© А.Р. Сафин, Ranjan Kumar Behera

(cc) BY

УДК 621.313.8 **DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33**

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Р. Сафин[1], Ranjan Kumar Behera[2]

[1]Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
[2]Indian Institute of Technology (IIT), Patna
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1792-8780, sarkazan@bk.ru*

Резюме: *ЦЕЛЬ. Рассмотреть технологии изготовления постоянных магнитов и области их применения. Выявить мировые тренды по изменению спроса на редкоземельные металлы. Изучить перспективы развития аддитивного производства полимерных магнитных материалов. МЕТОДЫ. При изучении данного вопроса использовался анализ широкого круга отечественных и зарубежных источников научной литературы. РЕЗУЛЬТАТЫ. Изучены перспективные технологии аддитивного производства полимерных магнитных материалов для различных сфер применения. Обозначена необходимость установить взаимосвязь между свойствами исходного материала, диаметрами экструзионных сопел, параметрами печати, а также механическими и функциональными свойствами получаемых магнитов.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье представлен всесторонний обзор последних достижений в области применения аддитивного производства, оптимизации топологии и их интеграции для электрических машин и их магнитных компонентов. Технологии аддитивного производства, такие как 3D-печать, BAAM – технология имеют потенциальные преимущества, такие как снижение производственных затрат, устранение необходимости в изготовлении пресс-форм, возможность создавать постоянные магниты с полевыми профилями и магнитными свойствами, которые невозможно получить с помощью современных методов. Рассмотренные технологии могут использоваться в качестве инструмента при проектировании и разработке инновационных магнитов для электрических двигателей, которые позволят наиболее полно использовать магнитный поток и тем самым повысить энергоэффективность приводных систем. Это позволит быстро создавать прототипы деталей и уменьшит время выхода на рынок новых продуктов.

Ключевые слова: *аддитивные технологии; постоянные магниты; 3D принтер; оптимизация; электрические машины.*

Для цитирования: Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 14-33. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.

ADDITIVE MANUFACTURING AND TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MAGNETIC MATERIALS FOR ELECTRICAL MACHINES

AR. Safin[1], Ranjan Kumar Behera[2]

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
[2]Indian Institute of Technology (IIT), Patna
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1792-8780, sarkazan@bk.ru*

Abstract: *THE PURPOSE. To consider the technologies for the manufacture of permanent magnets and their areas of application. To identify global trends in the change in demand for rare earth metals. To study the prospects for the development of additive production of polymer magnetic materials. METHODS. When studying this issue, an analysis of a wide range of domestic and foreign sources of scientific literature was used. RESULTS. Prospective technologies for the additive production of polymer magnetic materials for a variety of*

applications have been studied. The need to establish a relationship between the properties of the starting material, the diameters of the extrusion nozzles, the printing parameters, as well as the mechanical and functional properties of the resulting magnets is indicated. CONCLUSION. This article provides a comprehensive overview of recent advances in the application of additive manufacturing, topology optimization and their integration for electrical machines and their magnetic components. Additive manufacturing technologies such as 3D printing, BAAM - the technology has potential advantages such as lower production costs, elimination of the need to make molds, the ability to create permanent magnets with field profiles and magnetic properties that cannot be obtained using modern methods. The considered technologies can be used as a tool in the design and development of innovative magnets for electric motors, which will make the most of the magnetic flux and thereby increase the energy efficiency of drive systems. This will allow rapid prototyping of parts and reduce the time to market for new products.

Keywords: *additive technologies; permanent magnets; 3D printer; optimization; electrical machines.*

For citation: AR. Safin, Ranjan Kumar Behera. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):14-33. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.

Введение

Магниты применяются во многих областях, значительно улучшая повседневную жизнь (рис. 1). Основная доля выпускаемых магнитов используется в производстве электродвигателей и генераторов [1].

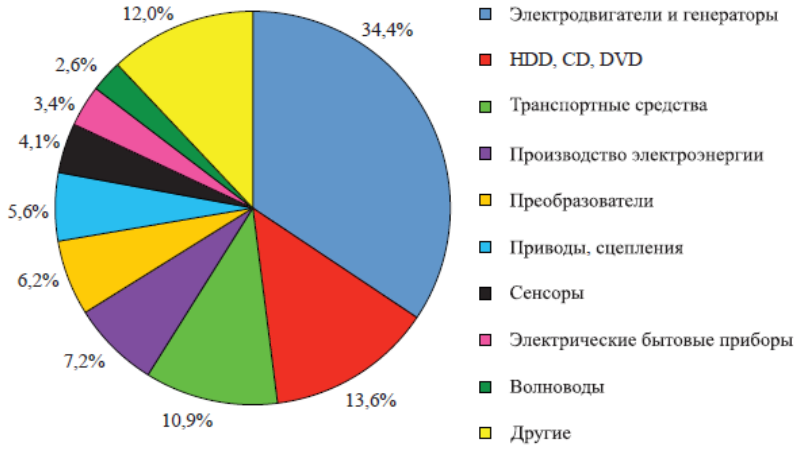


Рис. 1. Области применения редкоземельных магнитов

Fig. 1. Applications of rare earth magnets

Однако рынки сбыта магнитов оценивают не только по достигнутому уровню производства, сколько по развивающимся направлениям и будущему потенциалу. В этом направлении несомненным лидером являются ветряные электрогенераторы, производство которых стремительно возрастает. Массовое производство томографов, звуковых устройств, магнитной компьютерной памяти, сенсоров и переключателей создает значительные потребности в высококачественных магнитах (рис. 2) [2].

Стремительное развитие высокотехнологичных производств влечет за собой существенный прирост запросов промышленности на постоянные магниты. Основная доля требуемых магнитов производится из сплавов, содержащих Nd (неодим). Безусловным лидером как в производстве таких магнитов, так и в добыче редкоземельных металлов (РЗМ) является Китай. Именно на территории Китая находятся главные мировые запасы редкоземельных элементов, а доля производства редкоземельных оксидов составляет 97%.

Этим обстоятельством вызвано возникновение новых направлений исследований, преследующих цель создать магниты, не содержащие редкоземельные элементы, однако аналогичные по физическим характеристикам или даже превосходящие магниты на основе NdFeB.

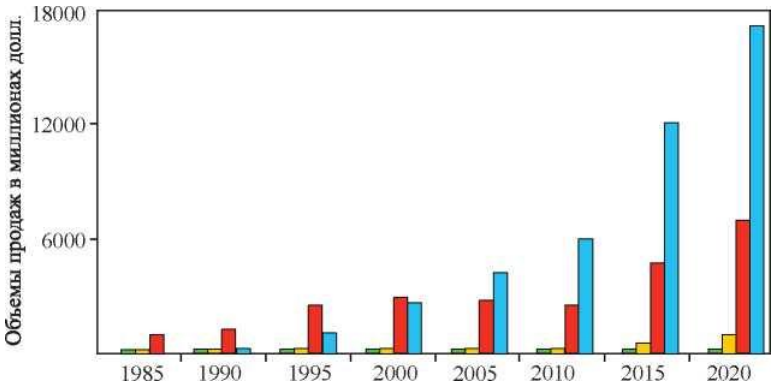


Рис.2. Рост спроса на редкоземельные магниты AlNiCo (■), SmCo (■), ферриты (■) и NdFeB (■)

Fig. 2. Growth in demand for rare earth magnets AlNiCo (■), SmCo (■), ферриты (■) и NdFeB (■)

Стремительное развитие высокотехнологичных производств влечет за собой

Однако производство объемных жестких магнитов вряд ли можно осуществить, полностью отказавшись от РЗМ. Основная идея удешевления магнитов и ослабления зависимости рынка от Китая заключается в попытках уменьшения доли РЗМ, путем создания дополнительной магнитной анизотропии, с помощью обменного взаимодействия между «мягкими» и «жесткими» магнитными фазами. При размерах включений «мягкой» фазы ниже определенного критического размера упомянутые композиционные материалы проявляют вполне приемлемые значения остаточной намагниченности и называются *exchange-spring materials* [3].

Евросоюз, Япония и США определили редкоземельные металлы как материалы огромной стратегической важности [4], значительно увеличив в последние годы количество исследовательских проектов и лабораторий, преследующих цель изготовить материалы с конкурентосопособной магнитной энергией, при этом избегая расширения в использовании редкоземельных элементов.

Аддитивное производство имеет много преимуществ по сравнению с традиционными методами производства и все чаще используется в медицине, авиакосмической и автомобильной промышленности. Гибкость технологий аддитивного производства для изготовления изделий сложной геометрии из меди, полимеров и магнитных металлов открывает уникальные возможности для новых концепций дизайна и повышения удельной мощности машин без значительного увеличения стоимости производства и прототипирования. Оптимизация топологии исследует оптимальное распределение одного или нескольких материалов в пределах определенного пространства проектирования и может привести к уникальной геометрии, которую невозможно реализовать с помощью традиционных методов оптимизации. В качестве перспективной технологии аддитивное производство дает разработчикам оборудования возможность преодолеть текущие производственные ограничения, препятствующие внедрению оптимизации топологии. Успешная интеграция аддитивного производства и оптимизации топологии для изготовления магнитных компонентов для электрических машин может открыть новые инструменты для разработчиков электрических машин.

Материалы и методы

Неодим-железо-бор магниты основаны на сплаве $Nd_2Fe_{14}B$, в которых расчетное содержание редкоземельных элементов составляет около 27%. Однако в дополнение к неодиму в сплаве часто используются празеодим, диспрозий и другие элементы, такие как кобальт. Это приводит к среднему содержанию редкоземельных элементов до 31% [5]. Празеодим в основном используется для частичной замены более дорогого неодима, что, согласно [6], возможно при соотношении смешивания 3: 1 (Nd:Pr) без потери качества. Добавление диспрозия служит для увеличения напряженности коэрцитивного поля при высоких температурах и имеет большое значение для устройств работающих при больших температурах. Магниты *NdFeB* без диспрозия остаются стабильными только по своим магнитным свойствам до температур примерно 80 ° С, добавление диспрозия до 10% [7] может увеличить рабочий температурный диапазон до 200° С. Состав магнитов варьируется соответственно в зависимости от области применения: Магниты NdFeB при низких рабочих температурах (например, в громкоговорителях) обычно содержат 31% неодима и празеодима (и не содержат диспрозия), а в магнитах для более высоких

температурных диапазонов (например, электродвигателей) празеодим заменен диспрозием. Магниты NdFeB достигают плотности энергии до 400 кДж / м3, что делает их самыми сильными постоянными магнитами.

По способу производства различают полимерные и спеченные магниты NdFeB. Магниты NdFeB с полимерной связкой изготавливаются из наноразмерного порошка NdFeB, который прессуется в желаемую форму с помощью полимера. Связанные полимерами магниты NdFeB имеют заметно меньшую плотность энергии, чем спеченные магниты NdFeB. Преимуществами являются простота обработки (например, литье под давлением), изменяемая форма и значительно улучшенная коррозионная стойкость. Полимерные магниты NdFeB используются главным образом для задач, где не требуются большие значения остаточной индукции, например, в двигателях постоянного тока для оптических приводов и жестких дисков. Состав материала магнитного сплава в полимерных магнитах обычно очень однороден с 29% неодима без добавления празеодима или диспрозия. Спеченные магниты NdFeB также изготавливаются из порошкообразного сырья. Однако компоненты не склеиваются связующим, а спекаются при высоком давлении и температуре. Поскольку спеченные магниты NdFeB очень восприимчивы к коррозии, они покрыты антикоррозионной защитой (например, никелированием).

Сферы применения. Электроника

В электронике магниты NdFeB в основном используются в небольших двигателях (например, в оптических приводах, жестких дисках и вибрационных сигналах), а также в некоторых громкоговорителях. В целом, по оценкам, около 10% общего производства магнитов NdFeB используется для приложений для оптических и акустических устройств (информационная, коммуникационная и развлекательная электроника) [8].

Автомобильная отрасль

Редкоземельные магниты используются во многих устройствах автомобилей. К ним относятся, например, высококачественные динамики, системы рулевого управления с усилителем, датчики и небольшие двигатели. Что касается автомобилей с гибридными и электрическими приводами, запрос на высококачественные магниты будет увеличиваться, так как эти приводы в основном содержат двигатели с NdFeB (спеченные магниты). В целом, будущая потребность в этой отрасли сильно зависит от развития продаж гибридных и электромобилей. Вес магнитов в трансмиссии для гибридных и полностью электрических автомобилей составляет от 1 кг до 2,4 кг в зависимости от размера и мощности электродвигателя. К 2030 году Европейский союз планирует выпустить на дороги не менее 30 млн электрокаров [9].

В зависимости от глобального развития рынка различных трансмиссий для электромобилей в секторе легковых автомобилей, можно предположить значительный рост спроса на магниты NdFeB и, таким образом, на неодим, празеодим и диспрозий. Для снижения ценового уровня проводятся исследования в направлении магнитов NdFeB с более низким содержанием диспрозия (7% или даже меньше) [10]. В дополнение к автотранспортным средствам электрические велосипеды также превращаются в значительных потребителей магнитов NdFeB. Масса магнитов на колесо составляет 300 г при этом содержание Nd составляет 30% и содержание диспрозия 4% [11].

Ветрогенераторы

Уже несколько лет используются безредукторные ветряные турбины, которые работают с синхронными генераторами, оснащенными постоянными магнитами. В отличие от «классических» приводов для ветряных турбин, которые работают с коробками передач, этот тип привода особенно подходит для больших диапазонов мощности (например, систем мощностью 6 МВт). Безредукторный привод обещает ряд преимуществ (экономия веса, меньший объем технического обслуживания и т. д.) особенно для использования в морских зонах. Потребность в магнитах NdFeB для этой технологии высока, предполагается, что от 500 до 600 кг на МВт выходной мощности, т.е. большие ветряные турбины (6 МВт) этого типа оснащены тремя-четырьмя тоннами магнитов NdFeB [12]. Для поддержания температурной стабильности диспрозий также включен в магнитный сплав для этой области применения. Драйвером роста спроса на редкоземельные элементы (особенно неодим, празеодим, диспрозий) для ветряных турбин становятся комплексные планы правительства Китая по расширению ветроэнергетики, в том числе в морских зонах. Китай планирует довести мощности солнечной и ветровой энергетики до 1200 ГВт к 2030 году [13].

Также магниты NdFeB все чаще используются во многих других применениях. К ним относятся магнитно-резонансная томография в медицине, современные лифтовые

системы, энергоэффективные стиральные машины, системы кондиционирования воздуха и тепловые насосы. Магниты NdFeB играют очень важную роль для различных военных применений [14], например, генераторы и электроприводы в системах управления ракетами и артиллерийскими системами, в приборах ночного видения, радио- и гидролокации, лазерных системах.

Аддитивное производство постоянных магнитов

Аддитивное производство - это быстро развивающаяся технология для полимерных магнитов. Технологии аддитивного производства, такие как 3*D*-печать, имеют потенциальное преимущество, позволяющие снизить производственные затраты, устраняя необходимость в изготовлении пресс-формы. Это позволяет быстро создавать прототипы деталей и уменьшает время выхода на рынок новых продуктов. Путем модификации термопластичного пластика с частицами магнитотвердого наполнителя можно изготавливать постоянные магниты на полимерной связке. В качестве твердых магнитных частиц вводят феррит, а также редкоземельные материалы с объемным содержанием наполнителя от 45% до 65%. Сначала полимер и магнитные частицы смешиваются в экструдере. Затем полученное соединение может быть дополнительно обработано литьем под давлением и экструзией соответственно.

В работе [15] представлена технология 3*D*-печати изотропных жестких магнитов на полимерной связке с помощью недорогого 3*D*-принтера. Представлен пример печатного магнита сложной формы, который был разработан для генерации определенного поля рассеяния, и сопоставлен с конечно-элементным моделированием. Данная технология позволяет печатать магнитные системы на полимерной связке имеющие сложную форму с локально настроенными магнитными свойствами. Порошок NdFeB для полимерных магнитов получен методом прядения из расплава, что позволяет получить сферический порошок с размером частиц приблизительно 45 мкм, который обычно предпочтителен в процессах литья под давлением для достижения лучшего реологического поведения. В тех случаях, когда максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$ связанных магнитов не является целевой характеристикой, предпочтительным является магнитно-изотропный порошок, поскольку он имеет более низкие затраты на изготовление и большую гибкость.

Представленный метод может быть использован для печати магнитов, состоящих из локально различных материалов полимерной матрицы, а также из различных магнитных порошков, начиная от магнитомягких сплавов до магнитотвердых NdFeB или ферритовых сплавов. Способность печатать магниты из локально изменяющихся магнитных материалов с индивидуальными магнитными свойствами позволяет создавать постоянные магниты с полевыми профилями и магнитными свойствами, которые невозможно получить с помощью современных методов.

Повторное использование редкоземельных элементов, таких как Sm и Nd, является одним из методов, направленных на смягчение долгосрочных проблем с поставками и стоимостью материалов и устройств, которые зависят от этих элементов. В работе [16] переработанный порошок *Sm-Co* восстановлен из промышленных отходов после обработки магнитов. Исследована возможность повторного использования сырья при подготовке нити для 3*D*-печати магнитов на полимерной основе. В данном исследовании вторичный порошок *Sm-Co*, извлеченный из стружек, смешивали с полимолочной кислотой, с температурой плавления 178 °C, которая была выбрана в качестве связующего для этого исследования, поскольку её температура плавления значительно ниже температуры Кюри *Sm-Co*. Далее полученную смесь экструдировали при 160 ° C для получения нити. Показано, что не произошло ухудшения магнитных свойств при приготовлении и экструзии полимерного магнитного материала. Хорошая однородность магнитных свойств проявляется по всей нити, за исключением начального участка выдавливаемого материала. Данная работа открывает путь для производства переработанной магнитной нити для 3*D*-печати постоянных магнитов. Поставка самария (*Sm*) в настоящее время не считается критической. Тем не менее, перебои с поставками могут произойти с внедрение технологий со значительной долей Sm, таких как Sm-Fe-N. Повторное использование переработанных магнитов в качестве порошков в магнитах один путь к сохранению материалов и переработке важнейших РЗМ.

Полимерные магниты составляют наиболее быстро растущий сегмент рынка постоянного магнита. Полимерный ферритовый магнит идеально подходит для применений, где необходимо точно комбинировать недорогой магнит со сложной формой. Однако магнитные свойства полимерного ферритового магнита являются самыми низкими среди коммерческих постоянных магнитов. Полимерный магнит NdFeB

более дорогой по весу, но обеспечивает приемлемые магнитные свойства для экономически эффективных применений. Одновременное использование двух совершенно разных магнитных материалов позволяет создавать самые разнообразные полимерные соединения магниты. Смесь NdFeB и феррита может быть перспективной для производства гибридных магнитов со сниженной стоимостью [17]. Изучена возможность создания гибридного магнита с промежуточным или улучшенным магнитными свойствами путем смешивания различных материалов.

Развивается новый метод производства полимерных магнитов с большой площадью поверхности *Big Area Additive Manufacturing (BAAM)* - для изготовления изотропных магнитов на основе NdFeB, имеющих форму сетки, с магнитными и механическими свойствами, сопоставимыми или лучше, чем у традиционных литьевых магнитов [18]. Композиционные гранулы с исходным полимерным магнитом состоят из 65 % изотропного порошка NdFeB и 35 % полимера (рис. 3). Данный метод предлагает значительные преимущества, такие как эффективность (не требуются инструменты), не требует предварительной подготовки филамента (нити для 3D принтера), быстрая скорость (простая процедура) и возможность производить неограниченное количество деталей в размерах и формах. *BAAM* технология обеспечивает эффективный метод реализации произвольной формы с минимальной стоимостью и отходами, и может ускорить развитие крупномасштабного промышленного производства магнитов на полимерной основе.

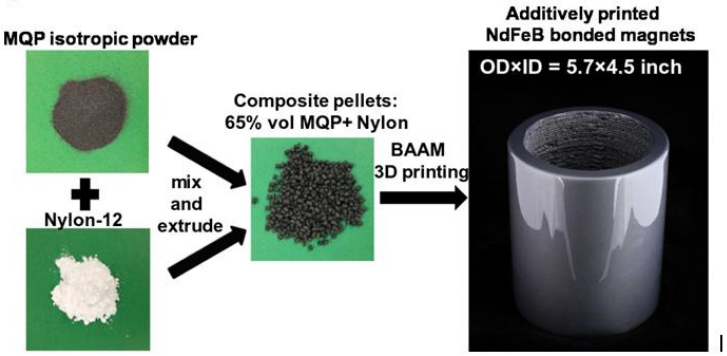


Рис. 3 Способ изготовления полимерного магнита [18]

Fig. 3 Method of manufacturing a polymer magnet [18]

В работе [19] сравнивается две технологии 3*D*-печати, а именно струйная печать и *BAAM* –технология, чтобы определить их применимость при изготовлении магнитов на основе Nd-Fe-B. Показано, что аддитивные технологии страдают от недостаточной точности из-за искажения и накопления остаточного напряжения во время процесса наслоения [20]. Для обеспечения качества изготовления необходимо установить прямую связь между свойствами исходного материала, диаметрами экструзионных сопел, параметрами печати, а также механическими и функциональными свойствами получаемых деталей, необходимы значительные усовершенствования, чтобы заменить традиционные методы изготовления деталей большого объема относительно простой формой. Аддитивные технологии нуждается в значительном прогрессе, чтобы заменить традиционные методы изготовления деталей большого объема. *BAAM* технология более перспективна по сравнению со струйной печатью с точки зрения производства деталей, механических и магнитных свойств деталей, который может превзойти по эффективности прессование. Тем не менее, аддитивные технологии можно использовать в качестве инструмента при проектировании и разработке инновационных магнитов для электродвигателей, при этом лучшая конструкция электродвигателя, позволяющая наиболее полно использовать магнитный поток, в свою очередь, снизила бы потребление редкоземельных материалов. Более того, электродвигатель, который состоит из немагнитных рам (например, статора, ротора и т. д.) и постоянных магнитов, может быть напечатан как единая деталь, что обеспечивает более высокую точность и более короткое время от проектирования до конечной детали.

В настоящее время в синхронных двигателях с постоянными магнитами обычно используются спеченные магниты NdFeB из-за их самой высокой остаточной плотности магнитного потока. Однако высокая электропроводность спеченных магнитов приводит к значительным потерям на вихревые токи, что снижает КПД двигателя [21]. Результаты моделирования и эксперименты продемонстрировали, что двигатель с осевым магнитным

потоком, использующий полимерные магниты NdFeB, может достигать как более высокого крутящего момента, так и более высокого КПД по сравнению с двигателем с радиальным магнитным потоком, со спеченными магнитами NdFeB с таким же весом магнитов [22]. Данная работа еще раз подтверждает необходимость в разработке передовых производственных технологий, таких как 3*D*-печать, для изготовления полимерных магнитов. Важно отметить, что методы 3*D*-печати, обсуждаемые с этой точки зрения, не являются исключительными для магнитов на основе NdFeB, возможно применение широкого спектра магнитных материалов и композиций.

Кроме того, электрическая машина, которая состоит из немагнитных рам (например, статор, ротор и т. д.) и постоянных магнитов, может быть напечатана как единая деталь, что обеспечивает более высокую точность и уменьшение времени проектирования.

Последние технологические достижения в области аддитивных технологий (АТ) позволяют использовать широкий спектр материалов, включая медь [23, 24], керамику и магнитные материалы [25]. Эти материалы являются ключевыми для производства компонентов электрических машин. Для очень сложных форм АТ могут предоставить наиболее экономичные и быстрые средства для изготовления небольших опытных партий.

Топологическая оптимизация (ТО) используется во многих областях электротехники для определения новых конструкций, снижающих вес без нарушения механической целостности. ТО определяет оптимальный способ распределения одного или нескольких материалов в определенном пространстве проектирования. В результате ТО часто возникают сложные конструкции. Применение ТО просматривается в конструкции сердечника ротора реактивной машины [26]. ТО также используется для поиска оптимального распределения постоянного магнита и стального сердечника ротора в машинах с постоянными магнитами [27, 28].

Одним из недостатков конструкций полученных на основе ТО является низкая технологичность найденных оптимальных решений. Это препятствовало принятию ТО при проектировании электрических машин. Однако применение АТ к компонентам электрических машин, особенно в ферромагнитных материалах и постоянных магнитах, дают возможность технически реализовать решения полученные на основе ТО. Поскольку АТ могут изготавливать практически любую сложную топологию, стало ясно, что ТО и АТ имеют высокий уровень совместимости и могут использоваться параллельно для облегчения разработки электрических машин следующего поколения. В работе [29] ТО используется для проектирования сердечника ротора машины с постоянными магнитами. Затем оптимизированный сердечник ротора печатается на 3*D*-принтере из высококремнистой стали. В работе [30] постоянные магниты разных марок предлагаются для изготовления электрической машины, чтобы снизить производственные затраты без ухудшения КПД машины. В работе [31] обсуждается современное состояние аддитивного производства электрических машин и их компонентов, включая магнитные материалы и обмотки. В статье [32] широко обсуждаются применение технологий АТ для компонентов электрических машин, в том числе железных сердечников, обмоток и систем изоляции, магнитов и систем управления теплообменом. Дается общее представление о характеристиках компонентов, напечатанных на 3*D*-принтере и они сравниваются с компонентами, производимыми традиционным способом. В [33] обсуждаются преимущества АТ в отношении конструкции и сборки электрических машин.

Магнитомягкие материалы характеризуются низкой собственной коэрцитивной силой, обычно ниже 1000 А/м, и могут легко намагничиваться или размагничиваться [34]. Поскольку железные сердечники отвечают за направление и улучшение основного потока, создаваемого непрерывно движущимся магнитным полем, существует несколько критериев при выборе магнитомягких материалов на этапе проектирования. Следующие характеристики считаются ключевыми для стальных сердечников: магнитное насыщение, собственная коэрцитивная сила, относительная магнитная проницаемость, плотность гистерезисных потерь, динамические потери и предел текучести [35]. Для электрических машин сердечники традиционно изготавливаются либо из стальных пластин, либо из магнитомягких композитов (*SMC* материалы). Для шихтованных сердечников количество стальных отходов из-за резки и пробивки пластин может составлять от 50% до 80% [36].

В отличие от шихтованных сердечников, *SMC* материалы выбираются для топологий машин, где предпочтительным является магнитный поток распределённый в трех направлениях [37]. Эти топологии машин могут включать в себя машины с осевым потоком, трубчатые линейные машины или машины с зубчатыми полюсами. Поскольку

железные сердечники, изготовленные из *SMC*, производятся путем прессования частиц железа в желаемые формы, это может потребовать меньше этапов механической обработки и постобработки. Еще одно преимущество *SMC* материалов по сравнению с шихтованной сталью состоит в том, что магнитомягкие композиты имеют более низкие потери на вихревые токи на высоких частотах возбуждения. При частоте возбуждения 1000 Гц и выше потери на вихревые токи в сердечнике *SMC* намного ниже, чем в сердечнике из многослойной стали. Это дает преимущества *SMC* для конструкций электрических машин, где требуется высокая скорость работы. Однако существуют заметные проблемы, связанные с применением *SMC*. Они подвержены высоким гистерезисным потерям, высокой собственной коэрцитивной силе, низкой относительной проницаемости и низкому пределу текучести. Типичное значение предела текучести *SMC* ниже 20 МПа, в то время как для шихтованной стали типичное значение составляет около 350 МПа. Для высокоскоростных электрических машин сердечники ротора, изготовленные из *SMC*, могут подвергаться высоким механическим напряжениям.

Многочисленные демонстрации аддитивного производства сердечника ротора синхронного реактивного электродвигателя показаны в [38, 39]. Изготовление прототипов сердечников ротора достигается с помощью двух методов 3*D*-печати: моделирования наплавлением (*FDM)* и селективного лазерного плавления (*SLM*) без использования формования или инструментов. В [40] анализируется поверхность сердечника ротора реактивной машины с изменяемым сопротивлением, напоминающая структуру сот. Использование сотовой структуры позволяет уменьшить как пульсацию крутящего момента, так и потоки рассеяния (рис. 4).

а) б)

Рис. 4. Сердечники ротора, изготовленные добавкой. Эти конструкции изготавливались без литья и оснастки.
(а) Напечатанный сердечник ротора для синхронно-реактивной машины [39];
(б) Напечатанный сердечник ротора для реактивной машины с изменяемым сопротивлением [40]

Fig. 4. Rotor cores made by the additive. These structures were made without casting and tooling.
((a) Printed rotor core for synchronous-reactive machine [39];
(b) A printed rotor core for a reactive machine with variable resistance [40].

В электрических машинах обычно используются три магнитомягких материала: сплавы железо-кобальт (FeCo), железо-никель (FeNi) и железо-кремний (FeSi). Что касается производительности в расчете на стоимость, варианты железо-кремниевой электротехнической стали имеют высокое магнитное насыщение, высокую максимальную относительную проницаемость, низкую собственную коэрцитивную силу, низкие гистерезисные потери и низкие потери на вихревые токи до сотен Гц на частоте возбуждения. Таким образом, варианты железо-кремниевой электротехнической стали можно найти в большинстве железных сердечников, используемых в электрических машинах [35]. В поисках железных сердечников аддитивного производства большая часть исследований и разработок ферромагнитных материалов, напечатанных на 3D-принтере, также сосредоточена на железо-кремнии.

Подобно 3*D*-печати железо-кобальт и железо-никель, *SLM* является наиболее часто используемым процессом АТ для железо-кремния. В [41] *SLM* предлагается в качестве альтернативного метода производства железо-кремния с содержанием кремния 6,9 мас.%, который является хрупким и сложным для производства с помощью обычного способа производства. Здесь исследование параметров печати *SLM* на магнитных свойствах показывает, что существует нелинейная зависимость между подводимой лазерной энергией и относительной проницаемостью, собственной коэрцитивной силой и общей плотностью потерь напечатанного железо-кремния. Таким образом, важно оптимизировать процесс печати, чтобы получить оптимальные магнитные

характеристики печатного железо-кремния. Однако природа метода *SLM* вносит дефекты и остаточные напряжения в микроструктуру печатных деталей, что ухудшает магнитные свойства железо-кремния на основе *SLM*. По сравнению с коммерческой сталью с ламинированным железом и кремнием максимальная относительная проницаемость железо-кремния, полученного методом *SLM*, ниже [41, 42]. Применение термообработки к готовым деталям может помочь снять остаточные напряжения и значительно улучшить относительную проницаемость, а также другие магнитные свойства железо-кремниевого сплава *SLM* [43]. В [44] показано, что процесс отжига улучшает максимальную относительную проницаемость готовых деталей со значения 2000 до 24000, что соответствует высокопроизводительным слоям железо-кремнистой стали. На другие магнитные свойства, включая общую плотность потерь в железе, собственную коэрцитивную силу и насыщение, также оказывает положительное влияние процесс отжига. Другой интересной особенностью процесса *SLM* является то, что он вводит удлинение зерна в направлении построения печатных деталей. В результате железо-кремний, изготовленный с использованием *SLM,* может иметь высокий уровень магнитной анизотропии [45]. Кроме того, более высокая подводимая энергия лазера может даже изменить кристаллографическую текстуру напечатанного железо-кремния, что приведет к образованию текстуры Госса, также известной как текстура куба, которая наблюдается в текстурированной электротехнической стали [46]. Это говорит о том, что *SLM* потенциально может быть использован в качестве альтернативного подхода при производстве железо-кремния с ориентированной структурой зёрен, который, в свою очередь, может быть использован для таких областей, как трансформаторы или электрические машины.

К постоянным магнитам, используемым в электрических машинах, предъявляются три основных требования: высокие функциональные магнитные свойства; стабильность при высоких температурах; коррозионная стойкость. Что касается магнитных свойств, к важным характеристикам относятся остаточная магнитная индукция B_r, собственная коэрцитивная сила H_{ci} и максимальное произведение энергии $(BH)_{max}$. Постоянными магнитами, которые обычно используются в электрических машинах, являются NdFeB, AlNiCo, SmCo и ферритовые магниты. Однако использование критически важных редкоземельных элементов, таких как Dy и Nd, может увеличить стоимость магнитов на основе NdFeB и ограничить поставки. Уменьшая использование редкоземельных элементов, можно снизить стоимость магнита и разнообразить линейку магнитов.

Процесс производства спеченных постоянных магнитов включает измельчение сплавов в мелкий порошок и выравнивание частиц порошка в сильном внешнем магнитном поле. Затем выровненные частицы порошка уплотняются посредством холодного изостатического прессования или других методов прессования. Далее сырая часть спекается, подвергается термообработке и механической обработке для придания желаемой геометрии. Для связанных магнитов порошки магнитных сплавов смешивают с полимерами, а затем формуют в желаемые формы путем сжатия или литья под давлением. Аддитивное производство потенциально может обеспечить как устойчивость, так и снижение затрат при производстве магнитов, а также сократить этапы механической обработки и создание сложных геометрических форм без использования пресс-форм. На данном этапе магнитные свойства магнитов на связке из NdFeB, напечатанных на 3*D*-принтере, во многом сравнимы со свойствами промышленных магнитов на связке NdFeB [47]. Эти промышленные магниты обычно производятся методом литья под давлением (IM). Однако магнитные свойства напечатанных магнитов зависят от технологии печати, плотности напечатанных деталей и химического состава нити или порошковой смеси, используемой в 3*D*-печати.

Технология порошкового слоя на основе *SLM* технологии перспективна при печати на магнитах с плотностью выше 90% [48]. В этом процессе АТ на основе лазера может вызвают значительные трещины и остаточные напряжения в печатных магнитах, которые могут отрицательно повлиять на магнитные и механические свойства магнитов. Таким образом, оптимизация параметров лазера, таких как правильный выбор скорости сканирования и мощности лазера, может привести к оптимальным характеристикам магнитных свойств печатных магнитов. Кроме того, оптимизация шаблона лазерного сканирования также может помочь в практическом распределении тепла внутри печатного магнита, что может помочь улучшить его общие характеристики. Заявленная магнитная индукция напечатанного на основе лазера магнита составляет около 0,55 Т.

Для печати магнитов NdFeB широко исследуются технологии экструзии материалов и струйной печати связующего, в которых не используется лазер в качестве

источника энергии. Магнитные свойства NdFeB, полученного с помощью *BJP* технологии, имеют аналогичные свойства по сравнению с NdFeB, полученным с помощью метода наплавленного осаждения (*FDM*), технологии в рамках экструзии материалов, как показано в [49]. У них схожие характеристики по плотности, остаточной плотности потока и собственной коэрцитивности [50]. Магниты, изготовленные с помощью *BJP* технологии, имеют значение плотности около 3,5 г / см3, что примерно выше 40% от теоретической плотности *NdFeB*. Одной из текущих проблем при изготовлении магнитов с помощью BJP является увеличение объемного содержания порошка NdFeB в печатных деталях, что может помочь улучшить плотность магнита и остаточную магнитную индукцию. Проникновение сплавов NdCuCo и PrCuCo в магниты *BJP* в исходном состоянии может помочь улучшить плотность и механическую целостность магнитов и внутреннюю коэрцитивную силу, как показано в [51].

Однако магниты из NdFeB, изготовленные с помощью *BAAM* технолгии, превосходят магниты, изготовленные с использованием других технологий печати [52]. Плотность магнитов *BAAM* примерно на 20% выше по сравнению с магнитами *BJP*, в то время как плотность остаточного потока и максимальное произведение энергии на 20% и 40% лучше соответственно. Магнитные свойства магнитов *BAAM* могут быть дополнительно улучшены за счет более высокого объемного процентного содержания магнитного порошка, используемого в смеси для печати [53]. Прямое сравнение с коммерческими литыми под давлением магнитами NdFeB показывает конкурентоспособные характеристики магнитов *BAAM* с точки зрения собственной коэрцитивной силы, остаточной плотности потока и произведения энергии магнита. Тепловые характеристики магнитов *BAAM* также демонстрируют аналогичное поведение по сравнению с магнитами, изготовленными литьем под давлением. Ухудшение характеристик магнита *BAAM* в зависимости от температуры показывает аналогичную отрицательную тенденцию при повышении температуры окружающей среды. Краткое сравнение текущего состояния магнитных свойств для различных технологий аддитивного производства, а также магнитов, полученных литьем под давлением, показано в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение характеристик промышленных полимерных магнитов и магнитов из NdFeB, изготовленных на основе АТ.

Метод изготовления	Плотность (г/см^3)	B_r (Т)	H_{ci} (кА/м)	$(BH)_{max}$ (МГсЭ)
IM	3,85-5.7	0,22-0,68	135-463	3.3-9.4
BJP	3,3-3,86	0,3-0,42	700-1100	2.4-3.8
BAAM	4,9-5,2	0.51-0.58	688-708	5.3-5.47
FDM	3,53	0.3	990	-

Исследования аддитивных магнитов из AlNiCo показывают многообещающие результаты для их применения в электрических машинах. Магниты из AlNiCo, напечатанные на 3D-принтере с помощью технологии LENS, могут достигать максимального энергетического продукта $(BH)_{max}$ со значениями от 48% до 66,7% по сравнению с промышленными спеченными или литыми магнитами из AlNiCo [54]. Что касается собственной коэрцитивной силы напечатанных магнитов из AlNiCo, она эквивалентна коммерческим магнитам из AlNiCo и варьируется от 140 кА / м до 160 кА / м. Остаточная магнитная индукция B_r печатных магнитов из AlNiCo варьируется от 0,75 Тл до 0,92 Тл, что примерно на 10-15% ниже, чем обычно значения, встречающиеся в коммерческом AlNiCo. Эти первые результаты показывают конкурентоспособность 3D-печати как альтернативного процесса производства постоянных магнитов AlNiCo. Здесь оптимизация процесса печати, а также дальнейшие исследования состава материалов могут потенциально производить аддитивно производимый AlNiCo с магнитными свойствами, превышающими коммерческие эквиваленты. Одним из ключевых преимуществ магнитов AlNiCo является то, что максимальное значение (BH) AlNiCo может оставаться относительно постоянным при температурах до 300 ° C. Таким образом, возможность иметь альтернативную технологию изготовления магнитов AlNiCo выгодна для области электрических машин, где высокая рабочая температура является важным фактором.

Формование магнитных структур для электрических машин обычно можно разделить на две группы: традиционные методы оптимизации и оптимизация топологии.

Для традиционных методов расчета математические модели и анализ чувствительности обычно используются на предварительно выбранном геометрическом шаблоне электрической машины [55, 56]. Традиционная оптимизация, которая обычно основана на эволюционных алгоритмах многоцелевой оптимизации, дополнительно уточняет форму магнитных структур для повышения производительности машины. В результате время проектирования магнитных структур уникальной формы для электрических машин может быть значительным.

ТО все чаще применяется в магнитных устройствах [57] и при проектировании электрических машин, особенно на уровне компонентов, таких как магнитопроводы и постоянные магниты [58, 59]. В общем, ТО исследует оптимальное распределение одного или нескольких материалов в пределах определенного проектного пространства. По сравнению с обычными методами оптимизации формы, он предлагает дополнительную гибкость в оптимизации геометрии магнитных компонентов для достижения желаемых характеристик. Таким образом, ТО может давать уникальные формы, которые обычно невозможно реализовать с помощью обычного подхода к оптимизации.

Методы оптимизации топологии

В поисках уникальной и оптимальной геометрии, изготовленной из одного или нескольких материалов, ТО может использовать такие подходы, как метод включения / выключения (*ON/OFF*) и метод, основанный на плотности. Для метода включения / выключения пространство дизайна обычно делится на ячейки или помещается в структуру, подобную сетке. Каждая ячейка затем представлена переменной, такой как нормализованная плотность p_n, которой можно присвоить значение ноль или единица. Ноль и единица указывают на отсутствие и наличие материала соответственно. Характер распределения материала может быть определен путем выбора целевых функций и использования эволюционного многоцелевого или градиентного алгоритма. Таким образом, в окончательной конструкции, оптимизированной для топологии с помощью метода включения / выключения, она обычно имеет нестандартную геометрию.

Метод на основе плотности присваивает каждой ячейке непрерывное значение от нуля до единицы. Вариант метода на основе плотности применен к сердечнику ротора синхронной машины с постоянными магнитами в [60]. В данной работе оптимизация топологии на основе магнитных полей направлена на максимальное увеличение среднего крутящего момента при одновременном ограничении пульсаций крутящего момента и приводит к уникальной конструкции сердечника ротора, как показано на рисунке 5. Белые области в сердечнике ротора представляют постоянный магнит, а темно-красные и темно-синие области представляют железо и воздух соответственно. Между ними находятся области с промежуточными значениями плотности, которые представлены разными оттенками цветов.

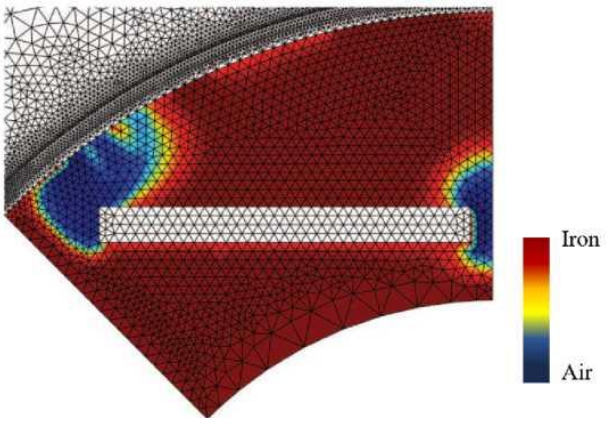


Рис. 5. Иллюстрация оптимизации топологии на основе плотности для сердечника ротора синхронной машины с внутренним постоянным магнитом [60].

Fig. 5. Illustration of density-based topology optimization for the rotor core of a synchronous machine with an internal permanent magnet [60].

Оптимизация топологии на основе магнитных полей может привести к созданию уникальных конструкций, обеспечивающих желаемые электромагнитные характеристики. Эти уникальные конструкции также создают проблемы при изготовлении, которые необходимо учитывать. Использование исключительно алгоритма ТО на основе магнитов приводит к созданию конструкций, оптимизированных только для электромагнитных

характеристик. Поскольку механическая прочность конструкции не входит в число целей оптимизации, механическая целостность конструкции может быть нарушена. Конструкция посчитанная на основе ТО с уникальным распределением воздушных карманов показана на рисунке 6. В данной работе ТО не включает анализ механических напряжений в областях железа, прилегающих к воздушным карманам. Это может привести к разрушению конструкции в реальных условиях эксплуатации, когда соседние участки железа могут подвергаться нагрузкам от 240 МПа до более 450 МПа. Сочетание прочностного и электромагнитного анализа может предложить компромиссные решения для решения этой проблемы. В работах [61, 62] топологическая оптимизация роторов достигается за счет интеграции анализа магнитной и механической структуры.

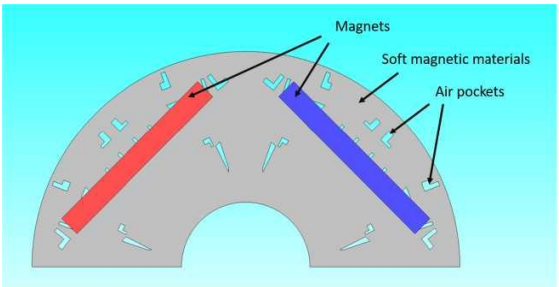


Рис. 6. Пример оптимизации магнитной топологии сердечника ротора синхронной машины с внутренними постоянными магнитами, адаптированный из [62]. Области железа, прилегающие к воздушным карманам и магнитам, могут подвергаться высоким механическим нагрузкам.

Fig. 6. An example of optimizing the magnetic topology of the rotor core of a synchronous machine with internal permanent magnets, adapted from [62]. Areas of iron adjacent to air pockets and magnets can be subjected to high mechanical loads.

Поскольку ТО все чаще применяется при разработке уникальных геометрических форм для электрических машин, технологичность уникальных конструкций магнитных сердечников не менее важна. Сложности конструкции могут увеличить стоимость производства листов электротехнической стали. Аддитивное производство потенциально может преодолеть трудности, наблюдаемые при традиционных методах производства, и в некоторых случаях является единственным жизнеспособным производственным решением [63].

Последние достижения в области АТ, а также распространение его применения в производстве магнитных компонентов для электрических машин возродили ТО как передовой инструмент проектирования. Объединение ТО и АТ потенциально может привести к разработке магнитных компонентов, свойства и геометрия которых сложны. Исследования по интеграции ТО в АТ при производстве магнитных компонентов для электрических машин показали очень многообещающие результаты. В работе [64] оптимизированная по топологии конструкция сердечника ротора машины с постоянными магнитами аддитивно производится с помощью процесса SLM, как показано на рисунке 7. Здесь алгоритм ТО объединяет этапы электромагнитной и структурной оптимизации для достижения геометрии сердечника ротора с уменьшением веса на 50% с учетом максимального напряжения в пределах предела текучести материала. Результат этой работы подчеркивает использование мультифизической ТО в качестве передового инструмента проектирования для АТ при разработке новых нетрадиционных электрических машин.

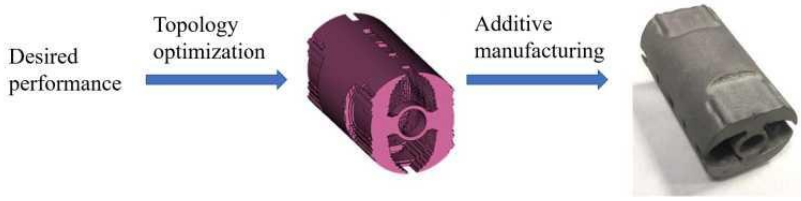


Рис.7. Оптимизированный сердечник ротора на основе ТО. Конструкция аддитивно изготавливается с помощью SLM [64].

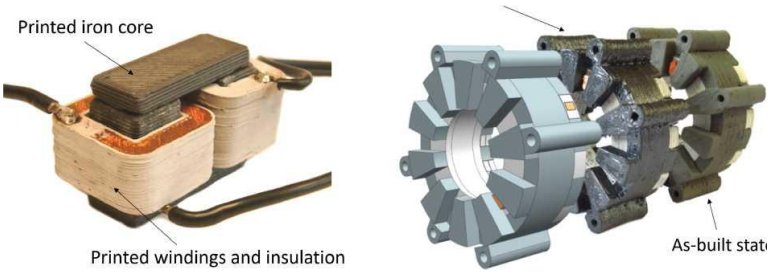
Fig. 7. Optimized rotor core based on TO. The design is additively manufactured using SLM [64].

Обсуждение

Внедрение АТ для магнитных компонентов в электрических машинах все еще находится на начальной стадии. Общие темы исследований по применению технологий АТ для электрических машин сосредоточены либо на понимании и улучшении характеристик отдельных компонентов, либо на использовании свободы при проектировании, присущей АТ. Понимание характеристик деталей, изготавливаемых аддитивным способом, может способствовать дальнейшему внедрению АТ для электрических машин, а также их интеграции с оптимизацией топологии в качестве инструмента проектирования.

В настоящее время существует возможность разработки магнитных материалов с полной плотностью печати для электрических машин. Пористость можно наблюдать при микроструктурном анализе напечатанных железо-кремниевых и напечатанных магнитов. Пористость, трещины и остаточные напряжения в процессе печати обычно ухудшают как магнитные, так и механические свойства деталей, напечатанных на 3D-принтере. Эти дефекты снижают относительную проницаемость, магнитное насыщение, характеристики потерь в железе в печатных магнитно-мягких материалах, а также уменьшают остаточную магнитную индукцию и максимальную энергетическую продукцию в напечатанных постоянных магнитах. Печатные железные сердечники и постоянные магниты, если они используются в роторах электрических машин, могут быть подвержены нагрузкам при высокой рабочей скорости. Это потенциально может привести к проблемам с механической целостностью электрических машин. Однако улучшение этих магнитных и механических свойств возможно за счет использования таких методов, как инфильтрация материала или термические методы постобработки.

На текущем этапе большинство АТ используется для отдельных компонентов, с использованием одного материала для печати. Затем печатные компоненты собираются вместе с компонентами, изготовленными традиционным способом, чтобы сформировать электрические машины. Проблемы при печати на нескольких материалах возникают из-за различий в характеристиках материалов. Успешное применение АТ из нескольких материалов может открыть возможности для печати всей электрической машины за один шаг. Ранние исследования АТ из нескольких материалов для электрических машин показали обнадеживающие результаты, фокусируясь одновременно на печати сплавов железа, проводов и изоляции. Время сборки сердечника ротора из одного материала на рисунке 16 составляет около 48 часов. Однако необходимы дальнейшие исследования и разработки для улучшения процесса печати в направлении массового производства [65,66].



а) б)

Рис. 8. Примеры печати нескольких материалов для электрических машин: железный сердечник, проводники и керамическая изоляция [65].
а) Трансформатор.
б) Статор.

Fig. 8. Examples of printing several materials for electrical machines: iron core, conductors, and ceramic insulation [65].
a) Transformer.
b) Stator.

Поскольку АТ становится производственным методом реализации для ТО, остаются проблемы с объединением этих двух технологий. Поскольку АТ - это технология изготовления на основе слоев, печатные детали могут страдать от некоторой степени анизотропии. Электромагнитные свойства могут немного отличаться по разным направлениям. Формулировка алгоритма оптимизации топологии должна учитывать эффект анизотропии при применении к задаче трехмерной оптимизации. Еще одна проблема, связанная с ТО, - это объем вычислений. Оптимизация только сердечника ротора с постоянным магнитом с помощью генетического алгоритма может занять до сотен поколений, чтобы привести к фронту Парето. Таким образом, требуются значительные вычислительные мощности для многоцелевой, мультифизической ТО,

состоящей из нескольких материалов.

Выводы

В данной статье представлены текущие исследования и тенденции в области применения аддитивного производства, оптимизации топологии и их интеграции с магнитными компонентами электрических машин. В качестве перспективной технологии аддитивное производство обеспечивает оптимизацию топологии, позволяющую создавать уникальные трехмерные геометрические формы, которые сложно изготовить обычными методами. Успешные комбинации аддитивного производства и оптимизации топологии при изготовлении как железного сердечника, так и постоянного магнита с желаемыми характеристиками показывают большой потенциал в качестве инструмента проектирования для электрических машин.

Таким образом, аддитивные технологии предлагает экономичный метод изготовления полимерных магнитов без ограничений по геометрии и количеству.

Однако, следующие проблемы еще предстоит решить для содействия промышленному применению:

1) Необходимо детальное исследование микроструктуры и остаточного напряжения в детали для оптимизации параметров печати.

2) Оптимизация диаметров экструзионного сопла, температуры экструзии и размеров частиц исходного магнита.

3) Необходимо разработать и внедрить зрелую систему для выравнивания магнитного поля анизотропного порошка во время процесса печати.

4) Технико-экономический анализ аддитивных технологий для того, чтобы конкурировать с традиционными методами изготовления полимерных магнитов.

Литература

1. Brown D.N., Wu Z., He F. et al. Dysprosium-free melt-spun permanent magnets // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. V. 26. pp. 1–8.

2. Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М. Ф. и др. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 58-66.

3. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., Петров Т.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 38-48.

4. Green J.A. The defense implications of rare earth shortages // National center for policy analysis [Электронный ресурс]. URL: http://www.ncpa.org/pub/ ib112 (дата обращения: 17.03.2021).

5. Buchert M., Goldmann D., Schüler-Hainsch, E., Treffer, F. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität Untersuchung im Rahmen des Projektes «Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM» [Resource efficiency and resource-policy aspects of the electromobility system - Study under the auspices of the project Optimisation of environmental potential from electric vehicles - integrated assessment of vehicle use and the energy industry – OPTUM]; Oeko-Institut e.V.; TU Clausthal, IFAD, Daimler AG, Umicore AG & Co. KG, 2012.

6. Грачева Е.И., Абдуллазянов Р.Э., Алимова А.Н. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 53-65.

7. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В. и др. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 7-8. С. 107-116.

8. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 77-85.

9. Гибадуллин Р.Р., Цветков А.Н., Ившин И.В., и др. Бездатчиковый метод контроля положения подвижного элемента электрической машины возвратно-поступательного действия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 133-143.

10. Elwert T. et al. Recycling of ndfeb magnets from electric drive motors of (hybrid) electric vehicles //Journal of Sustainable Metallurgy. 2017. Т. 3. №. 1. С. 108-121. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0085-1

11. Yang Y. et al. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review //Journal of Sustainable Metallurgy. 2017. Т. 3. №. 1. С. 122-149. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4

12. Kumari A. et al. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects //Waste Management. 2018. Т. 75. С. 486-498.

13. Yu Y. et al. The price evolution of wind turbines in China: A study based on the modified multi-factor learning curve //Renewable Energy. – 2017. – Т. 103. – С. 522-536.

14. Ganesan A.U. et al. Performance Analysis of Single-Phase Electrical Machine for Military Applications // Energies. 2019. Т. 12. №. 12. С. 2285.

15. Huber C. et al. 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer // Applied Physics Letters. 2016. Т. 109. №. 16. С. 162401.

16. Khazdozian H.A. et al. Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets // AIP Advances. 2018. Т. 8. №. 5. С. 056722.

17. Yang F. et al. 3D printing of NdFeB bonded magnets with SrFe12O19 addition // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Т. 779. С. 900-907.

18. Li L. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // Scientific reports. 2016. Т. 6. №. 1. С. 1-7.

19. Li L. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges // Scripta Materialia. 2017. Т. 135. С. 100-104.

20. Paranthaman M. P. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process // Jom. 2016. Т. 68. №. 7. С. 1978-1982.

21. Yamazaki K., Mukaiyama H., Daniel L. Effects of multi-axial mechanical stress on loss characteristics of electrical steel sheets and interior permanent magnet machines // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Т. 54. №. 3. С. 1-4.

22. Yamazaki K. et al. Characteristics improvement of claw-pole alternators by reducing armature reaction // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2017. С. 1-6.

23. Kustas A.B. et al. Characterization of the Fe-Co-1.5 V soft ferromagnetic alloy processed by Laser Engineered Net Shaping (LENS) // Additive Manufacturing. 2018. Т. 21. С. 41-52.

24. Копылов А.М., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р. и др. Разработка электрической машины возвратно-поступательного действия модульного типа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9-10. С. 126-132.

25. Geng J. et al. Bulk combinatorial synthesis and high throughput characterization for rapid assessment of magnetic materials: Application of laser engineered net shaping (lens™) // Jom. 2016. V. 68. №. 7. pp. 1972-1977.

26. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., и др. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 1(41). С. 3-9.

27. Mikler C.V. et al. Laser additive processing of Ni-Fe-V and Ni-Fe-Mo permalloys: microstructure and magnetic properties // Materials Letters. 2017. V. 192. pp. 9-11.

28. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92.

29. Garibaldi M. et al. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // Journal of Mechanical Design. 2019. V.141. №. 7.

30. McGarry C., McDonald A., Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019. pp. 656-663.

31. Silbernagel C. Investigation of the design, manufacture and testing of additively manufactured coils for electric motor applications : дис. University of Nottingham, 2019.

32. Wu F., EL-Refaie A.M. Toward additively manufactured electrical machines: opportunities and challenges // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019. V. 56. №. 2. pp 1306-1320.

33. Wrobel R., Mecrow B.A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020. V. 35.

№. 2. pp. 1054-1064.

34. Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., и др. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 10-18.

35. Krings A. et al. Soft magnetic material status and trends in electric machines //IEEE transactions on industrial electronics. 2016. V. 64. №. 3. pp. 2405-2414.

36. Libert F., Soulard J. Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings // 2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives-PEMD 2006. IET, 2006. pp. 676-680.

37. Jack A.G. et al. Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings // IEEE Transactions on industry applications. 2000. V. 36. №. 4. pp. 1077-1084.

38. Zhang Z.Y. et al. Metal 3D printing of synchronous reluctance motor //2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2016. Pp. 1125-1128.

39. Zhang Z.Y. et al. Characteristic comparison of transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor fabrication based on 2D lamination and 3D printing //2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2015. pp. 894-897.

40. Tseng G.M. et al. Application of additive manufacturing for low torque ripple of 6/4 switched reluctance motor // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2016. Pp. 1-4.

41. Garibaldi M. et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9% wt Si soft magnets //Materials Characterization. 2018. V. 143. Pp.144-151.

42. Jhong K.J., Huang W.C., Lee W.H. Microstructure and magnetic properties of magnetic material fabricated by selective laser melting // Physics Procedia. 2016. V. 83. pp. 818-824.

43. Lammers S. et al. Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine // 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2016. Pp. 41-45.

44. Garibaldi M. et al. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing // Scripta Materialia. 2018. V. 142. Pp. 121-125.

45. Сафин А.Р., Петров Т.И., Копылов А.М. и др. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 2(46). С. 45-53.

46. Garibaldi M. et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting // Acta Materialia. 2016. V. 110. pp. 207-216.

47. Li L. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // Scientific reports. 2016. V. 6. №. 1. pp. 1-7.

48. Urban N., Huber F., Franke J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting // 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE, 2017. Pp. 1-5.

49. Compton B. G. et al. Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets //Materials and Manufacturing Processes. 2018. V. 33. №. 1. pp. 109-113.

50. Paranthaman M. P. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process // Jom.2016. V. 68. №. 7. Pp. 1978-1982.

51. Li L. et al. A novel method combining additive manufacturing and alloy infiltration for NdFeB bonded magnet fabrication // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. – V. 438. pp. 163-167.

52. Li L. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges // Scripta Materialia. 2017. V. 135. Pp. 100-104.

53. Li L. et al. Fabrication of highly dense isotropic Nd-Fe-B nylon bonded magnets via extrusion-based additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. V. 21. pp. 495-500.

54. White E.M. H. et al. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. V 53. №. 11. pp. 1-6.

55. Pham T.Q., Foster S.N. Additive Manufacturing of Non-homogeneous Magnetic Cores for Electrical Machines Opportunities and Challenges // 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2020. V 1. Pp. 1623-1629.

56. McGarry C., McDonald A., Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019. pp. 656-663.

57. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 65-74.

58. Safin A., Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. V. 220.

59. Petrov T., Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization //E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01016.

60. Hermann A.N.A., Mijatovic N., Henriksen M. L. Topology optimisation of PMSM rotor for pump application // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2016. pp. 2119-2125.

61. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01049.

62. Guo F. et al. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. V. 56. №. 4. pp. 3656-3667.

63. Liu L. et al. Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. №. 4. pp. 3541-3547.

64. Garibaldi M. et al. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // Journal of Mechanical Design. 2019. V. 141. №. 7.

65. Studnitzky T. et al. 3D Screen Printing-Mass Production for Metals, Ceramics and its Combinations // Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC. 2016. С. 9-13.

66. Dadabaev S.T., Gracheva E.I., Dadabaeva Z.A. Study of Starting Transition Processes of Asynchronous Motor at a Lowered Mains Voltage Frequency // International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Springer, Cham, 2020. pp 206-213.

Авторы публикации

Сафин Альфред Робертович – д-р. техн. наук, профессор кафедры Электроснабжение промышленных предприятий, Казанский государственный энергетический университет. Email:sarkazan@bk.ru.

Ranjan Kumar Behera – Ph.D., доцент кафедры Электротехники, Индийский технологический институт, Индия, Kanpa Road, Bihta, г. Патна.

References

1. Brown DN, Wu Z, He F. et al. Dysprosium-free melt-spun permanent magnets. *Journal Physics.: Condens. Matter.* 2014;26:1–8.

2. Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF, et al. Stand for post-repair tests of asynchronous motors with voltage up to 1000 V. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2019;21(3-4):58-66. doi 10.30724 / 1998-9903-2019-21-3-4-58-66.

3. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply with a free piston engine based on a synchronous electric machine of reciprocating action with permanent magnets. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.*2020; 22 (1):38-48. doi 10.30724 / 1998-9903-2020-22-1-38-48.

4. Green JA. The defense implications of rare earth shortages. *National center for policy analysis [Electronic resource]*. URL: http://www.ncpa.org/pub/ ib112 (date of the application: 17.03.2021).

5. Buchert M, Goldmann D, Schüler-Hainsch E, et al. Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität Untersuchung im Rahmen des Projektes «Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM». Oeko-Institut e.V. TU Clausthal. IFAD. Daimler AG. Umicore AG & Co. KG. 2012.

6. Gracheva EI, Abdullazyanov RE, Alimova A.N. Analysis and methods of calculating active power and electricity losses in low-voltage shop networks. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2018; 4 (40):53-65.

7. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV. et al. Model of the control system of the pumping chair based on synchronous motors with sensorless method. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*.2018; 20(7-8):107-116.

8. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM. et al. Development of a method for topological optimization of electrical machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*.2018;4(40):77-85.

9. Gibadullin RR, Tsvetkov AN, Ivshin IV., et al. A sensorless method for monitoring the position of a moving element of an electric machine of reciprocating action. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2017; 19(7-8): 133-143.

10. Elwert T, Goldman D, Roemer F. et al. Recycling of ndfeb magnets from electric drive motors of (hybrid) electric vehicles. *Journal of Sustainable Metallurgy.* 2017; 3(1) : 108-121. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0085-1

11. Yang Y, Walton A, Sheridan R. et al. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *Journal of Sustainable Metallurgy.* 2017; 3(1):122-149. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4.

12. Kumari A, Sinha MK, Pramanik S. et al. Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management.* 2018; 75: 486-498.

13. Yu Y, Li H, Che Y. et al. The price evolution of wind turbines in China: A study based on the modified multi-factor learning curve. *Renewable Energy*. 2017; 103: 522-536.

14. Ganesan AU, Nandhagopal S, Venkat AS. Performance Analysis of Single-Phase Electrical Machine for Military Applications. *Energies*. 2019; 12(12): 2285.

15. Huber C, Abert C, Buckner F. et al. 3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer. *Applied Physics Letters*. 2016;109(16):162401.

16. Khazdozian HA, Manzano JS, Gandha K. et al. Recycled Sm-Co bonded magnet filaments for 3D printing of magnets. *AIP Advances.* 2018; 8 (5): 056722.

17. Yang F, Zhang X, Guo Z. et al. 3D printing of NdFeB bonded magnets with SrFe12O19 addition.*Journal of Alloys and Compounds.* 2019; 779: 900-907.

18. Li L, Tirado A, Nlebedim IC. et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Scientific reports.* 2016; 6(1): 1-7.

19. Li L, Post B, Kunc V. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges. *Scripta Materialia*. 2017; 135: 100-104.

20. Paranthaman MP, Shafer CS, Elliott AM. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process. *Jom.* 2016; 68(7):1978-1982.

21. Yamazaki K, Mukaiyama H, Daniel L. Effects of multi-axial mechanical stress on loss characteristics of electrical steel sheets and interior permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017; 54(3): 1-4.

22. Yamazaki K, Suzuki R, Nuka M. et al. Characteristics improvement of claw-pole alternators by reducing armature reaction. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE*. 2017; 1-6.

23. Kustas AB, Susan DF, Jonson KL. et al. Characterization of the Fe-Co-1.5 V soft ferromagnetic alloy processed by Laser Engineered Net Shaping (LENS). *Additive Manufacturing.* 2018; 21: 41-52.

24. Kopylov AM, Safin AR, Gibadullin RR. et al. Development of an electric machine of reciprocating action of a modular type. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2016; 9-10: 126-132.

25. Geng J, Nlebedim IC., Besser MF. et al. Bulk combinatorial synthesis and high throughput characterization for rapid assessment of magnetic materials: Application of laser engineered net shaping (lens™). *Jom.* 2016; 68(7): 1972-1977.

26. Gracheva EI., Sadykov RR, Khusnutdinov RR. et al. Reliability and layout of low-voltage switchgears of intra-shop power supply. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2019; 11(1):3-9.

27. Mikler CV, Chaudhary V, Borkar T. et al. Laser additive processing of Ni-Fe-V and Ni-Fe-Mo permalloys: microstructure and magnetic properties. *Materials Letters.* 2017; 192: 9-11.

28. Gracheva EI, Alimova AN. Possible errors in the calculation of electricity losses in shop industrial networks. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2018; 20(11-12): 81-92. doi 10.30724 / 1998-9903-2018-20-11-12-81-92.

29. Garibaldi M, Gerada C. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2019; 141(7).

30. McGarry C, McDonald A, Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured

permanent magnets for wind turbine generators. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE*. 2019:656-663.

31. Silbernagel C. Investigation of the design, manufacture and testing of additively manufactured coils for electric motor applications: Dis. – University of Nottingham, 2019.

32. Wu F, EL-Refaie A. M. Toward additively manufactured electrical machines: opportunities and challenges . *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019; 56(2):1306-1320.

33. Wrobel R, Mecrow B. A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 2020; 35(2): 1054-1064.

34. Gracheva EI, Sadykov RR, Khusnutdinov RR, et al. Investigation of the reliability parameters of low-voltage switching devices according to the operational data of industrial enterprises. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2019; 21(1-2):10-18. doi 10.30724 / 1998-9903-2019-21-1-2-10-18.

35. Krings A, Boglietti A, Cavagnino A. Soft magnetic material status and trends in electric machines. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2016; 64(3): 2405-2414.

36. Libert F, Soulard J. Manufacturing methods of stator cores with concentrated windings. *2006 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives-PEMD 2006. IET*. 2006: 676-680.

37. Jack AG, Mecrow BC, Dickinson PG. et al. Permanent-magnet machines with powdered iron cores and prepressed windings. *IEEE Transactions on industry applications*. 2000; 36(4):1077-1084.

38. Zhang ZY, Jhong KJ, Cheng CW. et al. Metal 3D printing of synchronous reluctance motor. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE*. 2016: 1125-1128.

39. Zhang ZY, Tsai MC, Huang PW. et al. Characteristic comparison of transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor fabrication based on 2D lamination and 3D printing. *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE*. 2015: 894-897.

40. Tseng GM, Jhong KJ, Tsai MS. et al. Application of additive manufacturing for low torque ripple of 6/4 switched reluctance motor. *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE.* 2016: 1-4.

41. Garibaldi M, Ashcroft I, Hillier N. et al. Relationship between laser energy input, microstructures and magnetic properties of selective laser melted Fe-6.9% wt Si soft magnets .*Materials Characterization*. 2018;143: 144-151.

42. Jhong KJ, Huang WC, Lee W. H. Microstructure and magnetic properties of magnetic material fabricated by selective laser melting. *Physics Procedia*. 2016; 83: 818-824.

43. Lammers S, Adam G, Schmid HJ. et al. Additive Manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE*. 2016: 41-45.

44. Garibaldi M, Ashcroft I, Lemke JN. et al. Effect of annealing on the microstructure and magnetic properties of soft magnetic Fe-Si produced via laser additive manufacturing. *Scripta Materialia*. 2018; 142: 121-125

45. Safin AR, Petrov TI, Kopylov AM, et al. The method of design and topological optimization of rotors of permanent magnet synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University.* 2020; 12(2): 45-53.

46. Garibaldi M, Ashcroft I, Simonelli M, et al. Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting. *Acta Materialia*. 2016;110: 207-216.

47. Li L, Nlebedim IC, Rios O, et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Scientific reports.* 2016; 6(1): C. 1-7.

48. Urban N, Huber F, Franke J. Influences of process parameters on rare earth magnets produced by laser beam melting. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE*. 2017:1-5.

49. Compton BG, Kemp JW, Novikov TV, et al. Direct-write 3D printing of NdFeB bonded magnets. *Materials and Manufacturing Processes*. 2018; 33(1) :109-113.

50. Paranthaman MP, Shafer CS, Elliott AM. et al. Binder jetting: a novel NdFeB bonded magnet fabrication process. *Jom.*2016; 68(7): 1978-1982.

51. Li L, Tirado A, Conner BS. et al. A novel method combining additive manufacturing and alloy infiltration for NdFeB bonded magnet fabrication. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017; 438: 163-167.

52. Li L, Post B, Kunc V. et al. Additive manufacturing of near-net-shape bonded

magnets: Prospects and challenges. *Scripta Materialia*. 2017; 135: 100-104.

53. Li L, Jones K, Sales B. et al. Fabrication of highly dense isotropic Nd-Fe-B nylon bonded magnets via extrusion-based additive manufacturing . *Additive Manufacturing*. 2018; 21: 495-500.

54. White EM. H., Kassen AG, Simsek E. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2017; 53(11): 1-6.

55. Pham TQ, Foster SN. Additive Manufacturing of Non-homogeneous Magnetic Cores for Electrical Machines Opportunities and Challenges. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE.* 2020; 1: 1623-1629.

56. McGarry C, McDonald A, Alotaibi N. Optimisation of additively manufactured permanent magnets for wind turbine generators. *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE.* 2019: 656-663.

57. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and assessment of energy savings in intra-plant power supply systems. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2020; 22(2): 65-74. doi 10.30724 / 1998-9903-2020-22-2-65-74.

58. Safin A, Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020: 220.

59. Petrov T, Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2020; 178: 01016.

60. Hermann ANA, Mijatovic N, Henriksen ML. Topology optimisation of PMSM rotor for pump application. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE*. 2016: 2119-2125.

61. Petrov T, Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors . *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020; 178: 01049.

62. Guo F, Salameh M, Krishnamurthy M, et al. Multimaterial Magneto-Structural Topology Optimization of Wound Field Synchronous Machine Rotors. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2020;56(4):3656-3667.

63. Liu L, Ding C, Lu S, et al. Design and additive manufacturing of multipermeability magnetic cores. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(4) ;3541-3547.

64. Garibaldi M, Gerada C. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. *Journal of Mechanical Design*. 2019; 141(7).

65. Studnitzky T, Dressler M, Andersen O, et al. 3D Screen Printing-Mass Production for Metals, Ceramics and its Combinations. *Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC.*2016: 9-13.

66. Dadabaev ST, Gracheva EI, Dadabaeva ZA. Study of Starting Transition Processes of Asynchronous Motor at a Lowered Mains Voltage Frequency. *International Conference Sustainable Energy Systems: innovative perspectives. Springer, Cham*. 2020: 206-213.

Authors of the publication

Alfred R. Safin – Kazan State Power Engineering University. Kazan. Email: sarkazan@bk.ru.

Ranjan Kumar Behera – Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology (IIT), India, Kanpa Road, Bihta. 801103, Patna.

Получено ***01.04.2021 г.***

Отредактировано ***06.04.2021 г.***

Принято ***27.04.2021 г.***