаются даже при отсутствии электрического тока магнитный поток будет все еще создаваться в электродвигателе. Это приводит к ряду нежелательных эффектов.

Одним из нежелательных эффектов является высокое магнитно-индуцированное напряжение на клеммы электродвигателя, если электрические клеммы электродвигателя разомкнуты, или высокие токи через обмотки электродвигателя, если клеммы электродвигателя замкнуты.

Поговорим о так называемом процессе «ослабление поля» [5]. Когда магниты вращаются они индуцируют напряжение на обмотках, вследствие этого возникает обратная электродвижущая сила. При использовании постоянных магнитов в электродвигателях размер обратного ЭДС прямо пропорционально скорости вращения электродвигателя. Поэтому при достижении достаточной скорости вращения электродвигателем, обратная ЭДС становится настолько большой, что больше не позволяет увеличивать скорость вращения электродвигателя. Чтобы «смягчить» этот эффект необходимо ослабить поле электродвигателя. Это можно сделать введением дополнительного тока в обмотки двигателя определенным образом, чтобы уменьшить магнитный поток [6]. Применение такого метода позволит увеличить скорость вращения электродвигателя в несколько раз, примерно от 3 до 5 раз. Однако требуя подачи дополнительного тока в обмотки электродвигателя, это приведет к увеличению резистивных потерь и это приведет к уменьшению эффективности электродвигателя.

Применение редкоземельных магнитов в электродвигателях позволяют разрабатывать электродвигатели высоким крутящим моментом и высоким магнитным потоком [7]. Замена редкоземельных магнитов в электродвигателях позволит уменьшить стоимость электродвигателя, уменьшить негативное влияние на окружающую среду и увеличение списка потенциальных поставщиков материалов для электродвигателя, что несомненно положительно отразится на стоимости электродвигателя.

Научная значимость заключается в развитии конструкции ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами, основанная на моделировании и топологической оптимизации, и позволяющая получить не просто результаты замены редкоземельных магнитов на ферритовые, но и определить оптимальное расположение магнитов, с целью минимизации потерь КПД и вращающего момента. А практическая значимость – получение новых типов двигателей с меньшей стоимостью, сохранением рабочих параметров, и возможный отказ от редкоземельных магнитов.

Материалы и методы исследования

Приведенные выше недостатки применения в электродвигателях неодимовых магнитов (NdFeB) заставляет рассмотреть альтернативы редкоземельным магнитам в электродвигателях. Необходимо рассмотреть альтернативы редкоземельным магнитам используемых в электродвигателях.

На основании проведенных исследований на возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных магнитов были рассмотрены:

1) альтернативные варианты редкоземельным магнитам. Рассмотрены наиболее эффективные способы, материалы, оборудование, которое позволило бы избежать применения в электродвигателях постоянных магнитов из редкоземельных элементов.

2) проведен сравнительный анализ различных электродвигателях, в котором описаны плюсы и минусы электродвигателей и область их применения.

Изучение вопроса возможности применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных магнитов проводилось с метода моделирования и изучения. С помощью программного обеспечения COMSOL были спроектированы различные виды электродвигателей, с различными материалами постоянных магнитов. В этом же программном обеспечении, COMSOL, были произведены необходимые расчеты, для определения различных характеристик электродвигателей.

Результаты

Рассмотрим альтернативные варианты постоянным магнитам из редкоземельных материалов:

1) Восстановленные редкоземельные элементы [8]. В этой области сосредоточены в основном на двух альтернативных подходах. Во-первых, производители магнитов стремятся уменьшить количество редкоземельных элементов в магнитах, при этом стараясь сохранить или улучшить характеристики магнита. Так, например, одни разрабатывают

магниты, в которых снижают содержание диспрозия по сравнению с обычными магнитами. Процесс производства таких магнитов связан с использованием нового процесса, который заключается в диффузии диспрозия в материалах магнита. Другие же стремятся уменьшить размер зерна магнитов до наномасштабов. Таким образом, они надеются значительно увеличить характеристики магнита [9].

Во-вторых, использование переработанных редкоземельных материалов. В компьютерной промышленности уже много лет используют переработанные редкоземельные магниты [10]. Однако есть опасения, что восстановление редкоземельных магнитов могут уменьшить качество и характеристики магнитов [11].

Так же была проделана большая работа по разработке электродвигателей, в которых используются менее редкие земные магниты. В таких двигателях старались сохранить характеристики или улучшить их. Наиболее эффективным подходом в этом направлении стало применение так называемых гибридных моторных технологий. В таких электродвигателях используется меньшее количество встроенных магнитных материалов. Такие электродвигатели применяются в электромобилях *BMW*.

2) Прочие магнитные материалы. Вопросом разработки магнитных материалов без использования неодима занимается большое количество компаний. На данный момент разработано большое количество магнитных материалов с хорошими характеристиками, например, нитрид железа и так далее. Были рассмотрены магнитные материалы, разработанные до появления неодима, такие как:

- Алюминий никель-кобальт. Данный материал был разработан в 1930-ом году. Плюсами такого магнита можно назвать высокая температурная стойкость, высокая плотность остаточного потока [12]. Минусы такого магнита высокий риск размагничивания, относительно не высокие магнитные свойства [13]. Из-за большого риска размагничивания данный материал не получил популярности для использования в электродвигателях.

- Самарий-кобальтовые магниты. Данный материал магнита был разработан в 1970-ом году [14]. Самарий-кобальтовые магниты широко используются в автомобильной, аэрокосмической, оборонной и промышленной сфере в различном оборудовании, аппаратах и приборах, таких как электродвигатели, электрогенераторы, электромагнитные муфты, микрофоны, динамики, в устройствах распыления для вакуумного нанесения покрытий, датчиках Холла, ускорителях частиц и многих других устройствах [15]. Однако данный магнит дороже, чем неодимовые магниты и содержит редкоземельные материалы Самарий и кобальт.

- Ферритовые магниты. Применять ферритовые магниты начали с 1950-ого года. Ферритовые магниты изготавливаются из оксида железа в сочетании со стронцием, барием или кобальтом [16]. Основной проблемой электродвигателей с ферритовыми магнитами является низкая плотность магнитного потока и низкая коэрцитивная сила. Магниты из феррита примерно в 10 раз хуже, чем неодимовые, по магнитным характеристикам: коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и магнитной энергии. Для получения конкурентоспособной плотности, крутящего момента требуется существенно изменить конструкцию электродвигателя. Однако одним из преимуществ ферритовых магнитов является то, что их коэрцитивная сила увеличивается с температурой, делая их менее чувствительные к внезапному размагничиванию [17]. В последнее время было проведено много различных исследований по использованию ферритовых магнитов в электродвигателях. Исследование на данный момент все еще продолжает, но уже можно сделать первоначальные выводы, что электродвигатели с ферритовыми магнитами являются надежной машиной и стоимость таких электродвигателей будет меньше чем у других.

3) Индукционные электродвигатели. Применение индукционных электродвигателей распространено в промышленной автоматизации, а применение их в качестве тяговых двигателей крайне редко. Исключением стала компания «*Tesla Motor Corporation*». Именно эта компания заявила о применении в своих электромобилях индукционных электродвигателей [18].

Однако индукционные электродвигатели несут потери в проводниках ротора. Как правило, эти потери в два-три раза выше, чем в электродвигателях с постоянными магнитами. Появление высоких потерь в роторе нежелательно, потому что это приведет к нагреву ротора, а охладить вращающийся ротор на много труднее, чем неподвижный статор. Возникновение больших потерь в роторе означает не только то, что это тип электродвигателя может быть менее эффективным, чем другие варианты, но также и то, что в процессе эксплуатации этот электродвигатель может быстро перегреться. Для снижения температуры электродвигателя понадобится разработать специальную схему управления,

которая позволяла бы при достижении какой-то определённой температуры ограничить мощность электродвигателя, чтобы уменьшить его температуру.

Но компания «*Tesla Motor Corporation*» для уменьшения потерь в роторе использовала медный ротор, вместо алюминиевого. Однако, применение медного ротора увеличило стоимость этого электродвигателя. Так же из-за применения меди пришлось изменить схему управления электродвигателем, также вес электродвигателя увеличился [19].

4) Электродвигатели с фазным ротором. Такие электродвигатели применяются в производстве электроэнергии, подъемных кранах, лифтовых приводах, станках и так далее. Принцип работы такого электродвигателя заключается в том, что в область обмотки статора подается электрический ток и возникает магнитный поток [20]. Так же одновременно на ротор подается ток, и в каждом механизме появляется магнитное поле, они взаимодействуют друг с другом и ротор вращается. Для передачи электрического тока на ротор требуется специальный механизм. Для этого части используют контактные кольца. Применение контактных колец оказалось ненадежным, из-за быстрого износа щеток. Еще одним из недостатков такого электродвигателя является необходимость дополнительных коммутационных устройств, который необходим для обеспечения контролируемого тока в роторе [21]. Также отвод тепла от проводников ротора может стать ограничивающим фактором, при этом снова требуется тщательный контроль для предотвращения перегрева.

Рассмотрим различные виды электродвигателей и выделим их достоинства:

1) Электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов. Такие электродвигатели выделяются такими характеристиками, как высокой плотностью мощности, высокой эффективностью, легкостью управления в широком диапазоне скорости. Именно поэтому такие электродвигатели используются повсеместно [26].

2) Асинхронные электродвигатели. Рассмотрим отдельно асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Это бесщеточные электродвигатели переменного тока, работающего на переменном синусоидальном напряжении, которые широко применяются в промышленности и в других сферах. Асинхронные электродвигатели обладают высокой надежностью, простотой конструкции, низкой стоимостью, простотой обслуживания и способностью работать в тяжелых условиях. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором так же применяются в электромобилях, электробусах и в легких грузовиках. Например, такие электродвигатели применялись в электромобилях компании *Tesla*, *Mercedes-Benz*, *Toyota* и так далее. Компания *Smith Electric Vehicles* разработала грузовик *Newton*, в котором применялся асинхронный электродвигатель.

Асинхронные электродвигатели являются асинхронными машинами, то есть скорость вращения поля, создаваемого обмотки статора и скорость вращения ротора отличаются [27]. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют простую конструкцию по сравнению с другими видами электродвигателей, это облегчает проектирование и производства таких электродвигателей [28].

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором обладают следующими недостатками:

- сложностью управления при низких скоростях;
- низким коэффициентом мощности, при малых нагрузках;
- высокими пусковыми токами;
- низким КПД.
- имеют меньшую плотность крутящего момента, чем у других видов электродвигателей [29].

3) Синхронные электродвигатели. Синхронные электродвигатели имеют ротор с постоянными магнитами. В большинстве случаев применяются постоянные магниты из редкоземельных материалов. Применение магнитов из редкоземельных материалов позволяют получить высокие характеристики синхронного электродвигателя. Синхронные электродвигатели с магнитами из редкоземельных материалов обладают высокими характеристиками, такими как, высокой плотностью крутящего момента, высокой эффективностью, точностью регулирования крутящего момента [30]. В тоже время синхронные электродвигатели обладают такими недостатками как, ограниченная способность ослабления поля, ограниченная область постоянной мощности, это характерно для синхронных электродвигателей, у которых магниты установлены на поверхности ротора [31]. Но это не так критично для синхронных электродвигателей, у которых магниты расположены внутри ротора. Также есть возможность размагничивания, это может быть

связано с повышением температуры или может быть последствием короткого замыкания [32].

Магниты, которые располагаются не на поверхности ротора, являются более защищенными от механических воздействий и магнитных [33]. Поэтому синхронные электродвигатели, в которых магниты расположены не на поверхности ротора, являются более надежными. Такие электродвигатели генерируют более высокую плотность потока в воздушном зазоре и применяются в условиях, когда нужно длительное время поддерживать постоянную нагрузку [34]. Однако такие электродвигатели имеют более высокую стоимость, по сравнению синхронными электродвигателями, у которых постоянные магниты расположены на поверхности ротора, из-за сложности производства [35].

В настоящее время синхронные машины с постоянными магнитами из редкоземельных материалов являются наиболее используемыми в электромобилях, поскольку использование редкоземельных магнитов позволяет разрабатывать более лёгкие электродвигатели с более высокими характеристиками [36]. Однако применения редкоземельных магнитов сильно увеличивает стоимость электродвигателя. Поэтому предпринимается много попыток для замены редкоземельных магнитов. Наиболее важными критериями при проектировании электродвигателей без редкоземельных магнитов является мощность, крутящий момент, простота конструкции, надежность [37].

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами гибридного возбуждения [38]. Такие электродвигатели обеспечивают высокую эффективность в широком диапазоне переменных скоростей [39]. Одним из главных минусов таких электродвигателей является высокая стоимость [40].

4) Синхронный реактивный двигатель. Такие электродвигатели обладают относительно низкой стоимостью [41]. Недостатками такого электродвигателя является сложность конструкции, сложностью управления, низкий коэффициент мощности при работе с ослаблением поля [42]. Для того чтобы мощность синхронного реактивного двигателя была сопоставима с мощностью синхронного электродвигателя с постоянными магнитами необходимо увеличить размеры первого или увеличить мощность источника питания, что приводит к увеличению стоимости синхронного реактивного двигателя [43].

Стоимость редкоземельных магнитов, применяемых в электродвигателях, может достигать до 60 % от общей стоимости материалов. Поэтому, заменив редкоземельные магниты ферритовыми магнитами, затраты на материалы может сократиться на 50%.

Плотность крутящего момента и возможность создания крутящего момента в синхронных реактивных электродвигателях могут быть увеличены за счет включения магнитов в ротор, что приводит к созданию синхронных реактивных электродвигателей с ферритовым усилителем [44]. Из-за больших затрат и возможными проблемами поставками редкоземельных магнитов, разрабатываются синхронные реактивные электродвигатели с ферритовым усилителем, с применением ферритовых магнитов. Такие электродвигатели сочетает в себе функции электродвигателей с ферритовыми магнитами и реактивных электродвигателей. Такой электродвигатель имеет высокий коэффициент мощности, широкий диапазон мощностей, является надежным [45]. Синхронные реактивные электродвигатели с ферритовым усилителем использует меньшее количество ферритовых магнитов, чем синхронные электродвигатели с ферритовым магнитом, что приводит к снижению обратной ЭДС и снижению токов короткого замыкания.

5) Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами из феррита. Такой электродвигатель уступает синхронному электродвигателю с редкоземельными магнитами в максимальной производительности по крутящему моменту [46]. Преимуществом синхронных электродвигателей с постоянными магнитами из феррита является низкая стоимость, обладает большой эффективностью в области высоких скоростей и низкой нагрузки.

Таким образом, можно сделать следующий вывод, что у каждого электродвигателя есть свои плюсы и минусы. В настоящее время в качестве тяговых двигателей применяются электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов, но в зависимости от различных технических требований могут применяться и другие виды электродвигателей [47].

Рассмотрим применение в электродвигателях вместо неодимовых магнитов более дешёвый и экологически чистые магниты. Такими магнитами могут стать ферритовые. Ферритовые магниты являются наилучшими кандидатами для замены неодимовых магнитов. Ферритовые магниты также обладают очень высоким электрическим сопротивлением, что сводит к минимуму потери на вихревые токи. Так же ферритовые магниты являются не дорогими магнитами. Изготовление ферритовых магнитов является

довольно простым процессом. Применение ферритовых магнитов позволит удешевить производство электродвигателей.

В программном обеспечении COMSOL был разработан электродвигатель с ферритовыми магнитами. На рисунке 2 представлен общий вид, разработанного электродвигателя.

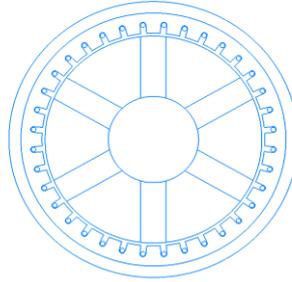


Рис. 2. Общий вид электродвигателя с ферритовыми магнитами. Fig. 2. General type of electric motor with ferrite magnets.

Для сравнения характеристик электродвигателей, таких как распределение магнитного поля и крутящего момента, был разработан общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами. На рис.3 представлен общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами.

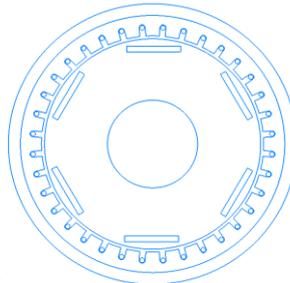


Рис. 3. Общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами. Fig. 3. The general appearance of an electric motor with neodymium magnets.

В результате моделирование, электродвигателей с ферритовыми и неодимовыми магнитами, в программном обеспечении COMSOL были получены следующие результаты:

1) Распределение магнитного поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами, представлен на рисунке 4, а в электродвигателе с неодимовыми магнитами на рисунке 5.



Рис. 4. Распределение магнитного поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами. Fig. 4. Magnetic field distribution in ferrite magnet motor.

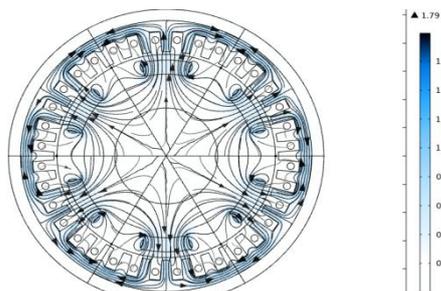


Рис. 5. Распределение магнитного поля в электродвигателе с неодимовыми магнитами. Fig. 5. Magnetic field distribution in neodymium magnet electric motor.

Как видно из результатов расчета, распределение магнитного поля в электродвигателях отличается на 30%.

2) График крутящего момента поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами, представлен на рисунке 6, а в электродвигателе с неодимовыми магнитами представлен на рисунке 7.

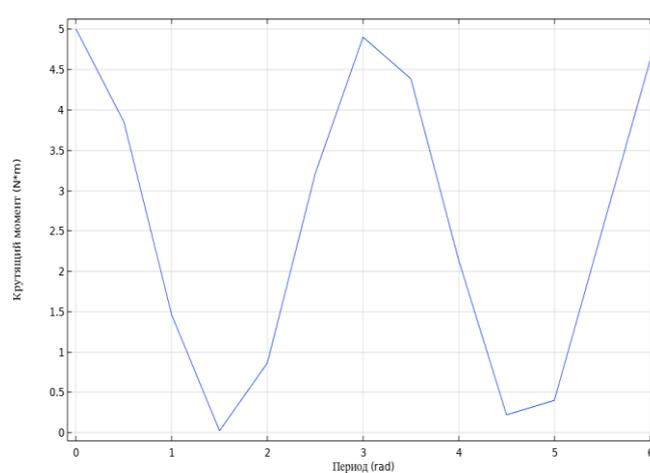


Рис. 6. График крутящего момента в электродвигателе с ферритовыми магнитами. *Fig. 6. Torque graph in ferrite magnet electric motor.*

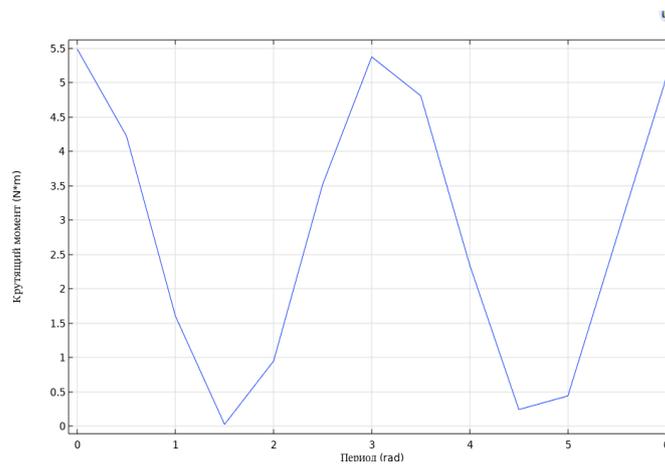


Рис. 7. График крутящего момента в электродвигателе с неодимовыми магнитами. *Fig. 7. Torque graph in neodymium electric motor*

Как видно из результатов расчета крутящий момент для электродвигателей с неодимовыми магнитами и ферритовыми магнитами отличается только на 9 процентов.

Несмотря на то, что остаточная плотность потока ферритового магнита составляет примерно одну треть от плотности потока редкоземельного магнита, электродвигатели с ферритовыми магнитами может генерировать крутящий момент, эквивалентный 90 % крутящего момента электродвигателя с неодимовыми магнитами, и получить более широкий диапазон постоянной выходной мощности.

В результате этих оценок электродвигатели с ферритовыми магнитами может достичь плотности выходной мощности, эквивалентной электродвигателям с неодимовыми магнитами, даже несмотря на то, что максимальный крутящий момент при том же токе немного ниже. Поэтому, можно предположить, что разработанный электродвигатель с ферритовыми магнитами можно применить вместо электродвигателей с неодимовыми магнитами.

Обсуждение

Для замены редкоземельным магнитам может быть использованы ферритовые магниты. Ферритовые магниты имеют более низкую электропроводность, чем магниты из редкоземельных материалов (NdFeB), поэтому они имеют более низкие потери из-за вихревых токов, что снижает вероятность размагничивания [48]. Ферритовые магниты имеют гораздо меньше поле остаточной индукции и максимальный продукт энергии, чем магниты из редкоземельных материалов (NdFeB). Поэтому ферритовые магниты не могут напрямую заменить магниты из редкоземельных материалов (NdFeB) в электродвигателях с

постоянными магнитами, поскольку ферритовые магниты генерируют гораздо меньшую плотность магнитного потока [49]. Однако существует возможность создания конкурентоспособного электродвигателя с ферритовыми магнитами, который будет иметь примерно такой же крутящий момент и мощность, как у электродвигателя с редкоземельными магнитами, при этом размеры самого электродвигателя не изменятся. Так не давно немецкая компания *Infineon Technologies* разработал синхронный электродвигатель со спицевым ротором, в котором используется ферритовые магниты. Такой электродвигатель смог составить конкуренцию асинхронному электродвигателю [50]. Электродвигатели с ферритовыми магнитами наиболее хорошо подходят для замены электродвигателей с редкоземельными магнитами (NdFeB), чем асинхронные электродвигатели или синхронные электродвигатели.

Большинство электродвигателей в настоящее время используют магниты с редкоземельными магнитами, хотя существует различные возможности для разработки электродвигателей без редкоземельных магнитов [51].

Заключение

Редкоземельный магнитный материалы, неодим, железо, бор, образуют основу электродвигателей, используемых во многих сферах. Применение таких магнитов в электродвигателях позволяют получить в проектируемых электродвигателях высокую плотность крутящего момента, высокий коэффициент полезного действия, делать электродвигатели более компактными и легкими.

Однако применять все время редкоземельные магниты в электродвигателях невозможно. Это связано как с тем, что цена на редкоземельные магниты очень высока, так и тем, что количество редкоземельных элементов используемых при производстве магнитов ограничено.

Даже если эти факторы можно несколько смягчить, тем не менее, есть веские аргументы в пользу исследования и эксплуатации других двигателей, которые не нуждаются в редкоземельных магнитных материалах. Многие производители электромобилей уже используют электродвигатели, в которых не используются редкоземельные элементы. Реактивные электродвигатели и электродвигатели, в которых не применяют редкоземельные магниты, а используют постоянные магниты из феррита, возможно, станут основой для всех электродвигателей с еще более высокими характеристиками в будущем.

В данной работе был проведен обзор литературы в области возможности применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов. В настоящее время большой интерес вызывает этот вопрос из-за проблем с увеличением стоимости редкоземельных магнитов, с риском ограничения поставок редкоземельных магнитов. Результаты исследования показывают, что существует возможность разработки электродвигателей без редкоземельных магнитов, которые могут достичь также характеристик, как аналогичные электродвигатели с редкоземельными магнитами. Так же были рассмотрены уже разработанные на данный момент электродвигателей с магнитами без применения редкоземельных магнитов. Эти электродвигатели обладают интересными особенностями и обладают более низкой стоимостью, более высокой температурой эксплуатации, меньшей вероятностью размагничивания, лучшим КПД и повышенной эффективностью. Такие электродвигатели являются более привлекательными для применения в электромобилях и в других сферах.

Литература

1. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты, энциклопедический справочник. В 5 томах, том 1, магниты и магнитные системы. Санкт-Петербург: ЛИК, 2004. 361 с.
2. Вонсовский С.В., Магнетизм. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. 1027 с.
3. Иродов И.Е., Электромагнетизм. Основные законы. 7-е изд. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 319 с.
4. Карташов Е.Ю. История открытия и области применения постоянных магнитов на основе РЗМ. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Северск, 2006. Доступно по: https://studopedia.net/16_33095_istoriya-otkritiya-i-oblasti-primeneniya-postoyannih-magnitov-na-osnove-rzm.html. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
5. Менушенков В.П. Новые магнитотвердые материалы вопросы использования и область применения // Электротехника. 1999. №10. с.1-4.

6. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 240 с.
7. Barba P., Savini A., Wiak S. Field Models in Electricity and Magnetism. Springer Science+Business Media, LCC, 2008.
8. Буйновский П.А. Получение магнитных сплавов на основе РЗМ и магнитов из них. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск, 2001. Доступно по: <https://tekhnosfera.com/view/383853/a#?page=1>. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
9. Юшина Т.И., Петров И.М., Гришаев С.И., и др. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №1. с. 577-608.
10. Нагата Х., Сингаки Й. Способ переработки отходов магнитов. Патент РФ на изобретение №2446497. 27.03.2012. Доступно по: <http://allpatents.ru/patent/2446497.html>. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
11. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020 №5. с. 68-84.
12. Перельман Ф.М., Зворыкин А.Я. Кобальт и никель. М.: Наука, 1975. 215 с.
13. Мин. П.Г., Вадеев В.Е., Пискороский В.П., и др. Разработка технологии выплавки сплавов системы РЗМ-Fe-Co-B с высокой чистотой по примесям для термостабильных магнитов // Труды ВИАМ. 2016. №1. с. 3-9.
14. Розин П.А., Акимов А.В. Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. №2(20). С. 12-18.
15. Volyanskaya Ya. B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. No.4. pp. 26-33.
16. Coey J.M.D. Magnetism and magnetic materials. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2010. pp. 633.
17. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. №2. С. 10-12.
18. Веселовский О.Н., Годкин М.Н. Индукционные электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом. М.: Информэлектро. 1974. 48 с.
19. Мумиков А.Д., Сентюрихин Н.И. Линейные индукционные электрические машины // Вопросы науки и образования. 2018. №8. С. 7-9.
20. Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация. М.: Энергоатомиздат. 2000. 496 с.
21. Bobazhanov M.K., Fayziev M.M., Mustaev R.A., et al. Applying the non-contact devices for starting a single-phase asynchronous electric motor. Вестник науки и образования. 2021. №10(113). pp. 31-35.
22. Кутупов И.И., Садыков Д.А., Тимеев А.А. Электроприводы с новыми типами синхронных реактивных машин // Вестник науки. 2021. №7(40). С. 88-91.
23. Нгуен М.Т., Нгуен Ч.Х. Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями. Известия Тульского государственного университета // Техника науки. 2014. №8. С. 184-187.
24. Самосейко В.Ф., Шарашкин С.В. Анализ преимуществ реактивных электрических машин при построении гребной электрической установки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. №2(17). С. 14-22.
25. Гельвер Ф.А. Конструкции реактивных электрических машин. Характеристики, достоинства и недостатки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №1(391). С. 140-150.
26. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020. №5. С. 68-84.
27. Enrico L. Electric Machines. Design. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. pp. 53-68.
28. Pollefiet J. Electric Machines. Power Electronics. 2018. pp. 16.1-16.76.
29. Lukaszczuk M. Improving efficiency in electric motors. World Pumps. 2014. №1. pp. 36-41.
30. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., и др. Синхронный электродвигатель с повышенной скоростью вращения и сбалансированным ротором // Вестник Чувашского университета. 2021. №1. С. 19-26.

31. Yang Y., Qiang H., Chunyun F., et al. Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. *Energy*. 2020. №213.
32. Shen Y., Wei W. Study on the flux-weakening capability of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle. *Mechatronics*. 2016. №38. pp. 115-120.
33. Zhifu W., Jingzhe Y., Chuang C., et al. Phase-phase Short Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles. *Energy Procedia*. 2016. №88. pp. 915-920.
34. Hamler A., Gorican V., Sustarsic B., et al. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor. *Jornal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. №2(304). pp. 816-819.
35. Silva P.C., Matos D.S., Nied A., et al. Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model. *ISA Transactions*. 2021. №111. pp. 223-230.
36. Zheming F., Guangwei L., Shi J., et al. Comparative study on torque characteristics of permanent magnet synchronous reluctance motors with different axial hybrid rotors. *Energy Reports*. 2022. №5(8). pp. 1349-1359.
37. Мартынов Л.Н. Синхронный гибридный электродвигатель // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». 2011. С. 492-493.
38. Смирнов А.Ю. Вопросы классификации электрических машин для бесконтактного синхронного привода // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2011. №2(87). С. 162-169.
39. Pyrkin A., Isidori A., Borisov O. Output Robust Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. №14(54). pp. 197-202.
40. Adly A.A., Huzayyin A. The impact of demagnetization on the feasibility of permanent magnet synchronous motors in industry applications. *Journal of Advanced Research*. 2019. №17. pp. 103-108.
41. Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Казакбаев В.М., и др. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». 2015. С. 19-22.
42. Шрейнер Р.Т., Шилин С.И., Медведев А.В. Математическое моделирование синхронных реактивных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода // Труды международной семнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». 2018. с. 58-63.
42. Gennaro M., Jurgens J., Zanon A., et al. Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessment*. 2019. №31. pp 86-101.
43. Кузнецов М.И. Основы электротехники. Москва: Высшая школа, 1970. 368 с.
44. Коршунов А.И. Электромагнитный момент синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известие высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. №1(58). С. 61-66.
45. Jani N.S., Jamnani G.J. Performance analysis and comparison of PM-Assisted synchronous reluctance motor with ferrites and Rare-earth magnet materials. *Materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022.
46. Kuznetsov V., Zikov N., Ivanov M. Technique of Evolutionary Optimization Permanent-magnet Synchronous Motors. *Procedia Computer Science*. 2017. №103. pp. 198-204.
47. Кондратьев В.Б. Глобальный рынок редкоземельных металлов // Горная промышленность. 2017. №4 (134). С. 48-54.
48. Breton J-M.L. Ferrite Magnets: Properties and Applications. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. №3. pp. 206-216.
49. Galioto S.J., Reddy P.B., El-Refai A.M., et al. Effect of Magnet Types on Performance of High-Speed Spoke Interior-Permanent-Magnet Machines Designed for Traction Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. №3(51). pp. 2148-2160.
50. Сафин А.Р., Грачева Е.И., Ранжан К.В., Петров Т.И. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 47-55. EDN FBPZWP.

Авторы публикаций

Майоров Андрей Александрович – аспирант, инженер ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань.

Сафин Альфред Робертович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань.

References

1. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. *Ferrity, entsiklopedicheskii spravochnik. V 5 tomakh, tom 1, magnity i magnitnye sistemy. Sankt-Peterburg: LIK; 2004.*
2. Vonsovskii S.V., *Magnetizm. Moskva: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izd-va «Nauka»; 1971.*
3. Irodov I.E., *Elektromagnitizm. Osnovnye zakony. 7-e izd. M.: BINOM. Laboratoriya znanii; 2009.*
4. Kartashov E.Yu. *Istoriya otkrytiya i oblasti primeneniya postoyannykh magnetov na osnove RZM. Dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. Seversk; 2006.* Available at: https://studopedia.net/16_33095_istoriya-otkrytiya-i-oblasti-primeneniya-postoyannih-magnitov-na-osnove-rzm.html. Accessed: 10 Apr 2022.
5. Menushenkov V.P. *Novye magnetotvredye materialy voprosy ispol'zovaniya i oblast' primeneniya. Elektrotehnika. 1999;10: 1-4.*
6. Likhachev V.L. *Spravochnik obmotchika asinkhronnykh elektrodvigatelei. Moscow: SOLON-Press; 2004.*
7. Barba P., Savini A., Wiak S. *Field Models in Electricity and Magnetism. Springer Science+Business Media, LCC; 2008.*
8. Buinovskii P.A. *Poluchenie magnitnykh splavov na osnove RZM i magnetov iz nikh. Dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. Tomsk; 2001.* Available at: <https://tekhnosfera.com/view/383853/a#?page=1>. Accessed: 10 Apr 2022.
9. Yushina T.I., Petrov I.M., Grishaev S.I., i dr. *Obzor rynka RZM i tekhnologii pererabotki redkozemelnogo syr'ya. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015; 1: 577-608.*
10. Nagata Kh., Singaki I. *Sposob pererabotki otkhodov magnetov. Patent RUS na izobretenie №2446497. 27.03.2012.* Available at: <http://allpatents.ru/patent/2446497.html>. Accessed: 10 Apr 2022.
11. Kryukov V.A., Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. *Redkozemel'naya promyshlennost' realizovat' imeyushchiesya vozmozhnosti. Gornaya promyshlennost'. 2020; 5: 68-84.*
12. Perel'man F.M., Zvorykin A.Ya. *Kobal't i nikel'. Moscow: Nauka; 1975.*
13. Min. P.G., Vadeev V.E., Piskoroskii V.P., et al. *Razrabotka tekhnologii vyplavki splavov sistemy RZM-Fe-Co-B s vysokoi chistotoi po primesyam dlya termostabil'nykh magnetov. Trudy VIAM. 2016; 1:3-9.*
14. Rozin P.A., Akimov A.V. *Primenenie magnetotvredykh materialov v elektricheskikh mashinakh na transportnykh sredstvakh./ Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2014; 2(20):12-18.*
15. Volyanskaya Ya. B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. *Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017; 4:26-33.*
16. Coey J.M.D. *Magnetism and magnetic materials. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2010; 633.*
17. Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. *Tyagovye dvigateli na postoyannykh magnetakh v elektroprivode avtomobilya./ Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2011; 2:10-12.*
18. Veselovskii O.N., Godkin M.N. *Induktsionnye elektrodvigatelei s razomknutym magnetoprovodom. Moscow.: Informelektro. 1974.*
19. Mumikov A.D. Sentyurikhin N.I. *Lineinye induktsionnye elektricheskie mashiny. Voprosy nauki i obrazovaniya. 2018; 8:7-9.*
20. Petrikov L.V., Kornachenko G.N. *Asinkhronnye elektrodvigatelei: Obmotochnye dannye. Remont. Modernizatsiya. Moscow: Energoatomizdat. 2000.*
21. Bobazhanov M.K., Fayziev M.M., Mustaev R.A., et al. *Applying the non-contact devices for starting a single-phase asynchronous electric motor. Vestnik nauki i obrazovaniya. 2021; 10(113): 31-35.*

22. Kutupov I.I., Sadykov D.A., Timeev A.A. *Elektroprivody s novymi tipami sinkhronnykh reaktivnykh mashin.* / *Vestnik nauki.* 2021; 7(40):88-91.
23. Nguen M.T., Nguen Ch.Kh. *Osnovnye dostoinstva reaktivno-ventil'nykh elektrodvigatelei po sravneniyu s traditsionnymi elektrodvigatelyami.* *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnika nauki.* 2014; 8:184-187.
24. Samoseiko V.F., Sharashkin S.V. *Analiz preimushchestv reaktivnykh elektricheskikh mashin pri postroenii grebnoi elektricheskoi ustanovki.* *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika.* 2017; 2(17):14-22.
25. Gel'ver F.A. *Konstruksii reaktivnykh elektricheskikh mashin. Kharakteristiki, dostoinstva i nedostatki. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra.* 2020; 1(391): 140-150.
26. Kryukov V.A., Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. *Redkozemel'naya promyshlennost' – realizovat' imeyushchiesya vozmozhnosti. Gornaya promyshlennost'.* 2020; 5:68-84.
27. Enrico L. *Electric Machines. Design. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition).* 2003; 53-68.
28. Pollefiet J. *Electric Machines. Power Electronics.* 2018; 16.1-16.76.
29. Lukaszczyk M. *Improving efficiency in electric motors. World Pumps.* 2014;1: 36-41.
30. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., et al. *Sinkhronnyi elektrodvigatel' s povyshennoi skorost'yu vrashcheniya i sbalansirovannym rotorom.* *Vestnik Chuvashskogo universiteta.* 2021; 0: 19-26.
31. Yang Y., Qiang H., Chunyun F., et al. *Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. Energy.* 2020; 213.
32. Shen Y., Wei W. *Study on the flux-weakening capability of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle. Mechatronics.* 2016; 38: 115-120.
33. Zhifu W., Jingzhe Y., Chuang C., et al. *Phase-phase Short Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles. Energy Procedia.* 2016; 8: 915-920.
34. Hamler A., Gorican V., Sustarsic B., et al. *The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor. Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2006; 2(304): 816-819.
35. Silva P.C., Matos D.S., Nied A., et al. *Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model. ISA Transactions.* 2021; 111: 223-230.
36. Zheming F., Guangwei L., Shi J., et al. *Comparative study on torque characteristics of permanent magnet synchronous reluctance motors with different axial hybrid rotors. Energy Reports.* 2022; 5(8): 1349-1359.
37. Martynov L.N. *Sinkhronnyi gibridnyi elektrodvigatel'. XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii».* 2011: 492-493. (In Russ).
38. Smirnov A.Yu. *Voprosy klassifikatsii elektricheskikh mashin dlya beskontaktnogo sinkhronnogo privoda. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva.* 2011; 2(87): 162-169.
39. Pyrkin A., Isidori A., Borisov O. *Output Robust Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. IFAC-PapersOnLine.* 2021;14(54): 197-202.
40. Adly A.A., Huzayyin A. *The impact of demagnetization on the feasibility of permanent magnet synchronous motors in industry applications. Journal of Advanced Research.* 2019; 17: 103-108.
41. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A., Kazakbaev V.M., et al. *Eksperimental'noe sravnenie asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo elektrodvigateli. Trudy Mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka».* 2015: 19-22.
42. Shreiner R.T., Shilin S.I., Medvedev A.V. *Matematicheskoe modelirovanie sinkhronnykh reaktivnykh dvigatelei v sostave chastotno-reguliruemogo elektroprivoda. Trudy mezhdunarodnoi semnadsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka.* 2018: 58-63.
43. Gennaro M., Jurgens J., Zanon A., et al. *Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications. Sustainable Energy Technologies and Assessment.* 2019; 31: 86-101.
44. Kuznetsov M.I. *Osnovy elektrotekhniki.* Moscow: Vysshaya shkola; 1970.
45. Korshunov A.I. *Elektromagnitnyi moment sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami. Izvestie vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie.* 2015; 1(58): 61-66.
46. Jani N.S., Jamnani G.J. *Performance analysis and comparison of PM-Assisted synchronous reluctance motor with ferrites and Rare-earth magnet materials. Materialstoday: PROCEEDINGS;* 2022.

47. Kuznetsov V., Zykov N., Ivanov M. *Technique of Evolutionary Optimization Permanent-magnet Synchronous Motors. Procedia Computer Science*. 2017; 103: 198-204.

48. Kondrat'ev V.B. *Global'nyi ryok redkozemel'nykh metallov. Gornaya promyshlennost'*. 2017; 4 (134): 48-54.

49. Breton J-M.L. *Ferrite Magnets: Properties and Applications. Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021; 3: 206-216.

50. Safin A.R., Gracheva E.I., Ranjan K.B., Petrov T.I. *Ispol'zovanie ferritovykh magnitov v sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022; 1(53): 47-55. EDN FBPZWP.

Authors of the publication

Andrei A. Maiorov – Engineer REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia.

Al'fred R. Safin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **16.06.2022 г.**

Отредактировано **20.06.2022 г.**

Принято **27.06.2022 г.**