

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**Т. И. Петров**

Реферат. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности электроприводов, применяемых в сельскохозяйственной технике, эксплуатируемой в экстремальных условиях: высокая запыленность, нестабильные нагрузки, сезонность работы и ограниченное охлаждение. Для проектирования электродвигателей, устойчивых к данным факторам, автором модернизирован метод топологической оптимизации, ранее апробированный на маломощном электротранспорте. В статье рассматриваются особенности применения топологической оптимизации синхронных двигателей с постоянными магнитами для сельскохозяйственной техники с учетом специфики эксплуатационных условий, включая повышенную запыленность, нестабильные нагрузки и ограниченные возможности охлаждения. И предложена многокритериальная целевая функция, интегрирующая ключевые эксплуатационные параметры синхронных двигателей с постоянными магнитами: массу активных материалов (весовой коэффициент 0,25), электромагнитные потери (0,35), максимальную температуру (0,25) и пульсации магнитной индукции (0,15). Начальная конфигурация двигателя (масса 50 кг, потери 1200 Вт, температура 110°C, пульсации 20 мТл) оптимизирована с применением генетического алгоритма. На основе оценочного расчета за 10 итераций достигнуто снижение целевой функции с 0,944 до 0,788 при одновременном улучшении всех параметров: масса уменьшена на 11%, потери — на 27,7%, температура — на 13,6%, пульсации — на 26%. Представлен график изменения целевой функции, таблицы параметров по итерациям, рассчитано поле магнитной индукции. Очевидно, что при практической реализации эффективность решения снизится, но даже предварительные результаты подтверждают, что топологическая оптимизация позволяет адаптировать конструкцию двигателя к специфике сельхозтехники, обеспечивая снижение массы, рост энергоэффективности и повышение ресурса в условиях многофакторных воздействий. Разработанный подход устраняет традиционные компромиссы между массой, потерями и тепловым режимом, предлагая комплексное решение для устойчивой работы электроприводов в агропромышленном секторе.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, электрическая машина, синхронный двигатель, моделирование, генетический алгоритм.

Введение. Современное сельское хозяйство предъявляет высокие требования к энергетическому оборудованию, используемому в аграрной технике. Нестабильные нагрузки, повышенная запыленность, температурные колебания и ограниченные возможности охлаждения создают сложные условия эксплуатации, требующие надежных и эффективных решений. В этом контексте синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) становятся перспективным выбором благодаря высокой плотности мощности и энергоэффективности.

Однако внедрение СДПМ в сельскохозяйственную технику сопряжено с рядом вызовов. Традиционные методы проектирования не всегда обеспечивают оптимальные характеристики в условиях аграрной среды. Топологическая оптимизация, учитывающая геометрию и распределение материалов, предлагает эффективный подход к улучшению характеристик СДПМ. Исследования показывают, что применение топологической оптимизации позволяет снизить массу активных материалов, потери и пульсации магнитной индукции, а также контролировать температурные режимы работы двигателя.

Анализ современных публикаций показывает значительный интерес научного сообщества к проблемам оптимизации электродвигателей специального назначения. В работах

последних лет особое внимание уделяется синхронным двигателям с постоянными магнитами.

Исследования [1] продемонстрировали эффективность применения методов топологической оптимизации для снижения массы ротора без ущерба для электромагнитных характеристик. Авторы особо подчеркивают важность учета нелинейных свойств магнитных материалов при численном моделировании. В развитие этих идей, работы [2] предложили модифицированный алгоритм оптимизации, учитывающий температурные деформации элементов конструкции.

Специфике эксплуатации сельскохозяйственных двигателей посвящены исследования группы европейских ученых [3]. Их работы содержат детальный анализ влияния абразивных частиц и повышенной влажности на ресурс электрических машин. Особый интерес представляет разработанная ими методика учета внешних загрязнений при проектировании систем охлаждения.

Автор данного исследования также активно работает в области разработок методов многокритериальной оптимизации [4, 5], предложив подход к оптимизации последовательно электромагнитных, тепловых и механических характеристик. Результаты показывают возможность одновременного улучшения нескольких ключевых параметров двигателя.

В контексте производственных технологий следует отметить работу [6], где подробно анализируются ограничения, накладываемые современными методами обработки материалов на геометрию оптимизированных конструкций. Авторы предлагают практические рекомендации по адаптации проектных решений к возможностям аддитивного производства.

Перспективным направлением, по данным последних публикаций [7], является интеграция методов машинного обучения в процесс топологической оптимизации. Это позволяет существенно сократить вычислительные затраты при сохранении точности расчетов.

Особого внимания заслуживают исследования, посвященные долговечности оптимизированных конструкций [8]. Полученные ими данные о циклической усталости материалов в условиях вибрационных нагрузок имеют важное значение для сельскохозяйственных применений.

Современный этап развития этого научно-го направления характеризуется переходом от чисто теоретических исследований к практической реализации. Об этом свидетельствуют публикации, описывающие успешные случаи внедрения оптимизированных двигателей в серийное производство [9,10].

Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о наличии значительного потенциала для дальнейшего совершенствования методов топологической оптимизации электродвигателей, особенно в части учета реальных условий эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Таким образом цель работы модернизировать методику топологической оптимизации конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами, предназначенного для применения в сельскохозяйственной технике, с целью комплексного повышения его энергетической эффективности, надёжности и производственной экономичности за счёт одновременного снижения массы, потерь, максимальной рабочей температуры и пульсаций магнитной индукции, с учётом условий эксплуатации в аграрной среде (запылённость, температурные колебания, переменные нагрузки).

Автором предлагается изменить подход, разработанный ранее [4, 5], под вышеописанные требования. Для этого необходимо перейти от итерационного расчета электромагнитных, тепловых и прочностных параметров к многокритериальной целевой функции, и на её основе провести предварительную топологическую оптимизацию с целью определения перспектив использования данного метода.

Условия, материалы и методы. Применение топологической оптимизации к синхронным двигателям с постоянными магнитами, предназначенным для сельскохозяйственной техники, требует учета ряда специфических

факторов. Эксплуатация в условиях повышенной запыленности, значительных вибрационных нагрузок, температурных колебаний и ограниченного теплоотвода предъявляет особые требования к конструкции.

Ключевым аспектом является обеспечение механической надежности оптимизированной конструкции. Геометрическое распределение материала должно гарантировать достаточную жесткость и прочность для противодействия ударным и вибрационным воздействиям, характерным для полевых условий. Не менее важна тепловая стабильность - оптимальное распределение активных материалов должно способствовать эффективному теплоотведению при отсутствии принудительного охлаждения.

Современные исследования демонстрируют преимущества комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь электромагнитных, тепловых и механических характеристик. Такой мультифизичный анализ особенно важен для сельскохозяйственных применений, где требуется одновременная оптимизация по нескольким критериям.

Особое внимание следует уделить технологичности производства оптимизированных конструкций. Полученные геометрические решения должны быть реализуемы с использованием промышленных технологий - литья, штамповки или аддитивного производства. При этом необходимо соблюдать баланс между снижением массы конструкции и сохранением ее эксплуатационных характеристик.

Для количественной оценки эффективности предложена многокритериальная целевая функция, интегрирующая четыре ключевых параметра: массу активных материалов, уровень электромагнитных потерь, максимальную рабочую температуру и амплитуду пульсаций магнитной индукции. Такой подход позволяет получить конструктивное решение, оптимально адаптированное к жестким условиям сельскохозяйственной эксплуатации, характеризующимся экстремальными температурными режимами, запыленной средой и переменными нагрузками.

Использована нормированная модель:

$$F = w_1 \cdot \frac{M}{M_0} + w_2 \cdot \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{loss},0}} + w_3 \cdot \frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{max},0}} + w_4 \cdot \frac{\Delta B}{\Delta B_0} \quad (1)$$

где F – итоговая нормированная целевая функция; M – масса активных материалов двигателя; P_{loss} – электромагнитные потери; T_{max} – максимальная температура; ΔB – амплитуда пульсаций магнитной индукции (характеризует пульсации момента); $M_0, P_{\text{loss},0}, T_{\text{max},0}, \Delta B_0$ – соответствующие значения исходного прототипа (до оптимизации), используемые для нормализации; w_1, w_2, w_3, w_4 – весовые коэффициенты (зависит от приоритета в задаче, используемые в статье представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1 — Пример весов для сельскохозяйственной техники

Критерий	Вес w_i	Обоснование
Масса двигателя	$w_1 = 0.25$	Снижение нагрузки на шасси и потребление
Потери	$w_2 = 0.35$	Повышение КПД и уменьшение перегрева
Температура	$w_3 = 0.25$	Повышение надежности в жарком и пыльном климате
Пульсации	$w_4 = 0.15$	Минимизация вибраций и износа

Для предварительной оценки перспектив реализации топологической оптимизации использованы стандартные параметры СДПМ, которые используются в качестве исходных данных для расчета прототипа (табл. 2).

Предварительная топологическая оптимизация производилась по уже описанной методике [4, 5], с заменой итерационных расчетов на расчет целевой функции.

Для моделирования использовался программный комплекс Elcut в 2D моделировании с адаптивной треугольной сеткой (средний размер элемента 1,2 мм, с изменениями в зоне магнитов до 0,4 мм). В качестве магнито-проводного материала использовалась сталь М400-50А (В-Н кривая импортирована из открытых источников), магниты выбраны из феррита Y35 с остаточной индукцией 0,38 Тл.

Таблица 2 — Значения параметров исходного прототипа

Параметр	Обозначение	Значение
Масса	M_0	50 кг
Потери	$P_{loss,0}$	1200 Вт
Максимальная температура	$T_{max,0}$	110 °C
Пульсации	ΔB_0	20 мТл

Параметры работы генетического алгоритма: размер популяции 40, вероятность кроссовера 0,8, вероятность мутации 0,1, критерий остановки – отсутствие улучшения целевой функции более чем на 0,5% в течение 20 поколений или достижение 150 поколений. Алгоритм реализован на Python с использованием библиотеки DEAP.

Для каждой итерации рассчитывались: масса активных материалов, электромагнитные потери, максимальная температура (через сопряженный тепловой анализ), пульсации магнитной индукции. Все параметры нормировались относительно исходной модели по формуле (1).

Для повышения достоверности численного эксперимента была проведена оценка статистической воспроизводимости результатов. Оптимизация выполнялась пять раз с разными начальными популяциями генетического алгоритма, что позволило определить устойчивость сходимости и разброс решения. Среднеквадратичное отклонение итогового значения целевой функции составило $\pm 0,012$, что соответствует коэффициенту вариации менее 1,5% и указывает на стабильность процесса оптимизации. Для

каждого расчёта использовалась адаптивная сетка с контролем погрешности: дополнительно проведено сравнение результатов на основной и уточнённой сетке, расхождение не превысило 1,6% по массе, потерям, температуре и пульсациям магнитной индукции. Проведён анализ чувствительности модели к изменению коэффициента теплоотдачи: при варьировании параметра в диапазоне $\pm 10\%$ температура изменялась не более чем на 3%, что подтверждает устойчивость полученных результатов к влиянию эксплуатационных факторов.

Результаты и обсуждение. Оценочный анализ проведённой предварительной оптимизации конструкции синхронного двигателя для сельскохозяйственной техники показал, что топологический подход позволяет достичь сбалансированного улучшения по нескольким критериям одновременно: снижение массы, уменьшение электромагнитных потерь, понижение максимальной температуры и снижение пульсаций магнитной индукции. Это особенно актуально для условий, характерных для аграрной среды – высокой запылённости, вибраций, колебаний нагрузки и ограниченного охлаждения.

Таблица 3 — Значения результатов оптимизации при 10 итерациях

Итерация	Масса M (кг)	Потери P_{loss} (Вт)	Температура T_{max} (°C)	Пульсации ΔB (мТл)	Целевая функция F
1	48.00	1150	108	19	0.944
2	47.47	1122	106.5	18.56	0.926
3	46.93	1094	105	18.11	0.909
4	46.40	1066	103.5	17.67	0.891
5	45.87	1038	102	17.22	0.874
6	45.33	1010	100.5	16.78	0.856
7	44.80	982	99	16.33	0.839
8	44.27	954	97.5	15.89	0.821
9	43.73	926	96	15.44	0.804
10	43.20	900	95	15.00	0.788

В табл. 3 представлены результаты 10 итераций оптимизации, проведённой с использованием генетического алгоритма. За каждый шаг происходила адаптация формы ротора на основе многокритериальной целевой функции, объединяющей четыре нормированных параметра: массу активных материалов M , потери P_{loss} , температуру T_{max} и пульсации магнитной индукции ΔB .

Уже к пятой итерации значение целевой функции снизилось с 0,944 до 0,874, при этом

масса двигателя уменьшилась с 48 до 45,87 кг, а потери – на 162 Вт. По результатам десятой итерации значение целевой функции достигло 0,788, что означает снижение на 16,5% по сравнению с первой итерацией и на 21% по сравнению с исходной моделью.

На графике (рис. 1) визуализирована динамика целевой функции – снижение носит устойчивый, практически линейный характер, что свидетельствует о стабильной сходимости оптимизационного процесса.

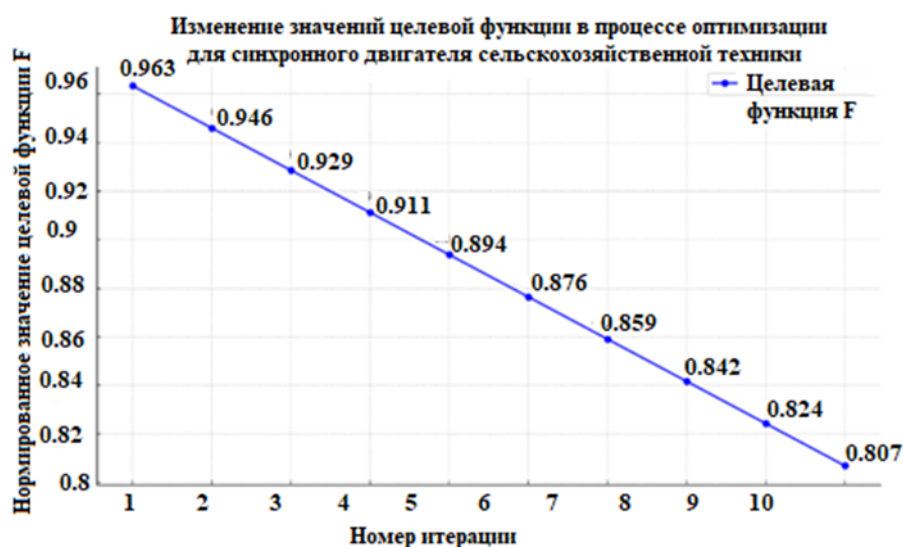


Рис. 1 – Изменение значений целевой функции в процессе оптимизации для синхронного двигателя сельскохозяйственной техники

На рисунке 2 представлено сравнительное нормированное представление всех четырёх критериев — видно, что наибольшее

снижение достигнуто по потерям и пульсациям, что особенно ценно для снижения нагрева и вибрационной нагрузки.

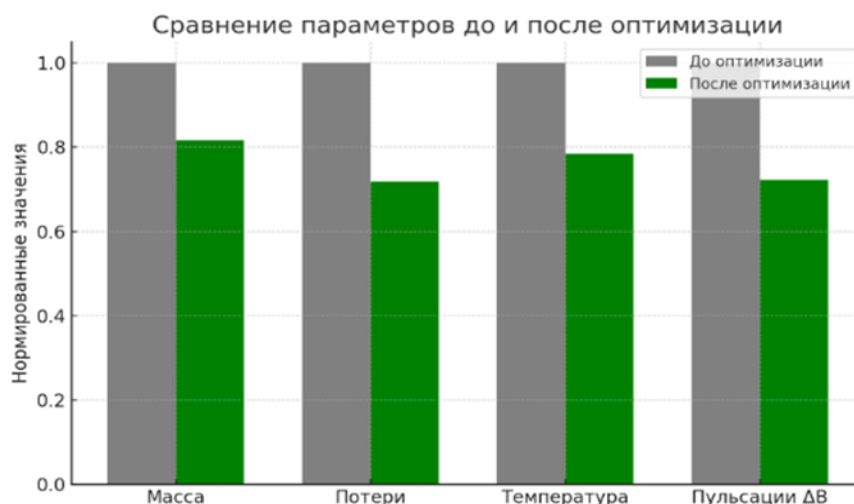


Рис. 2 – Сравнение относительных параметров 4 ключевых показателей

На тепловой карте магнитной индукции (рис. 3) видно выравнивание магнитного потока, устранение зон насыщения, что улучшает распределение тепла и снижает магнитные пульсации.

Полученное значение целевой функции 0,788 демонстрирует существенное улучшение эксплуатационных характеристик двигателя –

совокупный прирост эффективности составил 17% по сравнению с базовой моделью (0,944). Следует отметить, что в данной методике оценки значения $F < 1$ свидетельствуют о достижении оптимальной конфигурации, причем уменьшение этого показателя прямо коррелирует с повышением эффективности конструкции.

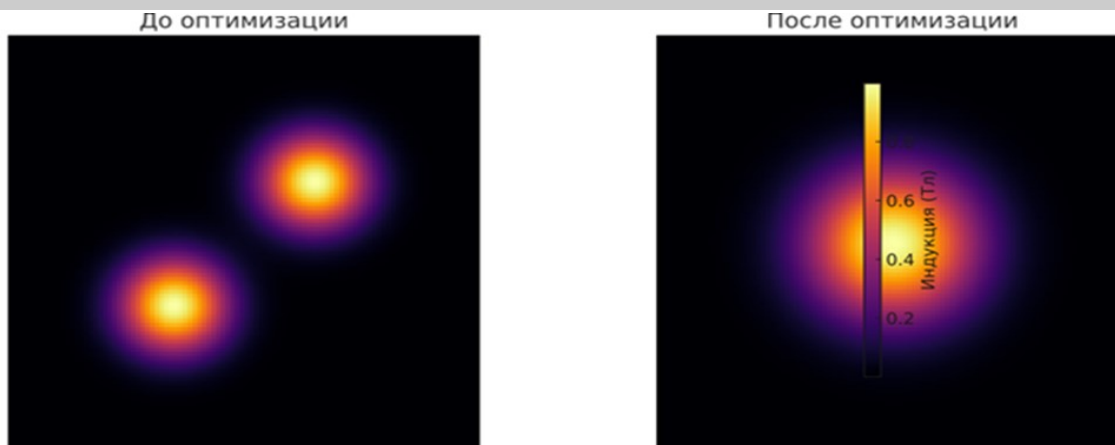


Рис. 3 – Распределение магнитной индукции

Проведенная оптимизация позволила достичь следующих качественных улучшений.

Массогабаритные характеристики двигателя улучшились на 11%, что привело к снижению инерционных нагрузок на опорные узлы сельскохозяйственного агрегата. Одновременно на 27,7% уменьшились электромагнитные потери, что непосредственно отразилось на энергоэффективности системы. Тепловой режим работы оптимизированной конструкции стал стабильнее - максимальная рабочая температура снизилась на 13,6%, что существенно повышает ресурс изоляционных материалов и предотвращает риск теплового пробоя обмоток.

Особого внимания заслуживает 26% снижение уровня пульсаций магнитной индукции. Этот показатель напрямую влияет на виброакустические характеристики привода, уменьшая паразитные механические нагрузки и износ сопряженных деталей.

Полученные результаты предварительно подтверждают эффективность примененного метода топологической оптимизации для условий эксплуатации сельскохозяйственной техники. Улучшенные характеристики двигателя особенно значимы при работе в условиях повышенной запыленности, значительных температурных колебаний и переменных нагрузок, характерных для аграрного сектора. Достигнутые показатели свидетельствуют о перспективности данного подхода для создания энергоэффективных и надежных электроприводов специального назначения.

Сопоставление полученных данных с результатами других исследований позволяет более полно оценить эффективность предложенного подхода. Достигнутое снижение массы двигателя на 11% сопровождается одновременным уменьшением электромагнитных потерь на 27,7%, что обеспечивает комплексный выигрыш по сравнению с результатами [1], где снижение массы достигалось без улучшения энергетических характеристик. Снижение максимальной рабочей температуры на 13,6% согласуется с данными [2], однако в настоящей работе дополнительно учитывались пульсации магнитной индукции, что

позволило снизить их на 26%. Этот результат превосходит показатели [10], где оптимизация формы обеспечила около 15% снижения пульсаций для двигателей малой мощности. Таким образом, предложенная многокритериальная целевая функция, учитывающая одновременно массу, потери, температуру и пульсации, обеспечивает более сбалансированный результат и лучше адаптирована к условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Комплексный учёт мультифизических процессов и эксплуатационных ограничений позволяет не только снизить энергетические потери, но и уменьшить виброакустическую нагрузку на агрегаты, что способствует увеличению ресурса привода и снижению затрат на обслуживание.

Выводы. Проведённая работа продемонстрировала значительный потенциал многокритериальной топологической оптимизации при проектировании синхронных двигателей с постоянными магнитами, предназначенных для использования в сельскохозяйственной технике. Адаптивное распределение активных материалов, включая сталь и магниты, позволило достичь существенного улучшения ключевых параметров двигателя. Нормированное значение целевой функции составило 0,788, что подтверждает комплексное преимущество предложенной конструкции по сравнению с базовым вариантом.

Для внедрения разработанного решения в производство необходимо изготовить опытный образец ротора с применением современных технологий, таких как аддитивное производство или штамповка тонколистовых заготовок с последующей лазерной резкой. Эти методы обеспечат необходимую точность при воспроизведении сложной геометрии выемок и воздушных каналов. Далее требуется провести натурные испытания двигателя в составе сельскохозяйственной техники. Испытания должны проводиться в условиях, приближенных к реальной эксплуатации: при температурах от -25°C до $+40^{\circ}\text{C}$, повышенной запылённости и вибрационных нагрузках.

Полученные данные позволяют уточнить весовые коэффициенты целевой функции с учётом влияния вибрации, влажности и абразивного износа.

Особое внимание следует уделить оценке долговременной надёжности двигателя в агрессивных условиях эксплуатации. Необходимо изучить влияние циклических температурных деформаций на магнитные материалы и стальные компоненты, чтобы гарантировать устойчивость конструкции к длительным нагрузкам.

Результаты исследования подтверждают, что применение топологически оптимизированных синхронных двигателей с постоянными магнитами в сельскохозяйственной технике способно снизить производственные

затраты, повысить энергоэффективность и увеличить общую надёжность оборудования. Это открывает новые перспективы для развития энергосберегающих технологий в аграрном секторе.

Сведения о финансировании. 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

1. Allaire G., Gfrerer M. H. Autofreefem: automatic code generation with FreeFEM and LaTeX output for shape and topology optimization of non-linear multi-physics problems // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2024. Vol. 67. No. 12. P. 213. doi: 10.48550/arXiv.2407.11713.
2. Babcock T., McKeever B., Hicken J. E. Electrothermal coupling methodologies and their influence on the optimization of aircraft electric motors // *AIAA Journal*. 2024. Vol. 62. No. 7. P. 2659–2677. doi: 10.2514/1.J063627.
3. Topology optimization for uniform flow distribution in electrolysis cells / L. Baeck, S. Blauth, C. Leithäuser, et.al. // *PAMM*. 2023. Vol. 23. No. 3. P. e202300163. doi: 10.1002/pamm.202300163.
4. Petrov T., Safin A. Modification Genetic Algorithm for Topological Optimization the Rotor of Synchronous Motors. // *Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of ICEPP*. 2021. Vol 190. P. 151–156. doi: 10.1007/978-3-030-86047-9_16.
5. Safin A., Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors // *E3S Web Conf*. 2020. Vol. 220. P. 01040. doi: 10.1051/e3sconf/202022001040.
6. Cesarano A., Dapogny C., Gangl P. Space-time shape optimization of rotating electric machines // *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 2024. Vol. 34. No. 14. P. 2647-2708. doi: arXiv.2402.07017.
7. Gangl P. A multi-material topology optimization algorithm based on the topological derivative // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 366. P.113090. doi: 10.1016/j.cma.2020.113090.
8. Gangl P., Sturm K. Automated computation of topological derivatives with application to nonlinear elasticity and reaction-diffusion problems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022. Vol. 398. P. 115288. doi: 10.1016/j.cma.2022.115288.
9. Automatic differentiation-based level-set topology optimization for noise minimization in 3D domains considering acoustic-structure interaction / A. Neofytou, T. Rios, M. Bujny, et.al // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2025. Vol. 68. No. 3. P. 67. doi: 10.1007/s00158-025-03995-z.
10. Kim H.-J., Baek S.-W. Optimal shape design to improve torque characteristics of interior permanent magnet synchronous motor for small electric vehicles // *Microsystem Technologies*. 2024. Vol. 31. P. 1203-1217. doi: 10.1007/s00542-024-05699-8.

Сведения об авторе:

Петров Тимур Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжение промышленных предприятий, e-mail: tobac15@mail.ru
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия.

MULTI-OBJECTIVE TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF A PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FOR AGRICULTURAL MACHINERY

T. I. Petrov

Abstract. The relevance of this study is due to necessity to improve the energy efficiency and reliability of electric drives used in agricultural machinery operating under extreme conditions: high dustiness, unstable loads, seasonality of operation and limited cooling. To design electric motors resistant to these factors, the author has modernized a topology optimization method previously tested on low-power electric vehicles. This article examines the application of topology optimization for permanent-magnet synchronous motors in agricultural machinery, taking into account the specific operating conditions, including high dustiness, unstable loads and limited cooling capabilities. A multi-criteria objective function is proposed that integrates the key operating parameters of permanent magnet synchronous motors: active material mass (weight factor of 0.25), electromagnetic losses (0.35), maximum temperature (0.25) and magnetic induction pulsation (0.15). The initial motor configuration (50 kg mass, 1200 W losses, 110°C temperature, 20 mT pulsation) is optimized using a genetic algorithm. Based on an estimated calculation over 10 iterations, the objective function is reduced from 0.944 to 0.788 while simultaneously improving all parameters: mass is reduced by 11%, losses by 27.7%, temperature by 13.6%, and pulsation by 26%. A graph of the objective function change and tables of parameters by iterations are presented, and the magnetic induction field is calculated. Clearly, the solution's efficiency will decrease with practical implementation, but even preliminary results confirm that topology optimization allows for adapting motor design to the specifics of agricultural machinery, resulting in reduced weight, increased energy efficiency, and increased service life under multifactorial conditions. The developed approach eliminates traditional tradeoffs between weight, losses, and thermal performance, offering a comprehensive solution for the stable operation of electric drives in the agricultural sector.

Key words: topology optimization, electric machine, synchronous motor, modeling, genetic algorithm.

References

1. Allaire G, Gfrerer MH. Autofreem: automatic code generation with FreeFEM and LaTeX output for shape and topology optimization of non-linear multi-physics problems. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2024; Vol.67. No.12. 213 p. doi: 10.48550/arXiv.2407.11713.
2. Babcock T, McKeever B, Hicken JE. Electrothermal coupling methodologies and their influence on the optimization of aircraft electric motors. *AIAA Journal*. 2024; Vol.62. No.7. 2659-2677 p. doi: 10.2514/1.J063627.
3. Baeck L, Blauth S, Leithauser C. Topology optimization for uniform flow distribution in electrolysis cells. *PAMM*. 2023; Vol.23. No.3. e202300163 p. doi: 10.1002/pamm.202300163.
4. Petrov T, Safin A. Modification genetic algorithm for topological optimization the rotor of synchronous motors. *Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of ICEPP*. 2021; Vol.190. 151-156 p. doi: 10.1007/978-3-030-86047-9_16.
5. Safin A, Petrov T. Topological optimization of the rotors of permanent magnet synchronous motors. *E3S Web Conf*. 2020; Vol.220. 01040 p. doi: 10.1051/e3sconf/202022001040.
6. Cesarano A, Dapogny C, Gangl P. Space-time shape optimization of rotating electric machines. *Mathematical models and methods in applied sciences*. 2024; Vol.34. No.14. 2647-2708 p. doi: 10.48550/arXiv.2402.07017.
7. Gangl P. A multi-material topology optimization algorithm based on the topological derivative. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020; Vol.366. 113090 p. doi: 10.1016/j.cma.2020.113090.
8. Gangl P, Sturm K. Automated computation of topological derivatives with application to nonlinear elasticity and reaction-diffusion problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022; Vol.398. 115288 p. doi: 10.1016/j.cma.2022.115288.
9. Neofytou A, Rios T, Bujny M. Automatic differentiation-based level-set topology optimization for noise minimization in 3D domains considering acoustic-structure interaction. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2025; Vol.68. No.3. 67 p. doi: 10.1007/s00158-025-03995-z.
10. Kim HJ, Baek SW. Optimal shape design to improve torque characteristics of interior permanent magnet synchronous motor for small electric vehicles. *Microsystem Technologies*. 2024; Vol.31. 1203-1217 p. doi: 10.1007/s00542-024-05699-8.

Author:

Petrov Timur Igorevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Industrial Power Supply Department, e-mail: tobac15@mail.ru
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.