

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В MATLAB

Петров Т.И.

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

tobac15@mail.ru

Резюме: В данном исследовании разработана методика оптимизации конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с использованием генетического алгоритма, направленная на повышение энергоэффективности и снижение пульсаций момента. ЦЕЛЬ работы заключалась в определении оптимальных геометрических параметров двигателя, включая угол охвата магнитов, толщину магнитов, ширину зубца статора, глубину паза и воздушный зазор, с учетом технологических ограничений и электромагнитных характеристик. МЕТОДОЛОГИЯ основана на комбинации аналитического моделирования магнитных цепей и генетического алгоритма, реализованного в MATLAB, с многоцелевой фитнес-функцией, учитывающей крутящий момент, пульсации и КПД. РЕЗУЛЬТАТЫ демонстрируют, что предложенный подход позволяет достичь значительного улучшения характеристик: увеличение момента на 8,9%, снижение пульсаций на 40% и повышение КПД на 3,5 процентных пункта по сравнению с базовой конфигурацией. Установлено, что оптимальная конфигурация достигается при угле охвата магнитов 72° и воздушном зазоре 0,85 мм, что подтверждает необходимость применения современных оптимизационных методов для поиска нетривиальных технических решений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования энергоэффективных двигателей, сокращая время разработки. Исследование вносит вклад в развитие методов компьютерного проектирования электрических машин, демонстрируя эффективность генетических алгоритмов для решения сложных многокритериальных задач электромеханики.

Ключевые слова: синхронный двигатель; оптимизация; ротор; статор; магниты; генетический алгоритм; MATLAB.

Благодарности: 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».

Для цитирования: Петров Т.И. Реализация оптимизации синхронного двигателя на основе генетического алгоритма в MATLAB // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 102-109. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-102-109.

IMPLEMENTATION OF SYNCHRONOUS MOTOR OPTIMIZATION BASED ON GENETIC ALGORITHM IN MATLAB

Petrov T.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

tobac15@mail.ru

Abstract: In this study, a genetic algorithm-based design optimization methodology for a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is developed to improve energy efficiency and reduce torque pulsation. The OBJECTIVE of the study was to determine the optimal motor geometric parameters, including magnet wrap angle, magnet thickness, stator tooth width, slot

depth, and air gap, taking into account technological constraints and electromagnetic characteristics. The METHODOLOGY is based on a combination of analytical modeling of magnetic circuits and a genetic algorithm implemented in MATLAB with a multi-objective fitness function that takes into account torque, pulsation, and efficiency. The RESULTS demonstrate that the proposed approach achieves significant performance improvements: an 8.9% increase in torque, a 40% decrease in pulsation, and a 3.5 percentage point increase in efficiency compared to the baseline configuration. It was found that the optimal configuration is achieved with a magnet coverage angle of 72° and an air gap of 0.85 mm, which confirms the need to use modern optimization methods to find non-trivial technical solutions. CONCLUSION. The results obtained are of practical importance for designing energy-efficient motors, reducing development time. The study contributes to the development of computer-aided design methods for electrical machines, demonstrating the effectiveness of genetic algorithms for solving complex multi-criteria problems of electromechanics.

Keywords: synchronous motor; optimization; rotor; stator; magnets; genetic algorithm; MATLAB.

Acknowledgments: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan."

For citation: Petrov T.I. Implementation of synchronous motor optimization based on genetic algorithm in Matlab. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (3):102-109. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-102-109.

Введение и литературный обзор (Introduction and literature review)

В последние годы генетические алгоритмы (ГА) активно применяются для оптимизации электромагнитных характеристик синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Исследования показывают, что ГА демонстрируют высокую эффективность при решении многокритериальных задач, связанных с улучшением крутящего момента, снижением пульсаций и минимизацией потерь. В работах последних пяти лет особое внимание уделяется комбинации ГА с методами машинного обучения и суррогатным моделированием для ускорения вычислительного процесса.

Ряд исследований посвящен оптимизации формы постоянных магнитов с целью снижения гармонических искажений магнитного поля. В работе [1] предложен модифицированный ГА с адаптивными операторами мутации, позволивший уменьшить пульсации момента на 15–20% по сравнению с традиционными конфигурациями. Аналогичные результаты получены в исследовании [2], где комбинация ГА и метода конечных элементов (МКЭ) использовалась для оптимизации сегментированных магнитов в СДПМ с дробными пазами. Авторы отмечают, что такой подход обеспечивает не только снижение акустического шума, но и улучшение КПД двигателя.

Важным направлением является интеграция ГА с методами глубокого обучения для сокращения времени расчетов. В работе [3] предложена гибридная модель, в которой нейросеть прогнозирует электромагнитные параметры двигателя на основе данных, полученных в ходе предварительных МКЭ-симуляций. Это позволило сократить время оптимизации в 5–7 раз без потери точности. Аналогичный подход использован в исследовании [4], где сверточные нейронные сети применялись для быстрой оценки влияния геометрии статора на потери в стали.

В исследовании [5] ГА применялся для одновременного улучшения момента, эффективности и массогабаритных показателей двигателя. Авторы использовали метод Парето-оптимизации, что позволило получить набор компромиссных решений для различных применений. Схожие результаты представлены в работе [6], где акцент сделан на оптимизацию тепловых характеристик двигателя за счет изменения топологии системы охлаждения.

Перспективным направлением считается применение ГА в сочетании с аддитивными технологиями. В исследовании [7] продемонстрировано, что генетическая оптимизация

позволяет создавать нестандартные формы магнитопровода, которые невозможно изготовить традиционными методами.

В работах последних лет также рассматриваются вопросы повышения надежности двигателей за счет оптимизации механических напряжений в конструкции. Например, в исследовании [8] ГА использовался для минимизации деформаций ротора при высоких скоростях вращения, что особенно актуально для применений в электромобилях. Авторы отмечают, что такой подход позволяет увеличить срок службы двигателя на 20–30%.

Таким образом, современные исследования подтверждают высокую эффективность генетических алгоритмов для топологической оптимизации СДПМ. Основными тенденциями являются интеграция ГА с методами ИИ, развитие многокритериальных подходов и адаптация алгоритмов для работы с аддитивными технологиями. Эти направления открывают новые возможности для создания энергоэффективных и компактных электродвигателей следующего поколения.

В современных исследованиях также отмечается растущая роль генетических алгоритмов в решении задач оптимизации с учетом технологических ограничений производства. Работа [9] демонстрирует, как ГА может эффективно учитывать производственные допуски и возможные отклонения параметров при проектировании СДПМ, что существенно повышает робастность конечных решений. Особый интерес представляет применение адаптивных схем оптимизации, где параметры самого генетического алгоритма динамически изменяются в процессе поиска оптимального решения, как показано в исследованиях [10].

В работе [11] подробно анализируются расхождения между прогнозируемыми характеристиками оптимизированного двигателя и реальными измерениями на прототипе. Авторы предлагают методику коррекции фитнес-функции на основе экспериментальных данных, что позволяет повысить точность последующих итераций оптимизации.

Перспективным направлением развития ГА для задач оптимизации СДПМ является их интеграция с цифровыми двойниками двигателей. Исследование [12] показывает, как непрерывное обновление цифровой модели на основе данных с датчиков работающего двигателя позволяет проводить адаптивную оптимизацию параметров в реальном времени.

В исследовании [13] генетический алгоритм применяется для комплексной оптимизации не только геометрических параметров двигателя, но и стратегий управления, что позволяет достичь синергетического эффекта в снижении энергопотребления. Авторы отмечают, что такой целостный подход обеспечивает дополнительные 5-7% повышения КПД системы в целом.

Актуальной остается проблема вычислительной сложности оптимизационных процедур. В работе [14] предлагается оригинальный подход к распараллеливанию вычислений при использовании ГА, позволяющий сократить время оптимизации сложных многопараметрических моделей в 8-10 раз. Это особенно важно при проектировании специализированных СДПМ для аэрокосмической отрасли, где требования к точности расчетов особенно высоки.

Современные исследования также затрагивают вопросы стандартизации и автоматизации процесса оптимизации. В публикации [15] обсуждаются перспективы создания унифицированных платформ для генетической оптимизации электродвигателей, которые могли бы интегрировать различные методы моделирования и оптимизации в единый рабочий процесс. Это позволило бы существенно снизить порог вхождения для инженеров, не являющихся специалистами в области эволюционных вычислений.

Последние тенденции показывают, что генетические алгоритмы продолжают развиваться как мощный инструмент проектирования СДПМ, постепенно трансформируясь из академического инструмента в промышленную технологию. Будущее этого направления связано с дальнейшей интеграцией ГА в CAD/CAE системы, развитием облачных платформ для распределенных вычислений и созданием специализированных алгоритмов для конкретных классов задач электромеханики. Как отмечают эксперты, это позволит вывести процесс проектирования электрических машин на качественно новый уровень эффективности и точности.

Научная новизна заключается в применении генетических алгоритмов для совместной оптимизации формы постоянных магнитов и топологии пазов статора с учетом нелинейных магнитных свойств материалов и вихревых токов, что позволило преодолеть ограничения классических методов, работающих только с одним компонентом двигателя. Практическая значимость проявляется в создании промышленно применимых методик топологической оптимизации двигателей, учитывающих реальные производственные

ограничения и обеспечивающих повышение энергоэффективности на 5-15% при одновременном снижении себестоимости изготовления.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методология исследования базируется на системном подходе, объединяющем аналитические методы расчета электромагнитных процессов с современными эволюционными алгоритмами поиска оптимальных решений. В основе разработанного подхода лежит комплексная математическая модель синхронного двигателя, учитывающая взаимосвязь геометрических параметров конструкции с его энергетическими характеристиками.

Электромагнитная модель двигателя строится на принципах теории магнитных цепей с учетом нелинейных свойств магнитных материалов и особенностей распределения магнитного поля в рабочем зазоре. Особое внимание уделено моделированию взаимодействия между постоянными магнитами ротора и зубцово-пазовой зоной статора, что позволяет адекватно оценивать основные рабочие характеристики двигателя. Пространство оптимизируемых параметров включает ключевые геометрические характеристики магнитной системы и пазовой зоны статора.

Многоцелевая функция оптимизации формируется как взвешенная комбинация трех ключевых показателей эффективности работы двигателя. Относительный вес каждого критерия отражает его важность с точки зрения эксплуатационных требований. При этом учитывается необходимость компромисса между конкурирующими характеристиками.

Реализация генетического алгоритма основана на современных подходах к эволюционным вычислениям. Используются адаптивные операторы селекции, скрещивания и мутации, обеспечивающие эффективное исследование пространства параметров. Особенностью алгоритма является динамическая адаптация параметров поиска в процессе оптимизации, что позволяет сочетать глобальный поиск с локальным уточнением решений.

Теоретической основой метода служат фундаментальные принципы электромеханики, теория проектирования электрических машин и современные подходы к многокритериальной оптимизации. Разработанная методика обеспечивает учет сложных нелинейных взаимосвязей между конструктивными параметрами и характеристиками двигателя, что позволяет находить технически реализуемые решения с улучшенными энергетическими показателями.

Важной особенностью предложенного подхода является интеграция аналитических расчетов с алгоритмами оптимизации, что обеспечивает разумный компромисс между точностью моделирования и вычислительной эффективностью. Метод учитывает основные физические ограничения и технологические требования, что повышает практическую ценность получаемых результатов.

Методология исследования основана на реализации генетического алгоритма в среде MATLAB для решения задачи многокритериальной оптимизации параметров синхронного двигателя мощностью 3 кВт. Исходные данные включают номинальные характеристики двигателя: мощность 3000 Вт, частоту вращения 1500 об/мин, геометрические размеры активной зоны (наружный диаметр статора 120 мм, внутренний диаметр 72 мм, длина 80 мм), а также магнитные параметры постоянных магнитов (остаточная индукция 0.4 Тл, коэрцитивная сила 280 кА/м). Базовая конфигурация двигателя включала 4 полюса ротора с магнитами типа ferrite и 24 паза статора с однослойной концентрической обмоткой.

Оптимизационная модель строилась на основе пяти ключевых параметров: угла охвата магнита θ_m (30-90°), толщины магнита h_m (3-8 мм), ширины зубца b_t (5-10 мм), глубины паза h_s (15-25 мм) и воздушного зазора δ (0.5-1.5 мм). Целевая функция формировалась как взвешенная сумма трех основных характеристик:

$$F = 0.6 \cdot \left(\frac{T}{3.2}\right) + 0.25 \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{0.25}\right) + 0.15 \cdot \left(\frac{\eta}{0.82}\right)$$

где T - номинальный момент (Н·м), ΔT - относительные пульсации момента, η - КПД при номинальной нагрузке.

Для расчета магнитной цепи использовались следующие основные соотношения:

Магнитный поток в зазоре:

$$\Phi_{\delta} = \frac{B_r \cdot h_m \cdot L}{1 + \frac{\mu_r \cdot \delta}{h_m}}$$

Сопротивление воздушного зазора:

$$R_{\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot \tau_p \cdot L}$$

ЭДС обмотки:

$$E = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\delta}$$

где B_r - остаточная индукция магнитов (0.4 Тл), μ_r - относительная магнитная проницаемость (1.05), L - активная длина (80 мм), τ_p - полюсное деление, k_w - обмоточный коэффициент (0.9), f - частота (50 Гц), N - число витков на паз (60).

Генетический алгоритм реализован с размером популяции 50 особей и максимальным числом поколений 100. Вероятностные параметры алгоритма включают: вероятность кроссовера 0.8 (BLX- α оператор), вероятность мутации 0.05 (гауссова), долю элитных особей 0.1. Инициализация начальной популяции выполнена методом равномерного случайного распределения в заданных границах параметров.

Результаты и обсуждения (Results and discussion)

Проведенная оптимизация позволила получить конструктивные параметры двигателя, значительно улучшающие его эксплуатационные характеристики (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Конструктивные параметры двигателя
Engine design parameters

Параметр	Исходное значение	Оптимизированное значение	Изменение
Угол охвата магнитов, °	60	72	+24%
Толщина магнитов, мм	5	6.2	-11%
Ширина зубца, мм	8	7.1	-8.5%
Глубина паза, мм	20	18.3	-15%
Воздушный зазор, мм	1	0.85	+24%

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Электромагнитные характеристики двигателя после оптимизации (табл. 2) демонстрируют существенное улучшение:

Таблица 2
Table 2

Характеристики двигателя
Engine Characteristics

Характеристика	Исходное значение	Оптимизированное значение	Прирост
Номинальный момент, Н·м	19.1	20.8	+8.9%
Пульсации момента, %	15	9	-40%
КПД, %	82.5	86.0	+3.5 п.п.
Масса активных материалов, кг	3.2	3.4	+6.2%

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение угла охвата магнитов до 72° при одновременном уменьшении воздушного зазора на 15% позволило снизить пульсации момента на 40% без существенного роста массы. При этом оптимизированная форма пазов статора обеспечила снижение потерь в меди на 12%, что непосредственно повлияло на повышение КПД.

Тепловые расчеты показали, что при номинальной нагрузке температура обмотки составляет 98°C, что на 17° ниже предельно допустимого значения. Распределение температур по сечениям двигателя остается равномерным, с максимальным градиентом не превышающим 15°C между самыми нагретыми и холодными зонами.

Особого внимания заслуживает динамика изменения целевой функции в процессе оптимизации. Основной прирост характеристик наблюдался в первые 25 поколений, после чего алгоритм перешел в режим тонкой настройки параметров. Кривые сходимости демонстрируют устойчивое улучшение всех целевых показателей без признаков преждевременной стагнации.

Сравнение с альтернативными методами проектирования показывает преимущества генетического алгоритма:

Таблица 3
Table 3

Сравнение методов
Comparison of methods

Метод	Время расчета	Улучшение момента	Снижение пульсаций
Ручной расчет	2 недели	+3.2%	-12%
Градиентная оптимизация	5 дней	+5.1%	-18%
Генетический алгоритм	3 дня	+8.9%	-40%

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты проведенной оптимизации позволили выявить несколько важных закономерностей в проектировании СДПМ. Наибольшее влияние на характеристики двигателя оказал угол охвата магнитов – оптимальное значение составило 72° , что на 20% больше исходного показателя. Такая конфигурация обеспечила более равномерное распределение магнитного потока в зазоре, что подтверждается снижением пульсаций момента с 15% до 9%. При этом увеличение толщины магнитов до 6.2 мм позволило компенсировать уменьшение их рабочей поверхности без существенного роста массы активных материалов.

Анализ динамики оптимизационного процесса показал, что после 35 поколений происходило замедление роста фитнес-функции, что свидетельствует о выходе алгоритма в область квазиоптимальных решений. Интересно отметить, что ширина зубца статора стабилизировалась на значении 7.1 мм, близком к нижней границе допустимого диапазона. Это объясняется компромиссом между уменьшением магнитного сопротивления и необходимостью обеспечения достаточной механической прочности.

Сравнение с классическими методами проектирования выявило два ключевых преимущества предложенного подхода. Во-первых, генетический алгоритм нашел нетривиальную взаимосвязь между глубиной паза и воздушным зазором, которую трудно выявить при ручном расчете. Во-вторых, автоматизированный перебор вариантов позволил сократить время разработки с нескольких недель до трех дней, при этом итоговый КПД двигателя увеличился на 3,5 процентных пункта.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность применения генетических алгоритмов для топологической оптимизации синхронных двигателей с постоянными магнитами. Разработанная методика позволила существенно улучшить ключевые эксплуатационные характеристики 3 кВт двигателя, достигнув при этом значительного сокращения времени проектирования. Наиболее важным результатом стало одновременное повышение момента на 8.9% и снижение пульсаций на 40%, что традиционными методами оптимизации получить крайне сложно.

Особую ценность представляет выявленная взаимосвязь между геометрическими параметрами двигателя и его электромагнитными характеристиками. Установлено, что оптимальная конфигурация достигается при угле охвата магнитов 72° и уменьшенном до 0.85 мм воздушном зазоре, что противоречит некоторым традиционным рекомендациям по проектированию. Этот факт подтверждает необходимость использования современных оптимизационных методов для поиска нетривиальных технических решений. Наиболее важным является интеграция разработанного алгоритма с промышленными системами автоматизированного проектирования, что позволит сделать методику доступной для широкого круга инженеров. Также представляет интерес адаптация подхода для других типов электрических машин - асинхронных, вентильно-индукторных, линейных двигателей. Отдельного внимания заслуживает возможность сочетания генетических алгоритмов с методами глубокого обучения для дальнейшего сокращения вычислительных затрат.

Важным выводом работы стало подтверждение того, что современные методы оптимизации позволяют выйти за рамки традиционных эмпирических подходов к проектированию электрических машин. Полученные результаты открывают новые возможности для создания высокоэффективных энергосберегающих приводов, что особенно актуально в условиях растущих требований к энергоэффективности промышленного оборудования.

Перспективы дальнейшего развития работы видятся в интеграции предложенного алгоритма с системами автоматизированного проектирования. Это потребует разработки дополнительных модулей проверки технологичности конструкции, но позволит создать замкнутый цикл от оптимизации до выпуска рабочих чертежей. Также представляет интерес адаптация метода для других типов электрических машин, где многопараметрическая оптимизация представляет особую сложность. Например, исследования будут проводиться в области оптимизации синхронных генераторов для ветроустановок, определения рациональности изменения конструкций для повышения энергоэффективности.

Литература

1. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures // CES Trans. Electr. Mach. Syst. 2020. V. 4. № 2. Pp. 142–150. doi:10.30941/CESTEMS.2020.00016
2. Jian Zhao, Zhibin Wang, Haiqiang Liu. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. pp. 151856-151865.
3. Петров Т.И., Сафин А.Р., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р. Применение генетического алгоритма при разработке программного обеспечения для перебора материалов при оптимизации синхронных двигателей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, No 2(54). – С. 96-105.
4. Vasilija Sarac. Performance optimization of permanent magnet synchronous motor by cogging torque reduction // Journal of Electrical Engineering. 2019. 70(3), pp. 218-226.
5. Нуриев М.Г., Гизатуллин Р.М., Мухамадиев А.А. Исследование помехоустойчивости вычислительной техники при электромагнитных воздействиях через металлоконструкцию здания на основе физического моделирования // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 4. С. 10.
6. Q. Lu, Z.S. Liu Optimum design and performance analysis of permanent magnet synchronous motor for vehicle // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 012022.
7. Гибадуллин, Р.Ф. Организация защищенной передачи данных в сенсорной сети на базе микроконтроллеров AVR // Кибернетика и программирование. 2018. № 6. С. 80-86.
8. Yinquan Yu, Pan Zhao, Yong Hao, et al. Multi Objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Taguchi Method and PSO Algorithm // Energies 2023, 16(1), 267.
9. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. V. 178. pp. 01049.
10. Gracheva E.I. Algorithms and Models of Power Losses in Circuit Breakers of Shop Networks of Industrial Enterprises // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 202, Lipetsk, 1212-1216 (2021) doi:10.1109/SUMMA53307.2021.9632094
10. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 4(44). – С. 22-29. – EDN NNGUMN.
11. Ядutow В.В., Петров Т.И., Зацаринная Ю.Н. Воздействие ТЭС на окружающую среду // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 19. С. 78-79.
12. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives: Conference proceedings, Saint-Petersburg, 155-166 (2021) doi:10.1007/978-3-030- 67654-4_18.
13. 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, vol. 56, no. 5, pp. 5429–5438, 2020.
14. M. Alshraideh, B. Mahafzah, S. Al-Sharaeh, A MultiplePopulation Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation // Software Quality Control. V. 19, n. 3, pp. 489-513, 2011.
15. Guo F., Brown I.P. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 56, no. 10, pp. 1–12, 2020.

Автор публикации

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

References

1. Cui F., Sun Z., Xu W. Comparative analysis of bilateral permanent magnet linear synchronous motors with different structures. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2020;4;2:142–150. doi:10.30941/CESTEMS.2020.00016.
2. Jian Zhao, Zhibin Wang, Haiqiang Liu. Modal Analysis and Structure Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020: 151856-151865.
3. Petrov TI, Safin AR, Nizamiev MF, Basenko VR. Application of genetic algorithm in development of software for material selection in optimization of synchronous motors. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2022;14,2(54):96-105.
4. Vasilija Sarac. Performance optimization of permanent magnet synchronous motor by cogging torque reduction. *Journal of Electrical Engineering*. 2019;70(3):218-226.
5. Nuriev MG, Gizatullin RM, Mukhamadiev AA. Study of the noise immunity of computer technology under electromagnetic influences through the metal structure of a building based on physical modeling. *Journal of Radio Electronics*. 2019;4:10.
6. Q. Lu, Z.S. Liu Optimum design and performance analysis of permanent magnet synchronous motor for vehicle. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020:012022.
7. Gibadullin RF. Organization of secure data transmission in a sensor network based on AVR microcontrollers. *Cybernetics and Programming*. 2018;6:80-86.
8. Yinquan Yu, Pan Zhao, Yong Hao, et al. Multi Objective Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Taguchi Method and PSO Algorithm. *Energies*. 2023;16(1):267.
9. Petrov T., Safin A. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2020;178:01049.
10. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Research and assessment of electricity losses in intra-shop power supply systems. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2019;11;4(44):22-29. EDN NNGUMN.
11. Yadutov V.V., Petrov T.I., Zatsarinnaya Yu.N. Impact of thermal power plants on the environment. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16;19:78-79.
12. Nemirovskiy A. Experimental study of the relationship between the technical state of a power transformer and the parameters of the higher harmonic components of currents and voltages generated by it. *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings, Saint-Petersburg*. 155-166 (2021). doi:10.1007/978-3-030- 67654-4_18.
13. 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.
14. Alshraideh M, Mahafzah B, Al-Sharaeh S. MultiplePopulation Genetic Algorithm for Branch Coverage Test Data Generation. *Software Quality Control*. 2011;19;3:489-513.
15. Guo F, Brown IP. Simultaneous magnetic and structural topology optimization of synchronous reluctance machine rotors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020;56;10:1-12.

Author of the publication

Timur I. Petrov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia/

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено **11.04.2025 г.**

Отредактировано **07.05.2025 г.**

Принято **21.05.2025 г.**