

УДК 621.313

НГО ФЫОНГ ЛЕ

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ МАГНИТАМИ

Белорусский национальный технический университет

Классические методы проектирования электрических машин направлены на достижение работоспособности электрической машины и не обеспечивают минимальных затрат при изготовлении и при эксплуатации. В последнее время оптимизация становится важной частью современного процесса проектирования электрических машин. Цель процесса оптимизации, как правило, сводится к обеспечению минимума стоимости машины, потерь энергии, массы, или обеспечения максимума момента и к.п.д. Большинство требований проектирования электрической конструкции машины находятся в противоречии друг с другом (уменьшение объема или массы, повышение КПД и т.д.). Задача оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами (СДИПМ) является задачей многокритериальной оптимизации. Существуют два подхода для решения этой задачи, одним из которых являются эволюционные алгоритмы, получившие широкое распространение в настоящее время. Для оптимизации проектирования СДИПМ эволюционные алгоритмы представляет собой более привлекательный подход. Генетический алгоритм (ГА) является самым популярным в эволюционных алгоритмах. Рассмотрены компоненты и процедура выполнения генетического алгоритма для оптимизации проектирования СДИПМ. Реализован генетический алгоритм на ЭВМ в программных языках C# и Lua. В процессе оптимизации для повышения скорости вычисления и точности аналитический расчет используется вместе с расчетом методом конечных элементов. Включение в процессе оптимизации анализа методом конечных элементов осуществляется с помощью программы FEMM и технологии ActiveX. Результатом процесса оптимизация с помощью генетического алгоритма является множество решений, из которых инженер выбирает самое лучшее. Осуществлена оптимизация проектирования СДИПМ на основе асинхронного двигателя типа АИР112МВ8.

Ключевые слова: синхронный двигатель с инкорпорированными магнитами, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

Введение

Синхронный двигатель с инкорпорированными постоянными магнитами имеет ряд достоинств: высокий КПД, низкие потери, высокие массогабаритные показатели, высокую перегрузочную способность, надежность, и большой диапазон регулирования [1].

Проектирование СДИПМ представляет собой сложную задачу. СДИПМ обладает сложной структурой и большим количеством параметров. Кроме того, большинство требований проектирования находятся в противоречии друг с другом, например, минимизация объема или массы с одновременным обеспечением максимума момента. Поэтому, определение варианта СДИПМ, который удовлетворит все критерии и технические ограничения, требует чрезмерно много работы. Следовательно, задача

проектирования СДИПМ является задачей многокритериальной оптимизации (МКО). Для решения этой задачи требуется системный подход на основе итерационной схемы, которая постепенно приводит к оптимальному решению.

В основном существуют два подхода решения задачи: классический подход и подход эволюционных алгоритмов.

Классический подход имеет большое количество алгоритмов, развивается исследователями в математике. Эти алгоритмы обычно дают одно решение. Многие из них преобразуют задачу МКО в однокритериальную задачу. В качестве примеров можно привести метод скалярной свертки, метод ϵ – ограничений, лексикографического упорядочения и целевого программирования [2, 3, 4].

С другой стороны, подход эволюционных алгоритмов представляет собой новую область исследования. Эволюционный алгоритм сохраняет популяцию решений во все время процесса оптимизации, поэтому в конце процесса оптимизации получается множество решений.

Для задачи многокритериальной оптимизации лучше получить множество решений вместо одного [5], и вследствие этого эволюционные алгоритмы представляют собой более привлекательный подход.

В этой статье рассматривается генетический алгоритм, который является самым известным из эволюционных алгоритмов. Приводится реализация генетического алгоритма на ЭВМ и его применение для оптимизации параметров СДИПМ.

Постановка задачи оптимизации параметров и выбор метода оптимизации

Конструкция машины может быть описана вектором параметров \vec{x} (размеры, безразмерные параметры, типы используемых материалов и т.д.). Конструкция учитывает множество m ограничений, которые могут включать в себя технические стандарты, электромагнитные, тепловые, механические или производственные ограничения. Цель оптимизации заключается в максимизации выбранных целевых функций $\vec{f}(\vec{x})$, и обеспечении технических показателей в пределах допустимых областей.

Общая задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: найти вектор параметров

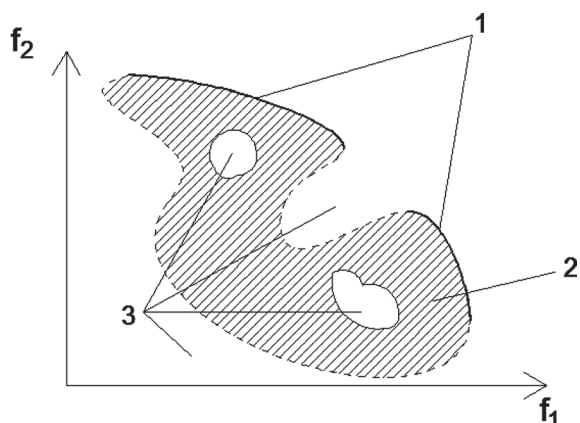


Рис. 1. Визуализация на пространстве критериев: 1 — множество оптимальных по Парето решений (Парето-фронт); 2 — множество допустимых значений критериев; 3 — множество недопустимых значений критериев

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in S \quad (1)$$

с учетом m функций ограничения

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, j = 1..m, \quad (2)$$

чтобы максимизировать вектор критериев (целевых функций)

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_p(\vec{x})] \rightarrow \max. \quad (3)$$

В задачах многокритериальной оптимизации обычно критерии оптимизации f_k противоречивы, и оптимизация по каждому из них отдельно может приводить к различным значениям оптимизируемых параметров. Решение задачи многокритериальной оптимизации в общем случае не являясь оптимальным ни для одного из критериев оказывается компромиссным для вектора $\vec{f}(\vec{x})$ в целом.

Решение задачи многокритериальной оптимизации (компромиссное решение) $\vec{x}^* \in S$ называют оптимальным по Парето решением, если не существует $\vec{x} \in S$ такого, что $f_k(\vec{x}^*) \leq f_k(\vec{x})$ для $k = 1..p$ и $f_k(\vec{x}^*) < f_k(\vec{x})$ хотя бы одного k [6]. Множество всех оптимальных по Парето решений называется множеством Парето, а также недоминируемым множеством [6], или Парето-фронтом (Pareto-frontier). Оптимальность по Парето векторного критерия $\vec{f}(\vec{x})$ означает, что нельзя дальше уменьшать значение одного из критериев не увеличивая значения хотя бы одного из остальных.

На рис. 1 представлена визуализация на пространстве критериев множества допустимых значений критериев и Парето-фронт в случае двух критериев.

При отсутствии дополнительной информации ни одно из этих решений не может быть принято лучшим по сравнению с другими. Как правило, лицо, принимающее решения (ЛПР), должно представить дополнительную информацию о предпочтительных характеристиках и определить наиболее приемлемое решение. Таким образом, многокритериальная оптимизация имеет два аспекта: оптимизацию и ЛПР.

В задаче оптимизации проектирования СДИПМ некоторые параметры дискретны, например, число витков, число полюсов, и т.д.; явные функции ограничения и целевые функции не всегда получаются; значение целевых функций и функций ограничения не существует на всех точках пространства поиска. Поэто-

му производная целевых функций не всегда существует. Кроме того функции ограничения нелинейные, что затрудняет определение оптимальной точки и следующих точек, удовлетворяющих функции ограничения.

Вследствие особенностей задачи оптимизации СДИПМ эволюционные алгоритмы представляют собой более привлекательный подход. Генетический алгоритм (ГА) представляет собой самый популярный алгоритм в группе эволюционных алгоритмов. ГА не требуют заданной отправной точки, позволяет использовать нелинейные, дискретные целевые функции и условия ограничения. Хотя он не строго математически гарантирует, что оптимальные решения будут найдены, но существует высокая вероятность того, что близкое к оптимальному решению будет найдено [7]. Множество этих решений находится очень близко к настоящему Парето-фронту и называется аппроксимацией множества Парето.

Генетический алгоритм и реализация его на ЭВМ

Обзор генетического алгоритма

Генетический алгоритм (ГА) – это алгоритм поиска, который моделирует естественный отбор с использованием методов естественной эволюции, таких как размножение, наследование, мутации, и отбор.

ГА включает в себя следующие компоненты [8]:

- гены,
- целевые функции (приспособленности),
- генетические операторы (скрещивание и мутация),
- функция отбора,
- популяция (множество особей).

Гены представляются собой оптимизируемые параметры. Популяция представляет собой возможные решения. Целевые функции выражают приспособленность особей на разных аспектах. Генетические операторы (скрещивание и мутация) служат для нахождения новых решений, одновременно сохраняя лучшие решения. Скрещивание сохраняет особенности предыдущих поколений и передает их следующим поколениям, а мутация ищет новые направления развития популяции. Функция отбора выбирает лучшие решения (особи) и создает новое поколение.

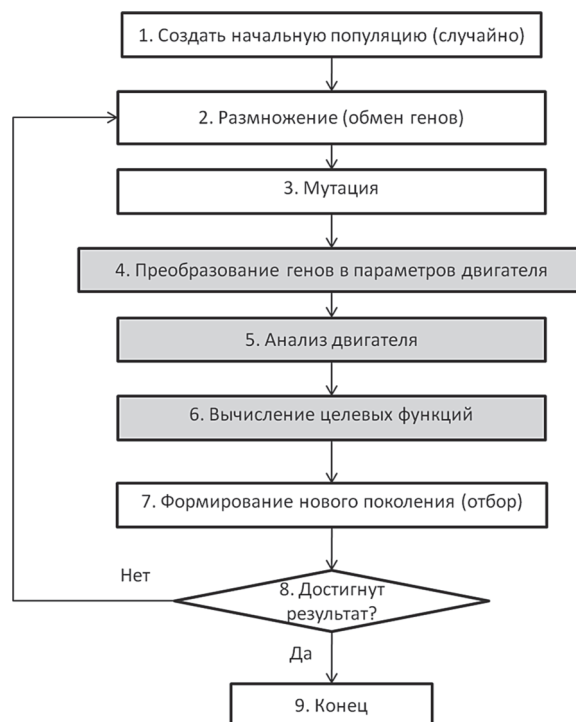


Рис. 2. Схема генетического алгоритма

Схема генетического алгоритма представлена на рис. 2. Сначала первая популяция создана случайным образом (блок 1). В цикле применяются генетические операторы как скрещивание (размножение) и мутация (блок 2, 3), результаты которого служат для получения нового поколения. Гены преобразуются в параметры двигателя (блок 4). Модель двигателя создается и анализируется в блоке 5. На основе показателей, получаемых из анализа двигателя, целевые функции вычисляются в блоке 6. На основе результатов целевых функций недоминируемое множество (популяция) выбирается для следующего поколения (блок 7).

В отличие от детерминированной оптимизации в генетическом алгоритме существует случайность и нет строгости математики. Поэтому условие завершения (блок 8) не явно. Обычно для простоты процесс заканчивается, когда количество поколений превышает максимальное.

Основной недостаток ГА заключается в том, что он требует больших вычислительных затрат [9]. Кроме того, с повышением точности аппроксимации, которую достигают увеличением числа недоминируемых решений, задача выбора единственного решения из представленного множества становится более трудоемкой для ЛППР. Однако, хорошая визуализация

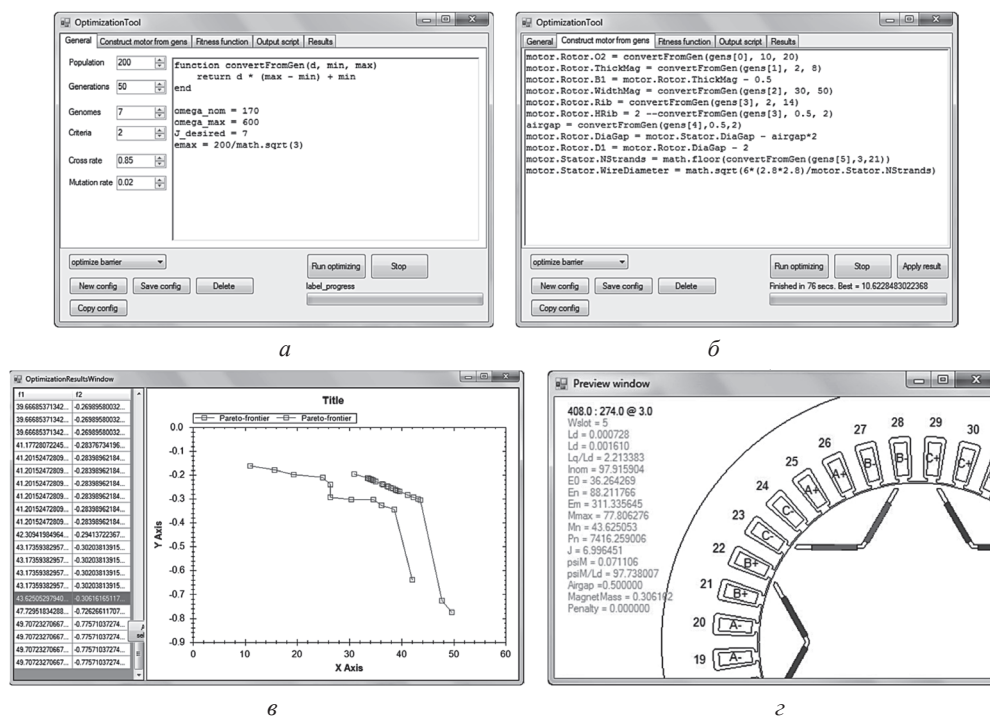


Рис. 3. Интерфейс модуля оптимизация параметров СДИПМ: а, б – Окно ввода исходных данных; в – окно, изображающее Парето-фронт в виде таблицы и графика; г – окно, изображающее выбранное решение

Парето-фронта очень помогает ЛПР выбрать решение.

Реализации генетического алгоритма на ЭВМ

Автор разработал программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ (ПАПД), в котором модуль оптимизации параметров СДИПМ осуществляется с помощью генетического алгоритма.

В модуле оптимизации осуществлены следующие части:

- блоки 1, 2, 3, 5, 7, 8, разработанные на языке C#, которые являются основной частью генетического алгоритма;

- блок 4 (преобразование генов в параметры двигателя), блок 6 (вычисление целевых функций), разработанные в компьютерном языке Lua, позволяющие гибко вводить данные задачи оптимизации.

Блок 5 (анализ двигателя) создает модель двигателя и анализирует ее. Параметры модели вычисляются в блоке 4. Используются два типа модели двигателя: аналитическая модель и модель метода конечных элементов (МКЭ). Аналитическая модель, которая основана на электромагнитных уравнениях эквивалентной магнитной цепи [10], служит для предвари-

тельного анализа двигателя и проверки осуществимости модели МКЭ. Для повышения точности используется модель МКЭ с помощью программы FEMM. С помощью технологии ActiveX и программного языка Lua модель МКЭ двигателя создается автоматически, анализируется в FEMM и результаты (показатели двигателя) получаются из FEMM.

На рис. 3 представлен интерфейс модуля оптимизации параметров СДИПМ. Исходные данные задачи оптимизации СДИПМ вводятся с помощью компьютерного языка Lua (рис. 3, а, б). В результате процесса оптимизации получается аппроксимация множества Парето, которая изображается в виде таблицы и графика (рис. 3, в). На основе своего опыта и предпочтения инженер выбирает одно из этих решений (рис. 3, г).

Применение генетического алгоритма для оптимизации параметров СДИПМ

Осуществлено проектирование СДИПМ на основе существующего асинхронного двигателя типа АИР112МВ8: число пазов статора и их форма считаются известными, а параметры ротора и обмоток статора найдены путем оптимизации параметров с помощью генетического алгоритма.

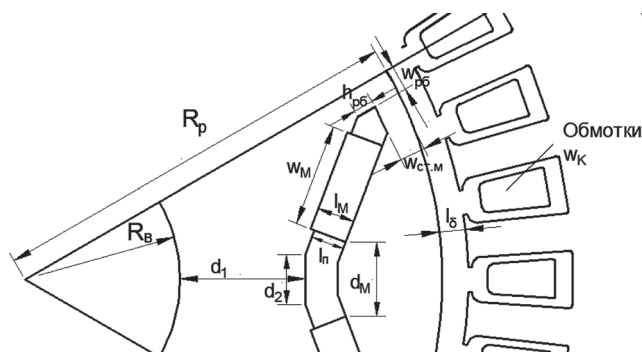


Рис. 4. Геометрические размеры ротора и параметры обмоток статора

При постановке задачи оптимизации параметров СДИПМ, необходимо решить следующие задачи:

1. Определение оптимизируемых параметров;
2. Выбор функций ограничения и методов их обработки;
3. Выбор целевых функций.

Оптимизируемые параметры

Оптимизируемыми параметрами, которые составляют вектор \vec{x} , являются геометрические размеры и другие величины, описывающие модель двигателя, такие как число витков, виды материалов, и т. д. Некоторые параметры представляют собой реальные числа (геометрические размеры), а другие – целые числа (число витков, число полюсов).

Оптимизируемые параметры представлены на рис. 4 и таблице.

Параметры оптимизации на роторе

| Обозначение | Описание |
|-------------|--|
| R_p | Радиус ротора |
| $w_{ст.м}$ | Ширина стального моста |
| w_M | Ширина оба магнитов |
| l_M | Длина магнита по магнитному направлению |
| d_M | Расстояние между магнитами |
| l_n | Длина воздушного барьера |
| $h_{рб}$ | Длина ребра |
| $w_{рб}$ | Ширина ребра |
| R_v | Радиус вала |
| d_1 | Расстояние между валом и воздушным зазором |
| d_2 | Ширина воздушного барьера |
| w_K | Число витков одной катушки |

Целевые функции

Выбранные целевые функции:

- максимизация номинального момента M_H

$$f_1 = M_H \rightarrow \max \quad (4)$$

– минимизация массы магнита $m_{пм}$ для уменьшения стоимости

$$f_2 = -m_{пм} \rightarrow \max \quad (5)$$

Функции ограничения

Функции ограничения, накладываемые технологическими требованиями и ограничениями на разработку двигателя. Один из методов учета ограничений типа неравенств (2) состоит в том, что составляется расширенный критерий вида

$$F_k(\vec{x}) = f_k(\vec{x}) - \sum_j^m \lambda_{jk} g_j(\vec{x}) \quad (6)$$

где λ_{jk} – коэффициент штрафа для целевой функции $f_k(\vec{x})$, если ограничение $g_j(x) \leq 0$ нарушено $j = 1 \dots m; k = 1 \dots p$.

Этот метод позволяет преобразовать задачу с функциями ограничения в задачу без функции ограничения. Однако, выбор подходящих коэффициентов штрафа не простой. Инженер выбирает коэффициент на основе его опыта и/или получает их после нескольких итераций оптимизации.

Технологические требования:

- широкий диапазон регулирования скорости;
- минимизация потерь в стали при холостом ходе.

Исходя из алгоритма регулирования СДИПМ оптимальным вектором тока, получено условие для получения максимального диапазона регулирования [11]:

$$g_1 = I_H - \frac{\Psi_M}{L_d} \leq 0, \quad (7)$$

где Ψ_M – потокосцепление обмотки статора от постоянных магнитов; L_d – индуктивность по оси d ; I_H – значение номинального тока.

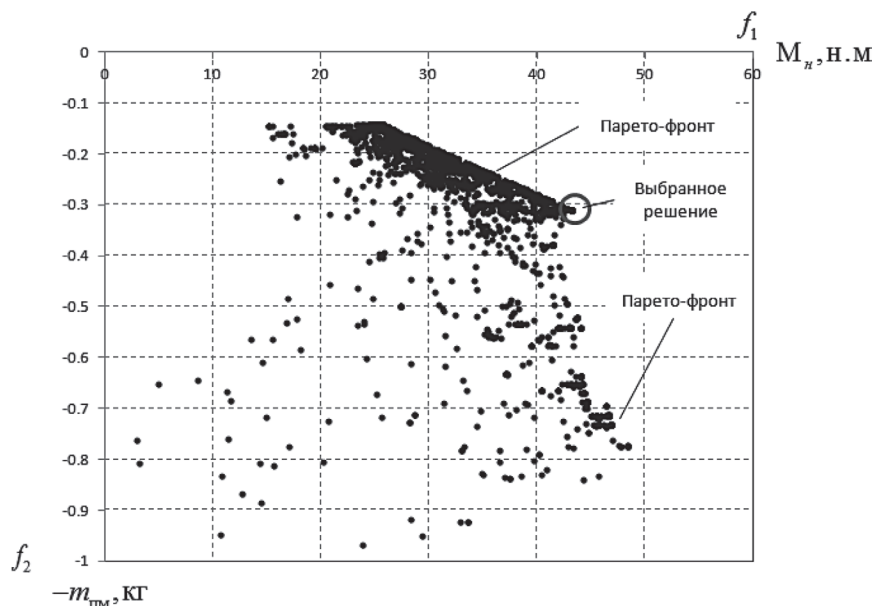


Рис. 5. Визуализация всех возможных решений, оптимальных по Парето решений и выбранного решения на пространстве критериев

С точки зрения минимизации потери в стали при холостом ходе, коэффициент гармонических искажений (КГИ) должен быть минимальным. Значение КГИ будет минимальным, когда ширина распределения магнитной индукции от постоянных магнитов $\gamma_M = 133,5^\circ$ [12]. Это приводит к условиям ограничения:

$$133,5^\circ - \Delta\gamma_M \leq \gamma_M \leq 133,5^\circ + \Delta\gamma_M, \quad (8)$$

или функциям ограничения:

$$g_2 = 133,5^\circ - \Delta\gamma_M - \gamma_M \leq 0, \quad (9)$$

$$g_3 = \gamma_M - 133,5^\circ - \Delta\gamma_M \leq 0, \quad (10)$$

где $\Delta\gamma_M$ – допустимая ошибка, градус.

Результат

В результате процесса оптимизации получены приблизительное множество оптималь-

ных по Парето решений и выбранное решение, представленные на рис. 5. Для изображения улучшения решений в течение процесса оптимизации на рис. 5 также представлены все решения.

Заключение

1. Рассмотрены задача многокритериальной оптимизации и подход эволюционных алгоритмов для решения этой задачи.

2. Реализован генетический алгоритм в виде программного обеспечения для проектирования СДИПМ.

3. Осуществлена оптимизация параметров СДИПМ на основе асинхронного двигателя типа АИР112МВ8

4. Получено множество решений и одно из них выбрано с участием ЛПР.

Литература

1. Miller, T. J. E. Brushless Permanent Magnet and Reluctance motor drive / T. J. E. Miller. – New York; Oxford: Clarendon Press, 1989. 207 p.
2. Брахман, Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.
3. Кини, Р. Л., Райфа, Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: Пер. с англ. / Под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
4. Ehrgott, Matthias. Multicriteria Optimization. – 2nd. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 323 p.
5. Multiobjective Optimization of Induction Machines Including Mixed Variables and Noise Minimization / J. Le Besnerais [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. 2008. – Vol. 44, № 6. – 1102–1105 p.
6. Лотов, А. В., Поспелова, И. И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие / А. В. Лотов, И. И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
7. S. B. Andersen, I. F. Santos. Evolution strategies and multi-objective optimization of permanent magnet motor / S. B. Andersen, I. F. Santos // Applied Soft Computing. 2012. – Vol. 12, no. 2. – pp. 778–792.
8. Petrenko, Y. N. Fuzzy logic and genetic algorithm technique for non-linear system of overhead crane / Y. N. Petrenko, S. E. Alavi. Proceedings of the IEEE Region 8 SIBIRCON-2010, Irkutsk Listvyanka, Russia, July 11–15, 2010, pp. 848–851.

9. Шварц, Д. Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор / Д. Т. Шварц // 2013, № 4. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/547747.html> – Дата доступа: 28.11.2016.
10. Нго, Фьонг Ле, Гульков, Г. И. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами // М.: Энергетика. 2015. – № 4. – с. 13–14.
11. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity / S. Morimoto [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 1990. – Vol. 26, № 5. – p. 866–871.
12. Kamiya M. Development of traction drive motors for the Toyota hybrid systems // IEEJ Transactions on Industry Applications. Apr. 2006. – Vol. 126, № 4. – P. 473–479.

Поступила
24.01.2017

После доработки
22.02.2017

Принята к печати
06.03.2017

Ngo Phuong Le

GENETIC ALGORITHM IN OPTIMIZATION DESIGN OF INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Belarusian National Technical University

Classical method of designing electric motors help to achieve functional motor, but doesn't ensure minimal cost in manufacturing and operating. Recently optimization is becoming an important part in modern electric motor design process. The objective of the optimization process is usually to minimize cost, energy loss, mass, or maximize torque and efficiency. Most of the requirements for electrical machine design are in contradiction to each other (reduction in volume or mass, improvement in efficiency etc.). Optimization in design permanent magnet synchronous motor (PMSM) is a multi-objective optimization problem. There are two approaches for solving this problem, one of them is evolution algorithms, which gain a lot of attentions recently. For designing PMSM, evolution algorithms are more attractive approach. Genetic algorithm is one of the most common. This paper presents components and procedures of genetic algorithms, and its implementation on computer. In optimization process, analytical and finite element method are used together for better performance and precision. Result from optimization process is a set of solutions, from which engineer will choose one. This method was used to design a permanent magnet synchronous motor based on an asynchronous motor type АИР112МВ8.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; multi-objective optimization, genetic algorithm.



Нго Фьонг Ле. Стажер Белорусского национального технического университета. В 2016 окончил аспирантуру по специальности «Электротехнические комплексы и системы» в БНТУ. Научные интересы: автоматизированный электропривод, методы оптимального проектирования электрических машин, микропроцессорное управление электроприводом, математическое и имитационное моделирование систем автоматического управления.

Email: ngo.phuong.le@gmail.com.

Ngo Phuong Le. Trainee in Belarus national technical university. In 2016 graduated from post-graduate course majoring in “Electric technical complex and systems”. Science interest: automated electric drive, methods of optimal designing of electric machines, microprocessor, mathematic and imitation model of automatic control.

Email: ngo.phuong.le@gmail.com.