

И.Н. Радимов, канд. техн. наук,  
В.В. Рымша, докт. техн. наук,  
Чан Тхи Тху Хыонг

## ПРОЕКТНЫЙ СИНТЕЗ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

*Наведено результати проектного синтезу вентильного двигуна з постійними магнітами та додатковими пазами на статорі. Вирішення задачі параметричної оптимізації дозволило суттєво знизити величину моменту від зубцевих гармонік магнітного поля.*

*Представлены результаты проектного синтеза вентильного двигателя с постоянными магнитами и дополнительными пазами на статоре. Решение задачи параметрической оптимизации позволило существенно снизить величину момента от зубцовых гармоник магнитного поля.*

*The results of the project synthesis of the brushless DC motor with added slots on the stator are presented. The solution of the parametric optimization task is permit considerably reduce the cogging torque.*

Одним из способов снижения величины момента от зубцовых гармоник магнитного поля в вентильных двигателях с постоянными магнитами (ВДПМ) является выполнение небольших по размерам пазов на полюсных наконечниках (зубцах) статора [1]. На рис. 1 показаны два варианта поперечных сечений ВДПМ. В первом варианте (рис. 1,а) поверхность зубцов статора – гладкая, а во втором варианте (рис. 1,б) на каждом из зубцов статора выполнено по два паза полукруглой формы, симметрично расположенных относительно оси зубца.

На величину момента от зубцовых гармоник влияет не только наличие самих дополнительных пазов, но и геометрические размеры участков всей зубцовой зоны ВДПМ. Исходя из этого задача поиска таких соотношений геометрических размеров зубцовой зоны, при которых обеспечивается минимум величины момента от зубцовых гармоник магнитного поля, является одной из составляющих задачи проектного синтеза ВДПМ.

В общей постановке задача проектного синтеза ВДПМ сводится к оптимизации (минимизации или максимизации) некоторого функционала [2]:

$$F^S(x^S) \rightarrow \min_{s \in S, x \in D} \Rightarrow s^*, x^{s^*} \quad (1)$$

при условии

$$D: \varphi_i^s(x^s) = \varphi_i^s(x_1^s, x_2^s, \dots, x_m^s) \geq 0, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; s = \{1, 2, \dots, s, \dots, k\}.$$

Эта задача включает в себя как структурную, так и параметрическую оптимизацию, где  $s$  - множество структур (конструктивных исполнений) ВДПМ,  $F^S(x^S)$  - критерий оптимальности,  $s^*$  - оптимальное исполнение двигателя,  $x^{s^*}$  - вектор оптимальных параметров оптимального исполнения двигателя.

Условия (2) выражают ограничения, накладываемые техническими требованиями на разработку ВДПМ, и описывают допустимую область  $D$ . Областью определения функций  $F^S(x^S)$  и  $\varphi_i^s(x^s)$  является некоторая область  $D_1$ , ограниченная условиями:

$$D_1: \psi_j^s(x^s) \geq 0, j = 1, 2, \dots, l. \quad (3)$$

В случае  $\{s\} = 1$ , т.е. когда требуется оптимизировать заданное конструктивное исполнение ВДПМ, задача синтеза сводится к виду:

$$F(x) \rightarrow \min \Rightarrow x^* \quad (4)$$

с ограничениями типа неравенств:

$$D: \varphi_i(x) \geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

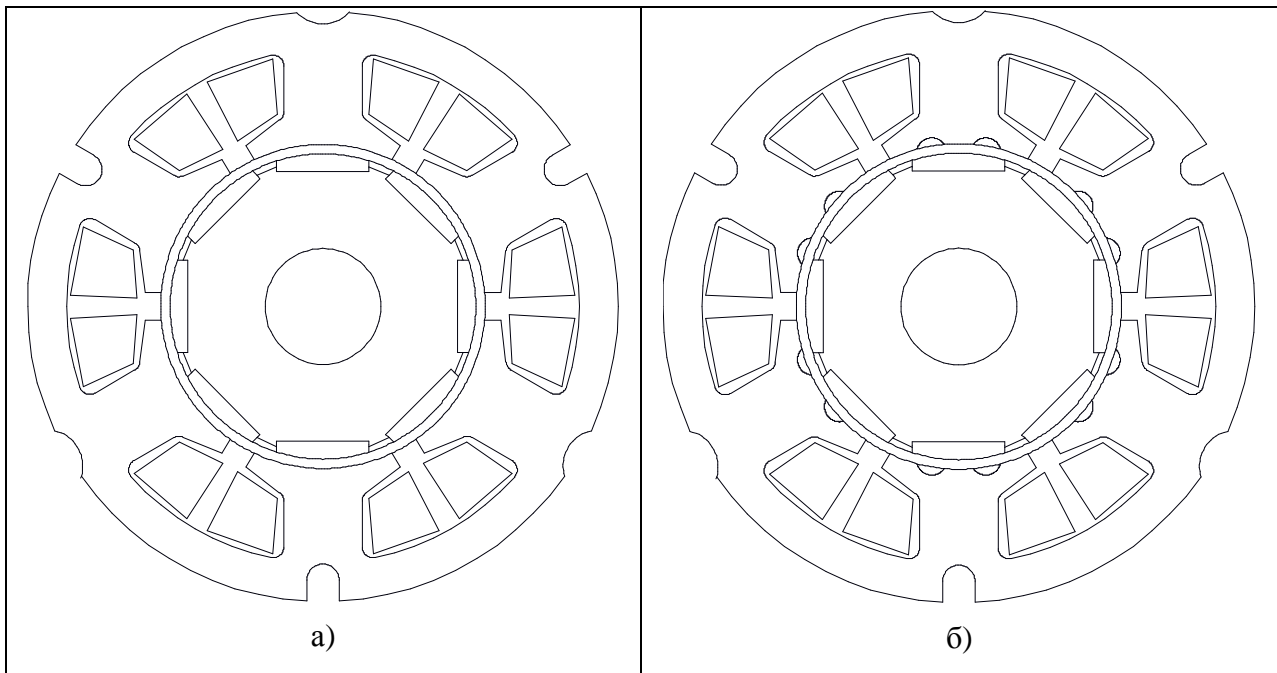


Рис. 1. Поперечное сечение ВДПМ

В данной работе для ВДПМ с наружным диаметром статора 81 мм и длиной пакета 45 мм решается задача параметрической оптимизации (4), (5).

Материал постоянных магнитов – NdFeB.

В качестве исходных варьируемых переменных приняты: воздушный зазор  $\delta$ ; длина полюсной дуги магнита  $\alpha_{\text{маг}}$ ; длина дуги главного полюса  $\alpha_{\text{ГП}}$ ; длина дуги между центрами дополнительных пазов  $\alpha_{\text{мп}}$ ; длина дуги, на которую опирается дополнительный паз  $\alpha_{\text{дно}}$  (рис.2). Пределы вариации независимых переменных приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Пределы вариации независимых переменных

Переменная	Размерность	Уровни изменения переменных	
		min	max
$\delta$	мм	0,8	1,3
$\alpha_{\text{маг}}$	град.	26	36
$\alpha_{\text{ГП}}$	град.	46	56
$\alpha_{\text{мп}}$	град.	8	36
$\alpha_{\text{дно}}$	град.	4	12

В состав ограничений входят: длина дуги шлица –  $\alpha_{\text{шл}} \geq \alpha_{\text{шл}_{\text{min}}}$ , обеспечивающая проведение проводника обмотки через шлиц, а также расстояние между крайними нижними вершинами смежных магнитов  $b_{\text{рм}} \geq b_{\text{рм}_{\text{min}}}$  (см. рис. 2). В данной задаче  $\alpha_{\text{шл}_{\text{min}}} = 4,5^{\circ}$ ,  $b_{\text{рм}_{\text{min}}} = 1,8$  мм.

Целевой функцией служит амплитуда момента от зубцовых гармоник магнитного поля  $M_{\text{Pmax}}$ , т.е.  $M_{\text{Pmax}} \Rightarrow \min$ .

Эффективность решения задачи проектного синтеза в указанной выше постановке определяется двумя факторами. Во-первых, точностью математической модели ВДПМ, а во-вторых – используемым методом поисковой оптимизации.

До появления высокопроизводительных вычислительных средств математические модели ВДПМ строились преимущественно на основе методик их поверочного расчета. Однако методики поверочного расчета, в силу ряда принимаемых допущений, не удовлетворяют современным требованиям по точности моделирования процессов, происходящих в вентильных двигателях. Математические модели, построенные в полевой постановке задачи на базе метода конечных элементов (МКЭ) (рис. 3), значительно точнее описывают электромагнитные явления в ВДПМ и уже на современном этапе развития вычислительной техники

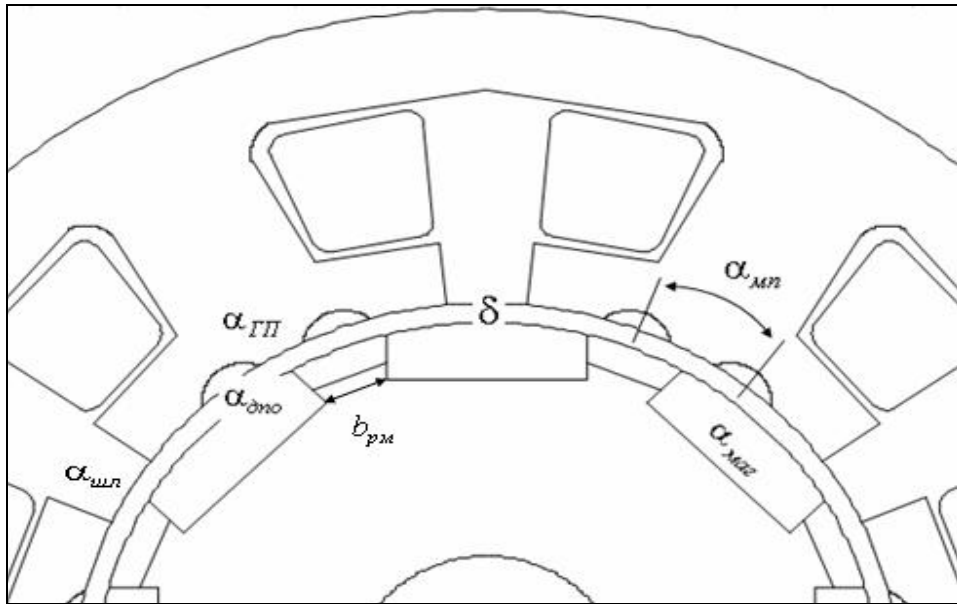


Рис. 2. Поперечное сечение активной зоны ВДПМ

могут быть использованы в качестве моделей, лежащих в основе решения задач их проектного синтеза.

Следует отметить, что в данной постановке задача усложняется тем, что для определения целевой функции  $M_{P \max}$  необходимо провести не один, а серию расчетов магнитного поля для построения зависимости электромагнитного момента в функции угла поворота ротора  $M_P = f(\Theta)$ , где  $\Theta$  - угол поворота ротора ВДПМ, и нахождения значения  $M_{P \max}$ .

Для каждого варианта серии выполняется:

- построение геометрии расчетной области по заданным значениям варьируемых переменных и ее дискретизация (см. рис. 3,а);
- расчет магнитного поля МКЭ в нелинейной постановке задачи (см. рис. 3,б);
- определение электромагнитного момента  $M_P$ , действующего на ротор двигателя.

Указанные этапы расчета реализованы в виде специального script-файла, написанного на языке программирования LUA. Данный язык интегрирован в систему конечноэлементных расчетов FEMM [3]. Script-файл позволяет в автоматическом режиме строить геометрию расчетной области, присваивать признаки сред подобластям, строить сетку конечных элементов

в области расчета, проводить расчет требуемых интегральных величин в постпроцессоре и т.д. По результатам серии расчетов определяется зависимость  $M_P = f(\Theta)$  и находится значение  $M_{P \max}$  для заданного сочетания варьируемых переменных.

Поисковую оптимизацию целесообразно осуществлять с использованием уже существующих и апробированных систем. Одной из таких систем является система OptiY [4], позволяющая проводить оптимизацию, инвариантную к типу оптимизируемого объекта, различными методами, а именно: полного перебора, Хука-Дживса, эволюционным. Метод полного перебора требует существенных затрат машинного времени при поиске оптимума, в особенности, при решении задач, содержащих многочисленные расчеты магнитного поля МКЭ. Следовательно, для рассматриваемой задачи его применение нецелесообразно. Также нецелесообразно в данном случае использование метода Хука-Дживса, относящегося к детерминированным методам поисковой оптимизации, спецификой которых является необходимость наличия информации о топологии области поиска экстремума. Исходя из этого, для решения задачи проектного синтеза ВДПМ принят эволюционный метод, сочетающий в себе преимущества случайных и детерминированных процедур поиска и обладающий высокой эффективностью нахождения глобального оптимума.

Для электромехаников главным

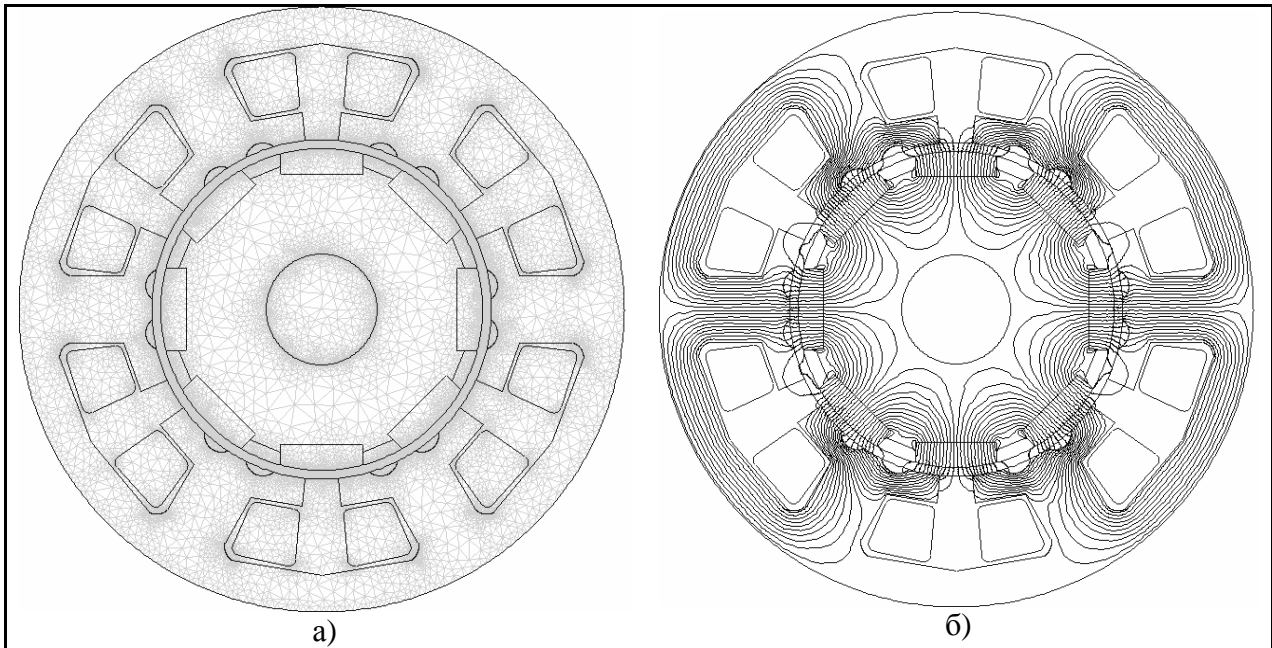


Рис. 3. К расчету магнитного поля ВДПМ

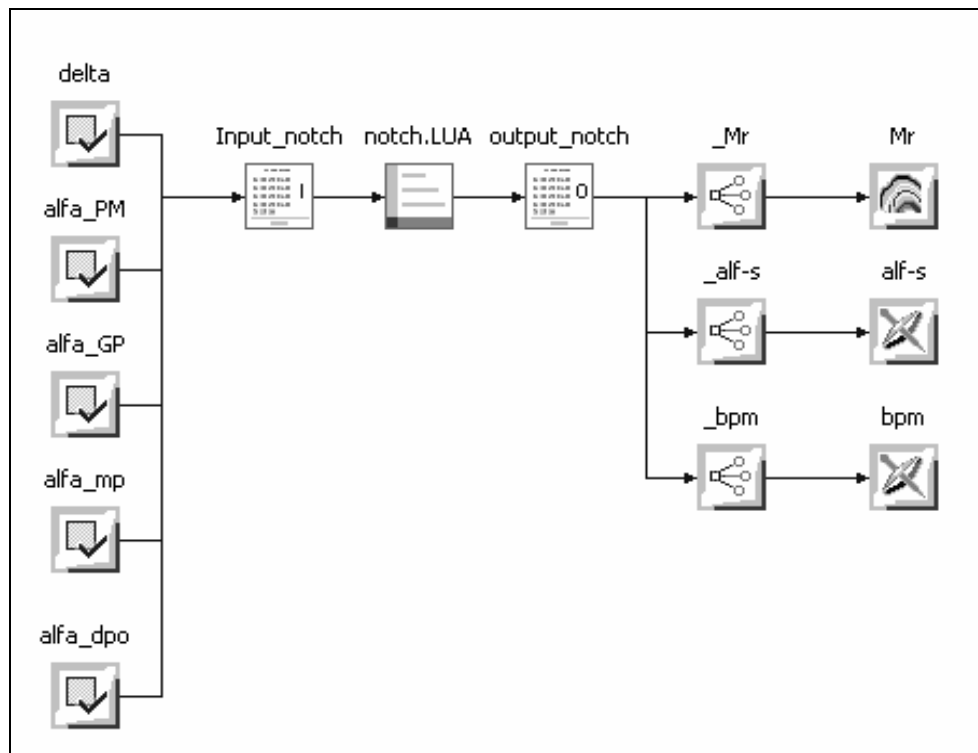


Рис. 4. Блок-схема проектного синтеза ВДПМ на основе полевой модели

преимуществом системы OptiY является появившаяся недавно возможность ее взаимодействия с программой FEMM через script-файлы, написанные на языке программирования LUA. Тем самым создается удобная программная среда, обеспечивающая оптимизацию электромагнитных и электромеханических устройств на основе достаточно точной нелинейной полевой математической модели.

Для осуществления проектного синтеза ВДПМ в программе OptiY составлена блок-схема, представленная на рис. 4.

На блок-схеме показаны связи между полевой математической моделью (реализованной в файле notch.lua), варьируемыми переменными, ограничениями и целевой функцией.

На рис. 5 показано изменение целевой функции в процессе поиска в зависимости от числа шагов поиска  $N$ .

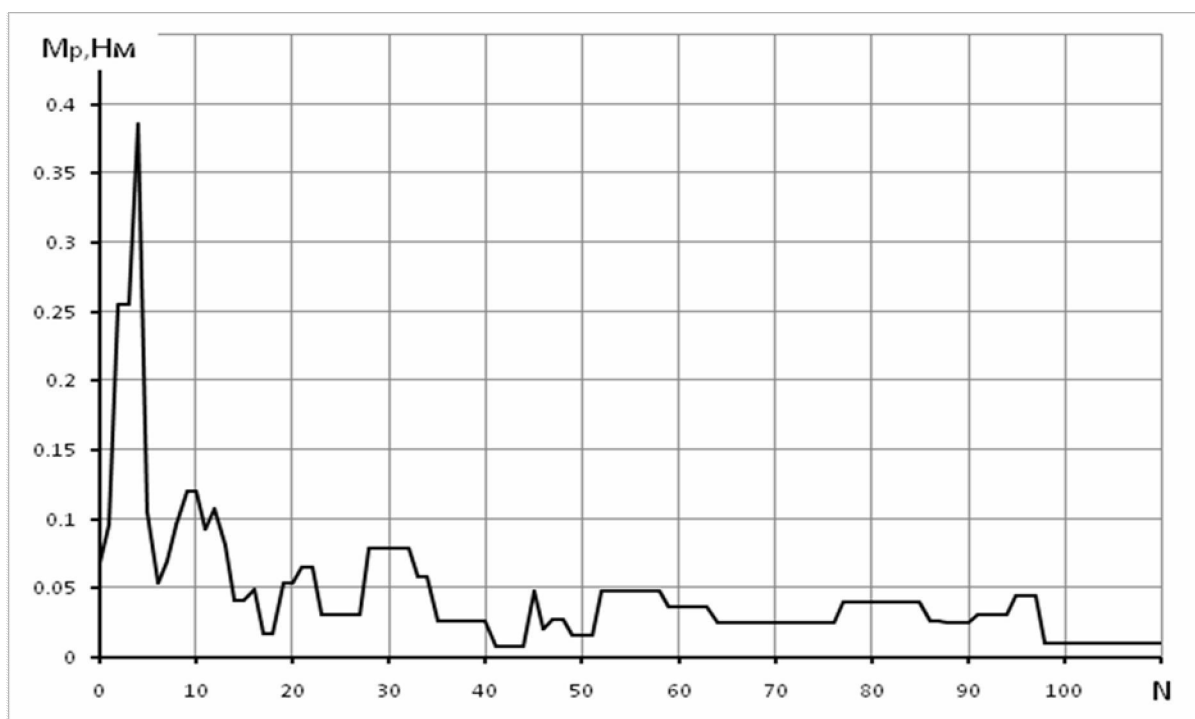


Рис. 5. Поведение целевой функции в процессе поиска от числа шагов  $N$

В таблице 2 представлены результаты проектного синтеза ВДПМ.

Таблица 2 – Результаты проектного синтеза

Обозначение	Размерность	Значение
Варьируемые переменные		
$\delta$	мм	0,95
$\alpha_{mag}$	град.	32
$\alpha_{ГП}$	град.	55
$\alpha_{мп}$	град.	19
$\alpha_{дно}$	град.	6
Ограничения		
$\alpha_{шл}$	град.	5
$b_{рм}$	мм	4,3
Целевая функция		
$M_{Pmax}$	Нм	0,0078

Видно, что эволюционный алгоритм достаточно быстро находит оптимальное решение (ориентировочно к 42 шагу) и далее продолжает работать в окрестности точки оптимума в поиске лучшей точки. Приблизительно после 97 шага поведение алгоритма уже не изменяется, и значение

целевой функции соответствует найденному на 42-м шаге минимальному значению критерия оптимальности.

При номинальном моменте двигателя 1 Нм амплитуда момента от зубцовых гармоник составляет менее 0,8% от номинального момента. Следовательно, применение допол-




нительных пазов на зубцах статора в сочетании с оптимальной геометрией зубцовой зоны ВДПМ позволяет получить малую величину момента от зубцовых гармоник магнитного поля, которая не будет оказывать влияния на характеристики ВДПМ.

Таким образом, применение системы OptiY в сочетании с программой FEMM позволяет эффективно решать достаточно сложные задачи проектного синтеза ВДПМ.

#### Список использованной литературы

1. Bolognani S., Bianchi N., Malesani L., Zigliotto M., Cervaro S. Brushless motor drives for ventilation // Department of ElectricalEngineering, University of Padova, Italy, 2003.
2. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
3. [http://femm.foster-miller.net/wiki/ Home-Page](http://femm.foster-miller.net/wiki/Home-Page)
4. <http://www.optiy.de>.

Получено: 02.11.2008

	Радимов Игорь Николаевич, канд.техн.наук, доцент, главный конструктор НТЦ при ООО «Завод «Электротехника», сл. тел. (048) 738-58-55 E-mail: office@zelnk.com
	Рымша Виталий Викторович, докт.техн.наук, профессор каф. электрических машин ОНПУ, сл. тел. (048) 738-58-55 E-mail: office@zelnk.com
	Чан Тхи Тху Хьонг, аспирантка каф. электрических машин ОНПУ, сл. тел. (048) 738-58-55 E-mail: office@zelnk.com