

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Майоров¹ А.А., Сафин² А.Р.

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

²Казанский Государственный Энергетический Университет,
г. Казань, Россия

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в том, чтобы определить наиболее эффективный метод оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. В настоящее время синхронные электродвигатели с постоянными магнитами находят все большее применение в различных сферах. Для каждой определенной задачи необходимо разрабатывать синхронный электродвигатель с постоянными магнитами с определенными характеристиками (крутящим моментом, условиями охлаждения и т.д.). Для разработки оптимальной конструкции синхронного электродвигателя с постоянными магнитами используются различные методы оптимизации. ЦЕЛЬ. Обычные методы оптимизации конструкции синхронного электродвигателя с постоянными магнитами направлены на определение оптимальных значений параметризованных переменных путем их изменения в заданном диапазоне с использованием алгоритмов оптимизации. Применение такого подхода ограничивается параметризацией, которая определена опытом проектировщика и производственными ограничениями. В настоящее время вследствие развития технологий производства металлов и постоянных магнитов, аддитивных технологий, появилась возможность изготавливать металлы и постоянные магниты различных геометрических форм. Это позволило применить метод топологической оптимизации. В настоящее время топологическая оптимизация широко применяется в строительстве, а применение топологической оптимизации в проектировании синхронных электродвигателей с постоянными магнитами только сейчас получает бурное развитие. Целью является рассмотреть существующие методы оптимизации, определить плюсы и минусы каждого из методов оптимизации. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач производился сравнительный анализ различных методов оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность рассматриваемой темы. Определены наиболее эффективные методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитам. Определены условия, в которых наиболее эффективно применение того или иного метода оптимизации ротора. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье описаны различные методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. Описаны плюсы и минусы различных методов оптимизации. После изучения различных видов оптимизации, пришли к выводу, что наиболее эффективным методом оптимизации является метод оптимизации топологии, для роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель с постоянными магнитами; методы оптимизации ротора; постоянные магниты; топология.

Для цитирования: Майоров А.А., Сафин А.Р. Методы оптимизации роторов синхронных электродвигателей с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 50-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-50-65.

METHODS FOR OPTIMIZING ROTORS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

Maivorov¹ AA., Safin² AR.

¹REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia
²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Abstract: *RELEVANCE* of research is the most preferred method of efficient rotor synchronous motor with some magnets. Currently, synchronous electric motors with ethereal magnets are increasingly used in various fields. For each task, it is necessary to implement a synchronous electric motor with small magnets with desire (torque, emotional cooling and many others). In order to make the most efficient use of a synchronized motor with universal magnets, methods are applied. *TARGET.* The usual methods of standard design of a synchronous motor with original magnets are aimed at determining the optimal parameters to be applied by changing them at a given value using indicative algorithms. The application of this approach is limited by parameterization, which is determined by the experience of the designer and manufacturing constraints. At present, the development of technologies for the production of metals and magnets, it has become possible to manufacture metals and detect magnets of various geometric shapes. It is this use of the topological estimation method. At present, topological modernization of large-scale construction, the application of topological strategy in the design of synchronous electric motors with federal magnets is only now gaining rapid development. *METHODS.* When solving the tasks set, a comparative analysis of various merged for comparative analysis of various methods for comparing the rotors of synchronous electrical motors with natural magnets was carried out. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic under consideration. The most effective methods for optimizing the rotors of synchronous electrical motors with permanent magnets are determined. The conditions under which the application of one or another method of optimizing the rotor is most effective are determined. *CONCLUSION.* The article describes various methods for optimizing the rotors of permanent magnet synchronous motors. The pros and cons of various optimization methods are described after studying various types of optimizations, it was concluded that the most effective optimization method is the topology optimization method for rotors of permanent magnets synchronous motors.

Keywords: *synchronous electric motor with permanent magnets; rotor optimization methods; permanent magnets; topology.*

For citation: Maiorov AA., Safin AR. Methods for optimizing rotors of synchronous electric motors with permanent magnets. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (3): 50-65. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-50-65.

Введение (Introduction)

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами применяют во многих сферах. В настоящее время из-за энергетических и экологических проблем к электродвигателям выставляют жесткие требования. Применение более энергоэффективных, экономичных электродвигателей позволит уменьшить вред, наносимый применением, изготовлением электродвигателей. При проектировании синхронных электродвигателей с постоянными магнитами следует найти компромиссы между эффективностью, удельной мощностью и стоимостью электрической машины. В своей работе [1] Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. рассматривают различные методы оптимизации конструкций электрических машин и определили особенности популярных подходов оптимизации электрических машин. В большинстве этих методов используется параметризованная геометрия. Однако такие методы ограничивают пространство для проектирования, поскольку компоненты могут принимать форму только в пределах указанного параметра. Кроме того, подход опирается на опыт проектировщика при разработке параметризации, в свою очередь проектировщик подвержен предвзятости.

Оптимизация топологии может преодолеть ограничения параметрической оптимизации, позволяя более свободно исследовать проектное пространство. Впервые эта методика была предложена для решения проблем в проектировании конструкций. Существует большое количество статей по топологической оптимизации. В работе [2] авторы Deaton J.D., Grandhi R.V. рассматривают структуру топологической оптимизации. В работе [3] авторы Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. описывают метод оптимизации синхронных электродвигателей. В работе [4] авторы Ле, Нго Фьонг применяют метод генетической оптимизации при оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными

магнитами. В работе [5] авторы Sigmund S., Maute K. рассматривают различные подходы при топологической оптимизации. В работе [6] авторы Escgenauer H.A., Olhoff N. проводят обзор топологической оптимизации для сплошных структур. В работе [7] авторы Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. провели обзор метода топологической оптимизации при вибрации. Не так давно топологическая оптимизация была адаптирована для применения в электрических машинах. В работе [8] авторы Guo F., Brown I.P. рассматривают оптимизацию синхронной реактивной машины топологическим и структурным методом. В работах [9, 54, 55] автор Петров Т.И. рассмотрел возможность оптимизации синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводного комплекса. В работе [10] авторы Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. рассматривают применение аддитивных технологий при производстве сердечников электрических машин. В работе [11] авторы Sato T., Watanade K., Igarashi H. рассматривают возможность много материальной оптимизации.

Цель работы: обзор и выбор наиболее эффективных методов оптимизации ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Определение условий для применения того или иного метода оптимизации ротора.

Теоретическая значимость исследования: заключается в том, чтобы выбранные методы оптимизации позволяли эффективно и быстро выполнять работы, связанные с проектированием или оптимизацией электродвигателей с постоянными магнитами.

Практическая значимость: полученные результаты оптимизации конструкции электродвигателя использовать на предприятиях, связанных с изготовлением и проектированием электродвигателей. Это позволит организациям получать эффективные конструкции электродвигателей, характеристики которых наиболее схожи с требуемыми характеристиками.

Материалы и методы (Materials and methods)

Топологическая оптимизация направлена на оптимизацию, расположения материалов в пределах заданного проектного пространства, для получения наилучшего соответствия заданным параметрам электрической машины. Топологическая оптимизация дает большую степень свободы по сравнению с параметризованной формой оптимизации, так как компоненты исследования могут принимать любую форму в пределах оптимизируемого пространства.

Для более детального сравнения параметрической оптимизации и топологической оптимизации рассмотрим пример проектирования ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (рис. 1). На рис. 1а представлена параметризованная оптимизация с пятью переменными (радиусом ротора (r_p), расстояние до магнита (r_m), угол, под которым находится магнит (a_m), ширина магнита (t_m) и длина магнита (w_m)). Радиус ротора r_p будет фиксированным и будет зависеть от воздушного зазора между статором и ротором, и внутренним диаметром статора. Остальные параметры (расстояние до магнита (r_m), угол, под которым находится магнит (a_m), ширина магнита (t_m) и длина магнита (w_m)) будут изменяться с учетом определённых ограничений. Этими ограничениями могут быть плотность крутящего момента, стоимость, эффективность и так далее. Пространство проектирования для параметрической оптимизации представляет собой диапазон значений параметров, указанных на рис. 1а. Ротор будет иметь оптимальную форму такую же, как и представлено на рис. 1а.

Пример проектного пространства для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами для топологической оптимизации представлен на рис. 1б. В этом случае радиус ротора (r_p) определяется на основании проектных требований (но может быть определен посредством параметрической оптимизации). Затем ротор подразделяется на несколько подобластей или элементов. Каждому из полученных подобластей или элементов ротора задается материал (воздух, железо, постоянный магнит) и оцениваются характеристики полученной конструкции. Распределение материалов изменяется с учетом определённых ограничений до тех пор, пока цели проектирования не будут достигнуты.

На рис. 1с представлена возможная оптимальная схема топологической оптимизации. Видно, что конструкция ротора имеет нетрадиционную форму постоянных магнитов и нерегулярные пустоты. Эти пустоты не охватываются параметрической оптимизацией, показанной на рис. 1а. Топологическая оптимизация позволяет тщательно изучить проектное пространство и не ограничивается параметризацией, которая зависит от опыта проектировщика. Использование алгоритмов оптимизации на основе популяции приводит к значительной вычислительной нагрузке, по сравнению топологической оптимизацией. Применение метода топологической оптимизации позволяет оптимизировать и минимизировать время проектирование синхронных электродвигателей с постоянными

магнитами. Проблемой топологической оптимизации является конструкция: при топологической оптимизации есть вероятность получения элементов нетрадиционной геометрической формы. Нетрадиционная геометрическая форма может создать серьезную проблему при производстве элементов с использованием традиционных технологий. Результаты сравнения параметрической и топологической оптимизации представлены в таблице 1.

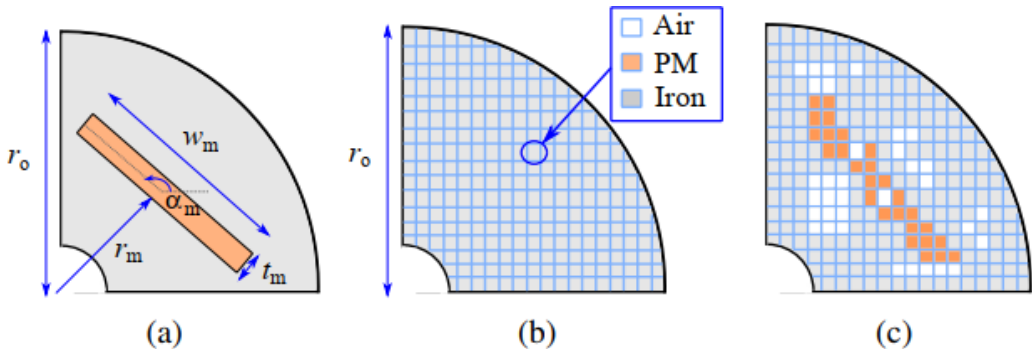


Рис. 1. Пример ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами: (а) параметрическая оптимизация; (б) топологическая оптимизация; (с) возможная оптимизированная топология ротора

Fig.1. An example of a permanent magnet synchronous motor rotor: (a) parametric optimization; (b) topological optimization; (c) possible optimized rotor topology

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Таблица 1
Table 1

Сравнение параметрической и топологической оптимизации
Comparison of parametric and topological estimation

Параметр	Параметрическая оптимизация	Топологическая оптимизация
Зависимость от опыта проектировщика	Да	Нет
Возможность получения нестандартных конструкций	Нет	Да
Простота реализации	Да	Нет (более сложная чем параметрическая оптимизация)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Недавние достижения в области аддитивного производства металлов позволяют изготавливать компоненты электрических машин с нетрадиционной геометрической формой, полученные в ходе топологической оптимизации. Существует большое количество статей по применению аддитивных технологий в конструкции электрических машин. Так в работе [12] авторы Вавилов В.Е., Исмагилов Ф.Р., Зайнагутдинова Э.И. рассмотрели возможность применения аддитивных технологий при производстве электрических машин. В работе [13] авторы Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. описывают способы изготовления деталей с низкой температурой плавления для электрических машин. В работе [15] авторы Lamichhane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. провели обзор технологий аддитивного производства магнитов для электродвигателей. В работе [16] авторы Wrobel R., Mecrow B. провели обзор применения аддитивных технологий при изготовлении электродвигателей. В работе [18] авторы Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. рассматривают возможность аддитивного производства высокопроизводительных магнитов для электродвигателей. В работе [19] авторы Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilhin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. рассмотрели возможность изготовления постоянных магнитов, без применения редкоземельных элементов, с помощью аддитивных технологий. В работе [20] авторы White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. рассматривают возможность изготовления постоянных магнитов из AlNi для электродвигателей. В работе [14] авторы Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. представили всесторонний обзор современных достижений в области аддитивного производства и интеграция аддитивных при изготовлении электрических машин. В работе [17] авторы Pham T., Kwon P., Foster S. рассмотрели аддитивное производство магнитных материалов для использования в электрических машинах.

Результаты этих работ показывают, что современные достижения в области аддитивного производства позволяет изготавливать магнитные компоненты с лучшими характеристиками чем магнитные компоненты, изготавливаемые стандартными методами. В работе [18] авторы предложили метод аддитивного производства большой площади (ВААМ), который использовался бы для производства магнитов из неодима (NdFeB). Авторы приходят к выводу, что с помощью производства большой мощности можно изготавливать постоянные магниты с остаточной намагниченностью до 0,51 Тл. В тоже время результаты работ [14, 18] демонстрируют, что магнитные и механические характеристики магнитов, изготовленных по методу ВААМ, конкурентоспособны с обычными магнитами, а в некоторых случаях превосходят их.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Основная цель многих исследований, связанных с топологической оптимизацией, сосредоточенных на электрических машинах, заключается в том, чтобы получить как можно большее значение крутящего момента. Топологическая оптимизация синхронных реактивных машин многими авторами рассматриваются более активно, чем топологическая оптимизация других электрических машин. Так в работе [21] авторы Korman O, Di Nardo M., Degano M., Gerada C рассматривают топологическую оптимизацию синхронных реактивных машин. В работе [22] авторы Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. рассматривают топологическую оптимизацию реактивных машин с линейным пуском. В работе [23] авторы Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. описывают способы топологической оптимизации для вентильных реактивных двигателей. В работе [24] авторы Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. рассматривают возможность применения топологической оптимизации для улучшения характеристик электродвигателя. В работе [25] авторы Sato S., Sato T., Igarashi H. описывают метод оптимизации синхронной машины при помощи гауссовой кривой. Топологическую оптимизацию геометрии статора электрических машин рассматриваются в работе [26] авторов Yamashita Y., Okamoto Y.

В настоящее время наиболее популярными методами оптимизации электрических машин являются методы:

- включения-отключения (ON-OFF);
- эволюционной оптимизации конструкции (Evolutionary Structural Optimization)/метод двунаправленной эволюционной структурной оптимизации (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization - BESO);
- SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization, метод пенализации для твердого изотропного тела);
- Level-Set (установления уровня или множества уровней).

Рассмотрим каждый из методов по отдельности.

Метод включения-отключения (ON-OFF).

Метод ON-OFF – простейший метод топологической оптимизации. Этот метод включает в себя разделение геометрии на несколько элементов, которые представляют собой элементы сетки анализа конечных элементов, также включает в себя изменение материала, назначенного каждому элементу. Метод ON-OFF относительно легко реализовать с помощью эволюционного алгоритма.

Одним из основных недостатков метода ON-OFF является то, что этот метод может привести к получению элементов сложной формы, которые трудно изготовить. Для того, чтобы избежать такого варианта было предложено использовать несколько методов фильтрации. Так в работе [27] авторы Otomo Y., Igarashi H. использовали фильтр Габора вместе с методом ON-OFF. Такой подход позволило создать конструкцию электрической машины со значительно меньшей пульсацией крутящего момента. В работе [34] авторы Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. предложили метод фильтрации, который проверяет соседство каждого элемента сетки перед назначением материала. Это позволило снизить вероятность появления пустот в проектируемом элементе. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что при использовании метода ON-OFF необходимо применять фильтры.

Метод ESO/BESO

Метод ESO/BESO наиболее эффективно применять при оптимизации топологии непрерывных структур, в случае, когда необходимо найти наилучшее размещение и геометрии пустот внутри области проектирования. Данный метод оптимизации можно применить не только для больших объектов, но и для очень маленьких.

Метод ESO характеризуется тем, что итерационно удаляет или добавляет конечное количество материала. Данный метод основан на определении уровня напряжений в произвольной части конструкции, для этого используется метод конечных элементов.

Материал является неэффективным в том случае, когда он имеет низкий уровень напряжения. Уровень напряжения в конструкции должен быть одинаковым. Материал, который недостаточно нагружен может быть удален, это приводит к удалению отдельных элементов конечно-элементной модели.

Уровень напряжения каждого элемента определяется сравнением напряжения определенного элемента с критическим или максимальным значением напряжения в конструкции. Если отношение напряжения элемента и максимальное напряжение конструкции меньше предельного значения (коэффициента отборки), то тогда элемент удаляется.

Анализ элементов, их удаления повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое состояние, то есть будут отсутствовать элементы, которые имели бы напряжение ниже, чем установленное пороговое значение. Далее пороговое значение может быть изменено. Вследствие изменения порогового значения цикл обработки повторяется пока не будет достигнуто устойчивое состояние.

В работах [29-31] Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. проводят всесторонний обзор метода BESO. Метод BESO в отличие от метода ESO дает возможность одновременно удалять и добавлять материал в область проектирования. Метод BESO достаточно прост в реализации. Особенностью метода BESO является то, что индекс чувствительности пустых элементов определяется путем линейной экстраполяции поля смещений, получаемого в результате конечно-элементного анализа. Затем заполненные элементы с минимальными значениями индекса чувствительности удаляются из структуры, а пустые элементы с наибольшими значениями чувствительности заполняются материалом. Количество удаляемых и добавляемых элементов на каждой итерации определяются двумя независимыми параметрами: отношением удаления и отношением включения.

В работе [10] авторы Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R применили метод BESO, для получения максимального крутящего момента электрической машины с поверхностным расположением постоянных магнитов. Для этого авторы оптимизировали конструкцию ротора. Как видно из результатов работы максимальный крутящий момент эквивалентен минимальному запасенной магнитной энергии в сердечнике ротора.

Метод SIMP

Метод SIMP представляет собой метод топологической оптимизации основной идеей, которого является создание поля виртуальной плотности, представляющей аналог некоторой реальной характеристики объекта. Суть метода заключается в том, чтобы уменьшить податливость конструкции вследствие перераспределения материала в рассматриваемой области пространства при известных граничных условиях. В результате применения метода SIMP получается равнопрочный объект.

Метод SIMP получил широкое применение в аддитивных технологиях. Метод SIMP является одним из самых популярных методов оптимизации и успешно используется для оптимизации электрических машин. Так в работе [32] авторы Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. используют метод SIMP для оптимизации электрических машин. Также в работе [33] авторы Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. рассматривают топологическую оптимизацию ферромагнитных компонентов электродвигателей.

В методе SIMP расчетной переменной является плотность материала. В SIMP область проектирования дискретизируется с помощью конечных элементов. Свойства материала постоянны в каждом из этих элементов и зависят от относительной плотности. Результатом применения метода SIMP должно стать то, что относительная плотность должна быть равно 1 или 0. Для исключения промежуточной относительной плотности используется фактор отбраковки.

Отношение между модулем упругости и относительной плотностью:

$$E(x_i) = E_{\min} + (x_i)^p (E_0 - E_{\min}), \quad (1)$$

где E_0 – модуль упругости материала. Для численной устойчивости $E_{\min}$ принимается за $\frac{E_0}{1000}$, x_i – относительная плотность i -го элемента; p – фактор отбраковки [34].

Относительная плотность элементов берется в качестве расчетной переменной, среднее соответствие выбирается как целевая функция. В этом случае задача оптимизации топологии для минимального соответствия может быть записана в виде:

$$\text{Find: } X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

$$\text{Minimize: } C(X) = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n u_i^T k_i u_i = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i \quad (3)$$

$$\text{Subject to: } KU = F, \quad V = f_0 v_0 = \sum_{i=1}^n x_i v_i \quad (4)$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1 \quad (5)$$

где целевая функция S определяется как среднее соответствие; X – вектор конструктивных переменных; $X_{\min}$ и $X_{\max}$ – минимальная и максимальная относительная плотность элементов соответственно. Целью введения ненулевого значения $X_{\min}$ является избежание сингулярности; F – вектор нагружения; U – вектор глобального смещения; K – глобальный тензор жесткости; k_i – тензор жесткости элемента после интерполяции плотности; k_0 и u_i – тензор жесткости и вектор смещения узлов элементов; v – объем материала; v_0 – начальный объем расчетной области; F_0 – заданное объемное отношение [35].

Минусом метода SIMP является промежуточная плотность материала. Поскольку плотность материала является непрерывной переменной, она может принимать промежуточные значения, которые являются недействительными, физически нереализуемыми. Для решения этой проблемы автор в работе [8] вводит дополнительную функцию для проницаемости:

$$u_T = (u_{FE} - u_{air})p^p + u_{air} \quad (6)$$

где u_{FE} и u_{air} – относительная проницаемость воздуха и электротехнической стали; p – коэффициент.

В работе [32] авторы Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. представили мульти материальную структуру оптимизации для ротора синхронной машины. Цель оптимизации заключалась в том, чтобы максимально увеличить крутящий момент и в то же время минимизировать потери в роторе с учетом ограничений по пульсации крутящего момента и плотности тока статора. В результате оптимизации авторы смогли получить прирост крутящего момента и уменьшения потерь в меди ротора примерно на 24 %.

Метод Level-Set

Особенностью метода Level-Set является то, что поверхность или кривая выражается в неявном виде. При этом поверхность или кривая принимаются в качестве установленного нулевого уровня многомерной функции. Затем происходит их деформация с помощью этой функции [36].

Для области исследования Ω , которая имеет гладкие границы, предполагается, что существует неявная функция $\phi(x)$, которая удовлетворяет следующим условиям [37]:

$$\phi(x) \begin{cases} > 0, x \in \Omega^+ \text{ (материал)} \\ = 0, x \in \partial\Omega \text{ (граница)} \\ < 0, x \in \Omega^- \text{ (пустота)} \end{cases} \quad (7)$$

Задачу оптимизации топологии конструкции с ограниченной площадью при минимизации податливости можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \min C_{(\phi)} &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} E_{(\phi)} \varepsilon^T D \varepsilon d\Omega \\ \nabla(E_{(\phi)} \varepsilon) &= f \\ \int_{\Omega} H_{(\phi)} d\Omega &= V \end{aligned} \quad (8)$$

где область проектирования представлена Ω ; D – матрица упругости, V – допустимый объем материала; E – расчетная переменная, которая определяется поверхностью уровня:

$$E_{(\phi)} = E_0 H_{(\phi)} + (1 - H_{(\phi)}) E_{\min} \quad (9)$$

где E_0 – модуль упругости материала; $E_{\min}$ – минимальный уровень упругости.

Метод Level-Set для синхронной реактивной машины с использованием представлением сетки, подогнанной к телу, был рассмотрен авторами [38] Kuci E., Jansen M., Coulaud O. Геометрия была смоделирована как ограниченная область Ω , состоящая из двух материалов, распределённых в области Ω_1 и Ω_2 без перекрытия. Метод Level-Set использовался для оптимизации компоновки катушки статора электрических машин в работе [39] Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. и постоянных магнитов в работе [40] Lee J., Wang S.

Проведем сравнение методов оптимизации топологии. Метод ON-OFF и его различные варианты популярны для оптимизации топологии электрических машин. В основу этих методов лежит эвристический алгоритм. Пространство проектирования при использовании метода ON-OFF имеет примерно 1000-10000 переменных. Такое количество переменных требует значительное количество вычислительно мощности и большое количество времени. Кроме того, метод ON-OFF требует применение фильтра.

Метод BESO позволяет решить проблему «шахматной доски», которая выражается в том, что схема оптимизации модели имеет разрывы сплошности и несвязанные «островки» материала. Метод BESO предполагает анализировать на каждой итерации напряженное состояние конечных элементов. В результате этого происходит удаление менее

нагруженных элементов и добавление элементов, заполненных материалом, в области, напряженное состояние которых выше некоторых значений.

Метод SIMP требует доступ к матрице жесткости конечно-элементного анализа, которая недоступна в большинстве коммерческих программных обеспечений. Но все же встречаются программные обеспечения, в которых имеется доступ к матрице жесткости. Все же выполнить расчет методом SIMP не так просто.

Метод Level-Set применяется вместе с эволюционными алгоритмами и градиентными алгоритмами для оптимизации топологии электрических машин. В работе [41] авторы Kim Y.S., Park I.H. используют сопряженный метод для эффективного анализа чувствительности алгоритмов.

Некоторые программные обеспечения имеют в своей базе мульти физический анализ метод SIMP и метод Level-Set. Однако в большинстве программ эти методы имеют ограниченную функциональность, и подходят больше для решения структурных проблем. В таблице 2 представлен сравнительный анализ методов оптимизации топологии.

Таблица 2

Table 2

Сравнительный анализ методов оптимизации топологии

Comparative analysis of topology optimization methods

Параметр	Метод ON-OFF	Метод BESO	Метод SIMP	Метод Level-Set
Тип оптимизатора	Эволюционный	Градиент	Градиент	Гибкий (можно применить различные оптимизаторы)
Популярность	Средняя	Низкий	Высокий	Высокий
Время вычисления	Медленно	Быстро	Быстро	Зависит от оптимизатора
Доступность в программных обеспечениях	Нет	Нет	Да	Да

**Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.*

Так как каждый из методов оптимизации имеет как сильные стороны, так и слабые стороны необходимо рассмотреть возможность объединения различных методов в процессе оптимизации. В работе [42] Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. использовали двухэтапный метод оптимизации. Данный метод оптимизации включал в себя метод Level-Set и метод ON-OFF. В своей работе авторы использовали метод ON-OFF для выполнения глобального поиска, а метод Level-Set для выполнения локального поиска. В месте с методом ON-OFF использовался генетический алгоритм, а для метода Level-Set использовался градиент. Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. использовали двухэтапный метод оптимизации топологии для увеличения крутящего момента и уменьшения пульсации крутящего момента, за счет изменения распределения постоянных магнитов в роторе. В результате авторы получили снижение пульсации крутящего момента примерно на 40 % и увеличение среднего крутящего момента на 0,5 % по сравнению с конструкцией, которая была оптимизирована только с помощью метода ON-OFF. Так же в работе [43] авторы Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. применили двухэтапный метод оптимизации топологии для трехмерной конструкции в кулачковом генераторе переменного тока.

Оптимизация топологии электрических машин очень перспективное направление. В данном направлении в настоящее время существует ряд проблем. Одной из основных проблем оптимизации топологии является технологичность оптимизированных конструкций. Конструкция с оптимизированной топологией очень часто имеет неправильные элементы, например, зубчатые поверхности, прерывистое распределение материала, которые невозможно изготовить с помощью обычных технологий. Для решения этой проблемы в настоящее время существует аддитивное производство материалов, но цены на аддитивное производство очень высоки. Также при использовании аддитивных технологий тяжело достичь желаемых магнитных и структурных свойств элемента. В работе [44] авторы Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. рассмотрели состояние аддитивного производства электромагнитных материалов для оптимизации топологии электрических машин. Именно поэтому при оптимизации топологии электрических машин необходимо учитывать технологичность конструкции.

Методы оптимизации топологии, такие как метод ON-OFF, основанные на эволюционной оптимизации, могут представлять значительные вычислительные

требования на основе оптимизируемой геометрии. Но использование метода SIMP и метода Level-Set может снизить вычислительную нагрузку. На данный момент разрабатываются методы оптимизации топологии на основе машинного обучения. Так в работе [45] авторы Khan A., Midha C., Lowther D. описали обучение искусственного интеллекта для оптимизации конструкции электрических машин. В работе [46] авторы Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. рассмотрели возможность создания нейро-сети для оптимизации электрических машин. В работе [47] Asanuma J., Doi S., Igarashi H. изучили возможность глубокого обучения для оптимизации электрических машин. Применение таких методов может позволить снизить вычислительную нагрузку на оптимизацию топологии при определении оптимальных схем.

При топологической оптимизации конструкции электрических машин улучшение электромагнитных характеристик, уменьшение объема, может привести к ослаблению конструкции электрической машины. Так, например, при оптимизации синхронного электродвигателя с постоянными магнитами или синхронной реактивной машины в роторе могут образоваться воздушные зазоры, которые могут значительно снизить прочность конструкции ротора, а также вызвать проблемы с динамикой ротора. Следовательно, при оптимизации топологии необходимо учитывать требования по структуре, чтобы гарантировать, что оптимизированная геометрия будет механически надежной.

В работе [51] авторы Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. предложили гибридную оптимизацию, объединяющую параметрическую оптимизацию и оптимизацию топологии. В работе [52] Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. применили аналогичную технологию для гибридной оптимизации, которая объединяет параметрическую и топологию оптимизации для оптимизации формы ротора синхронной реактивной машины. Авторы в начале для определения топологии ротора использовали метод SIMP. Затем топология использовалась для получения параметрической модели. Полученная параметрическая модель использовалась для окончательной магнито-структурной оптимизации.

Выбор метода оптимизации для усовершенствования конструкции ротора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

При проектировании конструкции ротора электродвигателя перед проектировщиком могут стоять следующие задачи:

- 1) Улучшение существующей конструкции ротора т.е. проектировщик будет ограничен существующими размерами ротора, превышать которые нельзя;
- 2) Спроектировать новый электродвигатель, при этом проектировщику известно только примерные характеристики электродвигателя.

Если проектировщику необходимо усовершенствовать существующий электродвигатель (конструкцию ротор) наиболее эффективным методом оптимизации в этом случае будут параметрический метод.

В случае, когда у проектировщика стоит задача спроектировать полностью новый электродвигатель, в этом случае наиболее оптимальным способом оптимизации будут – топологическая оптимизация. Топологическая оптимизация позволит расположить постоянные магниты в конструкции ротора наиболее рационально. Как писалось ранее при топологической оптимизации форма магнитов может быть трудной для изготовления. Поэтому проектировщику необходимо использовать фильтры.

В настоящее время существует большое количество программных обеспечений в библиотеке, которых, включены такие методы оптимизации как топологическая оптимизация и параметрическая оптимизация. К таким программным обеспечениям относятся ANSYS и COMSOL Multiphysics. Применение программных обеспечений позволит более эффективно оптимизировать конструкции электродвигателя и рационально тратить время проектировщика. На рис. 2 представлены результаты параметрической оптимизации конструкции ротора в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. На рис. 3 представлены результаты топологической оптимизации ротора синхронного реактивного электродвигателя в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. В работе [53] авторы Ситников М.А., Галунин С.А., Белыхсен Ануар рассмотрели возможность топологической оптимизации в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

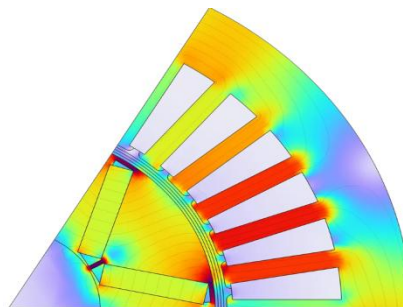


Рис. 2. Результаты параметрической оптимизации в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

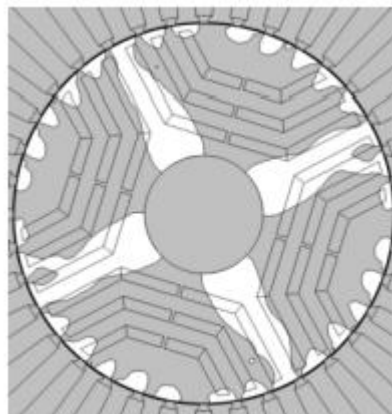


Рис. 3. Результаты топологической оптимизации синхронного реактивного электродвигателя в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Чтобы выполнить параметрическую оптимизацию достаточно выбрать физику General Optimization. Из подгруппы General Optimization необходимо выбрать узел Optimization. Для проведения параметрической оптимизации можно использовать те же параметры, которые задают основные настройки модели. Например, геометрические размеры, свойства материалов, граничные условия. Параметрическое исследование с простым перебором значений позволяет получить общие данные о пространстве управляющих параметров. При проведении параметрической оптимизации геометрических размеров на каждой итерации оптимизационного решателя необходимо перестраивать расчетную сетку.

Для реализации топологической оптимизации необходимо выбрать физику General Optimization. Из подгруппы General Optimization нужно выбрать Topology Optimization. Исследование нужно выбрать Stationary. В Topology Optimization имеется узел Density Model, который используется для ограничений. В узле Density Model используется фильтр Гельмгольца. Фильтр Гельмгольца представляет собой:

$$\theta_f = R_{min}^2 \nabla^2 \theta_c + \theta_c, \quad 0 \leq \theta_c \leq 1 \quad (10)$$

$$\theta_f / R_{mil} = m_{mil}^i \nabla \theta_m^i, \quad \theta_m = [\sum_{i=1}^n ((\theta_m^i)^{-p_{mil}}) / n]^{-1/p_{mil}} \quad (11)$$

$$\theta = \frac{\tanh(\beta(\theta_m - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta)}{\tanh(\beta(1 - \theta_\beta)) + \tanh(\beta\theta_\beta)} \quad (12)$$

$$\theta_p = \theta_{min} + (1 - \theta_{min})\theta^{psimp} \quad (13)$$

Уравнение 10 – это фильтр Гельмгольца, с помощью которого на основе поля управляющей переменной θ_c рассчитывается регуляризованное поле θ_f , характеризующееся минимальным линейным масштабом.

Уравнение 11 – это уравнение конвекции. Данное уравнение решается после применения фильтра Гельмгольца. Линейный масштаб для источникового члена уравнения

R_{mil} можно задать, исходя из характерного размера элементов расчетной сетки. Параметр p_{mil} связан с объединением переменных θ_m^i , задающих ограничения фрезерной обработки.

Параметр β – это угол отображения, который играет важную роль, поскольку обычно входные параметры операции отображения значительно больше 1. Коэффициент отображения θ_β обычно принимается равным 0,5. Что бы избежать размытых результатов оптимизации значение параметра $psimp$ необходимо принять равным 3. Тогда как для обеспечения устойчивости значение параметра θ_{min} должен равняться 10^{-3} .

Заключение (Conclusion)

В статье были рассмотрены основные методы оптимизации топологии электрических машин. Были рассмотрены такие методы, как метод BESO и метод ESO, метод SIMP и метод Level-Set. Также был проведен сравнительный анализ методов оптимизации электрических машин.

Сравнение показало, что оптимизации топологии позволяет находить более эффективные конструкции для электрических машин, но форма полученных элементов не всегда возможно изготовить в настоящее время. Но применение аддитивные технологии, при их дальнейшем развитии и удешевление позволит создавать электрические машины с различными оптимизированными формами.

Рассмотренные выше методы оптимизации (ESO/BESO, SIMP, Level-Set, ON-OFF) имеют различные преимущества, но всех их объединяет несколько недостатков. К таким недостаткам можно отнести проблемы «шахматной доски». Проблема заключается в том, что оптимизированная конструкция имеет фрагменты, которые находятся на каком-то расстоянии от основной геометрии. Так же к недостаткам можно отнести зависимость от сеточного разбиения. Проблема появляется в результате того, что в расчётах используется различные конечные элементы, что в конечном итоге приводит к различным дефектам.

Также была рассмотрена возможность топологической и параметрической оптимизации конструкции ротора с постоянными магнитами с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. С помощью данного программного обеспечения скорость оптимизации конструкции увеличивается во много раз. В COMSOL Multiphysics есть возможность использовать различные целевые функции и ограничения. Применение COMSOL Multiphysics позволяет в многократно упростить работу проектировщика, инженера при оптимизации конструкции.

Литература

- 1) Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. Modern electrical machine desing optimization: Techniques trends, and best practices // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, no.10. pp. 7672-7684.
- 2) Deaton J.D., Grandhi R.V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 200 // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2014. Vol. 49, no.1, pp. 1-38.
- 3) Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. No.10. pp. 1-11.
- 4) Ле, Нго Фьонг. Генетические алгоритм для оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 1. с. 42-48.
- 5) Sigmund S., Maute K. Topology optimization approaches // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48, no.6, pp. 1031-1055.
- 6) Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: a review // Appl. Mech. Rev. 2001. Vol. 54, no.4. pp. 331-390.
- 7) Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. Topology optimization: review for structural designs under vibration problems // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2016. Vol. 53, no.6. pp. 1157-1177.
- 8) Guo F., Brown I.P. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors // IEE Transaction on Magnetic. 2020. No.10. pp. 1-12.
- 9) Петров Т.И. Топологическая оптимизация параметров синхронных электрических машин с постоянными магнитами в составе приводных комплексов // Тинчуринские чтения. 2019. с. 241-244.
- 10) Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing // Journal of Mechanical Design. 2019. No.7. pp. 200-213.
- 11) Sato T., Watanabe K., Igarashi H. Multimaterial topology optimization of electrical machines based on normalized gaussian network // IEEE transactions on magnetics. 2015. No.3, pp. 1-4.
- 12) Вавилов В.Е., Исмаилов Ф.Р., Зайнагудинова Э.И. Применение аддитивных технологий в проектировании и создании электрических машин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения; 23-25 июня 2021 г., Самара. с. 281-282.

- 13) Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. Injected 3D-electrical traces in additive manufactured parts with low melting temperature metals // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015. pp. 988-995.
- 14) Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №3. С. 14-33.
- 15) Lamichhane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review // Material Today Physics. 2020. Vol. 15. pp. 250-255.
- 16) Wrobel R., Mecrow B. A comprehensive review of additive manufacturing in construction of electrical machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020. Vol. 35, no. 2. pp. 1054-1064.
- 17) Pham T., Kwon P., Foster S. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines – a review // Energies. 2021. Vol. 14, no. 2. pp. 283.
- 18) Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // Scientific reports. 2016. Vol. 6, no. 1. pp. 1-7.
- 19) Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets // Acta Materialia. 2020. Vol. 188. pp. 733-739.
- 20) White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing // IEEE Transactions on Magnetics. 2017. Vol. 53, no. 11. pp. 1-6.
- 21) Korman O., Di Nardo M., Degano M., Gerada C. On the use of topology optimization for synchronous reluctance machines design // Energies. 2022. Vol. 15, no. 6. Pp. 3719.
- 22) Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. Topology optimization of line-start synchronous reluctance machine. 2020 International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME). IEEE. 2020. pp. 1-7.
- 23) Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile // Structural and multidisciplinary optimization. 2010. Vol. 42, no. 5. pp. 783-796.
- 24) Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. Improvement of torque characteristics for a synchronous reluctance motor using mm based topology optimization method // IEEE transactions on magnetics. 2017. Vol. 54, no. 3. pp. 1-4.
- 25) Sato S., Sato T., Igarashi H. Topology optimization of synchronous reluctance motor using normalized gaussian network // IEEE transactions on magnetics. 2015. Vol. 51. pp. 1-4.
- 26) Yamashita Y., Okamoto Y. Design optimization of synchronous reluctance motor for reducing iron loss and improving torque characteristic using topology optimization based on the level-set method // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56, no. 3. pp. 1-4.
- 27) Otomo Y., Igarashi H. Topology optimization using gabor filter: Application to synchronous reluctance motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57, no.6. pp. 1-4.
- 28) Watanabe K., Suga T., Kitabatake S. Topology optimization based on the on/off method for synchronous motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. Vol. 54, no. 3. pp. 1-4.
- 29) Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2018. Vol. 25, no. 2. pp. 437-478.
- 30) Huang X., Xie M.Y. A further review of eso type methods for topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 41, no. 5. pp. 671-683.
- 31) Querin O.M., Steven G.P., Xie Y.M. Evolutionary structural optimization (eso) using a bidirectional algorithm // Engineering computation. 1998. Vol. 15, no. 8. [p. 1031-1048.
- 32) Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. Multimaterial magneto-structural topology optimization of wound field synchronous machine rotors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 56, No. 4, pp. 3656-3667.
- 33) Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. Topology optimization of ferromagnetic components in electrical machines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2020. Vol. 35, no. 2. pp. 786-789.
- 34) Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. №51. с. 51-61.
- 35) Sigmund O., Maute K. Struct topology optimization approaches A comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. Vol. 48, no. 6. pp. 1031-1055.
- 36) Liu Z., Korvink J., Huang R. Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005. Vol. 29, no. 6. pp. 407-417.

- 37) Шевцова В.С., Шевцова М.С. Сравнительный анализ метод оптимизации топологии (SIMP и Level Set) на примере реконструкции крыла стрекозы // Вестник южного научного центра. 2013. Т. 9. № 1. с. 8-16.
- 38) Kuci E., Jansen M., Coulaud O. Level set topology optimization of synchronous reluctance machines using a body-fitted mesh representation // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. pp. 1-17.
- 39) Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. Topology optimization for coil of electric machine with level-set method // International Conference on Electrical Machines and Systems. 2019. pp. 1-4.
- 40) Lee J., Wang S. Topological shape optimization of permanent magnet in voice coil motor using level set method // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. Vol. 48. no. 2. pp. 931-934.
- 41) Kim Y.S., Park I.H. Topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using level set method and shape design sensitivity // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2010. Vol. 20. no. 3. pp. 1093-1096.
- 42) Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. Topology optimization method based on on-off method and level set approach // IEEE Transactions on magnetics. 2014. Vol. 50. no. 2. pp. 617-620.
- 43) Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. 3-d topology optimization of claw-pole alternator using gaussian-basis function with global and local searches // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 56. no. 1. pp. 1-4.
- 44) Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. State of her art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical, machines // Additive Manufacturing. 2022. P. 102778.
- 45) Khan A., Midha C., Lowther D. Reinforcement learning for topology optimization of a synchronous reluctance motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58. no.9. pp. 1-4.
- 46) Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. Explainable deep neural network for design of electrical motors // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. no. 6. pp. 1-4.
- 47) Asanuma J., Doi S., Igarashi H. Transfer learning through deep learning: Application to topology optimization of electrical motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56. no. 3. pp. 1-4.
- 48) Doi S., Sasaki H., Igarashi H. Multi-objective topology optimization of rotation machines using deep learning // IEEE Transactions on Magnetics. 2019. Vol. 55. no. 6. pp. 1-5.
- 49) Deng C., Wang Y., Qin C., Fu Y., Lu W. Self-directed online machine learning for topology optimization // Nature communications. 2022 Vol. 13. no.1. pp. 1-14.
- 50) Петров Т.И. Название диссертации: Методы комплексной топологической оптимизации ротора синхронного электрического двигателя с постоянными магнитами канд. тех. наук. Казань; 2021. Доступно по: <https://kgeu.ru/Document/GetDissDoc/4495d7e9-e9d7-45d7-8178-a31c0e9e1d57>. Ссылка активна на 05.02.2023.
- 51) Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. Novel hybridization of parameter and topology optimizations: Application to permanent magnet motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2021. Vol. 57. no. 7. Pp. 1-4.
- 52) Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 56. no.5. pp. 5429-5438.
- 53) Ситников М.А., Галунин С.А., Белыхсен Ануар Оптимизация топологии ротора высокосортной синхронной реактивной машины // Развивая энергетическую повестку будущего; 10-11 декабря 2021 г., Санкт-Петербург. с. 142-146.
- 54) Петров Т. И. Модификация генетического алгоритма для комплексной топологической оптимизации ротора синхронных двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 70-79.
- 55) Petrov T., Safin A. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences, Prague, May 14–15, 2020. – Prague, 2020. – P. 01016.

Авторы публикаций

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

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

References

- 1) Bramerdorfer G., Tapia J.A., Pyrhonen J.J., Cavagnino A. *Modern electrical machine desing optimization: Techniques trends, and best practices. IEE Transactions on Industrial Electronics.* 2018;65(10): 7672-7684.
- 2) Deaton J.D., Grandhi R.V. *A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 200. Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2014;49(1): 1-38.
- 3) Jian Z., Zhibin W., Haiqiang L. *Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor. IEE Transactions on Industrial Electronics.* 2020;10: 1-11.
- 4) Le, Ngo Fyong. *Geneticheskie algoritm dlya optimizatsii proektirovaniya sinkhronnogo dvigatelya s inkorporirovannymi magnitami. Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika.* 2017;1: 42-48. (In Russ).
- 5) Sigmund S., Maute K. *Topology optimization approaches. Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2013;6: 1031-1055.
- 6) Escgenauer H.A., Olhoff N. *Topology optimization of continuum structures: a review. Appl. Mech. Rev.* 2001;4: 331-390.
- 7) Zargham S., Ward T.A., Ramil R., Bedruddin I.A. *Topology optimization: review for structural designs under vibration problems. Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2016;6: 1157-1177.
- 8) Guo F., Brown I.P. *Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors. IEE Transaction on Magnetic.* 2020;10: 1-12.
- 9) Petrov T.I. *Topologicheskaya optimizatsiya parametrov sinkhronnykh ehlektricheskikh mashin s postoyannymi magnitami v sostave privodnykh kompleksov. Tinchurinskie chteniya.* 2019: 241-244. (In Russ).
- 10) Garibaldi M., Gerada C., Ashcroft I., Hague R. *Free-form design of electrical machine rotor cores for production using additive manufacturing. Journal of Mechanical Design.* 2019;7: 200-213.
- 11) Sato T., Watanade K., Igarashi H. *Multimaterial topology optimization of electrical machines based on normalized gaussian network. IEEE transactions on magnetics.* 2015;3: 1-4.
- 12) Vavilov V.E., Ismagilov F.R., Zainagutdinova E.H.I. *Primenenie adventivnykh tekhnologii v proektirovanii i sozdanii ehlektricheskikh mashin. Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya; 23-25 iyunya 2021 g., Samara. s. 281-282. (In Russ).*
- 13) Swensen J.P., Odhner L.U., Araki B. and Dollar A.M. *Injected 3D-electrical traces in additive manufactured parts with low melting temperature metals. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015: 988-995.*
- 14) Safin A.R., Ranjan Kumar Behera. *Additivnoe proizvodstvo i optimizatsiya topologii magnitnykh materialov dlya ehlektricheskikh mashin . Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY EHNERGETIKI.* 2021. 23(3): 14-33. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33.
- 15) Lamichhane T.N., Sethuraman L., Dalagan A., Wang H., Keller J., Paranthaman M.P. *Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review. Material Today Physics.* 2020;15: 250-255.
- 16) 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.
- 17) Pham T., Kwon P., Foster S. *Additive manufacturing ang topology optimization of magnetic materials for electical machines – a review. Energies.* 2021;14(2): 283.
- 18) Li L., Tirado A., Nlebedim I., Rios O., Post B., Kunc V., Lowden R., Lara-Curzio E., Fredette R., Ormerod J., et al. *Big area additive manufacturing of high performance bonded ndfeb magnets. Scientific reports.* 2016;6(1): 1-7.
- 19) Volegov A., Andreev S., Selezneva N., Ryzhilhin I., Kudrecatykh N., Madler L., Okulov I. *Additive manufacturing of heavy rare earth free high-coercivity permanent magnets. Acta Materialia.* 2020;188: 733-739.
- 20) White H., Kassen A.G., Simsek E., Tang W., Ott R.T., Anderson I.E. *Net shape processing of alnico magnets by additive manufacturing. IEEE Transactions on Magnetics.* 2017;53(11): 1-6.
- 21) Korman O, Di Nardo M., Degano M., Gerada C. *On the use of topology optimization for synchronous reluctance machines design. Energies.* 2022;57(6): 3719.
- 22) Lolova I., Barta J., Bramerdorfer G., Silber S. *Topology optimization of line-start synhromous reluctance machine. 2020 International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME). IEEE.* 2020: 1-7.
- 23) Lee J., Seo J.H., Kikuchi N. *Topology optimization of switched reluctance motors for the desired torque profile. Structural and multidisciplinary optimization.* 2010;42(5): 783-796.
- 24) Okamoto Y., Hoshino R., Wakao S., Tsuburaya T. *Improvement of torque characteristics for a synchronous reluctance motor using mm abased topology optimization method. IEE transactions on magnetics.* 2017;54(3): 1-4.
- 25) Sato S., Sato T., Igarashi H. *Topology optimization of synchronous reluctance motor using normalized gaussian network. IEE transactions on magnetics.* 2015;51(3): 1-4.

- 26) Yamashita Y., Okamoto Y. *Design optimization of synchronous reluctance motor for reducing iron loss and improving torque characteristic using topology optimization based on the level-set method.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2020;56(3): 1-4.
- 27) Otomo Y., Igarashi H. *Topology optimization using gabor filter: Application to synchronous reluctance motor.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2021;57(6): 1-4.
- 28) Watanabe K., Suga T., Kitabatake S. *Topology optimization based on the on/off method for synchronous motor.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2018;54(3): 1-4.
- 29) Xia L., Xia Q., Huang X., Xie Y.M. *Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: a comprehensive review.* *Archives of Computational Methods in Engineering.* 2018;25(2): 437-478.
- 30) Huang X., Xie M.Y. *A further review of eso type methods for topology optimization.* *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2010;41(5): 671-683.
- 31) Querin O.M., Steven G.P., Xie Y.M. *Evolutionary structural optimization (eso) using a bidirectional algorithm.* *Engineering computation.* 1998;15(8): 1031-1048.
- 32) Guo F., Salameh S., Krishnamurthy M., Brown I.P. *Multimaterial magneto-structural topology optimization of wound field synchronous machine rotors.* *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2020;56(4): 3656-3667.
- 33) Ma B., Zheng J., Lei G., Zhu J., Jin J., Guo Y. *Topology optimization of ferromagnetic components in electrical machines.* *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 2020;35(2): 786-789.
- 34) Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. *Metody topologicheskoi optimizatsii konstruktssii, primenyayushchiesya v aehrokosmicheskoi otrasli.* *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aehrokosmicheskaya tekhnika.* 2017. №51. pp. 51-61.
- 35) Sigmund O., Maute K. *Struct topology optimization ap-proaches A comparative review.* *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2013;48(6): 1031-1055.
- 36) Liu Z., Korvink J., Huang R. *Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB.* *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2005;29(6): 407-417.
- 37) Shevtsova V.S., Shevtsova M.S. *Sravnitel'nyi analiz metod optimizatsii toplogii (SIMP i Level Set) na primere rekonstruktssii kryla strekozy.* *Vestnik yuzhnogo nauchnogo tsentra.* 2013;9(1): 8-16 (In Russ).
- 38) Kuci E., Jansen M., Coulaud O. *Level set topology optimization of synchronous reluctance machines using a body-fitted mesh representation.* *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2021: 1-17.
- 39) Ren X., Thabuis A., Belahcen A., Perriard Y. *Topology optimization for coil of electric machine with level-set method.* *International Conference on Electrical Machines and Systems.* 2019: 1-4.
- 40) Lee J., Wang S. *Topological shape optimization of permanent magnet in voice coil motor using level set method.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2012;48(2): 931-394.
- 41) Kim Y.S., Park I.H. *Topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using level set method and shape design sensitivity.* *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2010;20(3): 1093-1096.
- 42) Hidaka Y., Sato T., Igarashi H. *Topology optimization method based on on-off method and level set approach.* *IEEE Transactions on magnetics.* 2014;50(2): 617-620.
- 43) Otomo Y., Igarashi H., Hidaka Y., Komatsu T., Yamada M. *3-d topology optimization of claw-pole alternator using gaussian-basis function with global and local searches.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2019;56(1): 1-4.
- 44) Tiismus H., Kallaste A., Vaimann T., Rassolkin A. *State of her art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical, machines.* *Additive Manufacturing.* 2022: 102778.
- 45) Khan A., Midha C., Lowther D. *Reinforcement learning for topology optimization of a synchronous reluctance motor.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2022;58(9): 1-4.
- 46) Sasaki H., Hidaka Y., Igarashi H. *Explainable deep neural network for design of electrical motors.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2021;57(6): 1-4.
- 47) Asanuma J., Doi S., Igarashi H. *Transfer learning through deep learning: Application to topology optimization of electrical motor.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2020;56(3): 1-4.
- 48) Doi S., Sasaki H., Igarashi H. *Multi-objective topology optimization of rotation machines using deep learning.* *IEEE Transactions on Magnetics.* 2019;55(6): 1-5.
- 49) Deng C., Wang Y., Qin C., Fu Y., Lu W. *Self-directed online machine learning for topology optimization.* *Nature communications.* 2022;13(1): 1-14.
- 50) Petrov T.I. *Nazvanie dissertatsii: Metody kompleksnoi topologicheskoi optimizatsii rotora sinkhronnogo ehlektricheskogo dvigatelya s postoyannymi magnitami.* Kazan; 2021. Available at: <https://kgeu.ru/Document/GetDissDoc/4495d7e9-e9d7-45d7-8178-a31c0e9e1d57>. Accessed; 05.02.2023. (In Russ).

51) Hiruma S., Ohtani M., Soma S., Kubota Y., Igarashi H. *Novel hybridization of parameter and topology optimizations: Application to permanent magnet motor. IEEE Transactions on Magnetics.* 2021;57(7): 1-4.

52) Credo A., Fabri G., Villani M., Popescu M. *Adopting the topology optimization in the design of high-speed synchronous reluctance motors for electric vehicles. IEEE Transactions on Industry Applications.* 2020;56(5): 5429-5438.

53) Sitnikov M.A., Galunin S.A., Belakhsen Anuar *Optimizatsiya topologii rotora vysokosortnoi sinkhronnoi reaktivnoi mashiny. Razvivaya energeticheskuyu povestku budushchego; 10-11 dekabrya 2021 g., Saknt-Peterburg, s. 142-146. (In Russ).*

54) Petrov T.I. *Modification of the genetic algorithm for complex topological optimization of the rotor of synchronous motors. Izvestia of higher educational institutions. Energy problems.* 2021;23(3):70-79. (In Russ).

55) Petrov T., Safin A. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization. E3S Web of Conferences, Prague.* 2020;01016.

Authors of the publication

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

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

Шифр научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности

2.4.5 Энергетические системы и комплексы (техническая наука)

Получено

20.06.2023 г.

Отредактировано

19.02.2024 г.

Принято

01.03.2024 г.