

УДК 621.313

В.В. Божко

Державне підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект»

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЩО ЗБУДЖУЄТЬСЯ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

Наведено методику визначення залежностей потокозчеплень та електромагнітного моменту тягового синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів. Представлено результати розрахунку магнітного поля з використанням вбудованих алгоритмів інтегрування комплексу FEMM та отримано значення потокозчеплення фаз обмоток статора і електромагнітний момент.

**Ключові слова:** рейковий автобус, синхронний двигун зі збудженням від постійних магнітів.

### Вступ

На сьогоднішній день на залізницях України існує проблема приміського транспортного сполучення. Для вирішення даної проблеми проводиться комплекс заходів щодо підвищення якості і збільшення обсягу приміських перевезень на залізничному транспорті. Напрямок даної роботи є створення вітчизняного пасажирського мотор-вагонного рухомого складу для малозавантажених ділянок - так званого рейкового автобусу при підвищенні енергозбереження та зниження витрат на його утримання.

Основною проблемою, що існує на даний момент є вибір типу тягового приводу для подібного рухомого складу, який би забезпечував необхідний рівень енергоефективності при мінімальних експлуатаційних витратах.

У роботах [1, 2] було проведено аналіз існуючих і перспективних типів електромеханічних перетворювачів енергії для рухомого складу. Одним з перспективних типів є перетворювач на базі синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів. Проте, на даний час, для створення тягових приводів рухомого складу на базі синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів, відсутні узагальнені моделі приводу в цілому, що дозволяють проводити моделювання перехідних і аварійних режимів роботи приводу. Для створення такої моделі необхідно розробити модель тягового синхронного двигуна, параметри якої відображали стан магнітної системи у різних режимах її роботи. Тому **метою роботи** є розробка методики визначення залежностей потокозчеплень фаз обмоток статора та електромагнітного моменту за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів.

### Результати досліджень

Для вирішення поставленої мети пропонується провести комплекс цифрових експериментів з ви-

значення електромагнітного моменту і потокозчеплень обмоток статора тягового двигуна.

Цифровий експеримент проводився шляхом розрахунку магнітного поля тягового двигуна методом кінцевих елементів при заданому положенні ротора двигуна і двох заданих струмах фаз статора [3]. Пропонується проводити розрахунки в двомірному просторі при постановці задачі з використанням програмного комплексу Finite Element Method Magnetics (FEMM) [4] та макросу, що написаний на мові Lua [5]. Так як обмотки статора з'єднано зіркою, то згідно першого закону Кирхгофа струм фази С дорівнює:

$$i_C = -i_A - i_B,$$

де  $i_A$ ,  $i_B$  – струми фаз А і В відповідно.

На рис. 1 і 2 представлена область щодо розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів для тягового двигуна електропоїзду потужність двигуна 250 кВт, номінальна частота обертання 1200 об/хв, зовнішній діаметр статора 650 мм, довжина активного статора 300 мм.

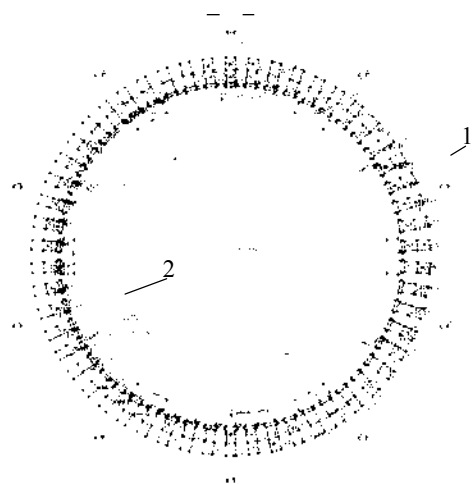


Рис. 1. Область для розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів (1 і 2 границі розрахункової області)

Встановлено граничну умову першого роду по межах 1 і 2.

Параметри матеріалів: сердечники статора і ротора виконані з електротехнічної сталі 2212, в якості постійного магніту обрано магніт з коерцитивної силою 883310 А/м і відносною магнітною проникністю 1,045. Обмотка статора двошарова хвильова з числом витків в секції, що дорівнює 1.

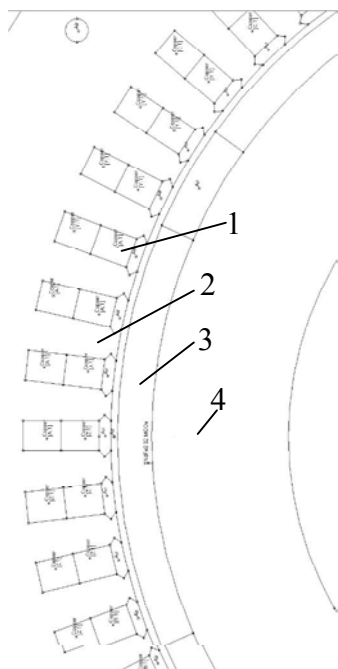


Рис. 2. Розрахункова область в зоні повітряного зазору.

1 – обмотка статора, 2 – сердечник статора, 3 – постійний магніт, 4 – сердечник ротора

На рис. 3, а приведено результат розрахунку магнітного поля при струмах в фазах А і В 600 А та куті повороту ротора 0° у розрахунковій області, а на рис 3, б в зубцевій зоні.

За результатами розрахунку магнітного поля з використанням вбудованих алгоритмів інтегрування комплексу FEMM отримано значення потокозчеплення фаз обмоток статора і електромагнітний момент.

Для варіанта, що розглядається потокозчеплення фази А становить -0,19 Вб, фази В – 0,62 Вб, фази С – -0,37 Вб, а електромагнітний момент –13111 Нм.

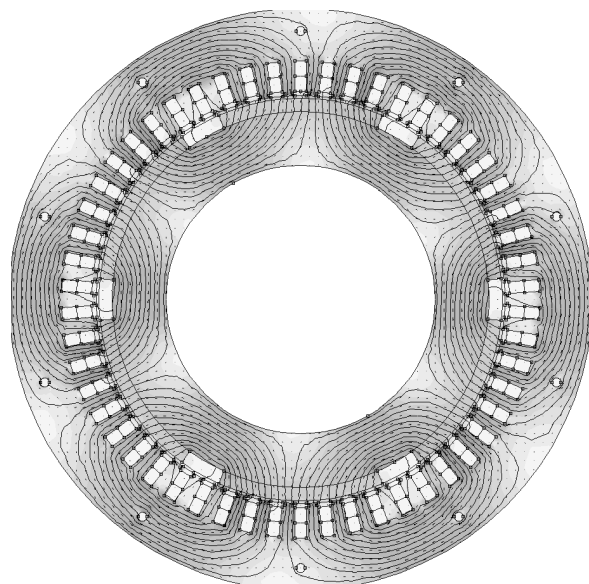
Використовуючи запропонований алгоритм визначення потокозчеплення пропонується провести повнофакторний цифровий експеримент. Струми фаз ротора варіюються в межах від -1000 А до 1000 А з кроком 200 А, а кутова координата від 0° до 120° з кроком в 1°.

Залежності потокозчеплень фаз А і В при різних величинах струмів в статорі наведено на рис 4 і 5.

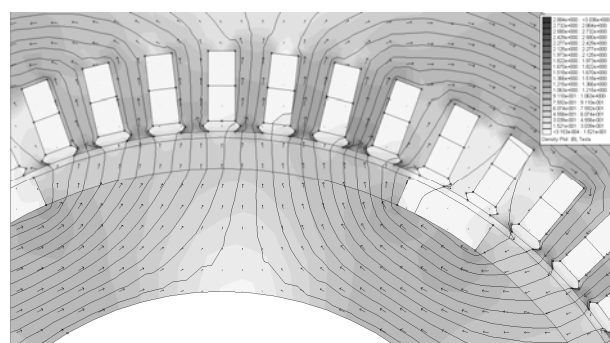
На рис 6 наведена залежність електромагнітного моменту при різних значеннях струмів в статорі.

Як видно з графіків рис. 4 і 5 потокозчеплення фаз статора мають гармонійний вигляд з явно вираженою постійною складовою і зрушені одне відносно одного приблизно на 120°.

Величина постійної складової потокозчеплення змінюється залежно від величин струмів у фазах статора.



а



б

Рис. 3. Результати розрахунку магнітного поля

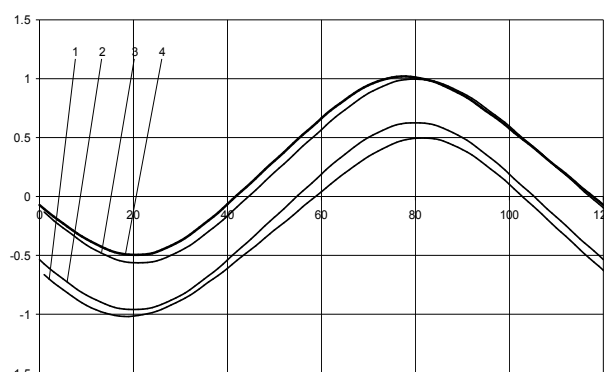


Рис. 4. Залежність потокозчеплення фази А від кута повороту ротора при струмах:

- 1 –  $i_A = -1000$  А;  $i_B = -1000$  А;
- 2 –  $i_A = -600$  А;  $i_B = 400$  А;
- 3 –  $i_A = 800$  А;  $i_B = 400$  А;
- 4 –  $i_A = 1000$  А;  $i_B = 1000$  А

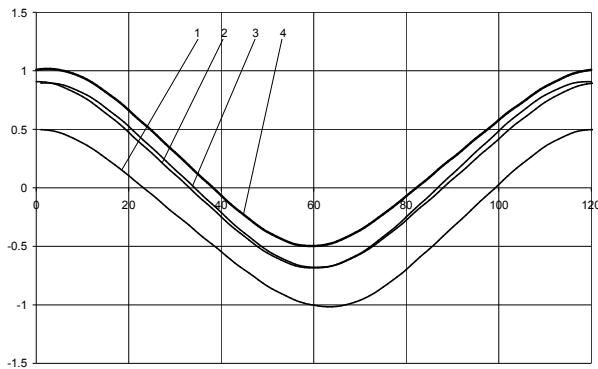


Рис. 5. Залежність потокозчеплення фази В від кута повороту ротора при струмах:

1.  $i_A = -1000$  А,  $i_B = -1000$  А;
2.  $i_A = -600$  А,  $i_B = 400$  А;
3.  $i_A = 800$  А,  $i_B = 400$  А;
4.  $i_A = 1000$  А,  $i_B = 1000$  А

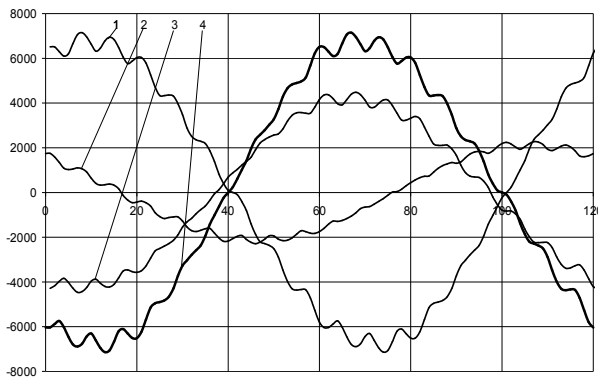


Рис. 6. Залежність електромагнітного моменту від кута повороту ротора при струмах:

1.  $i_A = -1000$  А,  $i_B = -1000$  А;
2.  $i_A = -600$  А,  $i_B = 400$  А;
3.  $i_A = 800$  А,  $i_B = 400$  А;
4.  $i_A = 1000$  А,  $i_B = 1000$  А

Електромагнітний момент двигуна рис. 6 має гармонійний характер, проте в його залежності жваво виражена 17 гармонійна складова моменту, яка становить близько 11..14 % від сумарного значення моменту.

Ця складова моменту виникає в результаті ступінчастої форми МРС статора, яка у свою чергу, викликана розподіленою конструкцією обмотки.

## Висновки

Запропоновано методику визначення залежностей потокозчеплень фаз статора і електромагнітного моменту тягового синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів в середовищі FEMM.

Залежність електромагнітного моменту двигуна від кута повороту ротора має гармонійний характер, проте в його залежності яскраво виражена 17 гармоніка моменту, яка становить приблизно 11..14 % від сумарного значення моменту, що може викликати вібрації і додаткові навантаження в механічній частині приводу. При моделюванні електромагнітних процесів у двигуні цей факт необхідно враховувати.

## Список літератури

1. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей. [Текст] / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // *Залізничний транспорт України*. – 2008. – № 2/1. – С. 26–31.
2. Электродвигатели для перспективного электродвижного состава [Текст] / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // *Локомотив-информ*. – 2008. – № 1. – С. 16-19.
3. Сильвестер П. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков / П. Сильвестер, Р. Феррари. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual [Електронний ресурс] / D. Meeker – January 26, 2004. – Режим доступу: <http://femm.berlios.de/>.
5. Сайт lua.org [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lua.org>.

Надійшла до редколегії 3.10.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.В. Хворост, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В.В. Божко

Приведена методика определения зависимостей потокозчепления и электромагнитного момента тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов по результатам расчета магнитного поля методом конечных элементов. Представлены результаты расчета магнитного поля с использованием встроенных алгоритмов интегрирования комплекса FEMM и получены значения потокозчепления фаз обмоток статора и электромагнитный момент.

**Ключевые слова:** рельсовый автобус, синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

## PROCEDURE OF DETERMINING THE ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE TRACTION SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNET EXCITATION

V.V. Bozhko

The procedure of determining the dependence of flux adhesion and electromagnetic torque of the traction synchronous motor with permanent magnet excitation by results of the calculation of the magnetic field by finite element method is resulted in. The results of the calculation of the magnetic field by using the integrated algorithms of FEMM complex are illustrated and values of flux adhesion of stator winding phases and electromagnetic torque are obtained.

**Keywords:** rail bus, synchronous motor with permanent-magnet.