

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Добродєєв Павло Миколайович**

УДК 621.313.2: 621.3.013

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ  
ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ  
МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

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 Відділенні магнетизму Інституту електродинаміки Національної Академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Елксніс Віктор Янович, пенсіонер.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Шумілов Юрій Андрійович, Національний технічний  
університет України “Київський політехнічний інститут”,  
професор кафедри електромеханіки.

кандидат технічних наук, доцент Поляков Ігор Володимирович,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний  
інститут”, доцент кафедри загальної електротехніки.

Провідна установа Одеський національний політехнічний університет  
кафедра електричних машин,  
Міністерство освіти і науки України, м. Одеса.

Захист відбудеться “ 12 ” травня 2005 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 “ 1 ” квітня 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Марков В.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В теперішній час актуальною є проблема зниження зовнішнього магнітного поля (ЗМП) електроустаткування технічних об'єктів для забезпечення вимог електромагнітної сумісності та магнітного захисту. Розв'язання цієї проблеми винятково важливо для геомагнітних суден та мінних тральників. Міжнародними та вітчизняними стандартами встановлюються вимоги до рівнів ЗМП судового електроустаткування, а також до визначення та маркування мінімально безпечної відстані, на якій воно може бути розташоване від головного компаса або магнітометрів. Машини постійного струму (МПС) використовуються в електроустановках суден і являють собою потужні джерела електромагнітних полів, що перевищують припустимі рівні.

Аналіз діючих та перспективних вимог до рівнів ЗМП електроустаткування з одного боку та його фактичних рівнів з іншого боку показує, що у МПС необхідно забезпечити зниження ЗМП не менш ніж в 5-10 разів.

Важливим аспектом проблеми є екологічний у зв'язку з накопиченими численними даними про деструктивний вплив постійних та змінних магнітних полів на здоров'я і працездатність людини. Особливе значення цьому питанню також надається на флоті, де специфіка праці вимушує команду тривалий час знаходитись в умовах інтенсивного впливу електромагнітних полів.

Існуючі методи (конструктивно-технологічні заходи, симетрування, розмагнічування, екранування, компенсація) при застосуванні в МПС не забезпечують необхідної ефективності зниження ЗМП. Це обумовлено недостатньою вивченістю МПС як джерела ЗМП, а також відсутністю пов'язаного з цим системного, науково-обґрунтованого підходу до проблеми його зниження. Тому актуальним є вирішення задачі підвищення ефективності методів зниження ЗМП машин постійного струму шляхом розвитку цих методів та розробки високоефективних засобів їх реалізації, які враховують особливості конструкції і технології виготовлення машин.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація є наслідком діяльності здобувача при виконанні ряду науково-дослідних робіт: "Розробка засобів зниження магнітних моментів основних груп електрообладнання" (спільно з ХПІ, договір №10-16910720 від 17.11.87, шифр "Захист 551"); "Розвиток теорії просторового гармонічного аналізу магнітного поля технічних об'єктів" (Постанова Бюро Відділення фізико-технічних проблем в енергетиці НАН України від 27.12.94 за № 9, шифр "Контур", №ДР 0195U010016); "Створення технології зниження завадонесучих магнітних полів електроенергетичного обладнання" (договір № 2/1043-97 від 26.08.97 з Міннауки України, шифр "Завада", №ДР 0197U015583); "Розвиток теорії розмагнічування технічних об'єктів та її застосувань" (Постанова Бюро Відділення фізико-технічних проблем в енергетиці НАН України від 26.04.01 за №5 §21 п.1, шифр "Демаг", №ДР 0101U001849), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності методів зниження ЗМП машин постійного струму шляхом розвитку цих методів та розробки високоефективних засобів їх реалізації, які враховують особливості конструкції і технології виготовлення машин.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались такі задачі:

- аналіз розподілу магнітного поля у навколишньому просторі МПС, виявлення зв'язків та дослідження впливу на ЗМП параметрів машини (кількості полюсів, частоти обертання, схеми з'єднань та ін.)
- дослідження проявлень у ЗМП різного роду асиметрій елементів електричного та магнітного кола машини;
- розробка високоефективних способів та засобів зниження ЗМП з урахуванням особливостей конструкції та технології виготовлення МПС;
- удосконалення конструкції машини за рахунок застосування нових засобів зниження її ЗМП та експериментальна перевірка цих засобів;

*Об'єкт дослідження* - зовнішнє магнітне поле електричних машин постійного струму.

*Предмет дослідження* - електричні машини постійного струму.

*Методи дослідження.* При теоретичних дослідженнях і розрахунках ЗМП використовувались методи просторового гармонічного аналізу та метод магнітних моментів. В експериментальних дослідженнях за основу був прийнятий метод різночасового порівняння магнітних параметрів (магнітної індукції, магнітного моменту) міри та електричних машин, що випробувались. Для аналізу експериментальних даних використовувався метод гармонічного аналізу Фур'є.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше експериментально виявлено і теоретично обгрунтовано, що багатополюсна МПС поряд з постійним та залишковим магнітними моментами має змінні магнітні моменти струмів на частотах, що визначаються полюсністю машини і є кратними частоті обертання. Доведено, що постійний і залишковий магнітні моменти МПС є наслідком електричної і магнітної асиметрії статора, а змінний магнітний момент - наслідком асиметрій якоря та статора;
- вперше експериментально виявлена і теоретично обгрунтована наявність в постійному ЗМП МПС широкої петлі гістерезису із зворотним напрямком обходу у порівнянні із звичайною петлею феромагнітного матеріалу, що дозволило використати цю особливість для підвищення ефективності методу компенсації постійного ЗМП;
- набули подальшого розвитку методи зниження ЗМП і розроблено нові ефективні способи та засоби, зокрема "безмоментне" з'єднання щіток та обмоток кола якоря, спосіб симетрування магнітного кола за допомогою феромагнітних прокладок під полюсами, спосіб зменшення анізотропії якоря введенням додаткової операції послідовного повороту жерстей на  $45^\circ$  при штампуванні,

спосіб статичного розмагнічування імпульсом струму збудження, який відповідає релаксаційній коерцитивній силі, спосіб компенсації магнітного моменту за допомогою пристрою, що враховує гістерезисні властивості постійного ЗМП машини.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблені в дисертаційній роботі засоби дозволяють забезпечити зниження ЗМП МПС в 4-10 разів в порівнянні з існуючим рівнем, що підтверджено випробуваннями машин типу ММГ-6 та П-82МШ, на яких були застосовані ці засоби, при їх промисловому виробництві на Харківському заводі "Електромашина", а також дослідного зразка МПС, побудованого на базі генератора ММГ-6, у Відділенні магнетизму ІЕД;

- виявлені закономірні зв'язки між ЗМП та технологічними відхиленнями основних конструктивних параметрів дозволяють проводити діагностику електричних машин за параметрами їх ЗМП, що знайшло реалізацію у розроблених за участю здобувача та введених в експлуатацію на Харківському заводі "Електроважмаш" стендах контролю якості роторів двигунів типу КД-60 та ДАВ-71;

- спосіб статичного розмагнічування, що набув подальшого розвитку у роботі, дозволяє ефективно усунути залишкову намагніченість феромагнітних елементів конструкцій і був впроваджений у серійному виробництві пристроїв для розмагнічування труб на підприємствах Асоціації "Харківнафтомаш".

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. В спільних наукових працях здобувачу належать: дослідження і обґрунтування зворотного ходу петлі гістерезису в ЗМП МПС; дослідження впливу анізотропії гаряче- та холоднокатаних сталей на ЗМП МПС; дослідження проявлення динамічного та статичного ексцентриситету в МПС різної полюсності; чисельна оцінка рівня магнітного моменту від статичної нерівномірності зазору; розрахунки вимірювальних обмоток стендів контролю якості роторів; аналіз похибок вимірювань мультиполів; обґрунтування доцільності двох витків у конструкції контуру для вимірювання магнітних моментів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень доповідались здобувачем та обговорювались на науково-технічній конференції "Електромеханіка. Теорія і практика" (м. Львів, 1996 р.); на II Міжнародній науково-технічній конференції "Метрологія в електроніці-97" (м. Харків, 1997 р.); на II Міжнародній науково-технічній конференції по судобудівництву "ISC'98" (м. Санкт-Петербург, Росія, 1998 р.); на VII Міжнародній конференції "Проблеми сучасної електротехніки - 2002" (м. Київ, 2002 р.); на семінарі "Магнетизм технічних об'єктів" у Відділенні магнетизму Інституту електродинаміки НАН України (1996–2004 р.р.). У повному обсязі дисертаційна робота була представлена на тематичному семінарі кафедри електричних машин НТУ "ХП".

**Публікації.** Основні положення і результати досліджень викладено у 12 публікаціях, з них 9 статей у фахових виданнях, 2 статті у збірках наукових праць, 1 патент України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 154 сторінки, у тому числі 140 сторінок основного тексту, 55 ілюстрацій, 18 таблиць, список використаних джерел із 95 найменувань, 1 додаток на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, визначені наукові задачі, викладені зв'язки з науковими програмами та планами, сформульована мета роботи, показана її наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

**У першому розділі** проаналізований стан проблеми дослідження та зниження ЗМП електричних машин. В основу існуючих методів розрахунку, вимірювання та зниження ЗМП електроустаткування покладено математичну модель узагальненого джерела магнітного поля, що заснована на теорії потенціалу та, зокрема, на теорії геомагнетизму Гаусса. Відповідно до цієї теорії, скалярний магнітний потенціал джерела, розміщеного в сфері радіуса  $R$ , визначається гармонічним рядом:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+1}} \cdot \sum_{m=0}^n [g_{nm} \cdot \cos m\varphi + h_{nm} \cdot \sin m\varphi] \cdot P_n^m(\cos\theta), \quad (1)$$

Коефіцієнти ряду  $g_{nm}$ ,  $h_{nm}$  мають фізичний зміст магнітних моментів мультиполів, розміщених всередині сфери.

При дослідженні ЗМП різних класів електроустаткування ряд (1) обмежують декількома першими гармоніками, поле яких з відстанню зменшується найбільш повільно. В науково-технічній літературі відсутні відомості щодо мультипольного складу ЗМП машин постійного струму, тобто про кількість членів математичної моделі, що необхідно враховувати при вирішенні задач аналізу, синтезу вимірювання та зниження ЗМП цього класу машин. Тому з метою обмеження кількості членів ряду було поставлене завдання дослідити розподіл магнітного поля у навколишньому просторі машини.

На основі прийнятої математичної моделі джерела магнітного поля і узагальнення досвіду проектування та експлуатації судового електроустаткування у 70-80 р.р. минулого століття були розроблені методи зниження його ЗМП. В розділі наведено їх класифікацію (конструктивно-технологічні заходи, симетрування, розмагнічування, екранування, компенсація) та описані засоби реалізації в електричних машинах з оцінкою позитивних на негативних властивостей. Застосування цих засобів в МПС не дозволяє досягти необхідного рівня їх ЗМП без суттєвого втручання в конструкцію та погіршення масогабаритних показників. Тому доцільним є узагальнення досвіду зниження ЗМП електричних машин, адаптація методів та засобів зниження до МПС, підвищення їх

ефективності, а також розробка нових високоефективних засобів, що враховують особливості конструкції та режимів роботи машини.

Базуючись на проведеному аналізі стану проблеми, здобувачем сформульовані наведені вище основні задачі, які мають бути вирішені в роботі.

**У другому розділі** представлені результати експериментальних досліджень розподілу ЗМП МПС в їх навколишньому середовищі та аналіз цього розподілу. Для вимірювань було вибрано два типи машин середньої потужності з різним числом полюсів та частотою обертання: двигун П-82МШ ( $P = 45$  кВт,  $2p = 4$ ,  $n = 3000$  об/с) та генератор ММГ- 6 ( $P = 58$  кВт,  $2p = 6$ ,  $n = 1500$  об/с) виробництва Харківського заводу “Електромашина” та одну велику машину ПГ-171 ( $P = 500$  кВт;  $2p = 12$ ;  $n = 43$  об/с) виробництва заводу “Електросила”.

Дослідженню підлягали:

- постійне ЗМП струмів;
- змінне ЗМП струмів;
- залишкове ЗМП.

Просторовий розподіл ЗМП визначався у площині основного магнітного потоку машини, перпендикулярній їй площині, та по осі обертання на різних відстанях  $R$  від машини роздільно по колу збудження та якоря. Сітка точок вимірів для одного  $R$  наведена на рис.1.

Рис. 1. Сітка точок вимірів ЗМП машини постійного струму

**Постійне ЗМП струмів.** Як приклад, на рис. 2 і рис. 3 наведено розподіл радіальної компоненти магнітної індукції машини з  $2p = 4$  в площині основного магнітного потоку на відстані  $R = 2$  м від її геометричного центру (крива 1). Результати вимірів просторового розподілу індукції розкладені у ряд Фур’є до гармоніки основної полюсности (криві 2, 3, 4).

Зіставлення експериментальних даних та параметрів математичної моделі дозволило уточнити просторовий гармонічний спектр постійного ЗМП струмів вимірюваних машин, пояснити його особливості. З результатів аналізу витікає, що незалежно від полюсности машини в її ЗМП окрім “власної” гармоніки магнітної індукції, яка визначається числом полюсів, присутня двополюсна складова, яка має вільний напрямок відносно полюсів. Напрямок “власної” гармоніки магнітної індукції при живленні обмотки збудження збігається з напрямком осей головних полюсів, а при живленні кола якоря - з напрямком осей додаткових полюсів. Двополюсна складова магнітної індукції вказує на наявність у машини постійного магнітного моменту струмів, довільно орієнтованого у просторі, що припустимо пов’язано з асиметріями обмоток та магнітопроводу. Враховуючи різний ступінь спадання просторових гармонік, на “далеких” відстанях (більше 2 максимальних габаритних розмірів машини) математична модель МПС як джерела ЗМП з достатньою точністю може бути зображена тільки дипольною просторовою гармонікою, тобто магнітним моментом диполя за винятком 4-полюсних машин, математичну модель яких можна вважати дипольною з

відстані не менш п'яти максимальних габаритних розмірів, а ближче необхідно враховувати і “власну”, квадрупольну гармоніку.

Рис. 2. Розподіл постійного ЗМП струмів машини П-82МШ при живленні кола збудження номінальним током.

Рис.3. Розподіл постійного ЗМП струмів машини П-82МШ при живленні кола якоря номінальним током.

**Змінне ЗМП струмів.** На машинах, що досліджувались, в режимі холостого ходу двигуна при номінальному струмі збудження та номінальній швидкості обертання було знято розподіл радіальної індукції змінного ЗМП на частоті обертання якоря та кратних їй. Встановлено, що незалежно від полюсности, МПС має змінний магнітний момент струмів. Виходячи з положення, що на “далеких” відстанях від МПС її змінне ЗМП також визначається магнітним моментом, були проведені виміри трьох його ортогональних компонент на різних частотах. З точки зору впливу полюсности на змінний магнітний момент струмів МПС примітними є результати вимірювань машини типу ПГ-171 з  $2p = 12$ , наведені в табл. 1. З таблиці витікає, що в площині основного магнітного потоку машини максимальне значення змінного магнітного моменту струмів спостерігається на частоті  $f = (p-1)f_2$  а по осі обертання якоря - на частоті  $f = pf_2$ , де  $f_2$  - частота обертання якоря. Ця закономірність зберігається і в інших машинах. Також машини мають обертові та пульсуючі магнітні моменти на інших частотах, кратних  $f_2$ , зокрема: обертовий на частоті  $f = (p+1)f_2$ , пульсуючий на частоті  $f = pf_2$ , пульсуючий та обертовий на частотах  $f = (p\pm 2)f_2$ .

Таблиця 1

Компоненти змінного магнітного моменту струмів машини типу ПГ-171

Компонента магнітного	Значення магнітного моменту при холостому ході в А·м <sup>2</sup>					
	на частоті, Гц					
	0,72 ( $f_2$ )	1,43 ( $2f_2$ )	2,15 ( $3f_2$ )	2,87 ( $4f_2$ )	3,58 ( $5f_2$ )	4,3 ( $6f_2$ )
X	20	15	40	26	21	76
Y	7	8	8	2	116	2
Z	20	17	24	9	107	2

**Залишкове магнітне поле.** В експериментах по визначенню залишкового ЗМП відключення машин проводилось з тих самих режимів, в яких проводились виміри постійного ЗМП струмів. Розподіл залишкового ЗМП МПС нагадує розподіл постійного, тому його аналіз і порівняння з математичною моделлю джерела магнітного поля проведені аналогічно. В результаті встановлено, що незалежно від полюсности МПС має залишковий магнітний момент, довільно орієнтований у просторі, який і обумовлює її ЗМП на “далеких” відстанях. Напрямок “власних” складових радіа-



льної індукції постійного та залишкового ЗМП збігаються між собою. Напрямок залишкового магнітного моменту в площині основного магнітного потоку, як правило, не збігається з напрямком постійного магнітного моменту струмів, що свідчить про різні причини їх виникнення.

Звертає на себе увагу форма та напрямок обходу петлі гістерезису постійного ЗМП при перемагнічуванні магнітопроводу. В площині основного магнітного потоку машини петля гістерезису в залежності радіальної індукції від струму збудження достатньо широка (завдяки значному залишковому магнітному полю) і має зворотний напрямок обходу в порівнянні з відомою петлею гістерезису феромагнітного матеріалу. В роботі це явище теоретично обґрунтовано, доказано, що воно є закономірним і пов'язане з наявністю у машини основного повітряного зазору. По осі валу петля гістерезису значно вужче і в різних машинах має різний напрямок обходу.

**Третій розділ** присвячений визначенню зв'язків ЗМП з параметрами МПС та аналізу його складових. Для аналітичних досліджень МПС як джерела ЗМП був обраний метод магнітних моментів, як найбільш прийнятний при розгляді мультипольної моделі узагальненого джерела магнітного поля. При цьому реальні джерела ЗМП машини замінюються системою магнітних моментів, які належним чином розташовані в її об'ємі і складаються з магнітних моментів контурів із струмом та намагнічених ділянок магнітопроводу, як зображено на рис. 4 для одного полюсного розбиття.

Рис. 4. Схема заміщення джерел ЗМП машини постійного струму

Сумарний магнітний момент системи у будь якому напрямку є сумою проекцій магнітних моментів на цей напрямок. В напрямку осі полюса сумарний магнітний момент дорівнює:

$$M = M_{OB} + M_{\Pi} + M_z + M_a' + M_{Я}' + M_{Я}'' \sin \alpha / 4 - M_a'' \sin \alpha / 4 \quad (2)$$

Магнітні моменти рівняння (2) відповідають коефіцієнтам потенційного ряду  $g_{nm}$ ,  $h_{nm}$  математичної моделі джерела магнітного поля (1) через співвідношення:

$$\begin{aligned} 4\pi g_{10} = M_{g10} = M_x; \quad 4\pi g_{11} = M_{g11} = M_y; \quad 4\pi h_{11} = M_{h11} = M_z; \\ 4\pi g_{20} = M_{g20} = 2M_x \cdot x - M_y \cdot y - M_z \cdot z; \\ 4\pi g_{21} = M_{g21} = M_x \cdot y + M_y \cdot x; \quad 4\pi h_{21} = M_{h21} = M_z \cdot x + M_x \cdot z; \\ 4\pi g_{22} = M_{g22} = \frac{1}{2}(M_y \cdot y - M_z \cdot z); \quad 4\pi h_{22} = M_{h22} = \frac{1}{2}(M_z \cdot y + M_y \cdot z). \end{aligned} \quad (3)$$

Формули (1), (2) і (3) разом із схемою заміщення (рис.4) становлять математичну модель МПС як джерела магнітного поля. Аналіз цієї моделі показує, що рівні результуючі магнітні моменти полюсних розбиттів обумовлюють “власну” систему магнітних моментів з порядком полюсності машини, а магнітний момент диполя багатопольсної системи є наслідком порушення цієї рівності за рахунок дії різного роду асиметрій. В дисертації асиметрії класифіковані на електричну та магнітну, кожна з них підрозділена на асиметрію статора та асиметрію якоря і далі на асиметрії обмоток та частин магнітопроводу. В роботі виконано детальний аналіз впливу асиметрій на ЗМП

МПС. В результаті встановлено, що постійний та залишковий магнітні моменти обумовлюються асиметріями статора, змінний - асиметріями якоря, а на деяких частотах - спільним проявленням асиметрій якоря і статора.

**Електрична асиметрія статора** є наслідком технологічних відхилень в межах допусків у виробництві обмоток, різнововщинності дроту та ізоляції, різного коефіцієнту заповнення, перекосу обмоток. Вона також доповнюється наявністю струмопідводів та міжкотушкових з'єднань, які створюють суттєвий магнітний момент, зокрема по осі обертання. Для порівняння, максимальна компонента постійного магнітного моменту машини П-82МШ складає  $M_n = 14 \text{ Ам}^2$ , а розрахункові значення компонент магнітного моменту цієї машини від з'єднань кола якоря  $M_x = 11,4 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ; від асиметрії обмотки збудження  $M_y = M_z = (5 \div 8) \text{ Ам}^2$ ;  $M_x = (3,5 \div 5) \text{ Ам}^2$ . Таким чином, електрична асиметрія статора приводить до виникнення всіх трьох компонент магнітного моменту, сумірних із магнітним моментом машини.

**Магнітна асиметрія статора** яскраво проявляється в МПС, ярма яких гнуть з товстолистової сталі. При цьому в ярмі виникають внутрішні механічні напруження, які повільно реалізуються до та після обробки посадочних поверхонь під полюси. В результаті “розточка” статора здобуває форму еліптичного циліндра, зміщеного відносно осі обертання якоря. Після установки полюсів “розточка” виправляється за допомогою феромагнітних прокладок, при цьому магнітний опір вирівнюється не повністю. Магнітна анізотропія сталі, вентиляційні отвори, технологічні пази та отвори, а також зварний шов в ярмі доповнюють картину нерівномірності магнітного опору машини. Всі вони можуть бути приведені до статичної нерівномірності основного повітряного зазору. Представляючи значення зазору рядом Фур'є, були одержані формули, що описують вплив магнітної асиметрії статора на ЗМП машини. Їх аналіз показує, що наявність статичної нерівномірності зазору приводить до появи у ЗМП машини просторових гармонік магнітної індукції з порядком нижче та вище основної та відповідних їм мультипольних магнітних моментів (табл. 2).

Таблиця 2

Магнітні мультиполі, обумовлені статичною нерівномірністю зазору

Полюсність	Порядок асиметрії			
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
$2p=2$	$M_{g20}$	$M_{g11}, M_{h11}$	$M_{g22}, M_{h22}$	$M_{g33}, M_{h33}$
$2p=4$	$M_{g11}, M_{h11}$	$M_{g20}$	$M_{g11}, M_{h11}$	$M_{g22}, M_{h22}$
$2p=6$	$M_{g22}, M_{h22}$	$M_{g11}, M_{h11}$	$M_{g20}$	$M_{g11}, M_{h11}$
$2p=8$	$M_{g33}, M_{h33}$	$M_{g22}, M_{h22}$	$M_{g11}, M_{h11}$	$M_{g20}$

Найвагоміша двополюсна просторова гармоніка ЗМП (дипольний магнітний момент) багатополюсних машин викликається нерівномірностями порядку  $k=(p\pm 1)$ . Як витікає з табл. 2, найбільший вплив на рівень ЗМП 4-полюсних машин чинить статичний ексцентриситет ( $k=1$ ), а 6-полюсних машин - еліптичність розточки статора ( $k=2$ ). Ці закономірності дають можливість за результатами вимірів постійних магнітних моментів здійснювати контроль над якістю виготовлення статорів та технічним станом машин при експлуатації.

Таким чином, на основі проведених теоретичних досліджень було встановлено, що постійний та залишковий магнітні моменти є наслідком асиметрій статора та оцінено внесок кожної з них в сумарне ЗМП. Числова оцінка магнітних моментів, які викликаються статичною нерівномірністю зазору, показала їх суттєвий рівень та достатньо добрий збіг з експериментальними даними.

**Електрична асиметрія якоря** проявляється у відхиленнях геометричних розмірів секцій, кутів нахилу лобових частин обмотки, опору секцій та паралельних гілок, опору щіткового контакту. Використовуючи метод спектрального аналізу та реальні відхилення по даним заводів-виготовлювачів, в роботі одержані формули, що описують вплив цих відхилень на ЗМП. Враховуючи, що різного роду асиметрії якоря складаються статистично, вони приводять до появи змінного магнітного моменту частоти  $k\omega t$ , де  $\omega$  - кругова частота обертання якоря. Величина цього моменту за компонентами:

$$\begin{aligned} M_x = M_{g10} &= \frac{0,03I_a W L_l R_l}{4p} \cos k\omega t, & k = p, \\ M_y = M_{g11} &= \frac{0,06I_a W L_l R_l}{4p} \cos k\omega t, & k = p \pm 1, \\ M_z = M_{h11} &= \frac{0,06I_a W L_l R_l}{4p} \sin k\omega t, & k = p \pm 1, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $L_l$  - виліт лобової частини обмотки;  $R_l$  - радіус середньої лінії лобових частин;  $I_a$  - струм якоря;  $p$  - число пар полюсів;  $W$  - число витків обмотки якоря.

При цьому осьова компонента магнітного моменту в основному викликається геометричною асиметрією. Радіальні компоненти від геометричної асиметрії та розходження опорів секцій мають приблизно однаковий рівень і викликаються асиметрією одного порядку  $k = p \pm 1$ .

**Магнітна асиметрія якоря**, як і статора, може бути приведена до нерівномірності основного повітряного зазору, але в даному випадку це буде динамічна нерівномірність зазору, що пов'язано з обертанням якоря. В роботі розглянуто вплив на ЗМП машини основних видів магнітної асиметрії якоря: динамічного ексцентриситету, анізотропії та перекоосу жерстей.

Наявність **динамічного ексцентриситету** якоря та **магнітна анізотропія** сталі приводять до появи в ЗМП багатополюсних машин спектру просторових та часових гармонік, порядком нижче

та вище порядку основної. Динамічний ексцентриситет  $\varepsilon$  викликає найбільш суттєвий з точки зору ЗМП диполь, магнітний момент якого  $M \sim \varepsilon^{p-1}$  і має частоту  $k\omega$ . Найсильніше динамічний ексцентриситет впливає на рівень ЗМП 4-полюсних машин ( $p=2$ ). Анізотропія сталі якоря найбільший вплив чинить на рівень ЗМП 6-полюсних машин. Магнітний диполь, що викликається анізотропією, має частоту  $2\omega$  та  $4\omega$ . Експериментальні значення магнітних моментів на частотах 50 Гц і 100 Гц, усереднені за результатами вимірів на 10 машинах типу ММГ- 6, дорівнюють:

$$M_{50} = (1,5 \pm 0,4) \text{ А}\cdot\text{м}^2; M_{100} = (0,8 \pm 0,2) \text{ А}\cdot\text{м}^2.$$

Ці результати добре збігаються з розрахунковими значеннями магнітних моментів від анізотропії якоря ( $M_{50}=1,9 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ;  $M_{100}=0,8 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ ).

Технологічний процес виготовлення жерстей якоря передбачає їх поворот через одну на  $90^\circ$ , але виключити тим вплив анізотропії вдається тільки частково, тому здобувачем було запропоновано внести в технологічний процес операцію послідовного повороту жерстей на  $45^\circ$  в одному напрямку.

В роботі теоретично обгрунтовано, що наявність дипольної складової індукції у змінному ЗМП 4-полюсних машин та її зміна під час експлуатації може служити діагностичною ознакою вигину валу. А по наявності у ЗМП машин певних мультиполів відповідної частоти можна судити про рівень анізотропії сталі якоря та дотримання технології його виготовлення.

**Перекіс жерстей якоря** пов'язаний з різновшчинністю електротехнічної сталі. При наявності такої асиметрії магнітні моменти окремих жерстей від намагніченості двополюсним магнітним потоком електричної машини будуть мати складову по осі обертання якоря, що викликає появу в цьому напрямку магнітних моментів частоти обертання (від постійного двополюсного магнітного потоку, пов'язаного із статичною асиметрією магнітного кола) та кратних частоті обертання (від змінного двополюсного потоку, пов'язаного із динамічною асиметрією). Враховуючи, що у МПС статична асиметрія, як правило, суттєво вище за динамічну, в напрямку осі обертання більшим є магнітне поле частоти обертання якоря.

Зіставлення теоретично одержаних відносних значень частотних складових радіальної індукції змінного ЗМП машин з відповідними значеннями розподілу радіальної індукції, одержаним експериментально, підтверджує вірність теоретичних передумов.

В роботі наведено приклад практичного використання досвіду дослідження ЗМП електричних машин для діагностики їх стану. Це є розроблені за участю здобувача стенди контролю якості роторів асинхронних електродвигунів за параметрами їх ЗМП. Робота стендів заснована на тому, що при наявності дефекту обмотки ротора в ЗМП багатопольової системи з'являється магнітний диполь, який відносно легко виділяється з її сумарного ЗМП.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню та розвитку методів і засобів зниження ЗМП МПС. Практика зниження ЗМП електричних машин показала, що найбільш доцільним шляхом досягнення встановлених вимог є поетапне застосування різних методів та засобів від простих до складних (а саме: конструктивно-технологічних заходів, симетрування, екранування, розмагнічування, компенсації) з оцінкою досягнутого результату на кожному етапі. В роботі досліджено відомі та запропоновано нові засоби з обґрунтуванням доцільності їх впровадження при проектуванні та виготовленні МПС.

**Конструктивно - технологічні заходи** спрямовані в першу чергу на підтримку  $2p$ -полюсної симетрії машини. В роботі проаналізовані загальні рекомендації по проектуванню маломагнітних електричних машин з розкриттям їх фізичної суті, механізму проявлення та оцінкою ефективності стосовно МПС. Також запропонована конструкція з'єднань однополярних щіток та обмотки якоря, що забезпечує в напрямку осі обертання взаємну компенсацію магнітних моментів, які створюються цими з'єднаннями. Ефективність цього заходу по колу якоря на машині типу П-82МШ склала приблизно 4.

**Симетрування** виконують шляхом внесення в електричну схему або магнітне коло машини елементів, що забезпечують підтримку  $2p$ -полюсної симетрії та виключення дипольної складової ЗМП. Електричне симетрування здійснюється на деяких типах МПС підключенням шунтуючих опорів паралельно обмоткам головних полюсів. Здобувачем запропоновано магнітне симетрування, суть якого полягає у вирівнюванні магнітного опору шляхом перерозподілу феромагнітних прокладок під частиною головних полюсів, а також заміни деяких феромагнітних бовтів, що кріплять полюси, бовтами з маломагнітної сталі. Ця операція виконується на магнітовимірювальному стенді. Магнітне симетрування доцільно застосовувати для зниження залишкового магнітного моменту, а електричне - для зниження постійного магнітного моменту струмів.

**Розмагнічування** вживається для зменшення залишкового ЗМП машини. В роботі досліджені два види розмагнічування - статичне та динамічне, обґрунтована перевага статичного. Розроблений за участю здобувача спосіб статичного розмагнічування передбачає внесення в схему живлення обмотки збудження додаткових елементів, що забезпечують після вимкнення машини автоматичну короткочасну подачу в обмотку розмагнічуючого струму, полярність якого зворотна полярності струму збудження, а величина відповідає значенню релаксаційної коерцитивної сили, що встановлюється експериментально і фіксується. Ефективність статичного розмагнічування достатньо висока і за даним іспитів реальних електричних машин знаходиться на рівні 10.

Проведені здобувачем роботи по статичному розмагнічуванню МПС знайшли застосування і на інших технічних об'єктах, зокрема, на магістральних трубопроводах, що потребують розмагнічування в технологічних цілях.

**Екранування.** Були досліджені магнітостатичне та електромагнітне екранування ЗМП. Виявлена добра ефективність магнітостатичного екранування змінного ЗМП в МПС (порядку 4,5 на частоті обертання). Запропоновано встановлювати пояси з рулонної електротехнічної сталі над торцевою зоною обмотки полюсів (та якоря) під станиною та щитами. Результати експериментальних досліджень таких поясів наведені в роботі.

**Компенсація** ЗМП в електричних машинах здійснюється за допомогою компенсаційних обмоток, спеціально призначених для цієї мети і розташованих на поверхні станини. Компенсаційний пристрій, що зараз застосовується на деяких типах МПС, має кільцеві обмотки для компенсації постійного магнітного моменту по осі обертання та сідлоподібні обмотки в площині основного магнітного потоку, по дві в напрямку кожної осі, одну з яких включено послідовно з обмоткою збудження, а другу - паралельно до обмотки додаткових полюсів. Ефективність компенсації такого пристрою обмежена наявністю у ЗМП МПС петлі гістерезису, в той час як ЗМП компенсаційної обмотки лінійно залежить від струму. Дослідження на генераторі ММГ-6 показали, що ефективність компенсації його магнітного моменту в штатних режимах роботи при регулюванні та зміні полярності струму збудження знаходиться на рівні 3 - 6.

Здобувачем був розроблений та випробуваний на моделі компенсаційний пристрій (КП), що у залежності постійного магнітного моменту від струму збудження має петлю магнітного гістерезису із зворотним напрямком обходу, аналогічним петлі машини.

Пристрій складається з компенсаційних обмоток і джерела їх живлення, функціональна схема якого зображена на рис. 5.

Рис. 5. Функціональна схема джерела живлення гістерезисного компенсаційного пристрою

Джерело живлення містить магнітопровід (1) з магнітом'якого матеріалу з намагнічуючою обмоткою (2). Магнітопровід має зазор, у якому розташований перетворювач Холла (4). Також джерело живлення містить датчик струму збудження (3), електронний блок підсумовування (5) і посилення (6) сигналів. Намагнічуюча обмотка включається послідовно з обмоткою збудження.

Робота КП заснована на підсумовуванні сигналу від струму збудження  $i_B$ , що обтікає обмотку намагнічування, та інвертованого сигналу від перетворювача Холла. Сигнал  $E_B$  від струму збудження є його лінійною функцією, а сигнал  $E_X$  від перетворювача Холла в функції струму збудження описує звичайну петлю гістерезису. Різниця сигналів ( $E_B - E_X$ ) в функції струму збудження опише петлю гістерезису із зворотнім напрямком обходу. Ця різниця сигналів посилювачем перетворюється на струм компенсації  $i_K$ , що протікає по компенсаційним обмоткам. Настроювання КП здійснюється на магнітовимірювальному стенді окремо по кожній компоненті. Форма петлі гісте-

резису задається відносною зміною значень сигналів  $E_B$  та  $E_X$  шляхом регулювання числа ампер-витків намагнічуючої обмотки та робочого струму перетворювача Холла.

Модель гістерезисного КП була випробувана на дослідному зразку генератора ММГ-6. Результат випробувань приведено на рис. 6, де позначено: 1 - магнітний момент машини по осі Y (див. рис.1), 2 - характеристика гістерезисного КП і 3 - результуючий магнітний момент ММГ-6 із вві-мкненим КП. З рис.6 очевидно, що за допомогою запропонованого гістерезисного КП можна досить точно наблизити форму характеристики його магнітного моменту до характеристики машини при зміні струму збудження і тим самим істотно підвищити ефективність компенсації. Постійний магнітний момент дослідного зразка генератора ММГ-6 було знижено в 10 разів в усіх режимах роботи.

Рис. 6. Компенсація ЗМП машини типу ММГ- 6 гістерезисним компенсаційним пристроєм

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-практичного завдання, яке полягає у підвищенні ефективності методів зниження зовнішнього магнітного поля електричних машин постійного струму, що досягається за рахунок розробки засобів, які враховують особливості конструкції, принципу дії та технології виготовлення цих машин і дозволяє забезпечити досягнення рівня діючих та перспективних вимог.

Виконані дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Проведений аналіз розподілу у навколишньому просторі постійного, змінного та залишкового ЗМП багатополюсних машин постійного струму підтвердив наявність у них складових просторових гармонік магнітної індукції та відповідних їм мультипольних магнітних моментів, дозволив пояснити походження і розподіл цих складових, виявити їх закономірні зв'язки з параметрами машин (числом полюсів, частотою обертання, схемою з'єднань та інше). З урахуванням вкладу цих гармонік в сумарне ЗМП доведено, що на "далеких" відстанях від машини її ЗМП може бути представлене першою просторовою гармонікою магнітної індукції, або магнітним моментом. Це дало можливість виявити суттєві складові ЗМП та зосередити увагу на їх дослідженні та розробці способів і засобів зниження.

2. Проведено класифікацію асиметрій елементів електричного та магнітного кола машин постійного струму, проаналізовано проявлення кожної асиметрії та відносний внесок полів, обумовлених ними, в сумарне ЗМП. Це дозволило виявити причини виникнення дипольних магнітних моментів в багатополюсних МПС та пов'язати ці моменти з конкретними асиметріями, в тому числі технологічними відхиленнями у виготовленні машини.

3. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень асиметрії активного ядра МПС було встановлено, що постійний і залишковий магнітні моменти є наслідком асиметрії статора, а змінний магнітний момент - наслідком асиметрії якоря та статора.

4. Забезпечено підвищення ефективності методів зниження ЗМП машин постійного струму. Запропоновані рекомендації по їх проектуванню і виготовленню враховують особливості конструкції та технології виробництва і дозволяють знизити ЗМП в 4-10 разів відносно досягнутого рівня. Вони передбачають:

а) реалізацію підвищених вимог до технології виготовлення:

- до рівномірності основного повітряного зазору;
- до якості сталі (ізотропність, підвищена точність прокату, мала коерцитивна сила, послідовний поворот жерстей при штампуванні на  $45^\circ$ );
- до біфілювання з'єднань;

б) установку симетруючих прокладок під головними полюсами;

в) застосування безмоментного з'єднання щіток та обмоток кола якоря;

г) застосування статичного розмагнічуючого пристрою та гістерезисного компенсаційного пристрою.

Запропоновані рекомендації використані при проектуванні та виробництві маломагнітних машин у ВАТ "Електромашина" (м. Харків), що забезпечило відповідність рівня їх ЗМП діючим вимогам. Випробування дослідного зразка МПС, створеного на базі генератора ММГ-6 у Відділенні магнетизму ІЕД НАНУ (м. Харків), на якому були застосовані розроблені засоби, підтвердили можливість досягти рівня перспективних вимог до ЗМП МПС.

5. Наукові та практичні результати, одержані в роботі, були поширені на інші класи електричних машин і технічні об'єкти. За участю здобувача були розроблені та виготовлені стенди технологічного контролю якості заливання короткозамкнених роторів асинхронних двигунів типу ДАВ-71 і КД-60, принцип дії яких ґрунтується на реєстрації зміни ЗМП ротору, що викликається електричною асиметрією обмотки. Стенди введено в експлуатацію на заводі "Електроважмаш" (м. Харків). Розвинутий в роботі спосіб статичного розмагнічування був реалізований у пристрої для розмагнічування труб, який впроваджено у промислове виробництво асоціацією "Харківнафтомаш" на підприємствах паливно-енергетичного комплексу.

6. Результати дисертаційної роботи рекомендовані для використання науковим і промисловим установам та організаціям, що займаються дослідженнями, розробкою та виготовленням електричних машин зі знизеним рівнем ЗМП.

7. Обґрунтована можливість використання параметрів ЗМП для технологічної та функціональної діагностики електричних машин. Показано, що наявність дипольної складової магнітної індукції в постійному ЗМП 4-полюсних машин та її зміна при експлуатації можуть бути діагности-



чною ознакою зношування підшипників, а у змінному ЗМП на частоті обертання - діагностичною ознакою вигину вала. По наявності в ЗМП електричної машини певних мультиполів відповідної частоти можна судити про рівень анізотропії сталі ротора та якість його виготовлення.

8. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджуються використанням коректних методів досліджень, узгодженням розрахунків з експериментальними даними та відомими з літературних джерел результатами, апробацією основних положень на наукових конференціях, результатами іспитів реальних машин із застосованими засобами зниження їх зовнішнього магнітного поля.

### ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Добродеев П.Н., Волохов С.А., Ивлева Л.Ф., Кильдишев А.В. Пространственный гармонический анализ внешнего магнитного поля технического объекта // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 1996. – № 2. – С. 3-9.

*Здобувачем був виконаний аналіз похибок вимірювань.*

2. Добродеев П.Н., Волохов С.А. Влияние динамического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле электрических машин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 1997. – № 3. – С.67-71.

*Здобувачем теоретично досліджено проявлення динамічного эксцентриситету в багатополюсних машинах.*

3. Добродеев П.Н., Волохов С.А., Кильдишев А.В. Влияние магнитной несимметрии статора на внешнее магнитное поле электрических машин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 1997. – № 4. – С. 48-52.

*Здобувач виконав чисельну оцінку рівня магнітного моменту від статичної нерівномірності зазору.*

4. Добродеев П.Н., Волохов С.А. Влияние анизотропии свойств стали ротора на внешнее магнитное поле электрических машин // Электротехника. - М., – 1997. – № 7. – С.39-43.

*Здобувачем досліджений вплив анізотропії гаряче- та холоднокатаних сталей на ЗМП МПС.*

5. Добродеев П.Н. Влияние токов в контурах соединений на внешнее магнитное поле электрических машин // Электротехника. -М.,-1997.-№ 8.- С.32-34.

6. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора асинхронного электродвигателя // Электротехника. - М., – 1998. - № 2. - С.13-15.

*Здобувач виконав розрахунки вимірювальних обмоток.*

7. Элкснис В.Я., Добродеев П.Н. Применение метода магнитных моментов к анализу внешнего магнитного поля машин постоянного тока // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1998. - Вып. 23. - С. 120-123.

*Здобувачем проведений аналіз схеми заміщення джерел ЗМП МПС.*

8. Добродеев П.Н. Внешнее магнитное поле машин постоянного тока // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2002. -Темат. Вип.: Проблеми сучасної електротехніки.– Ч. 3. – С. 7-10.

9. Волохов С.А., Добродеев П.Н. Проявление статического эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле электрических машин // Электротехника. - М., – 2002. –№ 11. – С. 28-32.

*Здобувачу належить аналіз впливу статичного эксцентриситету ротора на ЗМП машин постійного струму різної полюсності.*

10. Добродеев П.М., Волохов С.О. Вплив магнітного гістерезису в електричних машинах на їх зовнішнє магнітне поле // "Електромеханіка. Теорія і практика". Праці конференції з міжнародною участю. – Львів: ДУ “Львівська політехніка”. – 1996. – С. 30-32.

*Здобувачем досліджений і обґрунтований зворотний хід петлі гістерезису.*

11. П. Добродеев. Измерение параметров дипольно-квадрупольной модели источника магнитного поля "точечными" датчиками // Праці 2-ої МНТК "Метрологічне забезпечення в галузі електричних, магнітних та радіовимірювань (Метрологія в електроніці – 97)". – Харків: 1997. – Т. 1. – С. 200-202.

12. Пат. 28317А Україна, МКИ G 01 R 33/02. Пристрій для вимірювання магнітних моментів технічних об'єктів / С.О. Волохов, О.В. Кільдішев, П.М. Добродеев, Л.Ф. Івлева. – № 96062255 Заявл. 07.06.96; Опубл. 16.10.2000; Бюл. №5-II. – 5с.

*Здобувач обґрунтував доцільність двох витків у конструкції вимірювального контуру.*

## АНОТАЦІЇ

Добродеев П.М. “Підвищення ефективності методів зниження зовнішнього магнітного поля електричних машин постійного струму” - рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - електричні машини та апарати. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2004 р.

Дисертація присвячена дослідженню машин постійного струму як джерела зовнішнього магнітного поля та розвитку методів його зниження для вирішення проблем електромагнітної сумісності, магнітного захисту та екології. В роботі проведені виміри постійного, змінного та залишкового зовнішнього магнітного поля машин різної полюсності та швидкості обертання, встановлені закономірності їх просторового розподілу. Показано, що незалежно від полюсності реальні машини мають дипольні магнітні моменти, які і обумовлюють їх зовнішнє магнітне поле на “далеких” (що більш ніж вдвічі перевищують максимальний габаритний розмір) відстанях. Встановлено залежності магнітних моментів машин від різного роду електричних та магнітних асиметрій: постійного та залишкового - від асиметрій статора, змінного - від асиметрій статора та якоря. Це до-

зволило розробити науково обґрунтовані рекомендації по конструюванню та виробництву машин з низьким рівнем їх зовнішнього магнітного поля, а також вискоефективні засоби його зниження. Зроблено висновок про можливість використання параметрів зовнішнього магнітного поля для оцінки якості виготовлення та діагностики технічного стану машин. Результати роботи використані при виробництві маломагнітних машин постійного струму, діагностиці якості виготовлення роторів, розмагнічуванні магістральних трубопроводів.

Ключові слова: машина постійного струму, зовнішнє магнітне поле, асиметрія, магнітний момент, засоби зниження, ефективність, симетрування, розмагнічування, екранування, компенсація.

Добродеев П.Н. “Повышение эффективности методов снижения внешнего магнитного поля электрических машин постоянного тока” - 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, 2004г.

Диссертация посвящена исследованию машин постоянного тока (МПТ) как источника внешнего магнитного поля (ВМП) и развитию методов его снижения для решения проблем электромагнитной совместимости, магнитной защиты и экологии, что имеет важное значение на флоте, особенно для геомагнитных судов и минных тральщиков. Проведенный анализ предъявляемых к МПТ требований по маломагнитности показал, что этим требованиям не в полной мере удовлетворяют даже те машины, на которых приняты специальные меры по снижению их ВМП. Поэтому соискателем были поставлены задачи, решения которых направлены на повышение эффективности методов снижения ВМП МПТ для гарантированного удовлетворения действующим и перспективным требованиям.

В работе проведены измерения ВМП нескольких типов МПТ различной мощности, полюсности и скорости вращения, установлены закономерности пространственного распределения их ВМП. Показано, что вне зависимости от полюсности МПТ обладают произвольно ориентированными в пространстве постоянным, переменным и остаточным магнитными моментами, определяющими ВМП машины на “далеких” (превышающих более чем в 2 раза ее максимальный габаритный размер) расстояниях.

Для анализа ВМП МПТ был применен метод магнитных моментов, предполагающий замену реальных источников ВМП системой магнитных моментов катушек с током и участков магнитопровода. *P*-полюсная симметрия системы магнитных моментов нарушается в результате наличия асимметрий, приводящих к возникновению двухполюсных систем.

Проведена классификация асимметрий активного ядра МПТ, основными звеньями которой являются электрические и магнитные асимметрии статора и якоря. Установлены связи магнитных моментов машин с различного рода асимметриями: постоянного и остаточного - с асимметриями статора, переменного - с асимметриями статора и якоря. Это позволило разработать научно обоснованные рекомендации по конструированию и производству машин с низким уровнем их ВМП, а также высокоэффективные средства снижения ВМП. Практика снижения ВМП электрических машин показала, что наиболее целесообразным путем достижения установленных требований является поэтапное применение различных методов и средств снижения от простых к сложным с оценкой достигнутого результата на каждом этапе. Конструктивно-технологические мероприятия систематизированы и представлены в виде правил, которыми необходимо руководствоваться при создании машины для снижения ее ВМП за счет целенаправленного выбора электромагнитных нагрузок и исполнения традиционных элементов конструкции при проектировании и производстве. Разработана конструкция безмоментного соединения элементов якорной цепи и щеточного аппарата с эффективностью порядка 4. Предложено магнитное симметрирование как метод снижения ВМП электрических машин путем применения ферромагнитных прокладок под главными полюсами и замены части ферромагнитных болтов, крепящих полюса на немагнитные. Предложен способ статического размагничивания, позволяющий ликвидировать остаточную намагниченность после отключения машины. Эффективность способа составляет около 10. Разработано компенсационное устройство, обладающее гистерезисными свойствами своего ВМП, аналогичными машине. Устройство содержит компенсационные обмотки и источник их питания. Модель гистерезисного компенсационного устройства была испытана на генераторе ММГ-6, эффективность его составила 10.

Исследования проявлений асимметрий активного ядра МПТ в ее ВМП позволили сделать вывод о возможности использования параметров ВМП для оценки качества изготовления и диагностики технического состояния машин. В частности, наличие дипольной составляющей индукции в постоянном ВМП токов 4-полюсных электрических машин и ее изменение в процессе эксплуатации может служить диагностическим признаком износа подшипников. А наличие диполя в переменном ВМП 4-полюсных машин и его изменение в процессе эксплуатации может служить диагностическим признаком изгиба вала. По наличию в ВМП электрических машин определенных мультиполей соответствующей частоты можно судить об уровне анизотропии стали ротора и качестве его изготовления.

Результаты работы были использованы при проектировании и производстве маломощных МПТ, а также распространены на другие классы машин и технические объекты. В частности, исследование влияния качества заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей на их ВМП завершилось изготовлением стендов контроля качества заливки роторов двигателей для бытовой

техники. А предложенный в работе способ статического размагничивания был реализован в серийно выпускаемом устройстве для размагничивания труб магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: машина постоянного тока, внешнее магнитное поле, асимметрия, магнитный момент, средства снижения, эффективность, симметрирование, размагничивание, экранирование, компенсация.

Dobrodeyev P.N. “Increasing the efficacy of methods to the mitigation of external magnetic fields in DC machines” - manuscript. Thesis for a scientific degree of the candidate of technical science, speciality 05.09.01 - electrical machines and devices. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2004.

The thesis is devoted to research of the DC machines as source of an external magnetic field, and the methods development of its reduction for decision of the problems of electromagnetic compatibility, magnetic protection and ecology. The measurements of the permanent, variable and residual external magnetic field of actual DC machines with various numbers of poles and rotation rate were made, the regularity of their spatial distribution were fixed. It is shown, that out of dependence from number of poles the real machines have dipole magnetic moments, which determine external magnetic field of a machine on "far" (exceeding more than twice its maximal overall dimension) distances. The magnetic moments dependence of machines on a various kind of electrical and magnetic asymmetries were revealed: permanent and residual magnetic moments - on stator asymmetries, the variable magnetic moment - on stator and anchor asymmetries. It has allowed developing the scientifically reasonable recommendations for designing and production of machines with a low level of their external magnetic field, and also high-performance means of its reduction. The conclusion about possibility of using the parameters of external magnetic field for evaluation the quality of manufacturing and diagnostics the technical condition of machines is drawn. The outcomes of work were used at designing and manufacture of DC machines with a low level of their external magnetic field, diagnostics the quality of rotors, demagnetization of arterial pipelines.

Key words: the DC machine, the external magnetic field, asymmetry, the magnetic moment, means of reduction, efficiency, symmetrizing, demagnetization, shielding, compensation.

Відповідальний за випуск

к.т.н., с.н.с. Волохов С.О.

---

Підписано до друку 04.03.2005 р.

Формат видання 145x215, формат паперу 60x90/16.

Обсяг 0,9 авторських аркуша. Тираж 100 прим. Зам. №

---

Надруковано в ККЦ "МіФ"

61022 м. Харків, пр. Правди, 17