

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Зюзін Дмитро Юрійович

УДК 621.313.13

**ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ЗБУДЖЕННЯ
ВИСОКОМОМЕНТНИХ ВЕНТИЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Омельяненко Віктор Іванович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”,
завідувач кафедри електричного транспорту та
тепловозбудування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мілих Володимир Іванович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”,
завідувач кафедри електричних машин;

кандидат технічних наук, доцент
Демченко Геннадій Володимирович,
Донецький національний технічний університет,
доцент кафедри електромеханіки і теоретичних основ
електротехніки.

Провідна установа: Інститут електродинаміки Національної
академії наук України, м. Київ.

Захист відбудеться „10” листопада 2005 р. о 12-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий „07” жовтня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час в електроприводах металоріжучих верстатів, в залізничному транспорті і в інших областях техніки потрібні різні типи високомоментних електродвигунів. Одним із шляхів створення таких двигунів є застосування у них збудження від постійних магнітів. Проте, зважаючи на виникнення “стопорних” режимів при роботі, виникає небезпека розмагнічування постійних магнітів. Для запобігання цього застосовуються висококоерцитивні постійні магніти з товщиною значно більше, ніж вимагається для роботи в номінальних режимах таких двигунів. Це пов'язано з великими додатковими витратами. Одним з шляхів подолання цієї проблеми є застосування комбінованої системи збудження. При такій системі збудження магнітний потік створюється послідовно включеними джерелами магніторушійної сили (МРС) двох типів: магнітним (постійні магніти) і електромагнітним (обмотка збудження). Проте апробований алгоритм визначення параметрів комбінованого збудження та їх вплив на робочі властивості електродвигунів зараз відсутній. Вказана обставина при проектуванні створює проблеми з отриманням заданих робочих властивостей і характеристик двигунів такого типу. Тому дана робота, в якій розглядаються наукові основи проектування високомоментних двигунів комбінованого збудження, що направлена на зменшення витрати матеріалів постійних магнітів і стабілізацію їх роботи в “стопорних” режимах за рахунок використання підмагнічуючої електромагнітної системи збудження, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. На кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ “ХП” ведуться розробки в області електричних машин з комбінованим збудженням. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних тем МОН України “Розробка наукових основ проектування тягових передач високошвидкісного колісного залізничного транспорту (ВШКЗТ) для швидкостей руху 200...300 км/год” (№ ДР 0103U001506, наказ МОН України №633 від 05.01.2002р.); “Розробка науково-технічних основ ресурсозберігаючої системи проектування нових зразків електричних машин” (№ ДР 0103U001490, наказ МОН України №633 від 05.01.2002р.), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових основ проектування електричних машин з комбінованою системою збудження у напрямі раціонального вибору геометричних і електромагнітних параметрів її магнітної і електромагнітної компонент для високомоментних вентильних двигунів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель, що адекватно відображає процеси електромеханічного перетворення енергії в машинах з комбінованим збудженням, а також зв'язок геометричних і електромагнітних параметрів з показниками, визначальними робочі властивості електродвигуна;
- створити програмно-орієнтований алгоритмічний комплекс, що забезпечує ефективне цифрове моделювання робочих властивостей машин досліджуваного класу при широкому варіюванні досліджуваних параметрів;
- отримати залежність вибраних показників, що визначають робочі властивості двигуна, від варійованих параметрів комбінованого збудження, та оцінити ефективність застосування комбінованого збудження;
- апробувати отримані в роботі наукові положення в процесі розробки концептуального проекту вентильного високомоментного двигуна комбінованого збудження для одного з приводів

сучасного металоріжучого верстата.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в перехідних режимах при роботі вентильного високомоментного двигуна комбінованого збудження (ВВДКЗ).

Предмет дослідження – раціональні геометричні та електромагнітні параметри системи комбінованого збудження ВВДКЗ.

Методи дослідження. Теоретичні розробки в дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних машин, методах теорії електричних кіл для виводу основних рівнянь математичної моделі ВВДКЗ; чисельного інтегрування для рішення систем диференціальних рівнянь математичної моделі; кінцевих елементів для розрахунку квазістаціонарних магнітних полів; двофакторного ортогонального планування експерименту для обробки статистичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Розроблено математичну модель ВВДКЗ, що встановлює зв'язок геометричних і електромагнітних параметрів (розміри магнітів, число витків обмотки збудження) з показниками, що визначають робочі властивості вентильного двигуна комбінованого збудження.
- Визначений вектор показників, що визначають робочі властивості вентильного високомоментного двигуна комбінованого збудження, включаючи наступні компоненти: кутове прискорення, максимальне значення лінійної напруги на обмотці статора у разі роботи ВВДКЗ спільно з інвертором струму, і максимальне значення фазного струму в обмотці статора у разі роботи ВВДКЗ спільно з інвертором напруги при пуску з навантаженням і без неї; мінімальне значення нормальної складової магнітної індукції на поверхні полюса і максимальне значення фазного струму в обмотці статора при стопорному режимі.
- Розроблено алгоритм отримання раціональних співвідношень між геометрією постійного магніту та МРС електромагнітного збудження, що дозволяє вибрати мінімальну масу постійного магніту при збереженні на рівні, що вимагається, електромеханічних характеристик ВВДКЗ.
- Доказано, що раціональна схема живлення ВВДКЗ визначається рівнем швидкодії електродвигуна: при низькій швидкодії перевагу має інвертор синусоїдального струму; при необхідності підвищеної швидкодії - переважає схема з інвертором синусоїдальної напруги.
- Визначено показник, що оцінює ефективність застосування комбінованого збудження. Отримані значення цього показника для досліджуваного типу високомоментних двигунів.

Практичне значення одержаних результатів:

- отримано на базі проведених в роботі досліджень рекомендації по вибору раціональних параметрів комбінованого збудження ВВДКЗ;
- розроблено універсальний програмний комплекс, що дозволяє використовувати його для визначення геометричних і електромагнітних параметрів, а також робочих властивостей електродвигунів в широкому спектрі потужностей і призначень;
- реалізовано отримані в роботі результати при розробці концептуального проекту вентильного високомоментного двигуна комбінованого збудження для приводу подачі токарно-револьверного верстата з ЧПУ типу 1В340Ф30;
- практична цінність роботи підтверджена актом про впровадження результатів дисертаційної роботи на ВАТ „Електромашина”, м. Харків.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення аналізу конструкцій вентильних двигунів; розробка конструкції ВВДКЗ; запропонування механічної частини математичної моделі ВВДКЗ; виробка постановки задачі для

розрахунку магнітного поля ВВДКЗ; проведення ряду цифрових експериментів для визначення складових вектора показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ; запропонування параметрів оцінки ефективності комбінованого збудження.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи докладалися на щорічних наукових конференціях кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ “ХП” (2000-2003р.р.), на X міжнародній науково-практичній конференції „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (2002р., м. Харків), на Міжнародному симпозіумі “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (SIEMA ’2003) (2003 р., м. Харків), а також на семінарах Секції №8 “Фізико-технічні проблеми енергетики електричного і дизель-електричного транспорту” Наукової Ради НАН України по комплексній проблемі “Наукові основи електроенергетики” (м.Харків,2003,2004 р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 7 наукових статтях у фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків та 1 додатка. Повний обсяг дисертації 160 стор., у тому числі: 22 ілюстрації по тексту, 45 ілюстрацій на 33 стор.; 17 таблиць по тексту; 1 додаток на 1 стор.; 135 найменувань використаних літературних джерел на 13 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень. Викладено основні наукові та практичні результати, які отримані в роботі, а також основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі розглянуто принципи отримання високих моментів в електромеханічних перетворювачах, та визначені основні напрямки їх створення.

Проведено аналіз різноманітних типів високомоментних двигунів (асинхронних, синхронних, двигунів постійного струму) та визначено, що найбільш перспективними з позицій енергетичних показників, робочих властивостей та надійності є синхронні вентильні двигуни зі збудженням від постійних магнітів.

Визначено, що недоліком двигунів з таким збудженням є той факт, що вони не регулюють режим роботи постійного магніту, крім того, при роботі в режимах з великим навантаженням (так звані „стопорні” режими) виникає можливість розмагнічування магнітів. Одним зі шляхів подолання даної проблеми є використання комбінованої системи збудження, при якій збудження створюється джерелами МРС двох типів: магнітним та електромагнітним.

Показано, що комбіноване збудження останнім часом почало знаходити застосування в перспективних системах електромеханічного перетворення енергії з лінійними двигунами. Комбіноване збудження застосовується також і в ротативних електричних машинах - генераторах спеціального призначення (зварювальному, автотракторному та ін.), але там воно використовується, в основному, для отримання заданого виду зовнішніх характеристик цих генераторів. Для цього застосовується паралельне включення джерел магнітної і електромагнітної МРС, які, взаємодіючи з МРС реакції якоря, дозволяють знижувати основний магнітний потік при підвищенні навантаження.

У високомоментних двигунах ми маємо справу з іншим функціональним призначенням комбінованого збудження - створенням виду механічної характеристики двигуна, що вимагається.

Тут необхідно стабілізувати основний магнітний потік у всьому діапазоні навантажень, для чого необхідно із зростанням навантаження здійснювати підмагнічення постійного магніту, тобто здійснити послідовне включення обох джерел МРС.

Проте апробований алгоритм визначення параметрів комбінованого збудження та їх вплив на робочі властивості електродвигунів зараз відсутній. Вказана обставина при проектуванні створює проблеми з отриманням заданих робочих властивостей і характеристик двигунів такого типу. Тому дана робота, в якій розглядаються наукові основи проектування високомоментних двигунів із комбінованим збудженням, що направлена на зменшення витрати матеріалів постійних магнітів і стабілізацію їх роботи в „стопорних” режимах за рахунок використання електромагнітної системи збудження, що підмагнічує, представляється актуальною.

Проведений аналіз стану питання дозволив сформулювати мету роботи і поставити задачі дослідження.

У **другому розділі** запропоновано конструкцію явнополюсного ротора з обмоткою збудження і наклеєними на полюсні наконечники висококоерцитивними постійними магнітами в тих же габаритах, що і ротор звичайного вентильного двигуна традиційного типу (рис.1.).

Хоча конструкції комбінованих систем збудження розглядалися у літературі для різних типів електричних машин, проте для високомоментних двигунів вона пропонується вперше.

Встановлення додаткового джерела магнітного потоку дозволяє з одного боку збільшити електромагнітний момент двигуна, з другого боку, застосування електромагніту дає додаткову можливість регулювання моменту залежно від режиму роботи двигуна за рахунок зміни струму збудження. Електромагнітна складова обмотки збудження включена послідовно з перетворювачем, що живить обмотку якоря, тож створюваний цією обмоткою додатковий магнітний потік є пропорційний струму перетворювача а, отже, і струму якоря. При виникненні „стопорного” режиму різко збільшується струм якоря, що у свою чергу приводить до збільшення струму збудження і, отже, сумарного магнітного потоку.

Рис. 1. Схема конструкції ВВДКЗ: 1 – статор; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – обмотка збудження; 5 – постійні магніти

Розроблено математичну модель ВВДКЗ (1), що виводиться з теорії електричних кіл для узагальненого електромеханічного перетворювача, а також включає рівняння моментів та руху ротора.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_A \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma, t \right) = R_A i_A + \frac{dP_A \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma \right)}{dt}; \\
 U_B \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma, t \right) = R_B i_B + \frac{dP_B \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma \right)}{dt}; \\
 U_C \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma, t \right) = R_C i_C + \frac{dP_C \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma \right)}{dt}; \\
 U_f \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma, t \right) = R_f i_f + \frac{dP_f \left(i_A, i_B, i_C, i_f, \gamma \right)}{dt}; \\
 J \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2} \left| \int_{s_r} \left(\vec{H} \times \vec{B} \times \vec{n} + \vec{B} \times \vec{H} \times \vec{n} - \vec{B} \times \vec{H} \times \vec{n} \times \vec{r} \right) dS \right| - M_c; \\
 \frac{d\gamma}{dt} = \omega.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

де P_A, P_B, P_C, P_f - функції, що описують, величини потокозчеплень обмоток статора і збудження у ВВДКЗ відповідно, γ - кутова координата, що визначає поворот ротора щодо початкового положення, U_A, U_B, U_C, U_f - функції управління обмоток статора і збудження.

Для вирішення поставленої задачі систему диференційних рівнянь доповнено початковими умовами для струмів статора і обмотки збудження, початкової швидкості обертання ротора і кутової координати.

Відмітною особливістю математичної моделі ВВДКЗ є те, що вона враховує реальну геометрію, а також той факт, що вирази для потокозчеплень представлені як функція п'яти змінних (струмів трьох фаз і збудження та кутової координати ротора) і визначаються на кожному кроці інтегрування цих рівнянь з урахуванням поля постійного магніту.

Історично першим підходом до рішення такого роду рівнянь вважається підхід, заснований на рішенні їх в комплексному вигляді, а саме миттєві значення напруг і струмів статора замінювалися комплексними змінними. Величини власних і взаємних індуктивностей визначалися по наближених формулах, заснованих на аналітичному розрахунку магнітного поля перетворювача. Це дозволяло, використовуючи достатньо прості апаратні засоби, проводити розрахунок перехідних режимів електромеханічних перетворювачів. Проте при рішенні диференційних рівнянь власні і взаємні індуктивності визначалися без урахування реальної геометрії магнітної системи (зубчатість ротора, геометрія полюсного наконечника, різна насиченість магнітного ланцюга), які викликають вищі гармонійні магнітного потоку. Більшість сучасних електромеханічних перетворювачів працюють в електричному ланцюзі спільно з напівпровідниковими пристроями, такими як випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти та ін., які створюють в електричному ланцюзі напруги і струми не синусоїдальної форми з великим спектром вищих гармонік. Зневага вищими гармонійними складовими потоків і струмів неприпустима, оскільки вони створюють в електромеханічному перетворювачі додаткові моменти, які можуть викликати порушення в його роботі. При дослідженні режимів роботи ВВДКЗ створена більш адекватна модель розрахунку, яка враховує ці складові. Використовуючи програмний комплекс FEMM (<http://femm.berlios.de/cgi-bin/>) розраховано стаціонарні

плоскопаралельні магнітні поля при різноманітних геометріях розрахункової області, які змінюються залежно від положення ротора. З огляду на те, що комбінована система збудження має лише центральну симетрію, то розрахунок проведено на всьому поперечному перетині машини.

За наслідками розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів визначено поточкозчеплення обмоток

$$\Psi_A = l_\delta \sum_{i=1}^{n-1} \Phi_{i+1, A} - A_{i, A} = l_\delta \sum_K w_{AK} (A_{n, A} - A_{1, A}) \quad (2)$$

$$\Psi_B = l_\delta \sum_K w_B (A_{n, B} - A_{1, B}) ; \quad (3)$$

$$\Psi_C = l_\delta \sum_K w_C (A_{n, C} - A_{1, C}) ; \quad (4)$$

$$\Psi_f = l_\delta \sum_K w_f (A_{n, f} - A_{1, f}) , \quad (5)$$

де $A_{n, A}$, $A_{1, A}$ - потенціали в провідниках однієї секції фази А; K - число секцій фази А; $A_{n, A}$, $A_{n, B}$, $A_{n, C}$, $A_{n, f}$ - потенціали в провідниках однієї секції фаз А, В, С і обмотки збудження відповідно; w_A , w_B , w_C , w_f - число витків фаз А, В, С, і обмотки збудження.

Також знайдено величину електромагнітного моменту ВВДКЗ:

$$\vec{M} = \frac{1}{2} l_\delta \sum_{l_r} \vec{H} \times \vec{B} \times \vec{n} + \vec{B} \times \vec{H} \times \vec{n} \times \vec{r} \quad (6)$$

де l_r - контур інтегрування - коло з центром, співпадаючим із центром валу ротора і діаметром рівним зовнішньому діаметру ротора плюс довжина повітряного зазору.

Рішення системи диференціальних рівнянь (1) здійснюється методом прямого інтегрування (метод Ейлера). Замінімо функції поточкозчеплень і моментів розрахунковими виразами (2)...(6), прийнемо допущення про квазістаціонарність магнітного поля у момент часу. Перетворимо систему рівнянь до розрахункового вигляду шляхом вираження величин струмів, кутової швидкості і кутової координати в наступний момент часу через величини струмів, кутової швидкості і кутової координати в попередній момент часу.

$$\left. \begin{aligned}
 i_{A_i} &= \frac{U_A \bar{i}_{A_i} - \bar{i}_{B_i} - \bar{i}_{C_i} - \bar{i}_{f_i} - \gamma_i \bar{i}_{t_i} - \frac{\Psi_{A_t} - \Psi_{A_{t-1}}}{\Delta t_i}}{R_A}; \\
 i_{B_i} &= \frac{U_B \bar{i}_{A_i} - \bar{i}_{B_i} - \bar{i}_{C_i} - \bar{i}_{f_i} - \gamma_i \bar{i}_{t_i} - \frac{\Psi_{B_t} - \Psi_{B_{t-1}}}{\Delta t_i}}{R_B}; \\
 i_{C_i} &= \frac{U_C \bar{i}_{A_i} - \bar{i}_{B_i} - \bar{i}_{C_i} - \bar{i}_{f_i} - \gamma_i \bar{i}_{t_i} - \frac{\Psi_{C_t} - \Psi_{C_{t-1}}}{\Delta t_i}}{R_C}; \\
 i_{f_i} &= \frac{U_f \bar{i}_{A_i} - \bar{i}_{B_i} - \bar{i}_{C_i} - \bar{i}_{f_i} - \gamma_i \bar{i}_{t_i} - \frac{\Psi_{f_t} - \Psi_{f_{t-1}}}{\Delta t_i}}{R_f}; \\
 \omega_i &= \omega_{i-1} + \Delta t_i \left(\frac{1}{2J} l_\delta \sum_{l_r} \bar{H}_i \times \bar{B}_i \times \bar{n} + \bar{B}_i \times \bar{H}_i \times \bar{n} \times \bar{r} \right) - M_n; \\
 \gamma_i &= \gamma_{i-1} + \Delta t_i \omega_i.
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Складено алгоритм цифрового моделювання ВВДКЗ:

1. Введення початкових умов і розрахункової геометрії ВВДКЗ, створеної в системі автоматичного проектування з використанням середовища кінцево-елементного аналізу FEMM.
2. Установка граничних умов для розрахунку поля методом кінцевих елементів.
3. Завдання значень струмів для розрахункового моменту часу з використанням команд макросу Lua.
4. Створення розрахункової геометрії магнітного поля залежно від кутової координати шляхом перетворення початкової геометрії командами макросу Lua.
5. Розрахунок квазістаціонарного магнітного поля методом кінцевих елементів (створення розрахункової сітки, створення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, її рішення методом Ньютона-Рафсона).
6. Визначення поточкозчеплень фаз обмотки статора і обмотки збудження згідно виразам (2)...(5).
7. Рішення рівнянь математичної моделі на кроці інтегрування згідно (7) і законам управління.
8. Зміна розрахункового часу.
9. Перевірка умови завершення процесу рішення системи диференціальних рівнянь.
10. Виведення результатів розрахунку струмів, напруг, кутової швидкості, кутової координати у вигляді таблиці в текстовий файл.

Згідно алгоритму складена програма розрахунку режимів роботи ВВДКЗ. Програма написана на мові Lua, яка є мовою макросів середовища FEMM.

Рішення поставленої тестової задачі здійснювалося на ЕОМ Pentium-4 з тактовою частотою 1,7 ГГц і оперативною пам'яттю 256 МБ. Крок інтегрування 0,01с. Час розрахунку склав 32,5

хвилини.

У третьому розділі проводиться дослідження робочих властивостей ВВДКЗ на основі цифрового моделювання з застосуванням складеної програми розрахунків.

Вентильні двигуни є сукупністю безпосередньо електромеханічного перетворювача енергії - синхронного двигуна і напівпровідникового перетворювача (інвертора) з системою управління. В даний час у вентильних двигунах можуть використовуватися напівпровідникові перетворювачі двох типів: інвертори струму або інвертори напруги, тому дослідження робочих властивостей вентильного двигуна проведено спільно з обома типами інверторів. Для цього математична модель ВВДКЗ доповняється рівняннями, що описують закони зміни живлячих струмів або напруг. Ці рівняння для кожного з типів інверторів залежать від форми кривої вихідного сигналу. Різний гармонійний склад вихідного струму або напруги залежить від побудови систем управління силовими ключами. В роботі прийнято систему управління для двох граничних випадків - коли форма кривої вихідного сигналу має синусоїдальну форму і прямокутну.

Досліджуючи робочі властивості ВВДКЗ, розглянуто три режими: режим пуску на холостому ході, коли значення моменту опору на валу рівно нулю, режим пуску при номінальному навантаженні і режим пуску при п'ятикратному моменті опору на валу - так званий „стопорний” режим.

Дослідження проведено в наступному порядку. На першому етапі для сімейства двигунів, створених на базі одного з варіантів високомоментного двигуна, прийнятого нами за початковий (2ДВУ165S), була визначена раціональна система живлення. Подальші дослідження за оцінкою впливу параметрів комбінованого збудження на робочі властивості ВВДКЗ проведено з використанням саме цієї системи живлення.

Визначені параметри комбінованого збудження, що варіюються – число витків обмотки збудження та товщина магніту.

Для оцінки комбінованого збудження двигуна прийняті наступні показники, що визначають робочі властивості двигуна:

- кутове прискорення при пуску з моментом навантаження рівному нулю (ε_0);
- кутове прискорення при номінальному навантаженні (ε_n);
- мінімальне значення нормальної складової магнітної індукції на поверхні полюса при стопорному режимі (B_{min});
- максимальне значення фазного струму в обмотці статора при стопорному режимі (I_c);
- максимальне значення лінійної напруги на обмотці статора при пуску з моментом опору рівному нулю (U_0) (при роботі з автономним інвертором струму);
- максимальне значення лінійної напруги на обмотці статора при пуску з номінальним навантаженням (U_n) (при роботі з автономним інвертором струму);
- максимальне значення фазного струму в обмотці статора при пуску з моментом опору рівному нулю (I_0) (при роботі з автономним інвертором напруги);
- максимальне значення фазного струму в обмотці статора при пуску з номінальним навантаженням (I_n) (при роботі з автономним інвертором напруги).

З'ясування залежності показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ, від параметрів комбінованого збудження, що варіюються, вимагає проведення великої кількості цифрових дослідів. Для їх скорочення використана теорія планування експерименту.

За наслідками розрахунків отримані графіки зміни струмів, напруг, електромагнітного моменту, кутової швидкості і кутової координати (рис. 2...4).

По такого роду осцилограмах, отриманих для всіх проведених згідно плану експерименту дослідів, визначені значення показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ.

Аналіз результатів цифрового експерименту проводився з використанням програми PLAN 86.

Зв'язок між отриманими показниками і параметрами, що варіюються, апроксимований нами по критеріях середньоквадратичного і максимального відхилення у вигляді вектора показників, представленого як поліном:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_n \\ B_{\min} \\ U_0 \\ U_n \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{aligned} & K_1 + K \exp [(\lg 3w - 1)^{P_1} \cdot (\lg h - 0,61)^{P_2} (K_{00} + K_{10} (1,5 \cdot (\lg 3w - 1)) + \\ & + K_{11} ((1,5 \cdot (\lg 3w - 1) - 1)^2 - 0,667) + K_{20} (3,23 \cdot (\lg h - 0,61)) + \\ & + K_{21} (1,5 \cdot (\lg 3w - 1)) \cdot (3,23 \cdot (\lg h - 0,61)) + \\ & + K_{22} ((3,23 \cdot (\lg h - 0,61) - 1)^2 - 0,667))] , \end{aligned}$$

де $P_1, P_2, K_{00}, K_{10}, K_{11}, K_{20}, K_{21}, K_{22}, K, K_l$ — коефіцієнти полінома, які визначаються для кожного експерименту. Значення коефіцієнтів поліному для роботи ВВДКЗ з автономним інвертором синусоїдального струму представлені в табл.1.

Таблиця 1.

Коефіцієнти поліномів

	ε_0	ε_n	B_{\min}	U_0	U_n	I_c
P_1	-0,7	0,1	-0,90234	-0,55	-1	1,27188
P_2	-0,2	-0,6	-0,34609	-0,925	-1,11563	0,2
K_{00}	0,20878	0,38582	0,49431	1,65463	1,80288	1,56881
K_{10}	0,19131	0,0764	0,37905	0,61227	1,15057	-1,74026
K_{20}	0,05693	0,00774	0,0355	-0,13028	-0,03578	1,27275
K_{11}	0,1402	0,22882	0,11913	0,70243	0,90001	-0,44072
K_{21}	0,07046	0,00768	-0,01445	0,29115	0,58307	0,35686
K_{22}	0,02064	0,02496	-0,08342	-0,05389	-0,01278	0,10906
K	100	100	1	100	100	10
K_l	0	0	-1	0	0	0

Залежності окремих компонентів вектора показників від параметрів, що варіюються, для випадку роботи ВВДКЗ з автономним інвертором синусоїдального трифазного струму, представлені на рис. 5.

У четвертому розділі проведений вибір раціональних параметрів системи комбінованого збудження.

Отримана в третьому розділі залежність окремих складових вектора показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ, від параметрів комбінованого збудження не дають

уявлення про його повне значення і не дозволяють, таким чином, вибрати систему комбінованого збудження з раціональними параметрами.

Для відповіді на ці питання необхідна постановка і рішення складної і трудомісткої задачі багатокритерійної оптимізації. Тому запропоновано на цьому етапі знайти раціональні співвідношення параметрів шляхом графічного рішення системи нерівностей для кожної складової вектора показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ, з подальшим знаходженням загальної зони раціональних конструкцій як області перетину цих множин.

Згідно прийнятими співвідношенням для раціональних конструкцій, їх область в площині h , w (товщина магніту, МРС обмотки збудження) для роботи ВВДКЗ спільно з інвертором струму визначається системою нерівностей

$$\begin{aligned} & \epsilon_0 > 0,8 \cdot \text{MAX}\epsilon_0 \quad \cap \quad \epsilon_n > 0,8 \cdot \text{MAX}\epsilon_n \quad \cap \quad U_0 < 1,2 \cdot \text{MIN}U_0 \quad \cap \\ & \cap \quad U_n < 1,2 \cdot \text{MIN}U_n \quad \cap \quad I_c < 1,2 \cdot \text{MIN}I_c \quad \cap \quad B_{\min} > 0,3 \end{aligned}$$

а для роботи спільно з інвертором напруги –

$$\begin{aligned} & \epsilon_0 > 0,8 \cdot \text{MAX}\epsilon_0 \quad \cap \quad \epsilon_n > 0,8 \cdot \text{MAX}\epsilon_n \quad \cap \quad I_0 < 1,2 \cdot \text{MIN}I_0 \quad \cap \\ & \cap \quad I_n < 1,2 \cdot \text{MIN}I_n \quad \cap \quad I_c < 1,2 \cdot \text{MIN}I_c \quad \cap \quad B_{\min} > 0,3 \end{aligned}$$

Рішення системи нерівностей проводилося графічним методом. Кожна з нерівностей обмежує область, отриману перетином складової вектора показників з площиною рівня, що описує зону раціональних конструкцій. Перетин цих областей дає результуючу область раціональних параметрів (рис. 6).

Рис. 5 Залежності окремих компонентів вектора показників від параметрів, що варіюються

Рис. 6 Результуюча область раціональних параметрів, що задовольняють заданим умовам при роботі ВВДКЗ спільно з інвертором синусоїдального струму

При порівнянні двох типів інверторів при різних формах вихідного сигналу по таких параметрах, як товщина магніту та число витків обмотки збудження, перевагу забезпечує інвертор синусоїдального струму. Проте, з позицій вибору максимальної швидкодії, необхідної для більшості приводів, що використовують високомоментні двигуни, потрібна система живлення, що забезпечує максимальне значення кутового прискорення - то є схема з інвертором синусоїдальної напруги.

Проаналізувавши отримані результати, зроблено висновок, що для всієї розглянутої геометрії ВВДКЗ раціонально вибирати число витків обмотки збудження 12 або 18 на всю машину (2 або 3 виток на полюс), при цьому товщина постійного магніта для 12 витків - 6,6...7,2 мм, для 18

витків - 6,2...7,5 мм

Як згадувалося вище, застосування комбінованого збудження викликано прагненням зменшити витрату матеріалу постійного магніту. Для оцінки ефективності використання комбінованого збудження ВВДКЗ проведено порівняння витрати матеріалу постійних магнітів, що показало: маса постійних магнітів знизилася в 1,27...1,46 раз в порівнянні з базовою конструкцією.

Для наочного відчуття ефективності застосування комбінованої системи збудження доцільно від вагових показників перейти до геометрії і оперувати такими поняттями, як довжина і діаметр ротора, а також товщина магніту.

Для кількісної оцінки введемо показник, що оцінює ефективність застосування комбінованого збудження:

$$\xi = \frac{h_{ПМ} - h_K}{h_{ПМ}},$$

де $h_{ПМ}$ - товщина постійного магніту для двигуна із збудженням від постійних магнітів; h_K - товщина постійного магніту для двигуна з комбінованим збудженням.

Проведені розрахунки цього показника для базових двигунів з номінальними моментами 13...70 Н·м, діаметрами статора 0,0906...0,1118м і довжинами статора 0,1...0,275м (рис. 7).

Рис. 7 Показник, що оцінює ефективність застосування комбінованого збудження

Аналіз графіків залежності показника ефективності від головних розмірів (діаметр і довжина ротора), показує наступне: при створенні ВВДКЗ з меншою витратою магнітного матеріалу доцільно прагнути вибирати відношення діаметра ротора до його довжини більш високим.

Рис. 8 Побудова механічних характеристик ВВДКЗ для приводу подачі верстата ІВ340Ф30 з числовим програмним управлінням

Використовуючи основні положення теорії проектування синхронних електричних машин і відповідно до результатів, отриманих в роботі, проведений розрахунок концептуального проекту ВВДКЗ для приводу подачі верстата ІВ340Ф30 з числовим програмним управлінням. З використанням математичної моделі шляхом цифрового моделювання отримані механічні характеристики базового двигуна 2ДВУ165S та ВВДКЗ, що розраховано (рис.8). Величина максимального відхилення розрахункових механічних характеристик базового двигуна від експериментальних складає 9,3%, що є задовільним.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено теоретичне обґрунтування і розв'язання науково-практичної задачі, що полягає в розвитку наукових основ проектування електричних машин з комбінованою системою збудження у напрямку вибору раціональних геометричних та електромагнітних параметрів її магнітної та електромагнітної компонент, що дозволяє зменшити масу постійних магнітів при забезпеченні на рівні, що вимагається, електромеханічних характеристик високомоментних вентильних двигунів.

1. Розроблено узагальнену математичну модель ВВДКЗ, пристосовану для роботи з інверторами струму і напруги при синусоїдальній і пульсуючій формах вихідного сигналу, яка встановлює зв'язок геометричних і електромагнітних параметрів системи комбінованого збудження з показниками, що визначають робочі властивості двигуна. Відмітною особливістю цієї моделі є те, що вона ураховує реальну геометрію магнітної системи, а також те, що вирази для поточозчеплень представлені як функції п'яти змінних (струмів трьох фаз і збудження, а також кутової координати ротора) і визначаються на кожному кроці інтегрування з урахуванням поля постійних магнітів.

Визначено параметри комбінованого збудження, що варіюються (геометрія постійного магніту, МРС електромагнітного збудження) і вектор показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ - кутові прискорення ротора, максимальні значення струмів і напруг, мінімальні значення магнітної індукції на поверхні постійного магніту.

Достовірність математичної моделі ВВДКЗ доведена шляхом апробації її на базовому двигуні 2ДВУ165S.

2. Створено програмно-алгоритмічний комплекс, що пристосовує узагальнену математичну модель електромеханічного перетворення енергії ВВДКЗ для вирішення її в середовищі FEMM і дозволяє ефективно досліджувати вплив змінних інтегрування на робочі властивості двигуна при широкому варіюванні досліджуваних параметрів.

Розроблено алгоритм отримання раціональних співвідношень між геометрією постійного магніту і МРС електромагнітного збудження, що полягає в знаходженні шляхом цифрового моделювання окремих компонент вектора показників, що визначають робочі властивості ВВДКЗ; та графічному рішенні системи нерівностей для кожної складової вектора показників з подальшим знаходженням загальної зони раціональних конструкцій як області перетину цих множин. Алгоритм дозволяє вибрати мінімальну масу постійного магніту при збереженні на рівні, що вимагається, електромеханічних характеристик ВВДКЗ.

3. Для сімейства машин з комбінованим збудженням, що базується на серії 2ДВУ - вентильних високомоментних двигунів із збудженням від постійних магнітів, шляхом цифрового моделювання з використанням розробленого програмно-алгоритмічного комплексу отримана залежність робочих властивостей цього сімейства від параметрів, що варіюються.

У всьому різноманітті отриманої залежності встановлений ряд загальних закономірностей:

- кутове прискорення монотонно зростає при збільшенні товщини постійного магніту і числа витків обмотки збудження;

- величини максимальних значень лінійних напруг при роботі з інвертором струму і фазних струмів при роботі з інвертором напруги монотонно убивають при збільшенні числа витків і товщини магніту, що викликано стабілізацією потоку збудження в перехідних режимах;

- величина нормальної складової магнітної індукції має характерні мінімуми в області малих значень товщини магніту, що обумовлене розмагнічуванням постійних магнітів потоками реакції якоря.

Порівняння двох типів інверторів при різних формах вихідного сигналу по таких параметрах, як товщина магніту і число витків, показало, що перевагу може забезпечити інвертор синусоїдального струму. Проте, з позицій чинника максимальної швидкодії, необхідної для більшості приводів, що використовують високомоментні двигуни, потрібна система живлення, що забезпечує максимальне значення кутового прискорення, якою є схема з інвертором синусоїдальної напруги.

Введений показник ефективності застосування комбінованого збудження. Для типу двигунів, що розглядається, він лежить в межах 0,22...0,33. Це значить, що при певній величині електромагнітного моменту і відповідному співвідношенні діаметра ротора і його довжини перехід до комбінованого збудження дає можливість скоротити витрату матеріалів постійних магнітів більш ніж на 30%. Показано, що для різних значень довжин ротора і діаметрів показник ефективності міняється, тому при створенні ВВДКЗ з меншою витратою магнітного матеріалу доцільно прагнути вибирати відношення діаметра ротора до його довжини більш високим.

4. За наслідками проведених досліджень розроблений концептуальний проект ВВДКЗ для приводу подачі верстата 1В340Ф30. Порівняльний аналіз масогабаритних і вартісних характеристик пропонованого проекту і існуючих двигунів показав зниження вартості двигуна за рахунок зменшення маси постійних магнітів.

5. Отримано акт впровадження результатів дисертаційної роботи в ВАТ „Електромашина” (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Любарский Б.Г., Зюзин Д.Ю., Глебова М.Л. Сравнительная характеристика высокомоментных электродвигателей для привода подач станков // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002 р. – Т.4., Вип.9.– С.63–66.

Здобувачем проведений аналіз конструкцій високомоментних двигунів.

2. Зюзин Д.Ю., Любарский Б.Г., Глебова М.Л. Конструктивная схема вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - Вип.19.– С.85–88.

Здобувачем розроблена конструкція ВВДКЗ.

3. Омеляненко В.И., Любарский Б.Г., Зюзин Д.Ю., Глебова М.Л. Математическая модель вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2003 р. - Вип.11.– С.108–112.

Здобувачем запропонована механічна частина математичної моделі ВВДКЗ.

4. Зюзин Д.Ю., Любарский Б.Г., Гаряжа В.Н. Математическая модель магнитного поля вентильного высокомоментного двигателя комбинированного возбуждения. // Коммунальное хозяйство городов: Научно-технический сборник.– Киев: Техника.– 2004.– Вып.60.– С.200-205.

Здобувачем розроблена постановка задачі для розрахунку магнітного поля ВВДКЗ.

5. Зюзин Д.Ю., Омеляненко В.И., Любарский Б.Г. Критерии и параметры оценки

комбинированного возбуждения для вентильного высокомоментного двигателя // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2004 р. - Вип.28. – С65-69.

Здобувач запропонував параметри оцінки ефективності комбінованого збудження у машинах досліджуваного класу.

6. Омеляненко В.И., Зюзин Д.Ю., Любарский Б.Г. Выбор параметров системы комбинированного возбуждения вентильного высокомоментного двигателя с инвертором синусоидального напряжения // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2005р.– №1(10).– с.57-63.

Здобувачем проведені цифрові експерименти для визначення вектору показників, що оцінюють робочі властивості ВВДКЗ.

7. Зюзин Д.Ю. Выбор рациональных параметров комбинированного возбуждения вентильных высокомоментных двигателей // Вісник Національного технічного університету " Харківський політехнічний інститут ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005р. - Вип. 9. – С.99-103.

АНОТАЦІЇ

Зюзин Д.Ю. Вибір раціональних параметрів системи комбінованого збудження високомоментних вентильних двигунів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2005.

Дисертація присвячена вибору раціональних геометричних та електромагнітних параметрів системи комбінованого збудження високомоментних вентильних двигунів (ВВДКЗ) в напрямку зменшення расходу матеріалів постійних магнітів.

Запропоновано математичну модель для дослідження електромагнітних процесів в перехідних режимах при роботі ВВДКЗ.

Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс, що пристосовує математичну модель ВВДКЗ для вирішення її в середовищі FEMM і дозволяє ефективно досліджувати вплив змінних інтегрування на робочі властивості двигуна.

Розроблений алгоритм отримання раціональних співвідношень між геометрією постійного магніту та МРС електромагнітного збудження, що дозволяє вибрати мінімальну масу постійного магніту при збереженні на рівні, що вимагається, електромеханічних характеристик ВВДКЗ.

Встановлена раціональна схема живлення та визначений показник, що оцінює ефективність застосування комбінованого збудження.

Ключові слова: високомоментний вентильний двигун комбінованого збудження, геометричні та електромагнітні параметри системи комбінованого збудження, математична модель ВВДКЗ, маса постійного магніту, ефективність застосування комбінованого збудження.

Зюзин Д.Ю. Выбор рациональных параметров системы комбинированного возбуждения высокомоментных вентильных двигателей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",

Харьков, 2005.

Диссертация посвящена выбору рациональных параметров системы комбинированного возбуждения высокомоментных вентильных двигателей.

Разработана математическая модель высокомоментного вентильного двигателя комбинированного возбуждения (ВВДКВ), адаптированная для работы с инверторами тока и напряжения при синусоидальной и пульсирующей формах выходного сигнала, которая устанавливает связь геометрических и электромагнитных параметров системы комбинированного возбуждения с показателями, определяющими рабочие свойства двигателя. Отличительной особенностью этой модели является то, что она учитывает реальную геометрию магнитной системы, а также то, что выражения для потокосцеплений представлены как функция пяти переменных (токов трех фаз и возбуждения, а также угловой координаты ротора) и определяются на каждом шаге интегрирования с учетом поля постоянных магнитов.

Определены варьируемые параметры комбинированного возбуждения (геометрия постоянного магнита, МДС электромагнитного возбуждения) и вектор показателей, определяющих рабочие свойства ВВДКВ – угловые ускорения ротора, максимальные значения токов и напряжений, минимальные значения магнитной индукции на поверхности постоянного магнита.

Создан программно-алгоритмический комплекс, адаптирующий обобщенную математическую модель электромеханического преобразования энергии ВВДКВ для решения ее в среде FEMM и позволяющий эффективно исследовать влияние переменных интегрирования на рабочие свойства двигателя при широком варьировании исследуемых параметров.

Разработан алгоритм получения рациональных соотношений между геометрией постоянного магнита и МДС электромагнитного возбуждения, заключающийся в нахождении путем цифрового моделирования отдельных компонент вектора показателей, определяющих рабочие свойства ВВДКВ, и графическом решении системы неравенств для каждой составляющей вектора показателей с последующим нахождением общей зоны рациональных конструкций как области пересечения этих множеств. Алгоритм позволяет выбрать минимальную массу постоянного магнита при сохранении на требуемом уровне электромеханических характеристик ВВДКВ.

Для семейства машин с комбинированным возбуждением, базирующихся на серии 2ДВУ – вентильных высокомоментных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, путем цифрового моделирования с использованием разработанного программно-алгоритмического комплекса получены зависимости рабочих свойств от варьируемых параметров.

Сравнение двух типов инверторов при различных формах выходного сигнала по таким параметрам, как толщина магнита и число витков, показало, что преимущество может обеспечить инвертор синусоидального тока. Однако, с позиций фактора максимального быстродействия, необходимого для большинства приводов, использующих высокомоментные двигатели, требуется система питания, обеспечивающая максимальное значение углового ускорения, каковой является схема с инвертором синусоидального напряжения.

Введен показатель эффективности применения комбинированного возбуждения.

По результатам проведенных исследований разработан концептуальный проект ВВДКВ для привода подачи станка 1В340Ф30. Сравнительный анализ массогабаритных и стоимостных характеристик предлагаемого проекта и существующих двигателей показал снижение стоимости двигателя за счет уменьшения массы постоянных магнитов.

Ключевые слова: высокомоментный вентильный двигатель комбинированного возбуждения, геометрические и электромагнитные параметры системы комбинированного возбуждения, математическая модель ВВДКВ, масса постоянного магнита, эффективность применения комбинированного возбуждения.

Zyuzin D.Y. Choice of rational parameters of the system with the combined excitation for high-torque BLDC motors. - Manuscript.

The thesis for technical sciences candidate's degree on a specialty 05.09.01 - electrical machines and devices. - National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2005.

The mathematical model for research of electromagnetic processes in the transient behaviors during work BLDCCE, which allows to choose rational geometrical and electromagnetic parameters of the system with the combined excitation was offered.

The developed program-algorithmic complex that adjusts a mathematical model of BLDCCE for the decision of its in environment FEMM and allows to explore influencing of integration variables on the working properties of motor at the wide varying of the explored parameters.

The algorithm of rational correlations between geometry of permanent magnet and MMF of electromagnetic excitation, that allow to choose minimum mass of permanent magnet saving at required level, electromechanical descriptions BLDCCE has been developed.

Rational chart of feed BLDCCE depending on required level speed of response of electric motor and the index, that estimates efficiency of application of the combined excitation, was defined.

Keywords: high-torque BLDC motors with the combined system of excitation (BLDCCE), geometrical and electromagnetic parameters of the system with the combined excitation, mathematical model of BLDCCE, mass of permanent magnet, efficiency of application of the combined excitation.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВВДКЗ – вентильний високомоментний двигун комбінованого збудження

МРС – магніторушійна сила

BLDC motor – brushless direct current motor

BLDCCE – high-torque BLDC motor with the combined system of excitation