

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Шайда Віктор Петрович

УДК 621.313.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНИХ
МАТЕРІАЛІВ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ В МАШИНАХ ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Єгоров Борис Олексійович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”,
доцент кафедри електричних машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Римша Віталій Вікторович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри електричних машин;

кандидат технічних наук, доцент
Калиниченко Юрій Сергійович,
Харківська національна академія міського господарства,
доцент кафедри електричного транспорту.

Захист відбудеться "11" жовтня 2007 р. о 12 год. 30 хв. 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 “8” вересня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час більше 60% об'єму машин постійного струму, що випускаються, складають машини середньої потужності які мають загальнопромислове призначення та виконуються серіями. Безперервний розвиток науки і техніки привів до того, що серії машин постійного струму достатньо швидко застарівають і замінюються новими, які мають кращі техніко-економічні показники.

Основною тенденцією розвитку машин постійного струму середньої потужності є енерго- та ресурсозбереження. Підвищення коефіцієнту корисної дії і ефективності використання матеріалів у кожній знову створюваній серії машин постійного струму досягається важче, ніж в попередніх серіях і з кожною новою серією величина цього поліпшення поступово зменшується. Існуючі в цей час серії машин постійного струму середньої потужності вже мають достатньо високий ступінь використання матеріалів, і до того ж прийшов час їх заміни, тому подальше підвищення ефективності використання матеріалів в новій серії машин постійного струму є досить складною і значущою проблемою, яку необхідно вирішувати.

Основною проблемою при створенні нових серій машин постійного струму середньої потужності є те, що методики проектування, які використовуються в цей час, засновані на спрощених методах розрахунку і довгий час істотно не змінювалися. Тому при проектуванні нової серії цих електричних машин вони вже не можуть забезпечити необхідний ступінь точності та адекватності, отже, потребують перегляду. У зв'язку з цим розвиток теорії проектування систем збудження машин постійного струму середньої потужності з метою підвищення ефективності використання активних матеріалів в магнітній системі є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричних машин НТУ „ХПІ” у рамках координаційного плану НДР МОН України: “Розробка науково-технічних основ ресурсозберігаючої системи проектування нових зразків електричних машин” (№ ДР 0103U001490); “Створення науково-технічного і науково-методичного забезпечення для розвитку систем проектування електричних машин на основі чисельно-польових методів ” (№ ДР 0106U001484), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Здобувач брав участь у якості виконавця при проведенні робіт пов'язаних з проектуванням машин постійного струму серії 5П:

- "Розробка електродвигунів постійного струму багатоцільового призначення 132 габариту в закритому і захищеному виконанні" виконаною на підставі КЦНТП "Електротехніка" (додаток 6.2.2, напрямок 18, розділ 4, п. п. 4.7.10Е) і договором між Мінмашпромом України і СКБ Харківського заводу "Електромашина" № 6737/07-18-94 від 21.05.94 р.;

- "Розробка відрізка єдиної серії МПС багатоцільового призначення з висотою осі обертання 100мм" виконаною на підставі КЦНТП "Електротехніка" (додаток 6.2.2, напрямок 18, розділ 4, п. п. 4.7.11Е) і договором між Мінмашп-

ромом України і СКБ Харківського заводу "Електромашина" №6737/07-18-95 від 25.12.95р.;

- "Розробка електродвигунів постійного струму багатоцільового призначення 112 габариту в закритому виконанні" виконаною на підставі КЦНТП "Електротехніка" (додаток 6.2.2, напрямок 18, розділ 4, п. п. 4.7.12Е) і договором між Мінмашпромом України і СКБ Харківського заводу "Електромашина" № 6737/07-18-95 (додаткова угода № 1) від 1.05.96 р.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є економія матеріальних ресурсів в магнітній системі машин постійного струму середньої потужності загального призначення і підвищення її техніко-економічних показників шляхом вдосконалення методики проектування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- оцінити адекватність методик, що використовуються для розрахунку серій машин постійного струму середньої потужності;
- розробити програмний комплекс, який дозволяє виконувати чисельне моделювання магнітної системи при варіюванні вектора геометричних параметрів;
- виробити вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи в машинах постійного струму середньої потужності;
- провести дослідження впливу конструктивних факторів, які впливають на ефективність магнітної системи машин постійного струму середньої потужності;
- провести перевірку адекватності запропонованих методик розрахунку шляхом фізичного моделювання;
- розробити вдосконалену методику розрахунку машин постійного струму середньої потужності загального призначення на підставі проведених досліджень.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що протікають в машинах постійного струму середньої потужності загальнопромислового призначення.

Предмет дослідження – конструктивні параметри магнітної системи машин постійного струму середньої потужності загальнопромислового призначення.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на основних положеннях теорії електричних машин, в ході досліджень використовувалися методи математичного та фізичного моделювання. В якості методів математичного моделювання використовувалися: метод скінченних елементів – для розрахунку магнітних полів машин постійного струму, метод планування експерименту – для отримання поліноміальних залежностей, а для знаходження їх екстремальних значень – методи теорії диференціального числення, методом дослідження математичних моделей є чисельний експеримент. Вірогідність досліджень підтверджена практикою та статистичною оцінкою результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи машин постійного струму середньої потужності;
- запропоновані залежності для визначення комплексу конструктивних параметрів геометрії головного полюса і котушки обмотки збудження машин

постійного струму середньої потужності;

- доведено, що якнайкраще співвідношення висоти до ширини котушки складає 0,6;

- доведено, що якнайкраще співвідношення висоти до ширини осердя головного полюса складає 0,613;

- для економії активних матеріалів запропоновано виконати виріз в полюсному наконечнику під кутом 0° , глибина вирізу складає 0,25 від висоти полюсного “рогу”. Таке технічне рішення зменшує витрату активної сталі головного полюса на 3,2% та приводить до незначного збільшення величини робочого магнітного потоку;

- запропонована уточнена методика розрахунку коефіцієнта розсіяння машин постійного струму середньої потужності.

Практичне значення одержаних результатів:

- в результаті проведених досліджень отримані рекомендації по вибору раціональних геометричних параметрів магнітної системи при проектуванні нових серій машин постійного струму середньої потужності загальнопромислового призначення;

- розроблено, виготовлено та випробувано дослідний зразок машини постійного струму з поліпшеними техніко-економічними показниками;

- створено універсальний програмний комплекс, що дозволяє визначати геометричні та електромагнітні параметри магнітної системи як розглянутого класу електричних машин так і машин інших типів;

- результати дисертаційної роботи використовуються в розрахунковій практиці СКБ ВАТ “Електромашина” (м. Харків) та ДП НПП “ЕЛМЕС” (м. Харків), при розробці різних модифікацій машин постійного струму серії 5П, проектуванні нових відрізків серії 5П і модернізації машин постійного струму раніше випущених серій. Практична цінність дисертаційної роботи підтверджена актами про впровадження результатів.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації які виносяться на захист отримані здобувачем особисто. Серед них: отримані поліноміальні залежності, що дозволяють оцінити вплив різних конструктивних факторів магнітної системи на параметри машин постійного струму середньої потужності; вдосконалена методика проектування машин постійного струму шляхом підвищення її точності; складені програми розрахунку магнітного поля в машинах постійного струму; здобувачем спроектовано і досліджено експериментальний зразок на базі машини постійного струму серії 5П.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи докладалися на щорічних міжнародних науково-практичних конференціях „Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (1995 – 2004 р.р., м. Харків), на міжнародних симпозіумах “Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (SIEMA) (2001, 2002, 2004 р., м. Харків), а також на семінарах Секції №9 “Електромагнітні і теплові процеси високовикористованих електричних машин” Наукової Ради НАН України по комплексній проблемі “Наукові основи електроенергетики” (2002 – 2004 р.р., м. Харків) та на щорічних наукових конференціях кафедри електричних машин

НТУ “ХП” (1995 – 2006 р.р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 14 наукових працях, з них 12 – у фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 5-ти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації 204 стор., у тому числі: 23 ілюстрації за текстом, 42 ілюстрації на 25 стор.; 30 таблиць за текстом; 8 таблиць на 9 стор.; 2 додатки на 10 стор.; 143 найменування 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 розглянута класифікація машин постійного струму. Виконано порівняльний аналіз конструкцій машин постійного струму середньої потужності зарубіжного та вітчизняного виробництва та визначені напрями розвитку конструкцій електричних машин розглянутого типу. В роботі відзначено, що значна кількість зарубіжних виробників машин постійного струму середньої потужності загального призначення перейшла від традиційної круглої форми магнітної системи (для розглянутого типу машин) до прямокутної, що дозволило підвищити їх питому (габаритну) потужність. Даної ж тенденції притримується провідний український виробник машин постійного струму середньої потужності - ВАТ "Електромашина", який почав поетапну розробку і освоєння виробництва нової серії машин постійного струму загального призначення – 5П, що повинна замінити морально застарілі двигуни серії 4П.

Загальновідомо, що основні тенденції розвитку машин постійного струму середньої потужності загального призначення направлені на підвищення їх техніко-економічних показників. Розглянуті шляхи реалізації підвищення техніко-економічних показників машин постійного струму загального призначення.

Відзначено, що в даний період часу неможливо підвищити техніко-економічні показники машин постійного струму середньої потужності шляхом використання нових матеріалів або удосконалення вентиляції. Основним шляхом досягнення вказаної мети є вдосконалення методики проектування, тобто вхідних в неї методик розрахунку. Найперспективнішим є застосування чисельних методів розрахунку при проектуванні машин постійного струму. Це дозволить провести модернізацію відрізків серії 5П, що вже випускаються, уникнути помилок при проектуванні нових відрізків даної серії і проектуванні нових серій машин постійного струму.

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

У другому розділі розглянуті види розрахунків, з яких складається методика проектування машин постійного струму середньої потужності загального призначення, що використовується в даний час. Було встановлено, що практично всі види розрахунків мають значну погрішність через застосування спрощених

методів розрахунку. Тому кожний вид розрахунку потребує підвищення точності, тобто застосування чисельних методів розрахунку. Проте, виходячи з необхідної трудомісткості і точності, що вимагається, цілком достатнім буде використання чисельного методу тільки для електромагнітного розрахунку.

Провівши аналіз чисельних методів розрахунку, які використовуються для дослідження машин постійного струму встановлено, що самим відповідним для вирішення поставлених в дисертації задач є метод скінченних елементів. Метод скінченних елементів для магнітостатичного поля в двомірній постановці і декартовій системі координат полягає в мінімізації енергетичного функціонала, який описує розрахункову область

$$F = \int_S \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS - \int_S A \delta dS,$$

де: S – область розрахунку магнітного поля; μ – магнітна проникність середовища; B_x , B_y – складові вектора магнітної індукції по осях x і y ; A – векторний магнітний потенціал, що має тільки z компоненту; δ – густина струму.

Розрахункова область і результати розрахунку магнітного поля приведені на рис.1.

а) б)

1 – станина; 2 – осердя додаткового полюса; 3 – котушка обмотки збудження; 4 – осердя якоря; 5 – вал; 6 – головний полюс; 7 – міжполюсний простір (повітря).

Рис.1. Розрахункова область а) та картина магнітного поля двигуна б)

Розроблена методика проведення досліджень і програмний комплекс для розрахунку двомірного магнітного поля машин постійного струму засновані на методі скінченних елементів.

Запропонована методика визначення компонентів вектора критеріїв оцінки ефективності магнітної системи (робочого магнітного потоку, коефіцієнта роз-

сіяння, повного магнітного потоку) за результатами розрахунку магнітного поля. Встановлено, що положення зубців якоря щодо магнітної системи і прийнята область розрахунку впливають на точність розрахунку магнітного поля машин постійного струму. Для нейтралізації цієї погрішності використаний метод як найгіршого випадку.

Коефіцієнт розсіяння в досліджуваній машині постійного струму визначений за допомогою метода скінченних елементів не перевищує 1,05187, а в заводській методиці коефіцієнт розсіяння приймали рівним 1,2. В результаті цієї похибки для обмотки збудження використовувалося більше міді, ніж це було необхідно насправді.

За результатами розрахунків магнітного поля для різних значень струму збудження побудована характеристика неробочого ходу машин постійного струму, що досліджувалась (рис. 2). Порівняння отриманої характеристики з характеристикою знятою експериментально довело точність розробленої програми, при цьому максимальна похибка не перевищує 1,8 %.

Рис. 2. Характеристики неробочого ходу двигуна 5ПБ112М. 1 – висхідна та низхідна гілки експериментальної характеристики; 2 – розрахункова характеристика, отримана по заводській методиці розрахунку; 3 – розрахункова характеристика, отримана за розробленою програмою.

У **третьому розділі** запропонований вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи машин постійного струму середньої потужності що складається з наступних компонентів: коефіцієнт розсіяння (γ), робочий магнітний потік ($\Phi_{раб}$), сумарний магнітний потік (Φ_{Σ}) та вектор параметрів, що визначає ге-

ометрію магнітної системи та складається з таких компонентів: ширина (b'_n) і висота (h_n) осердя головного полюса, розміри котушки збудження та їх співвідношення ($b_{k1}, b_{k2}, h_{k1}, h_{k2}, h_{k1}/b_{k1}, K_{fca} = h_{k1}/R_{BH}, K_{fcr} = b_{k1}/R_{BH}$), ізоляційні проміжки між котушкою та головним полюсом (D_C, D_N та D_S) які характеризують конструкцію ізоляції котушки обмотки збудження, величина повітряного проміжку під віссю \mathcal{S}' і краєм \mathcal{S}'' головного полюса, глибина (h_B) і кут вирізу \mathcal{B} в полюсному наконечнику, коефіцієнт полюсного перекриття \mathcal{K} , висота (h_{nn}) полюсного наконечника та ширина його уступу (b_{nn}), при різних значеннях струму збудження. Параметри геометрії представлені на рис 3.

Рис.3. Параметри (компоненти) геометрії магнітної системи.

Для визначення функціональних зв'язків компонентів цих векторів проведений комплекс цифрових експериментів з використанням теорії планування експерименту. При отриманні функціональної залежності використані ортогональні двофакторні експерименти. План такого експерименту для факторів –

ширини (b_{k2}) та висоти (h_{k2}) котушки (розміри котушки b_{k1} та h_{k1} змінювали так, щоб площа поперечного перетину котушки була не змінною) приведені в табл.1.

Складені аналогічні плани для факторів: ширина (b'_n) і висота (h_n) осердя головного полюса, ізоляційні проміжки між котушкою та головним полюсом (D_C , D_N), коефіцієнт полюсного перекриття α та висота полюсного наконечника (h_{nn}), величина повітряного проміжку під віссю β і краєм полюса β' , глибина (h_B) і кут вирізу β'' в полюсному наконечнику. Крім того, кожна пара факторів досліджувалася при різних значеннях струму збудження, що було необхідно для оцінки впливу насичення магнітної системи.

Таблиця 1

План експерименту та результати розрахунку критеріїв ефективності

Номер спроби	h_{k2} , в.о., Фактор1	b_{k2} , в.о., Фактор2	X_0	X_1	X_2	$\Phi_{раб}$, в.о., Критерій 1	Φ_y , в.о., Критерій 2	y , в.о., Критерій 3
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,302	1	1	-1	1	1,0002	0,9947	0,9945
3	1	0,748	1	1	-1	1,000026	1,0002	1,0002
4	0,302	0,748	1	-1	-1	1,02095	1,0168	0,9960
5	1	0,874	1	1	0	1,000231	1,0003	1,0001
6	0,302	0,874	1	-1	0	1,0033	0,9984	0,9951
7	0,651	1	1	0	1	1,00038	0,9988	0,9985
8	0,651	0,748	1	0	-1	0,9993	0,9981	0,99886
9	0,651	0,874	1	0	0	0,9935	0,9923	0,99882

Проведення чисельних експериментів проводилося з використанням програмного комплексу на основі методу скінченних елементів.

Обробка результатів експерименту проводилася за допомогою програми PLAN 86, яка дозволяє отримати оптимальний апроксимуючий поліном, що описує функціональний зв'язок між компонентами вектора критеріїв ефективності і вектора параметрів, виходячи з критеріїв максимального і сумарного квадратичного відхилень. Поліноміальні залежності $\Phi_{раб} = f(b_{k2}, h_{k2})$, $\Phi_{\Sigma} = f(b_{k2}, h_{k2})$ та $\sigma = f(b_{k2}, h_{k2})$ мають наступний загальний вигляд

$$Y = T \times \left[\left(\frac{X_{01} + H_{01} \times X_1}{X_{01}} \right)^{P1} \times \left(\frac{X_{02} + H_{02} \times X_2}{X_{02}} \right)^{P2} \times \right. \\ \left. \times (k1 + k2 \times X_1 + k3 \times X_2 + k4 \times X_1 \times X_2 + \right. \\ \left. + k5 \times X_1^2 - 0,667 \times X_1 + k6 \times X_2^2 - 0,667 \times X_2) \right], \quad (1)$$

де: T – тип перетворення; X_1, X_2 – незалежні змінні; X_{01}, X_{02} – нульові значення плану; H_{01}, H_{02} – плече плану; $P1, P2$ – степеневі добавки; $k1, \dots, k6$ – коефіцієнти полінома, які представлені в табл. 2

Крім того, в табл. 2 приведені значення максимального відносного відхи-

лення (похибка) для кожного полінома.

Таблиця 2

Коефіцієнти поліномів математичних моделей $\Phi_{раб} = f \{k_2, b_{k_2}\}$,
 $\Phi_{\Sigma} = f \{k_2, b_{k_2}\}$ та $\sigma = f \{k_2, b_{k_2}\}$.

Найменування полінома	Т – тип перетворення	Погрішність, %	Нульові значення плану		Плече плану		Показники степеневої добавки	
			X_{01}	X_{02}	H_{01}	H_{02}	$P1$	$P2$
$\Phi_{раб} = f \{k_2, b_{k_2}\}$	$Y = exp \psi$	0,238	0,651	0,874	0,349	0,126	-0,92702	-1,44786
$\Phi_{\Sigma} = f \{k_2, b_{k_2}\}$		0,236					-1,00312	-1,35609
$\sigma = f \{k_2, b_{k_2}\}$		0,0063					-0,81482	-3,09464

Продовження табл. 2

Найменування полінома	Коефіцієнти полінома					
	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
$\Phi_{раб} = f \{k_2, b_{k_2}\}$	0,00041	-0,00157	-0,00118	0,00391	0,00197	0,00291
$\Phi_{\Sigma} = f \{k_2, b_{k_2}\}$	-0,0008	-0,00031	-0,00156	0,00405	0,00225	0,00208
$\sigma = f \{k_2, b_{k_2}\}$	-0,00135	0,00144	-0,00081	0,00005	0,00072	-0,00019

На рис. 4 – 9 представлені поверхні відгуку поліноміальних залежностей отриманих за результатами чисельних експериментів.

Рис.4. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f \{k_2, b_{k_2}\}$$

Рис.5. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f \{k_C, \Delta_N\}$$

Рис.6. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f(\alpha_n, \beta_n)$$

Рис.7. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f(\alpha, h_{тп})$$

Рис.8. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f(\alpha_B, \beta)$$

Рис.9. Поверхня відгуку залежності

$$\Phi_{раб} = f\left(\delta', \frac{\delta''}{\delta'}\right)$$

За результатами аналізу залежностей отримано, що конструкцію обмотки збудження визначає геометрія котушки обмотки збудження і конструкція ізоляції котушки. Встановлено, що застосовуючи ту або іншу конструкцію обмотки збудження при решті незмінних параметрів машин постійного струму можна впливати на вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи. Найбільший вплив оказує геометрія котушки обмотки збудження. Різниця у величині робочого магнітного потоку створюваного котушкою обмотки збудження з гіршою і кращою геометрією складає 3%.

Вплив конструкції ізоляції котушки обмотки збудження менш значущий, різниця робочого магнітного потоку між різними варіантами конструкції ізоляції

складає 1,6 %.

Конструкція головного полюса теж складається з двох елементів - осердя і наконечника головного полюса. Характер впливу розмірів осердя головного полюса достатньо добре вивчений, тому найбільший інтерес мала величина відхилення критеріїв оцінки ефективності магнітної системи через відхилення розмірів головного полюса, які виникають в процесі виробництва. Встановлено, що найбільший вплив на вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи надає висота осердя головного полюса. Вплив ширини осердя менш істотний та чим вище полюс, тим цей вплив менше.

В якості розмірів наконечника розглядалися коефіцієнт полюсного перекриття і висота наконечника. Природно, що найбільший вплив оказує коефіцієнт полюсного перекриття, із зростанням якого підвищується величина робочого магнітного потоку. Проте збільшення коефіцієнта полюсного перекриття приводить до погіршення комутації і роботи машин постійного струму. Вплив висоти наконечника менш значимий і лише при $\alpha = 0,68$ і вище, він стає істотним (більше 5%).

Поверхня наконечника також ділиться на дві частини - одна з них спрямована до станини і котушки обмотки збудження, а друга до якоря. Вплив геометрії поверхні наконечника спрямованої до станини і котушки обмотки збудження на вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи досліджувався вперше. Запропоновано виконувати виріз в цій поверхні: це приводить до зменшення сумарного магнітного потоку, проте дозволяє провести перерозподіл магнітного потоку і зменшити розсіяння. Глибина вирізу складає 0,25 від висоти полюсного наконечника. Таке технічне рішення дуже незначно збільшує величину робочого магнітного потоку, але зменшує витрату активної сталі головного полюса на 3,2%.

Рекомендації по вибору геометрії частини наконечника обернутої до якоря найбільш різноманітні і неоднозначні, а її обрахунок достатньо складний. Встановлено, що чим менше величина повітряного проміжку, тим менше різниця між різними формами наконечника. Найбільш часто, виходячи з різних міркувань, застосовуються дві форми повітряного проміжку: ексцентричний і рівномірний з підрізуванням країв наконечника. Різниця у величині створюваного робочого магнітного потоку наконечниками цих форм незначна, але друга технологічно простіше.

Аналіз рекомендацій по вибору величини повітряного проміжку показав, що краще використовувати залежність задану аналітично і засновані на обліку рівня електромагнітних навантажень, ніж графічна залежність. Більшість аналітичних методів визначення величини повітряного проміжку показали, що величину повітряного проміжку в досліджуваній машин постійного струму можна зменшити на 11%.

Встановлено, що при насиченні магнітної системи величина впливу досліджених параметрів на енергетичні параметри магнітної системи зменшується, але характер впливу зберігається і навпаки при зменшенні струму збудження величина впливу зростає.

Математичні моделі досліджувалися за допомогою чисельних експеримен-

тів. Для знаходження екстремальних значень поліноміальних залежностей були використані методи теорії диференціального числення. В результаті аналізу поліноміальних залежностей, що були отримані раціональні співвідношення, які визначають геометрію магнітної системи:

$$\frac{b'_n}{h_n} = 0,613; \quad \frac{b_{k1}}{h_{k1}} = 0,6; \quad h_B = \frac{1}{4} h_{nn} \text{ (при куті } \beta = 0^\circ \text{)}. \quad (2)$$

У четвертому розділі проведена перевірка адекватності отриманих поліноміальних залежностей. Для цього була проведена вибірка вектора параметрів геометрії магнітної системи, які представлені в таблиці 3.

Створені три фізичні моделі магнітних систем з параметрами приведеними у табл. 3. Для цього був використаний електродвигун 5ПБ112М виробництва ВАТ “Електромашина” (м. Харків), з номінальними параметрами: 2,2 кВт; 1500 об/хв.; 220 В; збудження незалежне - 220 В. Загалом було модернізовано три двигуна.

Таблиця 3

Параметри конструкції елементів магнітної системи різних моделей

Параметри геометрії елементів магнітної системи	Модель №1	Модель №2	Модель №3
Проміжки в котушці обмотки збудження	$\Delta_C = 1,5$ мм і $\Delta_N = 1,5$ мм		
Розміри котушки обмотки збудження	$h_{k1} = 21,4$ мм, $b_{k1} = 35,7$ мм, $h_{k2} = 6,5$ мм та $b_{k2} = 14,3$ мм		
Коефіцієнт полюсного перекриття α	0,637		
h_{nn} , мм	7,2	7,5	5,0
h_n , мм	31		
b'_n , мм	17,5	19,0	16,0
β , °	45	0	0
h_B , мм	-	4,25	2,35
Повітряний проміжок – рівномірний з підрізуванням країв	$\delta' = 1$ мм; $\frac{\delta''}{\delta} = 2$ мм.		
$\Phi_{раб}$, В.О.	1,00896	1,0183	0,974

Компоненти вектора ефективності магнітної системи, такі як коефіцієнт розсіяння (γ), робочий магнітний потік ($\Phi_{раб}$) та сумарний магнітний потік (Φ_{Σ}) достатньо важко вимірювати, тому в роботі запропоновано провести інтегральну оцінку адекватності шляхом порівняльного аналізу характеристик неробочого ходу отриманих експериментально і розрахованих з урахуванням коефіцієнта розсіяння визначеного по отриманим поліноміальним залежностям. Результати порівняльного аналізу характеристик неробочого ходу показали що максимальне відхилення склало 2,1%.

Крім того, для кожного зразка був виконаний весь комплекс випробувань, які підтвердили їх відповідність технічним умовам і поліпшення окремих параметрів.

У п'ятому розділі запропонована вдосконалена методика розрахунку машин постійного струму середньої потужності. Методика заснована на типовій

методиці розрахунку з уточненням розрахунку параметрів геометрії головного полюса, уточненням коефіцієнта розсіяння при розрахунку характеристики неробочого ходу та внесенням змін при розрахунку заповнення міжполюсного вікна. За результатами досліджень був спроектований та виготовлений дослідний зразок на ВАТ “Електромашина”. Дослідний зразок двигуна пройшов іспити (рис.10), протокол іспитів приведено у додатку Б, а в таблиці 4 наведені параметри базового і дослідного двигуна, що відрізняються.

Результати випробувань показали зменшення маси міді, електротехнічної сталі та підвищення коефіцієнта корисної дії.

Таблиця 4

Найменування	ККД, %	Маса обмоткової міді, кг	Маса електротехнічної сталі, кг
Базовий двигун	80,5	11,7	15,3
Дослідний зразок двигуна	81,3	10,4	15

Рис. 10. Дослідний зразок двигуна на випробувальному стенді.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено теоретичне обґрунтування та розв’язання науково-практичної задачі, що полягає в економії матеріальних ресурсів в магнітній системі машин постійного струму середньої потужності загального призначення, підвищення її техніко-економічних показників шляхом вдосконалення методики проектування.

1. Розглянувши види розрахунків, з яких складається методика проекту-

вання машин постійного струму середньої потужності загального призначення, що використовується в даний час, було встановлено, що практично всі види розрахунків мають значну погрішність через застосування спрощених методів. Тому кожний етап розрахунку потребує підвищення точності, тобто застосування чисельних методів. Проте, виходячи з необхідної трудомісткості і точності, що вимагається, цілком достатнім буде використання чисельного методу тільки для електромагнітного розрахунку.

2. Для проведення чисельного моделювання магнітної системи при варіюванні вектора параметрів, що визначають її геометрію, розроблено програмний комплекс на основі методу скінченних елементів. Особливістю програмного комплексу є можливість використання його для дослідження магнітних полів електричних машин різного типу та потужності.

3. Запропонована уточнена методика розрахунку коефіцієнта розсіяння машин постійного струму середньої потужності. Отримані уточнені значення коефіцієнта розсіяння для машин постійного струму, що мають магнітну систему прямокутної форми, які можна використовувати в заводських (інженерних) методиках розрахунку.

4. Для перевірки адекватності методики розрахунку моделі магнітного поля машин постійного струму середньої потужності була визначена характеристика холостого ходу двигуна 5ПБ112М. Отриманий порівняльний аналіз показав, що максимальне відхилення існуючої методики від експерименту складає 16%, а запропонованої – 1,8%.

5. Обрано вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи машин постійного струму середньої потужності що складається з наступних компонентів: коефіцієнт розсіяння, робочий магнітний потік, сумарний магнітний потік.

6. Скомпоновано вектор параметрів, що визначає геометрію магнітної системи, який складається з наступних компонентів: ширина і висота осердя головного полюса, ширина і висота котушки збудження, величина повітряного проміжку під віссю і краєм головного полюса, глибина і кут вирізу в полюсному наконечнику, коефіцієнт полюсного перекриття, висота полюсного наконечника

7. Отримані оптимальні поліноміальні залежності, що описують поведінку вектора критеріїв оцінки ефективності магнітної системи від вектора параметрів, які описують геометрію магнітної системи з використанням теорії планування експерименту в різних режимах роботи. Була підтверджена адекватність отриманих поліноміальних залежностей шляхом фізичного моделювання. Отриманий порівняльний аналіз показав, що максимальне відхилення складає – 2,1%.

8. Для економії активних матеріалів запропоновано виконати виріз в полюсному наконечнику під кутом 0° , глибина вирізу складає 0,25 від висоти полюсного наконечника. Таке технічне рішення зменшує витрату активної сталі головного полюса на 3,2% та приводить до незначного збільшення величини робочого магнітного потоку.

9. Запропонована уточнена методика розрахунку машин постійного струму середньої потужності із станиною прямокутної форми особливою якої, є уточнений розрахунок геометрії головного полюса, геометрія котушки збудження, і уточнення коефіцієнта розсіяння при електромагнітному розрахунку.

10. По уточненій методиці розрахунку проведено проектування модернізованого двигуна 5ПБ112М з новою геометрією магнітної системи. Застосування такої магнітної системи дозволило зменшити витрату обмотувальній міді на 1,3 кг (11%) і активну сталь головного полюса на 0,2 кг (3,2%), підвищити коефіцієнт корисної дії двигуна на 0,8%, результати було підтверджено при іспитах дослідного зразка.

11. Отримані акти впровадження результатів дисертаційної роботи у ВАТ „Електромашина” (м. Харків) та ДП НПП „ЕЛМЕС” (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шайда В. П. Анализ путей повышения эффективности использования активных материалов при проектировании машин постоянного тока средней мощности. // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 46. – С. 69 – 71.

2. Шайда В. П., Егоров Б. А. Влияние геометрии катушки обмотки возбуждения на энергетические показатели машины постоянного тока. // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – № 47. – С. 70 – 72.

Здобувачем виконана перевірка гіпотези впливу геометрії котушки обмотки збудження на величину магнітної індукції за допомогою аналітичних методів розрахунку магнітного поля.

3. Шайда В.П., Егоров Б.А., Мирошниченко А.Г. Расчет коэффициента рассеяния обмотки возбуждения с учетом зубчатости якоря машины постоянного тока. // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 2000. № 84. - С. 195 - 198.

Здобувачем розроблена програма розрахунку магнітного поля в двигуні постійного струму методом скінченних елементів, за допомогою котрої він виконав розрахунки магнітного поля та проаналізував вплив положення зубця ротора відносно вісі головного полюса на параметри магнітного поля.

4. Шайда В.П., Егоров Б.А., Мирошниченко А.Г. Повышение эффективности работы обмотки возбуждения машин постоянного тока средней мощности. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001. № 5. - С. 189 - 194.

Здобувачем було виконано розрахунки магнітного поля та проведено аналіз залежності повного і робочого магнітного потоку, а також коефіцієнту розсіювання від конструкції обмотки збудження.

5. Шайда В.П., Егоров Б.А., Любарский Б.Г. Определение зависимости величины рабочего магнитного потока от геометрии катушки обмотки возбуждения в машинах постоянного тока средней мощности. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001. – № 16. – С. 163 – 166.

За допомогою розрахунків магнітного поля у двигуні постійного струму здобувач виконав аналіз впливу геометрії котушки обмотки збудження на величину повного і робочого магнітного потоків, а також коефіцієнт розсіювання.

6. Шайда В.П., Егорова Г.Г., Егоров Б.А. Расчет размеров наконечника главного полюса для обеспечения наибольшего рабочего потока в якоре машины постоянного тока средней мощности. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2001. – № 17. – С. 145 – 148.

Здобувач виконав аналіз існуючих рекомендацій щодо знаходження розмірів полюсного наконечника та дослідив їх вплив на робочій магнітний потік.

7. Шайда В.П., Егорова Г.Г., Мирошніченко А.Г., Егоров Б.А. Характеристики магнітного поля машини постійного тока середньої потужності при зміні розмірів полюсного вікна. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2002. – № 1. – С. 83 – 86.

Здобувач дослідив та проаналізував вплив висоти та ширини осердя головного полюса машини постійного струму на характеристики магнітного поля в режимі неробочого ходу.

8. Шайда В.П., Егоров Б.А., Мирошніченко А.Г. Влияние насыщения магнитной системы на рабочий магнитный поток при изменении формы обмотки возбуждения. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2002. – № 9, т.4. – С. 143 – 146.

Здобувач дослідив вплив насичення магнітної системи на отриману залежність робочого магнітного потоку від геометрії обмотки збудження.

9. Шайда В.П., Егоров Б.А. Влияние формы воздушного зазора на величину рабочего магнитного потока в машинах постоянного тока средней мощности. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2002. – № 14. – С. 142 – 146.

Здобувачем виконано аналіз існуючих рекомендацій щодо знаходження величини повітряного проміжку та геометрії частини полюсного наконечника зверненої до якоря, та перевірів ці рекомендації відносно двигунів постійного струму середньої потужності.

10. Шайда В.П., Егоров Б.А., Мирошніченко А.Г. Исследование геометрии наконечника главного полюса в машинах постоянного тока средней мощности общепромышленного назначения. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003. – № 9, т.4. – С. 101 – 108.

Здобувач дослідив та проаналізував вплив геометрії частини полюсного наконечника спрямованої до обмотки збудження.

11. Шайда В.П., Егоров Б.А., Мирошніченко А.Г. Цифровое моделирование магнитной системы машин постоянного тока средней мощности общепромышленного назначения. // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – № 22. – С. 99 – 102.

Здобувач виконав цифрове моделювання магнітної системи двигуна постійного струму середньої потужності та перевірів результати на експериментальному двигуні.

12. Шайда В.П., Егоров Б.А., Любарский Б.Г. Исследование влияния конструкции обмотки возбуждения на энергетические параметры магнитной системы в машинах постоянного тока средней мощности общепромышленного назначения. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2004. – № 4. – С. 86 – 89.

Здобувач дослідив та проаналізував сумісний вплив конструкції та геометрії обмотки збудження на параметри магнітної системи.

13. Шайда В. П., Егоров Б. А. Новая серия машин постоянного тока средней мощности 5П. // Пр. міжнар. науч. – техн. конф. “Інформаційні технології: наука,

техніка, технологія, освіта, здоров'я”. – Харків: ХГПУ, 1997. – С. 205 - 207.

Здобувачем зробив огляд електричних машин нової серії та розглянув її параметри.

14. Шайда В.П. Анализ закономерностей построения серии машин постоянного тока 5П. // Збірка наукових праць ХГПУ “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. - Харків: ХГПУ, 1998. – Вип. 6, ч. 2. – С. 347 – 351.

АНОТАЦІЇ

Шайда В.П. Підвищення ефективності використання активних матеріалів магнітної системи в машинах постійного струму середньої потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2007.

У дисертаційній роботі теоретично обґрунтовано та розв’язано науково-практичну задачу, що полягає в економії матеріальних ресурсів в магнітній системі МПС середньої потужності загального призначення, підвищення її техніко-економічних показників шляхом вдосконалення методики проектування.

Встановлено, що методика проектування МПС середньої потужності загального призначення, яка використовується в даний час, має значну похибку і не може використовуватися при проектуванні нових серій розглянутих МПС. Тобто вона потребує перегляду.

Розроблено програмний комплекс на основі методу скінченних елементів, який дозволяє проводити чисельне моделювання магнітної системи при варіюванні вектора параметрів, що визначають її геометрію.

Запропоновано вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи МПС середньої потужності та вектор параметрів, що визначає геометрію магнітної системи.

Отримані рекомендації по вибору раціональних геометричних параметрів магнітної системи МПС середньої потужності загального призначення.

Запропонована уточнена методика розрахунку МПС середньої потужності із станиною прямокутної форми особливістю якої, є уточнений розрахунок геометрії головного полюса, геометрії котушки збудження та уточнення коефіцієнта розсіяння при електромагнітному розрахунку.

Ключові слова: двигун постійного струму середньої потужності загального призначення, вектор критеріїв оцінки ефективності магнітної системи, магнітне поле двигуна, зниження матеріалоемності.

Шайда В.П. Повышение эффективности использования активных материалов магнитной системы в машинах постоянного тока средней мощности. – 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,

2007.

В диссертационной работе теоретически обоснована и решена научно-практическая задача, которая заключается в экономии материальных ресурсов в магнитной системе машин постоянного тока (МПТ) средней мощности общего назначения, повышения ее технико-экономических показателей путем совершенствования методики проектирования.

Установлено, что методика проектирования МПТ средней мощности общего назначения, которая используется в настоящее время, имеет значительную погрешность и не может использоваться при проектировании новых серий рассмотренных МПТ. То есть она нуждается в пересмотре.

Разработана методика проведения исследований и программный комплекс на основе метода конечных элементов, который позволяет проводить численное моделирование магнитной системы при варьировании вектора параметров, которые определяют ее геометрию.

Предложен вектор критериев оценки эффективности магнитной системы машин постоянного тока средней мощности, который состоит из следующих компонентов: коэффициент рассеяния, рабочий магнитный поток, суммарный магнитный поток. Также предложен вектор параметров, который определяет геометрию магнитной системы и состоит из следующих компонентов: ширина и высота сердечника главного полюса, ширина и высота катушки возбуждения, величина воздушного промежутка под осью и краем главного полюса, глубина и угол выреза в полюсном наконечнике, коэффициент полюсного перекрытия, высота полюсного наконечника.

Для определения функциональных связей компонентов этих векторов проведен комплекс численных экспериментов с использованием теории планирования эксперимента. Проведение экспериментов проводилось с использованием созданного программного комплекса. Обработка результатов экспериментов проводилась с помощью программы PLAN 86, которая позволяет получить оптимальный аппроксимирующий полином, который описывает функциональную связь между компонентами вектора критериев эффективности и вектора параметров, исходя из критериев максимального и суммарного квадратичного отклонений.

Получены рациональные зависимости полиномов, которые описывают поведение вектора критериев оценки эффективности магнитной системы от вектора параметров, каковые описывают геометрию магнитной системы с использованием теории планирования эксперимента в разных режимах работы.

Получены рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров магнитной системы МПТ средней мощности общего назначения.

Предложена усовершенствованная методика расчета машин постоянного тока средней мощности. Методика основана на типичной методике расчета с уточнением расчета параметров геометрии главного полюса, уточнением коэффициента рассеяния при расчете характеристики холостого хода и внесением изменений при расчете заполнения межполюсного окна.

По результатам исследований был спроектирован и изготовлен опытный образец электродвигателя 5ПБ112М на ОАО “Электромашина”. Опытный обра-

зец двигателя прошел испытания, которые подтвердили экономию активных материалов и повышение коэффициента полезного действия в сравнении с базовым (серийным) двигателем.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока средней мощности общего назначения, вектор критериев оценки эффективности магнитной системы, магнитное поле двигателя, снижение материалоемкости.

Shayda V.P. The raising of efficiency of the use of active materials in the magnetic system of middle power DC machines. – Manuscript.

The thesis is presented for Ph. D degree in the specialty 05.09.01 – electric machines and apparatus. National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2007.

A theoretical ground and decision of scientifically-practice task, which consists in the economy of financial resources in the magnetic system of middle power DC machines of the general purpose, increase of it technical and economic indexes by perfection of design technique, is resulted in dissertation work.

It was set that the design technique of middle power DC machines of the general purpose, which is utilized presently, has a considerable error and can not be used for planning new series of considered DC machines. That it needs revision.

A programmatic complex is developed on the basis of method of finite elements, which allows conducting the digital design of the magnetic system at varying of vector of parameters that determine its geometry.

Criteria vector of estimation of efficiency of the magnetic system of middle power DC machines and vector of parameters that determines geometry of the magnetic system are offered.

Recommendation for the choice of rational geometrical parameters of the magnetic system of middle power DC machines of the general purpose was obtained.

The specified method of calculation of middle power DC machines with the bed of rectangular form by the feature of which, there is the specified calculation of geometry of main pole, geometry of spool of excitation, and clarification of coefficient of dispersion at an electromagnetic calculation was offered.

Keywords: middle power DC machines of the general purpose, vector of criteria of estimation of efficiency of the magnetic system, magnetic field of engine, reduction of the used materials.