

Определяем значение длительно допустимого тока трансформатора с учетом высших гармоник тока:

$$\frac{I}{I_{\text{ном}}} = \sqrt{\frac{P_{*\text{нагр,ном}}}{1 + K_{\text{обм}} P_{*\text{обм,ном}} + K_{\text{б}} P_{*\text{б,ном}} + K_{\text{др}} P_{*\text{др,ном}}}}. \quad (11)$$

#### Литература

1. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский [и др.] // Пром. энергетика. – 2013. – № 5. – С. 42–47.
2. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
3. Силовые трансформаторы : справ. книга / под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоиздат, 2004. – 616 с.

### ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ МАГНИТАМИ

Нго Фьонг Ле

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель Г. И. Гульков

Оптимизация является очень популярным термином в современном проектировании электрических машин и устройств в целом. Цель процесса оптимизации, как правило, заключается в том, чтобы свести к минимуму стоимость машины, ее потери, ее массы, или свести к максимуму КПД, момент. Большинство требований проектирования электрической конструкции машины находятся в противоречии друг с другом (уменьшение объема или массы, повышение КПД и т. д.).

Задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: найти вектор параметров:

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n], \vec{x} \in R^n$$

с учетом  $n$  ограничений параметров

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1 \dots n$$

и  $m$  функций ограничения

$$g_j(x) \leq 0, j = 1 \dots m,$$

чтобы минимизировать (или максимизировать) вектор функций:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})].$$

Методы поиска оптимума различны. Детерминированный подход, использующий детерминированные процедуры выбора векторов, принадлежащих некоторому допустимому множеству и обращающих в оптимум целевую функцию. Наиболее классический представитель этого подхода – метод градиентов (метод наискорейше-

го спуска). Другой подход основан на моделировании процесса эволюции живых организмов. Один из них – генетический алгоритм (ГА). Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Для оптимизации параметров синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами (СДПМ) из-за сложности структуры этого двигателя методы оптимизации, которые не требуют заданной отправной точки, представляют собой более гибкий и привлекательный подход, например, эволюционные алгоритмы как генетический алгоритм. Генетический алгоритм также позволяет использовать нелинейные, дискретные целевые функции и условия ограничения. Однако он не строго математически гарантирует, что оптимальные решения будут найдены, но существует высокая вероятность того, что близкое к оптимальному решение будет найдено. С точки зрения инженеров, это оптимальное решение.

В докладе рассмотрен генетический алгоритм (ГА) и его применение в проектировании синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами.

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

Генетический алгоритм включает в себя следующие компоненты: гены (параметры для оптимизации), целевая функция (приспособленности), генетические операторы (скрещивание и мутация), функция отбора и популяция (множество особей). Популяция представляет собой возможные решения. Целевая функция выражает приспособленность особей. Генетические операторы (скрещивание и мутация) служат для нахождения новых решений, одновременно сохраняет лучшие решения. Функция отбора выбирает лучшие решения (особи) и создает новое поколение.

Сначала первая популяция создана случайным образом (блок 1 на рис. 1). В цикле применяются такие генетические операторы, как скрещивание и мутация (блок 2, 3), результат которого служит для получения нового поколения. Для них также вычисляется значение приспособленности (блок 4, 5, 6), и затем производится отбор (блок 7) лучших в следующее поколение.

Для повышения эффективности ГА предлагается ГА с элитарной особью. Функция отбора всегда сохраняет самое лучшее решение (элитарная особь) на следующее поколение.

**Применение ГА в проектировании СДПМ.** Рассмотрим примерный синхронный двигатель с инкорпорированными магнитами, имеющий геометрические параметры для оптимизации (рис. 2).

Определяются 6 генов, соответствующих 6 основным параметрам двигателя (табл. 1). Эти параметры ограничены в промежутках, определяющих поисковое пространство (пространство проектирования). Другие параметры либо постоянные, или косвенные, вычисляются из данных параметров.

Таблица 1

Ген	Параметр	Описание	Ограничение
0	O2	Расстояние между валом и магнитами (мм)	10...20
1	Widthmag	Ширина магнита (мм)	2...8
2	Thickmag	Толщина магнита (мм)	30...50

Ген	Параметр	Описание	Ограничение
3	Rib	Расстояние между магнитами соседних полюсов (мм)	2...14
4	Airgap	Воздушный зазор (мм)	0,5...2
5	NStrands	Число проводов в одном пазе	3...20

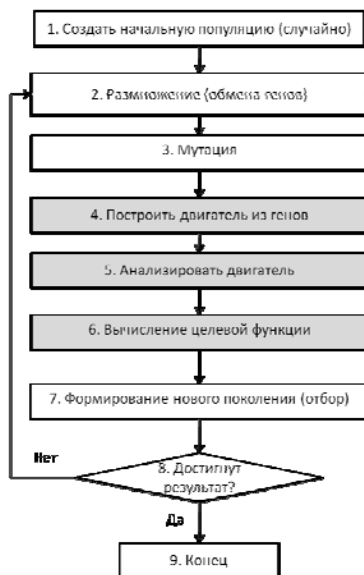


Рис. 1. Схема генетического алгоритма

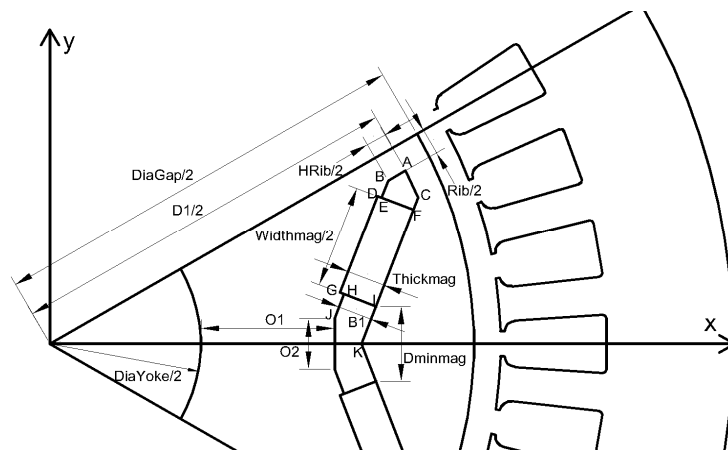


Рис. 2. СДПМ с геометрическими параметрами

Функции ограничения, связанные с техническими ограничениями или требованиями, определяются в табл. 2. Также используются штрафные функции, которые позволяют штрафовать решения, нарушающие ограничения. Штраф осуществляется путем умножения целевых функций на штрафные коэффициенты.

Таблица 2

Описание	Ограничение
Отношение потокосцепления магнитов к индуктивности оси $d$	$\frac{\Psi_M}{L_d} < 50$
Угол магнитов (электрический угол)	$128 < \gamma_M < 138$
Момент (Н · м)	$M \geq 40$

Целями оптимизации являются максимизация момента и минимизация массы магнитов (так как габаритный размер двигателя определен, минимальная масса магнитов служит для уменьшения стоимости). Целевая функция формулируется в виде взвешенной суммы:

$$f = w_1 \frac{M}{M_{\max}} + w_2 \frac{m_{\text{магнит}}}{m_{\max}},$$

где  $M$  – крутящий момент;  $M_{\max}$  – возможно максимальный момент во всех случаях (на границе ограничения);  $m_{\text{магнит}}$  – масса магнитов;  $m_{\max}$  – возможно максимальная масса магнитов;  $w_1$ ,  $w_2$  – коэффициент важности цели.

На рис. 1 блок 5 выполняет аналитический расчет двигателя путем решения магнитной цепи 0 на основе параметров, полученных из блока 4. Блок 4 построит параметры двигателя из генов.

Автор разработал программное обеспечение для автоматизации проектирования СДПМ, в котором модуль оптимизации параметров СДПМ осуществляется с помощью генетического алгоритма (рис. 3).

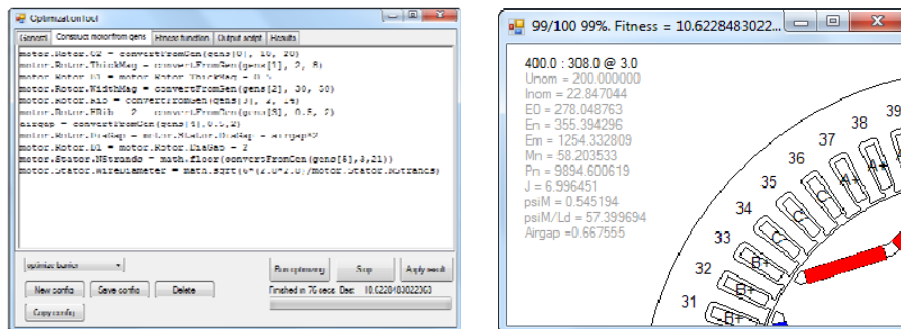


Рис. 3. Интерфейс модуля оптимизация параметров СДПМ

**Заключение.** Оптимизация становится важной и неизбежной частью процесса современного проектирования электрических машин. Методы оптимизации на базе моделирования эволюции живых организмов, таких как ГА, очень гибки и подходят для проектирования электрических машин.

Дальнейшее исследование предполагает включение метода конечных элементов в цикл алгоритма (блок 5 на рис. 1) для повышения точности проектирования.

#### Литература

1. Andersen, S. B. Evolution strategies and multi-objective optimization of permanent magnet motor / S. B. Andersen, I. F. Santos // Applied Soft Computing. – 2012. – № 2. – С. 778–792.
2. Нго Фьонг Ле. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами / Нго Фьонг Ле, Г. И. Гульков. – М. : Энергетика, 2015. – № 4. – С. 13–24.

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОАО «РЕЧИЦАДРЕВ»

С. В. Пырх, Е. А. Пастерняк

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научный руководитель А. Г. Ус

Во время прохождения практики на предприятии ОАО «Речицадрев» мы провели его обследование и выявили ряд мероприятий по повышению энергоэффективности производства.