

Features of Topological Optimization of the Synchronous Generator with Permanent Magnets Based on a Genetic Algorithm

Petrov T.I., Safin A.R.

Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation

Abstract. The main objective of the study is to assess the feasibility of replacing rare-earth NdFeB magnets with ferrite magnets ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) in a 10 kW synchronous generator designed for use in renewable energy. Ferrites are 10–15 times cheaper than NdFeB and have high thermal stability but have a significantly lower residual induction and coercivity. To achieve this goal, the following tasks were solved: creating a technique for multi-criteria optimization of the generator design based on a genetic algorithm and the finite element method modeling and analysis of the results. The optimization objective function combines three normalized parameters: rotor mass (kg), magnetic system cost (USD), and electromagnetic losses (W), normalized relative to the base generator with NdFeB. The choice of the genetic algorithm is due to its ability to effectively solve problems with nonlinear field dependencies and complex topology, avoiding local minima. The simulation was performed for three configurations: the base generator with NdFeB and the generator with ferrites before and after optimization. The most important results are that topological optimization allowed reducing the rotor weight by 10% losses and by 18% and increasing the efficiency from 85% to 87.3%, while reducing the cost by 9.6% compared to the original model on ferrite magnets. Compared to the base version of NdFeB, the optimized generator turned out to be 20.5% cheaper, and the efficiency decrease was only 5 percentage points. The significance of the obtained results consists in confirming the prospects for using ferrite magnets in low-power distributed generation systems.

Keywords: topology optimization, synchronous generator, ferrite magnets, genetic algorithm, finite element method, integral objective function, multicriteria design.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.04>

UDC: 621.313.322

Particularități de optimizare topologică al generatorului sincron cu magneți permanenți bazate pe un algoritm genetic

Petrov T.I., Safin A.R.

Universitatea de Stat de Inginerie Energetică din Kazan, Kazan, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivul principal al studiului este de a evalua fezabilitatea înlocuirii magneților NdFeB din pământuri rare cu magneți din ferită ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) într-un generator sincron de 10kW proiectat pentru utilizarea în energia regenerabilă. Feritele sunt de 10-15 ori mai ieftine decât NdFeB și au o stabilitate termică ridicată, dar au o inducție reziduală și o forță coercitivă semnificativ mai mici. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost rezolvate următoarele sarcini: crearea unei tehnici de optimizării multicriteriale a proiectării generatorului pe baza unui algoritm genetic și a metodei elementelor finite, modelarea și analiza rezultatelor. Funcția obiectivului de optimizare combină trei parametri normalizați: masa rotorului (kg), costul sistemului magnetic (USD) și pierderile electromagnetice (W), normalizate în raport cu generatorul de bază cu NdFeB. Alegerea algoritmului genetic se datorează capacității sale de a rezolva în mod eficient probleme cu dependențe de câmp neliniare și topologie complexă, evitând mini-ma locale. Simularea a fost efectuată pentru trei configurații: generatorul de bază cu NdFeB, generatorul cu ferite înainte de optimizare și după optimizare. Cele mai importante rezultate sunt că optimizarea topologică a permis reducerea greutateii rotorului cu 10%, a pierderilor cu 18% și creșterea eficienței de la 85% la 87.3%, reducând în același timp costul cu 9.6% în comparație cu modelul original pe magneți de ferită. În comparație cu versiunea de bază pe NdFeB, generatorul optimizat s-a dovedit a fi cu 20.5% mai ieftin, iar scăderea eficienței a fost de numai 5%. Semnificația rezultatelor obținute constă în confirmarea perspectivelor utilizării magneților din ferită în sistemele de generare distribuită cu putere redusă.

Cuvinte-cheie: optimizarea topologiei, generator sincron, magneți din ferită, algoritm genetic, metoda elementelor finite, funcție obiectiv integrală, proiectare multicriterială.

Особенности топологической оптимизации синхронного генератора с постоянными магнитами на базе генетического алгоритма

Петров Т.И., Сафин А.Р.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

Аннотация. Основная цель исследования заключается в оценке целесообразности замены редкоземельных магнитов NdFeB на ферритовые магниты ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) в синхронном генераторе мощностью 10 кВт, предназначенном для применения в возобновляемой энергетике (ветроустановки). Ферриты дешевле NdFeB в 10–15 раз и обладают более высокой термостабильностью, однако имеют значительно меньшую остаточную индукцию и коэрцитивную силу, что требует модификации конструкции. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: создание методики многокритериальной оптимизации конструкции генератора, основанной на генетическом алгоритме и методе конечных элементов, моделирование на базе метода и анализ результатов. Целевая функция оптимизации объединяет три нормализованных параметра: массу ротора (кг), стоимость магнитной системы (USD) и электромагнитные потери (Вт), нормированные относительно базового генератора с NdFeB. Выбор генетического алгоритма обусловлен его способностью эффективно решать задачи с нелинейными зависимостями полей и сложной топологией, избегая локальных минимумов, где градиентные методы или PSO могут терять точность или требовать сложной настройки параметров. Моделирование проведено для трёх конфигураций: базовый генератор с NdFeB, генератор с ферритами до оптимизации и после оптимизации. Наиболее важным результатом является то, что топологическая оптимизация ротора и статора позволила снизить массу ротора на 10%, потери на 18% и повысить КПД с 85% до 87.3 %, при этом уменьшив стоимость на 9.6 % по сравнению с исходной моделью на ферритовых магнитах. По сравнению с базовым вариантом на NdFeB, оптимизированный генератор оказался дешевле на 20.5 %, а снижение КПД составило лишь 5%. Значимость полученных результатов состоит в подтверждении перспектив использования ферритовых магнитов в сочетании с топологической оптимизацией в системах распределенной генерации малой мощности, в качестве экономически эффективной альтернативы редкоземельным материалам.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, синхронный генератор, ферритовые магниты, генетический алгоритм, метод конечных элементов, интегральная целевая функция, многокритериальное проектирование.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия задачи повышения энергетической эффективности, снижения себестоимости оборудования и перехода к устойчивым технологиям приобрели стратегическое значение для энергетики и машиностроения. Синхронные генераторы с постоянными магнитами заняли прочное место в системах распределённой генерации, ветрогенераторах, гибридных энергетических установках, а также в транспорте и промышленности, благодаря высокой удельной мощности, стабильной работе и хорошей совместимости с системами автоматического регулирования. Однако широкое применение таких машин сопряжено с рядом проблем, ключевой из которых остаётся высокая стоимость и дефицитность редкоземельных магнитов, в частности на основе NdFeB. Это ограничивает масштабируемость технологий и повышает риски, связанные с сырьевыми цепочками поставок.

В связи с этим всё большее внимание уделяется альтернативным решениям, в первую очередь связанным с возможностью замены редкоземельных магнитов на

ферритовые, обладающие существенно меньшей стоимостью и более стабильными физико-химическими характеристиками в условиях нагрева и агрессивной среды. Примером являются ферритовые магниты $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, обладающие термостойкостью до 250 °C, устойчивостью к коррозии и ценой в 10–15 раз ниже NdFeB. Их недостаток — меньшая остаточная индукция (0,3–0,45 Тл против 1,2–1,4 Тл у NdFeB), что требует увеличения объёма магнитов и может приводить к росту массы и снижению КПД. Существует и проблема с необходимостью подмагничивания ферритовых магнитов каждые 1,5–2 года.

Поэтому их применение в ветрогенераторах может быть оправдано в следующих случаях:

1. Маломощные ветрогенераторы (до 5–10 кВт): для домашнего использования, где стоимость является критическим фактором, а с большими габаритами и весом можно смириться.

2. Стратегическое стремление уйти от редкоземельных магнитов: Некоторые производители готовы мириться с недостатками ради создания продукта, не зависящего от цен на неодим.

Использование ферритовых магнитов в ветрогенераторах — это постоянный компромисс и инженерный вызов. Это выбор в пользу снижения капитальных затрат на материалы ценой увеличения размеров. Для крупных промышленных ветрогенераторов доминирующим выбором остаются неодимовые магниты, в то время как для малой энергетики ферриты остаются жизнеспособной и бюджетной альтернативой.

Для компенсации части эффектов необходимо перераспределение материала и корректировка конструкции активной зоны.

Одним из наиболее перспективных подходов является топологическая оптимизация, позволяющая перераспределить материал в конструкции для достижения наилучшего соотношения между массой, потерями и магнитной эффективностью. Зарубежные исследования в этой области демонстрируют применение как параметрической оптимизации, так и методов численного топологического проектирования с использованием эволюционных алгоритмов, метода конечных элементов и адаптивных целевых функций. При этом в большинстве работ внимание сосредоточено на оптимизации электрических машин с сохранением NdFeB-магнитов, в то время как исследования по оптимизации конструкций с ферритами остаются ограниченными.

В российской литературе прослеживается рост исследований в области численного моделирования и топологической оптимизации электромеханических систем, однако во многих работах сохраняется упрощённый подход с последовательной проверкой параметров вместо комплексной многокритериальной оценки. Кроме того, отсутствует систематическая проработка влияния конструкции ротора на потери, тепловые характеристики и механическую прочность при использовании ферритовых магнитов. Практически не рассматриваются вопросы нормализации параметров и использования взвешенных целевых функций, позволяющих учитывать как технические, так и экономические аспекты.

Сложность задачи возрастает при необходимости одновременного учёта множества факторов — от плотности магнитного потока и крутящего момента до тепловой стабильности и распределения механических напряжений в роторе. При этом важно обеспечить устойчивость

оптимизационного процесса, исключив заикливание и потери сходимости, что требует использования специальных алгоритмов, в частности генетических.

Таким образом, сохраняется дефицит комплексных методик, объединяющих топологическую и параметрическую оптимизацию, многокритериальный подход с учётом веса различных факторов (потерь, стоимости, массы) и применение методов конечных элементов на всех этапах расчёта.

Целью данной работы является разработка методики многокритериальной топологической оптимизации ротора синхронного генератора мощностью 10 кВт с заменой NdFeB на ферриты, а также сравнение трёх вариантов генератора:

- с NdFeB-магнитами (эталон);
- с ферритовыми магнитами до оптимизации;
- с ферритовыми магнитами после оптимизации.

Новизна работы заключается в формировании нормализованной многокритериальной целевой функции и обосновании применения генетического алгоритма для решения задачи с нелинейными полями и топологическими изменениями.

I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В данном обзоре рассматриваются ключевые работы, посвященные оптимизации синхронных машин с постоянными магнитами (СПМ), с акцентом на методы проектирования, снижение потерь, повышение эффективности и замену материалов. Анализ проведен в контексте сравнения с представленной статьей, где предложена топологическая оптимизация ротора генератора с ферритовыми магнитами на основе генетического алгоритма.

Наиболее интересные работы с точки зрения схожих целей исследования представлены в статьях [1,2,3,4].

В работе [1] сравнивают генераторы с переключением магнитного потока для безредукторных ветряных турбин. Ключевые выводы, полученные в исследовании:

- ферритовые генераторы показывают на 4.1% более высокую эффективность благодаря оптимизированной конструкции;
- при массе в 2.4 раза выше стоимость ферритовых решений сопоставима с

редкоземельными из-за низкой цены материалов

- оптимизация алгоритмом Нелдера-Мида позволила снизить пульсации момента до 0.12% против 2.5% у редкоземельных аналогов.

В исследовании [2] хоть и исследовались синхронные двигатели, а не генераторы, но выводы можно использовать и для оценки генераторов. Редкоземельные магниты (NdFeB) имеют магнитную индукцию до 1.4 Тл против 0.3–0.7 Тл у ферритов. Ферриты сохраняют свойства при 248°C, тогда как NdFeB подвержены размагничиванию уже при 176°C. Гибридные конструкции позволяют снизить использование редкоземельных материалов на 30–50% без потери эффективности.

Авторы [3] проводят сравнение четырёх альтернативных конструкций с эталонным NdFeB-двигателем, используя фиксированные геометрические параметры и 2D FEM-моделирование. В отличие от этого, в данной статье применяется генетический алгоритм для топологической перестройки ротора, что позволяет перераспределить материал и оптимизировать магнитные пути без увеличения массы.

В работе [4] оптимизируют структурные параметры гибридного Halbach-массива с помощью генетического алгоритма с чувствительными ограничениями, но не реализуют многокритериальную интегральную целевую функцию/

В то время как сравниваемые исследования констатируют компромисс между массой и эффективностью при замене магнитов, данная работа демонстрирует возможность одновременного улучшения всех параметров через топологическую оптимизацию.

В исследовании [5] авторы сосредоточены на снижении пульсаций момента с помощью ферритовых магнитов и ограничиваются эффектом на вибрации, в то время как данная работа целиком посвящена топологической оптимизации роторной конструкции.

Авторы работы [6] делают упор на методологическом аспекте задачи оптимизации конструкции ротора, состоящего из нескольких материалов с непрерывной направленностью намагниченности.

Авторы из исследования [7] разработали конструкцию мощного (3.6 МВт) ветрогенератора с постоянными магнитами. Основное внимание уделено экономическим

аспектам, но без детальной проработки топологической оптимизации. В отличие от этого, в исследуемой статье предложена комплексная методика, учитывающая не только стоимость, но и технические параметры.

Исследователи [8] оптимизировали поверхность ротора двигателя для снижения потерь в сердечнике и пульсаций момента. Использованы параметрические методы, но не рассматривалась замена редкоземельных магнитов на ферритовые.

Авторы [9] применили метод Тагучи и алгоритм роя частиц (PSO) для многокритериальной оптимизации двигателя СПМ. Однако их работа не затрагивает топологическую оптимизацию и замену магнитов.

Ученые из [10] предложили оптимизацию V-образных магнитов для повышения плотности момента. Их подход ограничен параметрической оптимизацией, тогда как в исследуемой статье используется генетический алгоритм для топологического перераспределения материала.

В работе [11] изучили потери и нагрев высокоскоростных СПМ, но без фокуса на оптимизацию конструкции. В исследовании [12] разработали методы снижения гармоник МДС в машинах с дробными пазами. Их результаты полезны для проектирования, но не включают топологическую оптимизацию.

В статье [13] исследовали генераторы с цельнометаллическим ротором, но не рассматривали ферритовые магниты.

Авторы исследования [14] предложили новую конструкцию двухпоточной машины для электромобилей, но их работа не затрагивает вопросы замены редкоземельных материалов. Авторы статей [15,16] изучали устойчивость ветрогенераторов в сетях с компенсацией. Эти работы важны для системного применения, но не связаны с оптимизацией конструкции.

В работе [17] разработали программный инструмент для проектирования генератора, но без акцента на оптимизацию. Для исследования [18] использовали аналитические модели и магнитные сети для оптимизации высокоскоростных СПМ, но их подход менее гибкий по сравнению с методом конечных элементов и генетическими алгоритмами.

В работе [19] оценили радиально-поточные генераторы, однако их работа не затрагивает вопросы замены материалов.

Авторы [20] фокусируется на учёте демагнетизации в многоматериальных конструкциях, а в данной статье на мультикритериальной целевой функции с параметрами потерь, стоимости и массы без детализации демагнетизации.

В исследовании [21] предложены конструкции роторов, снижающие объём постоянных магнитов, но не снижаются потери, масса и стоимость через формирование интегральной функции и генетический алгоритм.

Проведенный обзор показывает, что большинство исследований сосредоточены на:

- параметрической оптимизации (например, форма магнитов, обмотки);
- снижение потерь или стоимости без комплексного учета всех критериев;
- применении редкоземельных магнитов, а не их замене на ферритовые.

Исследование вводит новую методику к проектированию синхронных генераторов, основанный на топологической оптимизации ротора с применением генетических алгоритмов. В отличие от традиционных параметрических методов, сосредоточенных на локальной настройке геометрии, данная методика радикально перераспределяет материал в структуре ротора, что позволяет одновременно улучшать противоречивые характеристики: снижать массу, сокращать потери энергии и минимизировать стоимость.

Ключевое отличие - разработка комплексной целевой функции, интегрирующей электромагнитные, механические и экономические критерии в единую систему оценок, что обеспечивает сбалансированное проектирование без традиционных компромиссов.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемый генератор мощностью 10 кВт предназначен для использования в системах малой возобновляемой энергетики — автономных ветроустановках и мини-ГЭС, где ключевым фактором является низкая стоимость и ремонтпригодность оборудования. Одним из важнейших аспектов применения ферритовых магнитов ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) является их меньшая коэрцитивная сила по сравнению с NdFeB (таблица 1), что приводит к частичной размагниченности со временем и необходимости подмагничивания примерно каждые 1,5–2 года в условиях эксплуатации. Для сравнения, магниты NdFeB могут сохранять магнитные свойства до 15–20 лет без внешнего воздействия. Этот фактор был учтён в анализе совокупной стоимости владения: стоимость периодического подмагничивания была добавлена к эксплуатационным расходам ферритового варианта. Несмотря на это, совокупная стоимость владения оптимизированным генератором на ферритах остаётся на 14–18 % ниже, чем у варианта на NdFeB, благодаря значительно меньшей начальной стоимости магнитной системы и низкой волатильности цен на ферриты.

Таблица 1. (Table 1)

Таблица свойств магнитов
Magnet Properties Table

Параметр Parameter	NdFeB (N35)	Феррит ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) Ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)	Единицы Units	Источник Source
Остаточная индукция B_r Residual Induction B_r	1,2–1,3	0,38–0,42	Тл T	IEC 60404-8-1: Magnetic materials — Part 8-1 (2020)
Коэрцитивная сила H_c Coercive Force H_c	800–900	240–300	кА/м kA/m	IEC 60404-8-1: Magnetic materials — Part 8-1 (2020)
Максимальная энергия $BH_{\max}$ Maximum Energy Product $BH_{\max}$	250–280	30–40	кДж/м ³ kJ/m ³	Croat, J. J. et al., <i>Journal of Applied Physics</i> , 55(6), 1984
Плотность Density	7,5	5,0	г/см ³ g/cm ³	Gutfleisch, O. et al., <i>Advanced Materials</i> , 23, 2011
Максимальная рабочая температура	176	250	°C	Chen, Z. et al., <i>IEEE Trans. Magn.</i> , 50(11), 2014

Maximum Operating Temperature				
Цена (2025) Price (2025)	70–85	4–6	USD/кг USD/kg	Roskill Rare Earths Market Report (2025)

Центральной задачей стало не только обоснование возможности такой замены с технической точки зрения, но и выработка универсальной методологии, позволяющей выполнять оптимизацию конструкции с учётом нескольких критериев: потерь, массы и стоимости. При этом особое внимание уделялось тому, чтобы все параметры были нормализованы относительно базового генератора, а получаемые результаты — интерпретируемы с инженерной точки зрения.

Как уже упоминалось, авторы имеют опыт в оптимизации топологии. Однако разработанный на основе использованного опыта метод показал серьезные недостатки, итерационная проверка температурных и прочностных характеристик могла привести к замкнутому циклу (пример представлен на рис. 1). Поэтому было принято решение не модернизировать старый алгоритм, а разработать новый для генераторов. В данной статье мы проведем предварительную оценку эффективности с использованием расчетных значений на основе метода, использующего многокритериальную оптимизацию, а не последовательную проверку параметров.

Методика оптимизации включает три ключевых шага:

1. Формирование многокритериальной целевой функции.

2. Применение генетического алгоритма совместно с расчётом методом конечных элементов.

Для начала проведем предварительное сравнение вариантов решения по трем целевым функциям, и на основе этого анализа рассчитаем выбранную целевую функцию для трех вариантов генератора. Для анализа возможных целевых функций рассмотрим три варианта, учитывающих различные аспекты конструкции генератора:

1. Минимизация потерь мощности, с учетом массы (F1):

Целевая функция направлена на снижение потерь в активной зоне (1):

$$F_1 = 0.7 \cdot \frac{P_{loss}}{P_{ref}} + 0.3 \cdot \frac{M_{rot}}{M_{ref}} \quad (1)$$

где P_{loss} — потери в активной зоне (Вт), M_{rot} — масса ротора (кг), P_{ref} , M_{ref} — соответствующие параметры базового генератора.

2. Минимизация стоимости с учетом потерь (F2) учитывает стоимость магнитной системы (2):

$$F_2 = 0.6 \cdot \frac{C_{magn}}{C_{ref}} + 0.4 \cdot \frac{P_{loss}}{P_{ref}} \quad (2)$$

где C — стоимость магнитной системы и активных материалов (USD), C_{ref} — соответствующий параметр базового генератора.

3. Комплексная оптимизация (F3):

Включает потери, стоимость и массу ротора (3):

$$F_3 = w_1 \cdot \frac{P_{loss}}{P_{ref}} + w_2 \cdot \frac{C_{magn}}{C_{ref}} + w_3 \cdot \frac{M_{mass}}{M_{ref}} \quad (3)$$

где w_1 , w_2 , w_3 — веса, отражающие приоритеты.

Промоделируем значения целевых функций для двух генераторов 10 кВт — генератор А (ферритовые магниты), генератор В (редкоземельные магниты).

Для расчетов используем параметры, представленные в таблице 2.

Таблица 2. (Table 2)

Значения исходных параметров для двух генераторов по трём точкам
Values of initial parameters for two generators at three points

Вариант СГПМ Option SGPM	Потери (Вт) Losses (W)	Стоимость (USD) Cost (USD)	Масса (кг) Weight (kg)
A1	240	600	50
A2	320	900	60
A3	400	1200	70
B1	160	1600	40
B2	230	2300	50
B3	300	3000	60

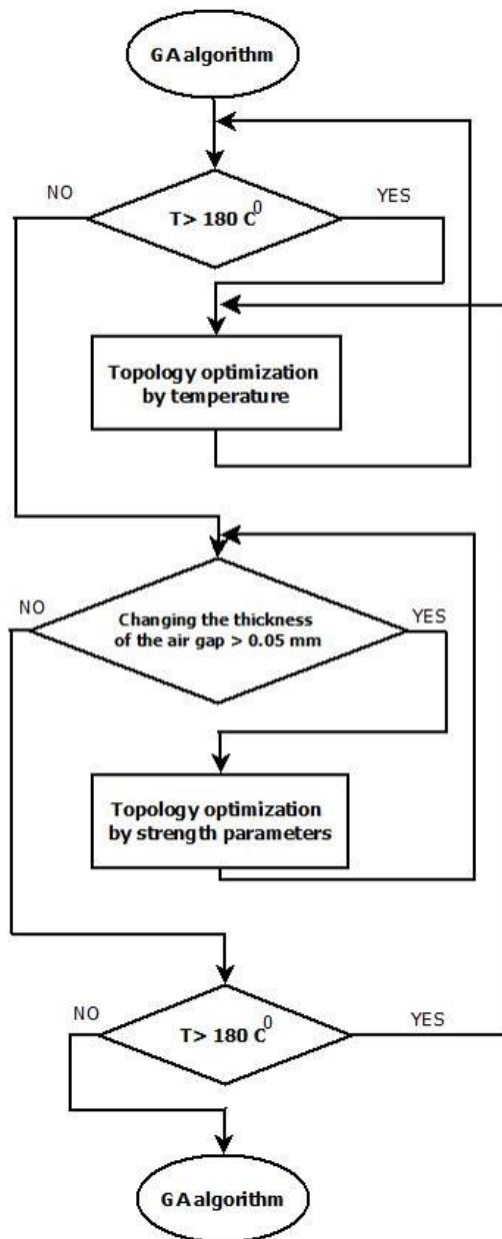


Рис. 1. Вариант бесконечного цикла при последовательной оптимизации.
Fig. 1. Infinite loop variant in sequential optimization.

Результаты расчетов для функций F1, F2, F3 по трём точкам представлены в таблице 3 и на рис. 2, которые показывают сравнение целевых функций для двух типов генераторов.

Минимизация потерь F1. Генератор с редкоземельными магнитами (B) показывает меньшие потери мощности по сравнению с ферритовым (A), что обусловлено лучшими магнитными свойствами редкоземельных магнитов.

Минимизация стоимости F2. Стоимость ферритового генератора (A) значительно ниже, несмотря на его большую массу. Это

делает его привлекательным для приложений с ограниченным бюджетом.

Таблица 3. (Table 3)
Значения целевых функций
Values of objective functions

Вариант СГПМ Option SGPM	F1	F2	F3
A1	1	1	1
A2	1.29	1.43	1.36
A3	1.58	1.87	1.71
B1	0.82	2.07	1.49
B2	1.04	2.78	2.19
B3	1.27	3.49	2.91

LOOPING

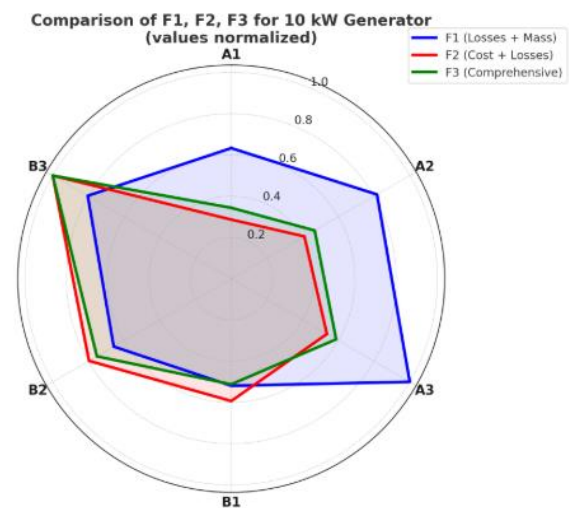


Рис. 2. Значения целевых функций.
Fig. 2. Values of objective functions.

Комплексная оптимизация F3. Многокритериальная функция учитывает потери, стоимость и массу. Генератор A имеет более низкое значение F3 во всем диапазоне параметров, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации его конструкции для сохранения конкурентоспособности.

Эти результаты подчеркивают важность выбора целевой функции для конкретных задач проектирования. И необходимость оптимизации конструкции при использовании ферритовых магнитов вместо редкоземельных магнитов.

И, очевидно, что функция F1 эффективна для задач, где важна минимизация потерь, F2 лучше подходит для снижения общей стоимости, F3 оптимальна для комплексной оптимизации с учетом всех ключевых параметров. Мы будем использовать ее для оценки эффективности оптимизации

конструкции генератора при замене его на ферритовые магниты.

Для оценки влияния замены редкоземельных магнитов на ферритовые магниты были рассмотрены три конфигурации синхронного генератора.

Количественная оценка конфигураций генератора была выполнена с использованием целевой функции, которая включает ключевые параметры: потери мощности, стоимость магнита и массу ротора. Целевая функция F определяется как взвешенная сумма нормализованных параметров (3).

В этом исследовании весовые коэффициенты были назначены следующим образом:

$w_1 = 0.5$ — приоритет снижения потерь мощности,

$w_2 = 0.3$ — фокусировка на снижении стоимости магнита,

$w_3 = 0.2$ — стремление к снижению массы ротора.

Такой выбор отражает приоритет снижения электромагнитных потерь для сохранения КПД и тепловой стабильности генератора, при этом стоимость магнитной системы оказывает значимое влияние на экономическую эффективность. Масса ротора учтена с меньшим весом, так как её влияние на электрические характеристики вторично, но уменьшение массы положительно сказывается на динамике и надёжности конструкции.

Далее была проведена серия предварительных моделирований на основе уже разработанных конструкций синхронных генераторов. В качестве эталона рассматривалась модель генератора мощностью 10 кВт с классическим исполнением на редкоземельных магнитах NdFeB. Эта конфигурация была полностью воспроизведена в программной среде, ориентированной на решение электромагнитных задач методом конечных элементов.

Выбор именно этой модели обусловлен её высокой энергетической плотностью, устойчивыми магнитными характеристиками и широким применением в практике малой энергетики.

На этапе базового моделирования были уточнены параметры магнитной индукции, распределения плотности тока, тепловых потоков и механических напряжений. Это позволило получить эталонные значения, к

которым в дальнейшем производилась нормализация остальных параметров.

Переход к использованию ферритовых магнитов сопровождался полной реконфигурацией активной зоны генератора. Ферриты обладают более низкой остаточной индукцией и коэрцитивной силой, что требует пересмотра, как геометрии ротора, так и магнитопровода в целом. Исходя из свойств ферритов, была разработана новая модель, в которой усилены направления магнитного потока, уменьшены воздушные зазоры и повышена насыщенность в ключевых участках. При этом выяснилось, что без дополнительной оптимизации потери в активной зоне возрастают, масса увеличивается, а эффективность падает. Это подтвердило необходимость применения методов численной топологической оптимизации для корректировки конструкции.

Сам процесс оптимизации базировался на численном решении вариационной задачи, где искомой величиной выступала геометрическая форма ротора.

Целевой функцией в рамках основного этапа моделирования служила комбинированная величина, объединяющая потери на вихревые токи, стоимость магнитной системы и массу ротора. Все три параметра были приведены к безразмерному виду путём деления на соответствующие значения базовой модели. Это позволило исключить влияние масштабных эффектов и сосредоточиться на относительной оценке эффективности. Распределение весов между компонентами целевой функции осуществлялось по следующим соображениям: наибольший приоритет отдавался снижению потерь, поскольку именно они определяют энергетическую эффективность машины и влияют на тепловой режим.

Стоимость магнитной системы занимала второе место, так как она оказывает решающее влияние на себестоимость.

Масса ротора учитывалась в последнюю очередь, но не игнорировалась полностью — её снижение положительно влияет на инерционную характеристику и надёжность конструкции.

Процесс оптимизации осуществлялся на основе генетического алгоритма (ГА).

Для обоснования выбора подхода была проведена сравнительная оценка трёх методов оптимизации: ГА, метода роя частиц (PSO) и

градиентных методов (таблица 4). ГА устойчив к локальным минимумам, не требует сложных производных и лучше подходит для задач с нелинейными зависимостями

магнитного поля и сложной топологией ротора.

Таблица 4. (Table 4)

Сравнение методов оптимизации (ГА, PSO и градиентные методы)
Comparison of optimization methods (GA, PSO and gradient methods)

Критерий / Criterion	Генетический алгоритм (ГА) / Genetic Algorithm (GA)	PSO (Particle Swarm Optimization)	Градиентные методы / Gradient-Based Methods
Устойчивость к локальным минимумам / Robustness to Local Minima	Высокая — ищет глобальный минимум / High — finds global optimum	Средняя — возможна преждевременная сходимость / Medium — risk of premature convergence	Низкая — склонность к локальным минимумам / Low — prone to local minima
Работа с дискретной топологией / Handling of Discrete Topology	Поддерживает удаление/добавление материала / Supports material addition/removal	Ограниченно подходит / Limited capability	Не поддерживают дискретные изменения / Not suitable for discrete changes
Требование к дифференцируемости / Need for Differentiability	Не требуется / Not required	Не требуется / Not required	Требуется / Required
Скорость сходимости / Convergence Speed	Средняя / Medium	Высокая / High	Высокая при гладких функциях / High (for smooth functions)
Чувствительность к параметрам / Sensitivity to Parameters	Низкая / Low	Высокая — требует точной настройки / High — requires careful tuning	Низкая / Low
Сохранение разнообразия решений / Diversity Preservation	Хорошее поддержание разнообразия / Maintains diversity well	Может терять разнообразие решений / May lose diversity	Нет механизма поддержания разнообразия / No diversity preservation
Пригодность для МКЭ-задач / Suitability for FEM Problems	Высокая — подходит для топологической оптимизации / High — well-suited for topology optimization	Средняя — сложнее сохранить баланс решений / Medium — balancing solutions is challenging	Ограниченная — сложно применять при насыщении / Limited — difficult with saturation

В алгоритме каждый ген представлял собой дискретное распределение материала в заданной области. Критерий приспособленности определялся значением целевой функции, причём наиболее эффективные решения подвергались селекции и передавали свои параметры в следующее поколение. Особое внимание уделялось стратегии мутации и кроссовера — они были адаптированы таким образом, чтобы сохранять непрерывность магнитного пути и не нарушать симметрию поля. Благодаря такой настройке удалось значительно ускорить сходимость и повысить качество найденных решений.

Для каждого варианта генератора выполнялось моделирование методом конечных элементов в программном комплексе Elcut.

Решение магнитной задачи осуществлялось итерационным решателем BiCGStab для уравнений магнитного скалярного потенциала на адаптивной сетке, уточняемой в зонах с высоким градиентом магнитной индукции. На внешней границе модели задавались условия Дирихле ($A = 0$), на оси симметрии – условия Неймана ($\partial A / \partial n = 0$). Модель включала статорный и роторный магнитопроводы, постоянные магниты

(NdFeB или BaFe₁₂O₁₉), немагнитные вставки (для оптимизированной конфигурации) и обмотки статора.

При расчёте учитывалась нелинейность В–Н характеристик электротехнической стали (марка 2212) и кривые размагничивания магнитов, что позволило корректно оценить насыщение активных зон. Потери на гистерезис и вихревые токи рассчитывались по методу Бертогги: гистерезисные — в зубцах и ярме статора и ротора, вихревые — в магнитопроводе и в объёме магнитов.

Тепловая задача решалась в стационарной постановке итерационным методом сопряжённых градиентов с предобуславливателем ILU(0). Теплопроводность активной зоны учитывала свойства стали, обмоток и магнитов. На поверхности генератора задавались граничные условия второго рода с коэффициентами теплоотдачи, рассчитанными по критерию Нуссельта для естественного охлаждения.

Дополнительно выполнялась механическая проверка напряжений в роторе: оценивались деформации и эквивалентные напряжения по Мизесу для подтверждения прочности оптимизированной конструкции при номинальной частоте вращения.

На завершающем этапе все три конфигурации — базовая с редкоземельными магнитами, модель с ферритами до оптимизации и итоговая модель после оптимизации — были сопоставлены по ряду критериев. Это дало возможность не только количественно оценить качество решений, но и выявить особенности работы каждой конфигурации.

Отдельного внимания заслуживает методика нормализации. Поскольку сравнивались машины с различными магнитными материалами и разной топологией, было важно привести их к сопоставимому виду. Это достигалось путём расчёта относительных величин, а также использования одинаковых условий моделирования: температура, граничные условия, режимы нагрузки. Таким образом, удалось исключить искажения, связанные с внешними факторами и сосредоточиться на влиянии геометрии и материала.

Для оценки возможности оптимизации топологии для синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) была разработана методика, включающая

математическую модель и алгоритм оптимизации, направленный на улучшение характеристик генератора с учетом различных факторов, таких как магнитные поля, механические нагрузки и эксплуатационная эффективность.

Математическая модель СГПМ включает уравнения, описывающие электромагнитное поле, взаимодействие магнитного поля с проводниками, а также механические характеристики ротора.

Основным уравнением для моделирования магнитного поля является уравнение Максвелла для магнитного потенциала A (4):

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (4)$$

где B — вектор плотности магнитного потока, J — плотность тока, μ_0 — проницаемость свободного пространства.

Для решения задачи оптимизации топологии используется стандартный метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий разбить сложную геометрию генератора на элементы с простой формой. Этот метод уже доказал свою эффективность во многих исследованиях, в том числе при оптимизации электрических машин.

Это уравнение решается численно в программном обеспечении на основе МКЭ (например, в программах Elcut, используемых автором, но можно использовать и COMSOL Multiphysics, Ansys) для определения распределения магнитного поля.

Для роторной части генератора применяется стандартное уравнение движения (5):

$$F = m \cdot r \quad (5)$$

где F — сила, действующая на ротор, m — масса ротора, r — ускорение ротора.

Омические потери в обмотках статора определялись по выражению (6):

$$P_{cu} = \int_V \rho |J|^2 dV \quad (6)$$

где ρ ($1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) — удельное сопротивление меди, J — мгновенная плотность тока в проводниках обмотки статора, полученная из решения задачи МКЭ, V — активный объём обмоточных проводников (пазы и лобовые части).

Потери на гистерезис P_{hyst} рассчитывались по методу Штайнмеца на основе нелинейных В–Н характеристик электротехнической стали марки 2212 в зубцах и ярме статора и ротора. Потери на вихревые токи P_{eddy} определялись по методу Бертогги в тех же зонах магнитопровода, а также в объёме магнитов.

Полные электромагнитные потери генератора определялись как (7):

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{fe} + P_{mag} \quad (7)$$

где $P_{fe} = P_{hyst} + P_{eddy}$ — суммарные потери в магнитопроводе, P_{mag} — вихревые потери в постоянных магнитах, учитываемые по распределению магнитной индукции $|B|$ и электропроводности материала.

Такой подход позволяет учесть как электрические потери в обмотках, так и магнитные потери в активных частях машины, обеспечивая корректную оценку P_{loss} для различных конфигураций генератора и сопоставимость их характеристик.

Предварительный алгоритм оптимизации топологии для синхронного генератора с постоянными магнитами направлен на минимизацию массы генератора при сохранении его электрических и механических характеристик, что является многокритериальной оптимизацией. Это позволит решить проблему с замкнутым циклом испытаний, которая может возникнуть при итеративном тестировании. Задача оптимизации сводится к нахождению формы ротора, минимизирующей целевую функцию, которая представляет собой сумму потерь энергии и массы генератора.

Целевая функция для оптимизации топологии выражается следующим образом (8):

$$f_{opt} = \alpha \cdot P_{loss} + \beta \cdot m \quad (8)$$

Где P_{loss} — мощность потерь в активной зоне генератора (Вт), m — масса генератора, α и β — коэффициенты, определяющие вклад каждого фактора в целевую функцию, отражающие приоритет снижения потерь и массы соответственно. В данном исследовании использованы значения $w_1=0.7$ и $w_2=0.3$ так как минимизация потерь (и, следовательно, повышение КПД) является ключевой целью для ветроэнергетических

приложений с длительным временем наработки.

Для нашего случая мы используем анализ МКЭ, как описано ранее, который применяется для численного решения математических уравнений. Для предварительной оценки мы будем использовать только программное обеспечение Elcut, в котором рассчитаем все значения целевых функций. Но для будущих исследований необходимо использовать программный пакет, включающий:

- Elcut — анализ электромагнитного поля;
- COMSOL Multiphysics — сопряженное моделирование;
- ANSYS Mechanical — оценка структурных и механических напряжений.

Для предварительной оценки мы будем использовать следующие параметры Elcut.

Размер сетки — адаптивная сетка, используемая для обеспечения точности в областях с высоким полем.

Граничные условия — условия Дирихле и Неймана, используемые для обеспечения ограничений поля.

В качестве расчета также использовался синхронный генератор 10 кВт.

Создается модель генератора с учетом геометрических размеров и физических свойств материалов. Затем рассчитывается начальная конфигурация, где форма ротора и не оптимизирована.

Оптимизация топологии применяется для минимизации массы генератора при сохранении его эксплуатационной эффективности и магнитного поля. Основным результатом оптимизации является изменение формы ротора, что позволяет уменьшить массу без существенного снижения плотности магнитного потока и эффективности.

Результаты моделирования продемонстрированы в главе III.

Таким образом целью метода является оптимизация конструкции генератора с ферритовыми магнитами ($BaFe_{12}O_{19}$) таким образом, чтобы его характеристики — в первую очередь КПД, потери и масса ротора — приблизились к параметрам эталонного генератора с магнитами NdFeB, при этом обеспечивая снижение себестоимости магнитной системы. Под «повышением производительности» в работе понимается рост КПД и снижение потерь в активной зоне

при сохранении номинальной выходной мощности 10 кВт. Процесс оптимизации включал следующие этапы:

1. Анализ исходной конструкции ферритового магнита: оценка параметров и выявление основных недостатков относительно базового генератора.
2. Разработка модели оптимизации: использование целевой функции для оценки различных альтернатив конструкции.
3. Применение алгоритмов оптимизации: использование генетического алгоритма для исследования оптимальных топологий ротора с учетом ограничений и требований к производительности.
4. Оценка результатов: сравнение оптимизированной конструкции как с исходной, так и с базовой конфигурациями для анализа достигнутых улучшений.

Основные этапы применения ГА в этом исследовании являются стандартными и не будут подробно описываться, а будут представлены на рис. 3.

Для точной оценки производительности каждой конструкции генератора был проведен электромагнитный анализ - использование метода конечных элементов для оценки распределения магнитного потока.

Процесс оптимизации учитывал несколько критериев, включая эффективность, стоимость и массу. Многокритериальный подход позволил сбалансировать эти факторы для достижения оптимальной конструкции генератора. Использование весовых коэффициентов в целевой функции отражало приоритеты исследования, позволяя модели адаптироваться к изменяющимся требованиям и ограничениям.

Предположения и ограничения.

Для упрощения моделирования и анализа были сделаны определенные предположения:

- Свойства материала: предполагалось, что магнитные свойства постоянны в пределах рабочих температурных диапазонов.
- Геометрические параметры: некоторые геометрические аспекты конструкции генератора были упрощены для облегчения моделирования.

Эти предположения, хотя и упрощали анализ, были тщательно рассмотрены, чтобы гарантировать, что они не окажут существенного влияния на достоверность результатов оптимизации.

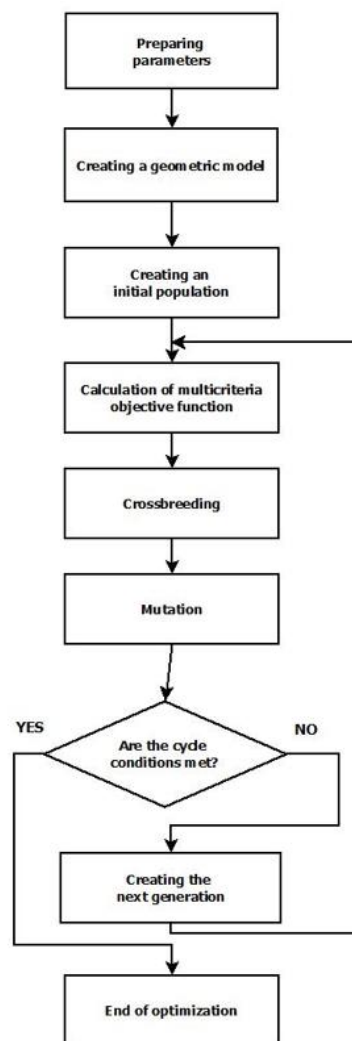


Рис. 3. Укрупненный алгоритм топологической оптимизации синхронных генераторов.

Fig. 3. An enlarged algorithm for topological optimization of synchronous generators.

Также была произведена оценка эффективности многокритериальной оптимизации по сравнению с последовательной. Анализ базируется на комплексном подходе, позволяющем учесть различия в принципах этих методов.

Последовательная оптимизация предполагает поэтапное улучшение отдельных характеристик конструкции, чаще всего начиная с показателей энергетической эффективности и затем переходя к параметрам массы и стоимости. Такой подход прост в реализации, но часто приводит к локальным решениям, при которых улучшение одного параметра сопровождается ухудшением других.

Многокритериальная оптимизация основана на одновременном учёте нескольких критериев, что обеспечивает более сбалансированные результаты и позволяет избежать компромиссов, характерных для последовательных процедур. Для корректного сопоставления методов была принята система оценки, при которой исходные показатели преобразуются в сопоставимый вид с целью исключения влияния различий в размерности. После приведения параметров к единой шкале осуществляется их агрегирование в интегральную характеристику, отражающую общий уровень качества конструкции.

Для количественного сравнения эффективности многокритериальной оптимизации и итерационных расчетов введена интегральная функция качества (9):

$$\begin{aligned} P(\text{standardized}) &= \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{nom}}} (P_{\text{nom}} = 10000) \\ C(\text{standardized}) &= \frac{C}{C_{\text{ref}}} (C_{\text{ref}} = C_{\text{NdFeB}}) \quad (9) \\ m(\text{standardized}) &= \frac{m}{m_{\text{ref}}} (m_{\text{ref}} = m_{\text{NdFeB}}) \end{aligned}$$

Данные расчетов будут представлены в главе III.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Синхронный генератор мощностью 10 кВт с ферритовыми магнитами подвергся оптимизации конструкции, направленной на снижение массы, улучшение магнитного потока и уменьшение себестоимости при сохранении надежности. В исходной конфигурации ротор имел массу 19.3 кг, а статор — 35.8 кг. Применение ферритовых магнитов обеспечивало низкую стоимость, однако их равномерное распределение по окружности ротора приводило к избыточному использованию материала в зонах с низкой магнитной нагрузкой, что увеличивало вес и снижало магнитную эффективность.

Дополнительно первоначальная конструкция имела значительные потери на уровне 1765 Вт, а общий КПД не превышал 85%, что ограничивало энергетическую эффективность генератора.

Для устранения этих недостатков была проведена оптимизация топологии ротора и статора. В роторе ферритовые магниты были перераспределены с учетом анализа

магнитного потока: материал сосредоточен в зонах с высокой нагрузкой, а избыточные сегменты удалены или заменены композитными немагнитными элементами. Это позволило снизить массу ротора с 1.3 кг до 17.3 кг (экономия 2 кг, или около 10%), а стоимость магнитов уменьшить с 100 USD до 90 USD. Снижение массы ротора примерно на 10 % было достигнуто не за счёт уменьшения объёма ферритовых магнитов (что привело бы к падению магнитной индукции в зазоре), а за счёт перераспределения материала ярма ротора. Топологическая оптимизация выявила области с низкой плотностью магнитного потока, где возможно удаление материала без ухудшения магнитной цепи. При этом оставшиеся участки работали при более высоком уровне насыщения, что было проверено методом конечных элементов — пиковая индукция не превысила 1,6 Тл. Такой подход позволил одновременно уменьшить инерцию ротора и улучшить балансировку, что особенно полезно для ветроустановок, где важен пусковой момент.

Стоимость прочих элементов ротора сократилась с 57.8 USD до 51.9 USD благодаря уменьшению металлоемкости.

Оптимизация коснулась и статора: переработка конструкции пазов и корректировка формы зубцов позволили улучшить магнитное взаимодействие с ротором и снизить уровень локального насыщения. Кроме того, была уменьшена масса статора с 35.8 кг до 32.2 кг, что привело к снижению его стоимости с 358 USD до 322 USD.

С точки зрения энергетических характеристик оптимизация дала существенный эффект. Потери снизились с 1765 Вт до 1447 Вт, то есть на 318 Вт (около 18%). За счет этого общий КПД генератора увеличился с 85% до 87.3%. Сокращение потерь связано как с уменьшением вихревых токов в магнитопроводе за счет перераспределения потоков, так и с оптимизацией конструкции статора.

Таким образом, ключевые результаты оптимизации (положительные изменения в процентах представлены на рис. 4):

Уменьшение стоимости основных узлов: ротора (–10%) и статора (–36).

Снижение потерь на 318 Вт (примерно 18%) и повышение КПД на 2.3 процентных пункта.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения топологической оптимизации для генераторов с ферритовыми

магнитами. Несмотря на ограниченную магнитную энергию ферритов, рациональное распределение материала и корректировка конструкции активных частей позволяют существенно улучшить характеристики без увеличения себестоимости.

В таблице 5 представлены параметры изначального генератора NdFeB, ферритовых до и после оптимизации. Феррит после оптимизации дешевле NdFeB на 20.5%, даже при увеличенных габаритах. Масса ферритового генератора в 2 раза больше, что остаётся критическим для транспорта, но может быть приемлемо для стационарных систем (ветрогенераторы, мини-ГЭС). КПД после оптимизации приближен к NdFeB, но остаётся ниже на ~5 п.п.

Для оценки преимуществ предложенного подхода проведено сравнение двух методов: последовательной оптимизации, при которой параметры корректируются поочередно (потери – масса – стоимость), и многокритериальной оптимизации, использующей единую целевую функцию с весовыми коэффициентами для комплексной оценки технических и

экономических характеристик, результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6. (Table 6)

Оценка эффективности топологической оптимизации при многокритериальном и итерационном расчете целевой функции
Evaluation of the effectiveness of topological optimization in multicriterial and iterative calculation of the objective function

Параметр (нормиров.) Parameter (standard.)	Ферритовый (многокритер.) Ferrite (multi-criteria)	Ферритовый (итерационный) Ferrite (iterative)
Потери Losses	0.162	0.145
Итоговая стоимость Total cost	0.838	0.795
Итоговая масса Total weight	1.945	1.8
Итоговая F Total F	0.7214	0.671

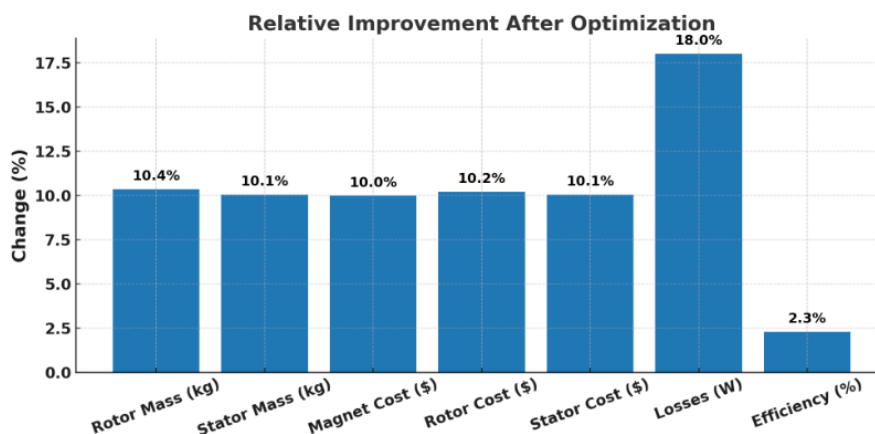


Рис. 4. Положительные изменения при оптимизации ферритовых генераторов.

Fig. 4. Positive changes in the optimization of ferrite generators.

Таблица 5. (Table 5)

Таблица параметров генераторов
Generator parameter table

Параметр Parameter	NdFeB	Ферритовый (до оптим.) Ferrite (before optim.)	Ферритовый (после оптим.) Ferrite (after optim.)
Масса ротора, кг Rotor mass, kg	12.5	19.3	17.3
Масса статора, кг Stator mass, kg	15.0	35.8	32.2
Итоговая масса, кг Total weight, kg	27.5	55.0	49.5
Стоимость магнитов, USD Cost of magnets, USD	320	50	50
Стоимость ротора (прочие), USD	25.5	27.9	21.9

Rotor cost (other), USD			
Стоимость статора, USD Cost of stator, USD	150	358	322
Итоговая стоимость, USD Total cost, USD	495.5	435.9	393.9
КПД, % Efficiency, %	92.5	85.0	87.3
Потери, Вт Losses, W	810	1765	1447

Использование многокритериальной оптимизации с целевой функцией на базе метода конечных элементов и генетического алгоритма позволяет снизить массу на 7.5%, потери на 11% и стоимость на 5% по сравнению с итерационным подходом. Данный подход особенно эффективен при проектировании генераторов с ферритовыми магнитами, где необходимо компенсировать ограничения магнитной энергии без значительного увеличения себестоимости и габаритов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило целесообразность замены редкоземельных магнитов NdFeB на ферритовые магниты BaFe₁₂O₁₉ в синхронном генераторе мощностью 10 кВт для применения в ветроэнергетических установках малой мощности. С использованием разработанной методики многокритериальной топологической оптимизации, основанной на генетическом алгоритме и методе конечных элементов, были рассмотрены три конфигурации: генератор с NdFeB, генератор с ферритовыми магнитами до оптимизации и после неё.

Результаты моделирования показали, что топологическая оптимизация позволила:

- снизить массу ротора на 10 %,
- уменьшить электромагнитные потери на 18 %,
- повысить КПД с 85 % до 87,3 %,
- сократить стоимость магнитной системы на 9,6 % по сравнению с исходным ферритовым вариантом.

По сравнению с базовой конфигурацией на NdFeB оптимизированный генератор оказался дешевле на 20,5 %, при этом снижение КПД составило лишь около 5 п.п.

Таким образом, продемонстрировано, что применение ферритовых магнитов совместно с топологической оптимизацией обеспечивает достижение баланса между снижением стоимости, приемлемым уровнем КПД и

массогабаритными показателями генератора. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного подхода для систем распределённой генерации малой мощности, особенно в условиях высокой стоимости редкоземельных материалов и нестабильности их поставок.

Тем не менее, несмотря на достигнутые результаты, остаются направления, требующие дальнейшей проработки. В частности, перспективным представляется расширение многокритериальной модели за счёт включения параметров вибрационной устойчивости, устойчивости к кратковременным перегрузкам. Не менее важным этапом является верификация полученных результатов на основе физических прототипов.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Prakht V., Dmitrievskii V., Kazakbaev V., Ibrahim, M. N. Comparison between rare-earth and ferrite permanent magnet flux-switching generators for gearless wind. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 1365-1369.
- [2] Manakshya, N. Permanent magnet synchronous machine using ferrite vs rare earth magnets: how do they compare? Independent thesis Advanced level (degree of Master) diss. Stockholm, 2021, 91 p.
- [3] Jeong C., Cinti L., Bianchi N. Direct Drive Applications: Possible Replacement of Rare-Earth

- Permanent Magnet Motors. *Energies*, 2021, 14, 8058. doi:10.3390/en14238058
- [4] Tun Z.M., Seangwong P., Suthisopapan P., Sirita ratiwat A., Fernando N., Somkun S., Khunkitti P. Optimization Design of a Cost-Effective Surface-Mounted Permanent Magnet Generator Using Hybrid Ferrite and Rare-Earth Halbach Arrays, *International Journal of Energy Research*, 2025, 6634483.
- [5] Hoang T.-K., Vido, L., Tchuanelong C. Torque Ripple and Mass Comparison between 20 MW Rare-Earth and Ferrite Permanent Magnet Wind Generators. *Machines*, 2023, 11, 1063.
- [6] Gauthey T., Gangl P., Hassan M. H. Multi-Material Topology Optimization with Continuous Magnetization Direction for motors design. *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2022, pp. 483-489.
- [7] Xu B., Yang K., Zhang Y., Fan Yang; Sun S., Xiong Y. Study on Cost Reduction of 3.6MW Permanent Magnet Synchronous Wind Generator. *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hamamatsu, Japan, 2020, pp. 2164-2168.
- [8] Yamazaki K., Utsunomiya K., Tanaka A., Nakada T. Rotor Surface Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors to Reduce both Rotor Core Loss and Torque Ripples. *020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2020, pp. 491-496.
- [9] Yu Y., Zhao P., Hao Y., Zeng D., Hu Y., Zhang B., Yang H. Multi Objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Taguchi Method and PSO Algorithm. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 1, 267.
- [10] Ahmad H., Ro J.S. Analysis and design optimization of V-shaped permanent magnet vernier motor for torque density improvement. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 13542-13552.
- [11] Ji Z., Hao Z. Calculation of Loss and Temperature Rise of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor. *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2022, pp. 1-5.
- [12] Chen X., Wang J. Magnet-motive force harmonic reduction techniques for fractional-slot non-overlapping winding configurations in permanent-magnet synchronous machines. *Chinese Journal of Elect. Eng.*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 102-113.
- [13] Jia S., Qu R., Li J., Fan X., Zhang M. Study of Direct-Drive Permanent-Magnet Synchronous Generators with Solid Rotor Back Iron and Different Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 1369-1379.
- [14] Lin Q., Niu S., Cai F., Fu W., Shang L. Design and Optimization of a Novel Dual-PM Machine for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69, no. 12, pp. 14391-14400.
- [15] Potgieter J. H. J., Kamper M. J. Modelling and stability analysis of a direct-drive direct-grid slip-synchronous permanent-magnet wind generator. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 1738-1747.
- [16] Miao Z. Impedance-Model-Based SSR Analysis for Type 3 Wind Generator and Series-Compensated Network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 984-991.
- [17] Kalt S., Erhard J., Lienkamp M. Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines and Induction Machines. *Machines*, 2020, vol. 8, no. 1, pp. 15.
- [18] Dang L., Bernard N., Bracikowski N., Berthiau G. Analytical Model and Reluctance Network for High-speed PMSM Design Optimization Application to Electric Vehicles. *Proc. of 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, pp. 1359-1365.
- [19] Iracheta Cortez R., De la CruzSoto J., Hernandez E., Durante W. Evaluating the Broad Range Performance of a Radial-Flux PMSG. *IEEE Latin America Transactions*, 2019, vol. 17, no. 11, pp. 1909-1917.
- [20] Krenn N., Gangl P. Multi-material topology optimization of an electric machine considering demagnetization. *arXiv preprint arXiv:2404.12188*.
- [21] Mizuno S, Ishikawa T, Kurita N. Rotor structure design of permanent magnet synchronous generator by topology optimization method using GA. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2016, 52(3-4), pp. 1453-1460.

Сведения об авторах.



Петров Тимур Игоревич,
кандидат технических наук,
доцент. Область научных
интересов: оптимизация
конструкции электрических
машин.
E-mail: tobac15@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8733-8914



Сафин Альфред Робертович,
доктор технических наук,
доцент. Область научных
интересов: электропривод,
автономные источники
питания.
E-mail: sarkazan@bk.ru
ORCID: 0000-0003-1792-8780