

УДК 621.313.04

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Хнычев Д.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва,
e-mail: danila.khnychiov@mail.ru

Статья посвящена исследованию применения аддитивных технологий в конструкции электрических машин, подчеркнута их роль в оптимизации и создании инновационных решений. Целью данной статьи является обзор последних достижений в области применения аддитивных технологий в конструкциях различных типов электрических машин. Исследование основано на анализе научных статей, опубликованных за последние три года, что позволяет отразить актуальные тенденции и инновации в данной области. В рамках исследования рассмотрены конкретные примеры использования аддитивных технологий для создания катушек вентильного реактивного двигателя, магнитопроводов синхронных электродвигателей с аксиальным потоком, роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами и оптимизации магнитной системы синхронного генератора для ветроэнергетической установки. Представлены данные о сравнении новых решений на основе аддитивных технологий с традиционными конструкциями. В результате работы выявлено, что с развитием аддитивных технологий открываются новые возможности для проектирования электрических машин и оптимизации их конструкций. Дальнейшее совершенствование аддитивных технологий позволит создавать еще более эффективные электрические машины, отвечающие современным требованиям электромашиностроения. Данное исследование подчеркивает необходимость активного внедрения аддитивных технологий в проектирование и производство электрических машин.

Ключевые слова: аддитивные технологии, аддитивное производство, 3D печать, электрические машины

OVERVIEW OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE DESIGNS OF ELECTRICAL MACHINES

Khnychev D.A.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow,
e-mail: danila.khnychiov@mail.ru

The article is devoted to the study of the application of additive technologies in the design of electrical machines, emphasizing their role in optimization and creation of innovative solutions. The purpose of this article is to review the latest achievements in the field of additive technologies in the designs of various types of electrical machines. The study is based on the analysis of scientific articles published over the past three years, which allows us to reflect current trends and innovations in this field. The study considers specific examples of the use of additive technologies to create coils of a switched reluctance motor, magnetic cores of synchronous electric motors with axial flux, rotors of synchronous motors with permanent magnets and optimization of the magnetic system of a synchronous generator for a wind turbine. Data on the comparison of new solutions based on additive technologies with traditional designs are presented. As a result of the work, it was revealed that with the development of additive technologies, new opportunities for the design of electrical machines and optimization of their designs are opening up. Further improvement of additive technologies will allow creating even more efficient electrical machines that meet modern requirements of electrical engineering. This study emphasizes the need for active implementation of additive technologies in the design and production of electrical machines.

Keywords: additive technologies, additive manufacturing, 3D printing, electrical machines

Введение

В настоящее время аддитивные технологии (АТ) являются одним из ключевых инструментов для совершенствования конструкций электрических машин. Их внедрение открывает новые горизонты для создания инновационных конструкций и оптимизации существующих, что ранее было невозможно при использовании традиционных методов производства.

Благодаря АТ стало возможным изготовление деталей машин со сложной конфигурацией. Кроме того, сокращается трудоемкость производства за счет уменьшения количества технологических опера-

ций. В дополнение к этим преимуществам данная технология является практически безотходной. Все это способствует стремительному росту аддитивного производства.

Целью данного исследования является обзор последних достижений в области применения аддитивных технологий в конструкциях различных типов электрических машин. В работе рассмотрены примеры использования АТ в вентильном реактивном двигателе, синхронном электродвигателе с аксиальным потоком, синхронном двигателе с постоянными магнитами (СДПМ) и синхронном генераторе для ветроэнергетической установки (ВЭУ).

Материалы и методы исследования

В качестве материалов исследования были использованы научные статьи, опубликованные за последние три года. Поиск материалов осуществлялся по ключевым словосочетаниям: «additive technologies in electric machines», «3D printing in electric machines».

При отборе материалов учитывались следующие критерии:

1) материал написан в период с 2022 по 2024 гг.;

2) материал опубликован в рецензируемых научных журналах или конференциях;

3) тип материала: оригинальные научные статьи, обзорные статьи или материалы конференций.

Для данной обзорной статьи было отобрано 8 материалов, соответствующих указанным критериям.

Результаты исследования и их обсуждение

В некоторых работах рассматриваются новые возможности проектирования и производства сосредоточенной обмотки вентильного реактивного электродвигателя с использованием технологии 3D-печати [1, 2]. Авторы разработали и изготовили катушку трапецевидной формы из порошка Fe-Si (рис. 1). Применение данной катушки позволит значительно повысить коэффициент заполнения паза, что, в свою очередь, приведет к созданию более энергоэффективной электрической машины. Статор конструкции состоит из секций, что обеспечивает возможность размещения катушек

на зубцах. Кроме того, вместо естественного воздушного охлаждения используется внешняя рубашка с непрямым водяным охлаждением, что способствует более эффективному отведению тепла.

Для печати таких катушек возможно использование алюминия, что даст возможность снизить массу двигателя и его стоимость. Снижение веса катушки составило 32% по сравнению с обычной медной катушкой. При проведении теплового анализа с одинаковой системой охлаждения было установлено, что алюминиевые катушки, напечатанные на 3D-принтере, имеют более низкую температуру по сравнению с традиционными медными катушками. Применение таких катушек не только способствует снижению веса, но и позволяет повысить коэффициент полезного действия (КПД) и удельную мощность вентильного реактивного двигателя, что делает их перспективными для использования в различных областях, требующих высоких энергетических характеристик.

Найдена работа, посвященная исследованию создания магнитопровода статора синхронного электродвигателя с аксиальным потоком [3]. Для изготовления ярма и зубцов статора используется 3D-принтер с несколькими соплами, а в качестве материала применяется порошок Fe-Si (рис. 2). Между слоями магнитного материала наносится изолирующий слой.

В исследовании рассматриваются два метода печати сердечника: микроэкструзия и технология LPBF (Laser Powder Bed Fusion).

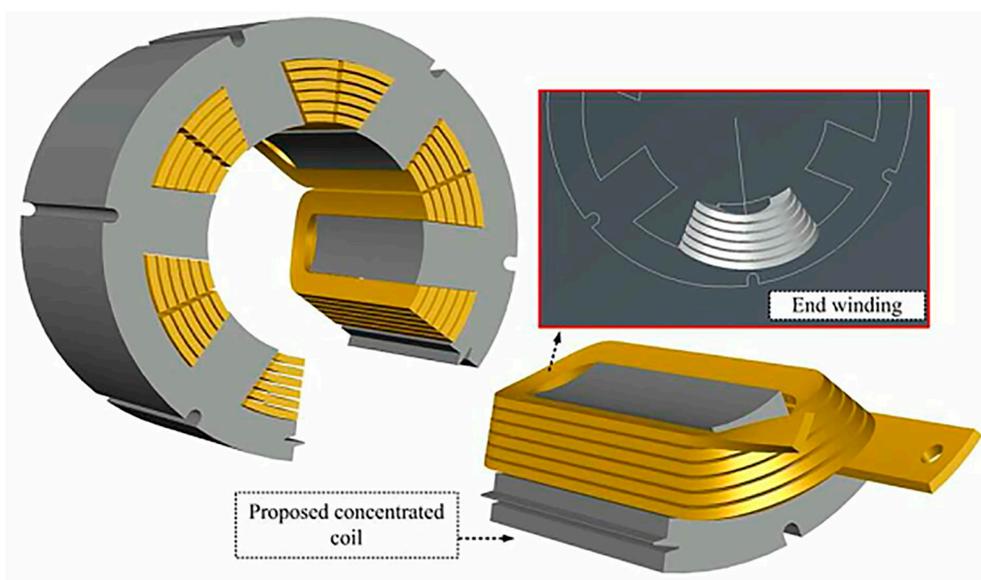


Рис. 1. Катушка трапецевидной формы [1, 2]

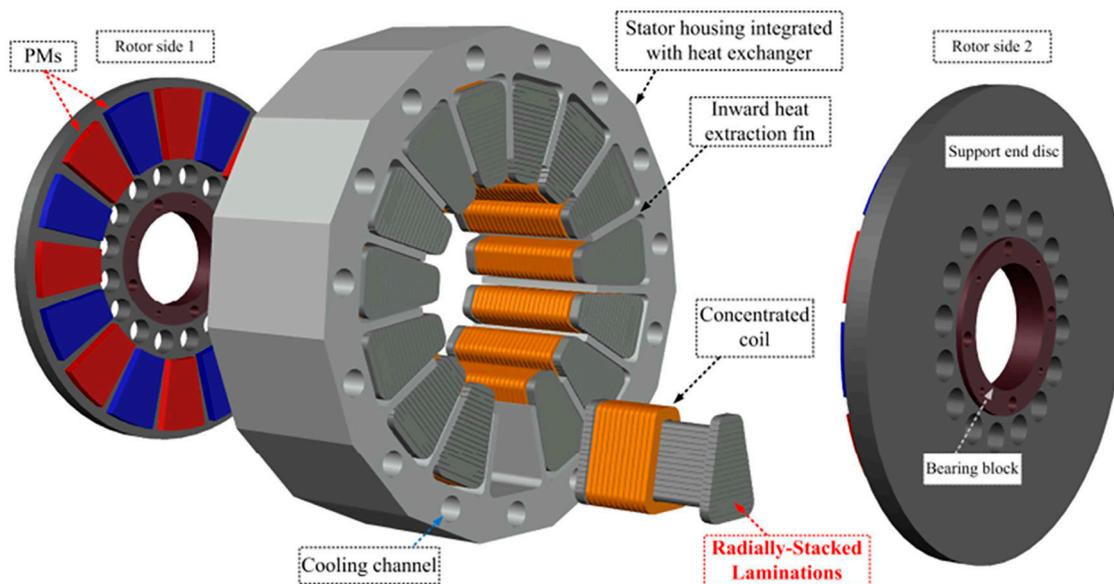


Рис. 2. Конструкция синхронного двигателя с аксиальным потоком [3]

Проведено сравнение магнитных свойств сердечников, изготовленных по данным методам, с сердечником из электротехнической стали марки М270-50А толщиной 0,5 мм. Испытания показали, что магнитопровод, изготовленный с помощью технологии LPBF, демонстрирует наибольшую площадь петли ВН, в то время как у магнитопровода из стали М270-50А она оказывается наименьшей. При анализе удельных потерь в сердечнике при частоте 50 Гц было установлено, что наибольшие потери наблюдаются

у образца, изготовленного по технологии LPBF, тогда как наименьшие потери фиксируются у магнитопровода из стали М270-50А. Эти результаты указывают на то, что микроэкструзия является более предпочтительным методом для изготовления магнитопроводов, чем технология LPBF.

Авторами в одной из работ исследовался синхронный электродвигатель с аксиальным потоком, у которого магнитопровод статора изготовлен с использованием аддитивного производства (рис. 3).

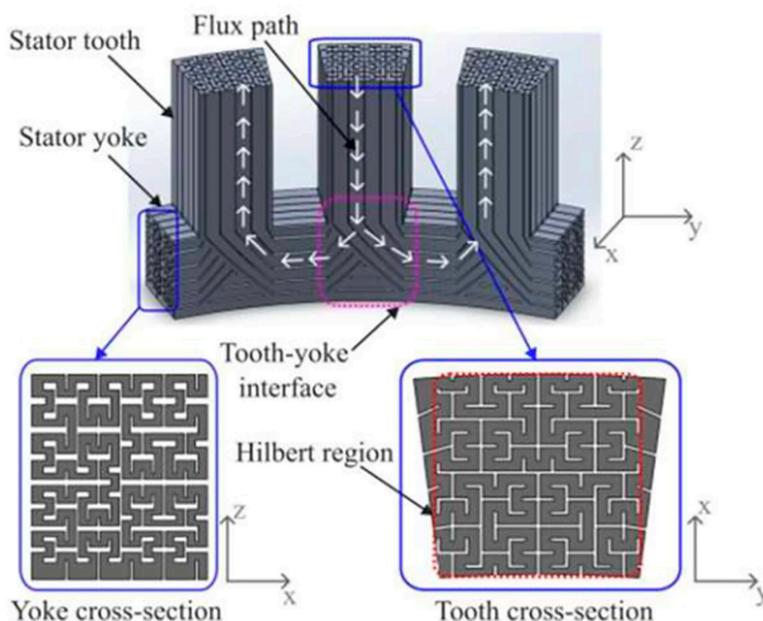


Рис. 3. Магнитопровод статора двигателя с аксиальным потоком [4]

В результате исследования был разработан статор с использованием структуры Гильберта, который был изготовлен аддитивным методом с применением металлического порошка с содержанием кремния 6,5%. Результаты экспериментов показывают, что магнитопровод, изготовленный по данной технологии, демонстрирует более низкие потери на вихревые токи по сравнению с традиционными методами производства [4].

В одном из анализируемых исследований имелась информация о разработке легкого ротора с системой воздушного охлаждения, выполненного с помощью аддитивных технологий совместно с валом (рис. 4). В результате проведенных экспериментов было подтверждено, что температура постоянных магнитов (ПМ) в данной конструкции ротора значительно ниже по срав-

нению с традиционными решениями за счет более интенсивного охлаждения [5].

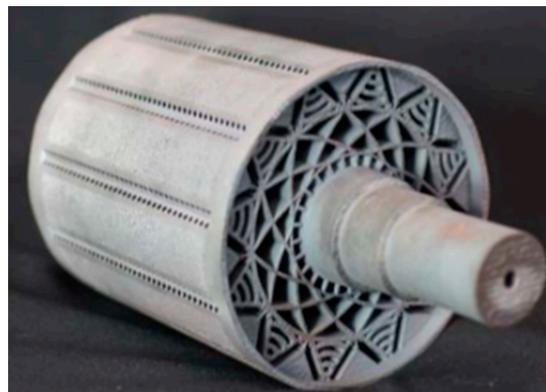


Рис. 4. Легкий ротор с системой охлаждения [5]

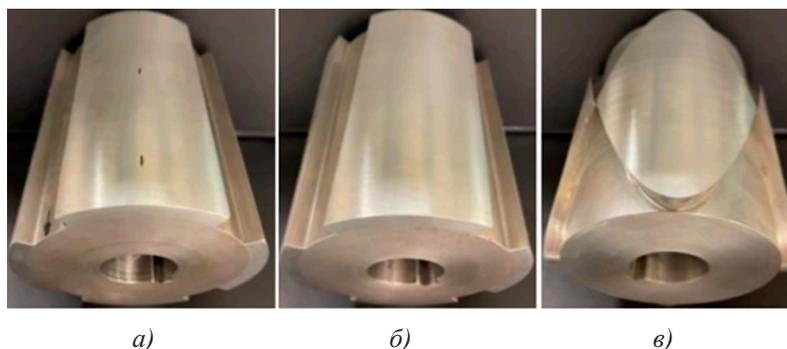


Рис. 5. Роторы с ПМ (а – прямоугольные, б – скошенные, в – в форме лепестков) [6]

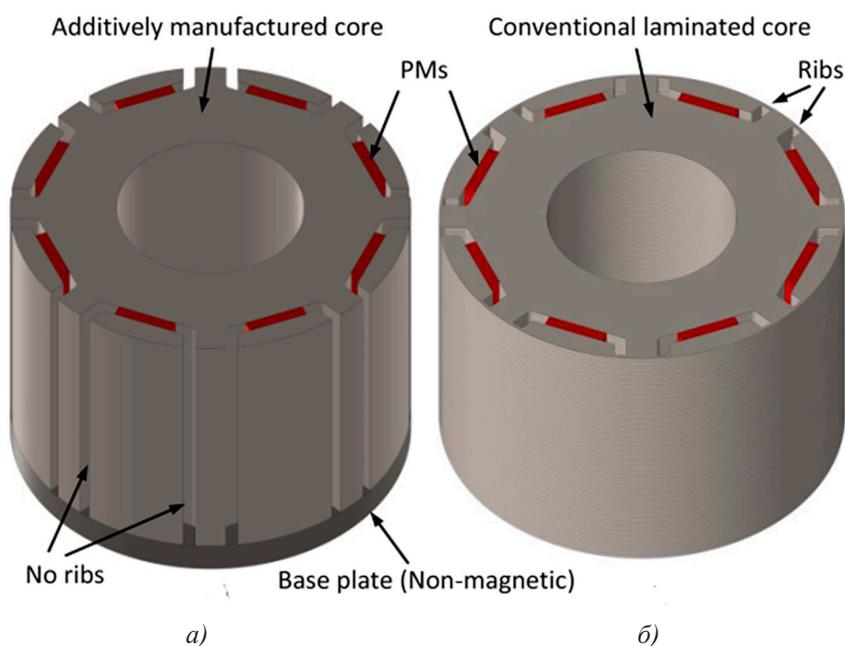


Рис. 6. Роторы с внутренним расположением ПМ (а – на основе АТ, б – базовый) [7]

В следующей статье представлены роторы с постоянными магнитами, изготовленные методом холодного напыления. Рассматриваются три типа магнитов: прямоугольной формы, скошенные и в форме лепестков (рис. 5).

Эксперименты показали, что электродвигатель с ПМ в форме лепестков демонстрирует меньшие пульсации момента по сравнению с другими образцами. Однако стоит отметить, что новая конструкция ротора с лепестковыми магнитами приводит к снижению крутящего момента более чем на 10%. Данная работа подчеркивает потенциал использования различных форм магнитов для оптимизации электродвигателей [6].

В одном из исследований авторами была представлена новая конструкция ротора без ребер с внутренним расположением постоянных магнитов, выполненная с использованием аддитивных технологий (рис. 6), и проведено сравнение с ротором базовой конструкции.

Наличие полюсных ребер необходимо для механической прочности ротора, однако они являются причиной возникновения потоков рассеяния, что негативно сказывается на эффективности работы электродвигателя. В предложенной конструкции ротор с ПМ изготавливается без ребер и печатается на немагнитной плате, которая обеспечивает механическую прочность ротора.

Параметры СДПМ

Параметр	Базовый ротор	Ротор на основе АТ
Момент, Н·м	6,1	6,6
Выходная мощность, Вт	479,1	518,4
Потери на вихревые токи в роторе, Вт	1,2	2,2
Потери в стали статора, Вт	24,9	25,1
КПД, %	83,3	84,2
Номинальная частота вращения, об/мин	750	
Потери в меди, Вт	70	

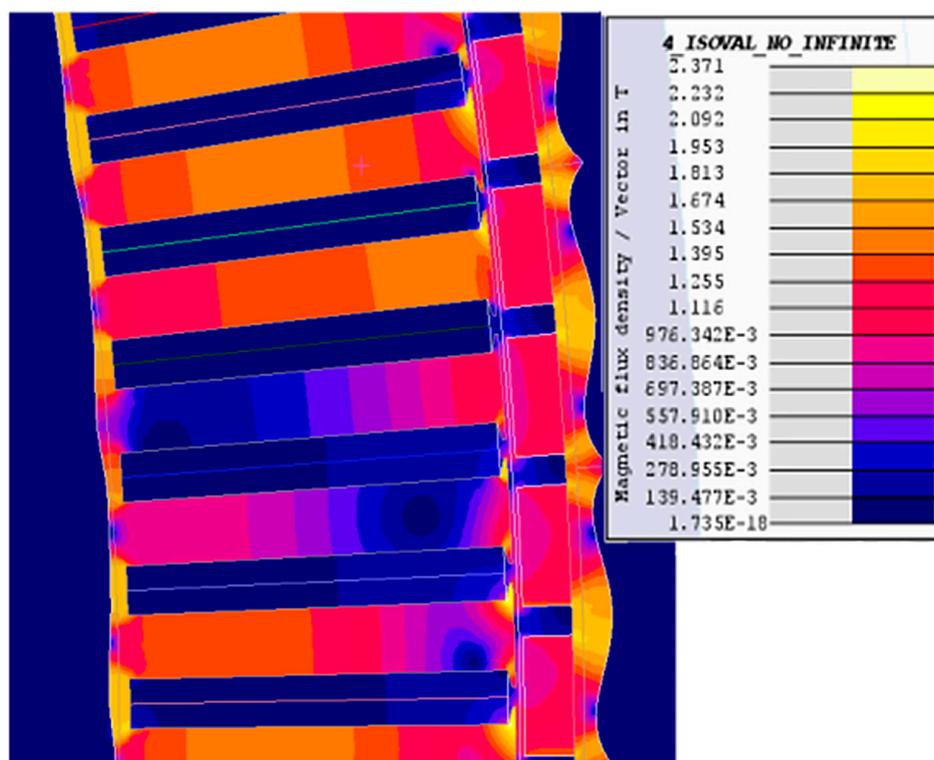


Рис. 7. Распределение индукции в генераторе с оптимизированным магнитопроводом статора и ротора [8]

Для 3D-печати ротора используется порошок Fe-Si с содержанием кремния 6,7%, что способствует повышению относительной проницаемости и удельного электрического сопротивления [7]. В таблице представлены параметры двигателя с базовой конструкцией ротора и двигателя, выполненного с применением 3D-технологий.

Следует отметить, что синхронный двигатель с предложенной конструкцией ротора демонстрирует примерно на 18% более высокие пульсации момента по сравнению с базовой моделью. Следовательно, у такого электродвигателя будут более высокие уровни шума и вибрации.

Учеными из Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (США) представлен новый подход к оптимизации синхронного генератора мощностью 15 МВт для ВЭУ, направленный на снижение массы при сохранении производительности [8]. Этот подход основан на применении аддитивного производства и использует кривые Безье (Bezier curves), которые широко применяются в автоматизированном геометрическом проектировании. Главной задачей оптимизации было создание максимального крутящего момента при минимальной массе электротехнической стали.

На рисунке 7 представлена оптимальная конструкция генератора, полученная в результате проведенной оптимизации с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Изменение формы границ магнитопроводов статора и ротора позволило снизить массу стали на 20 тонн.

Оптимизация конструкции, связанная со сложной геометрией, стала возможна благодаря применению технологии 3D-печати при производстве электрических машин. Эта технология позволяет создавать детали с высокой точностью и сложными формами, что невозможно при использовании традиционных методов производства.

Заключение

С развитием аддитивных технологий открываются новые возможности для про-

ектирования электрических машин и оптимизации их конструкций. Эти методы производства позволяют создавать детали и узлы сложной геометрии, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами. Дальнейшее совершенствование аддитивных технологий даст возможность создавать еще более эффективные электрические машины, отвечающие современным требованиям электромашиностроения.

Список литературы

1. Selema A., Van Den Abbeele J., Ibrahim M.N., Sergeant P. Novel 3D Printed Coils for High Power Density Electrical Machine and Traction Applications // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2023. P. 1-5. DOI: 10.1109/IEMDC55163.2023.10239022.
2. Selema A., Van Den Abbeele J., Ibrahim M.N., Sergeant P. Innovative 3D Printed Coil and Cooling Designs for Weight-Sensitive Energy-Saving Electrical Machine // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2023. P. 1-12. DOI: 10.1109/TTE.2023.3322522.
3. Selema A., Beretta M., Van Coppenolle M., Tiismus H., Kallaste A., Ibrahim M.N., Rombouts M., Vleugels J., Kestens L.A.I., Sergeant P. Evaluation of 3D-printed magnetic materials for additively-manufactured electrical machines // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2023. Vol. 569. P. 170426. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.170426.
4. Nishanth F., Goodall A.D., Todd I., Severson E.L. Characterization of an Axial Flux Machine With an Additively Manufactured Stator // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2023. Vol. 38. No. 4. P. 2717-2729. DOI: 10.1109/TEC.2023.3285539.
5. Bieber M., Haase M., Tasche F., Zibart A., Ponick B. Additively manufactured air-cooled lightweight rotor for an automotive electric motor // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2023. P. I-VII. DOI: 10.1109/IEMDC55163.2023.10238918.
6. Singh S., Payarou T., Bobby M., Lamarre J.M., Bernier F., Ibrahim M., Pillay P. Cold-spray additive manufacturing of a petal-shaped surface permanent magnet traction motor // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 3636-3648. DOI: 10.1109/TTE.2022.3233779.
7. Ajamloo A.M., Ibrahim M.N., Sergeant P. Design Considerations of a New IPM Rotor With Efficient Utilization of PMs Enabled by Additive Manufacturing // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 61036-61048. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3394739.
8. Sethuraman L., Vijayakumar G. A new shape optimization approach for lightweighting electric machines inspired by additive manufacturing. Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG). 2022. P. 1-7. DOI: 10.1109/INTERMAG.39746.2022.9827714.