

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Крюкова Наталія Валеріївна

УДК 621.314.632:621.3.013

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ
ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ТРИФАЗНОГО РОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ
МЕТОДОМ СИМЕТРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Данько Володимир Григорович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри загальної електротехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сосков Анатолій Георгійович,
Харківська національна академія
міського господарства,
завідувач кафедри теоретичної та
загальної електротехніки

кандидат технічних наук, доцент
Жорняк Людмила Борисівна,
Запорізький національний технічний університет,
доцент кафедри електричних апаратів

Захист відбудеться 17.06.2010 р. о 12 год 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 07.05.2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні низьковольтні розподільні пристрої укомплектовані приладами як сильнотрумової, так і слабкострумової електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Для надійної роботи цих розподільних пристроїв потребується забезпечення електромагнітної сумісності зі слабкострумовими системами управління, захисту та контролю, що представляє собою складну технічну задачу.

Для забезпечення вимог електромагнітної сумісності використовують різноманітні методи зниження зовнішнього магнітного поля розподільного пристрою, у тому числі автоматичну компенсацію. Автоматична компенсація зовнішнього магнітного поля здійснюється за допомогою систем автоматичної компенсації. Значний вклад у розвиток теорії та практичного використання параметричних систем автоматичної компенсації було внесено наступними дослідниками: Розов В.Ю., Волохов С.О., Пілюгіна О.Ю., Машньов А.Є., Рудас Ю.Д., Устименко Л.Ю., Добродєєв П.М., Лушків В.С., Клименко Б.В., Сотніков В.В., Дегтярьов В.В., Щерба А.А., Ткачук В.І. та іншими.

Актуальність питання пов'язана з необхідністю зниження зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою для вирішення проблеми електромагнітної сумісності з магніточутливими елементами систем контролю, керування, моніторингу, що розташовані поблизу, а також проблеми екологічної безпеки персоналу, що його обслуговує. Сучасні вимоги ДСТУ в Україні по обмеженню ЗМП складають величину поля 110 мкТл; в той же час в закордонних джерелах ці рівні повинні бути значно нижче, наприклад, в Швеції – 1 мкТл, за даними в Англії рівні більше 0,4 мкТл є причиною дитячої лейкемії.

Таким чином, урахування впливу порядку чергування фаз живлення на величину зовнішнього магнітного поля трифазних розподільних пристроїв та зменшення цього впливу шляхом симетрування конструкції є актуальною науково-практичною задачею, що і визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі загальної електротехніки НТУ "ХП". Дослідження проводились у відповідності з науково-дослідними держбюджетними НДР МОН України: "Теорія об'єднаних дипольних структур в задачах компенсації магнітного поля електроенергетичних структур" (ДР № 0103V001508); "Вплив рамкових конструкцій на основні електромагнітні і енергетичні характеристики електроенергетичного обладнання" (ДР № 0106V001485); "Розвиток теорії компенсації зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів. Аналіз джерел магнітного поля струмів електротехнічних комплексів та методів та засобів його зниження" (шифр "Симетрія") (ДР №0106U000375); "Розвиток теорії компенсації зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів. Розвиток методів компенсації зовнішнього магнітного поля струмів електротехнічних комплексів" (шифр "Симетрія-1") (ДР №0107U000166), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності компенсації зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою. Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі були поставлені наступні завдання:

- аналіз особливостей зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою та удосконалення математичної моделі розподільного пристрою як джерела зовнішнього магнітного поля при змінному порядку чергування фаз живлення;
- розробка структурних схем параметричних систем автоматичної компенсації магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою з урахуванням порядку чергування фаз живлення;
- розробка рекомендацій на проектування трифазних розподільних пристроїв з урахуванням порядку чергування фаз живлення;
- експериментальне підтвердження впливу чергування фаз струмів живлення на магнітний момент трифазного розподільного пристрою.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси у трифазному розподільному пристрої.

Предмет дослідження – змінне зовнішнє магнітне поле, що виникає при роботі трифазного розподільного пристрою.

Методи дослідження – теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії магнітного поля. Для розрахунків струмів та магнітних моментів використано методи структурного аналізу електричних кіл. При експериментальних дослідженнях використано методи вимірювання напруженості зовнішнього магнітного поля та магнітного моменту трифазного розподільного пристрою.

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалена математична модель трифазного розподільного пристрою як джерела зовнішнього магнітного поля; магнітний момент представлений як функція параметрів, залежних від порядку чергування фаз живлення трифазного розподільного пристрою;
- теоретично обґрунтована залежність величини магнітного поля трифазного розподільного пристрою від порядку чергування фаз живлення, тобто наявність магнітофазного ефекту;
- запропоновано метод кусково-ортогональної апроксимації для розрахунку коефіцієнтів взаємної індуктивності, струмів та магнітних моментів рамкової конструкції трифазного розподільного пристрою;
- розроблені структурні схеми параметричних систем автоматичної компенсації з датчиком порядку чергування фаз живлення;
- експериментально підтверджена залежність магнітного моменту від порядку чергування фаз живлення трифазного розподільного пристрою, тобто магнітофазний ефект з урахуванням припущення застосування у конструкції трифазного розподільного пристрою немагнітних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів для електротехнічної галузі полягає у наступному:

- розроблено методіку аналізу струмів та магнітного моменту трифазного розподільного пристрою з урахуванням просторової рамкової конструкції для оцінки величини зовнішнього магнітного поля на етапі проектування;
- розроблено удосконалену систему автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою з датчиком порядку чергування фаз живлення, що застосовується, наприклад, для корабельного устаткування;
- запропоновано спосіб компенсації змінного магнітного поля трифазного розподільного пристрою в заданій точці простору, що підвищує точність налагодження параметричних систем автоматичної компенсації;
- розроблено рекомендації по симетруванню конструкції трифазного розподільного пристрою, виконання яких забезпечує підвищення ефективності компенсації зовнішнього магнітного поля;
- результати і рекомендації, отримані в дисертації, застосовані в наукових розробках НТЦ магнетизму технічних об'єктів НАН України (м. Харків); розроблена система автоматичної компенсації впроваджена при розробці шаф напівпровідникових перетворювачів у ВАТ "Запорізький завод "Перетворювач";

Результати дисертації використовуються у навчальному процесі кафедри електричних апаратів НТУ "ХП" у лекційному курсі та дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації розроблені здобувачем особисто, серед них:

- запропоновано співвідношення для магнітних моментів джерел зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою, що враховують порядок чергування фаз живлення;
- виготовлено експериментальний зразок системи трифазних шинопроводів з пасивним струмоведучим контуром;

- проведено експериментальне дослідження виготовленого зразка системи трифазних шинопроводів з пасивним струмоведучим контуром;
 - розроблено структурні схеми систем автоматичної компенсації магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою;
 - отримано аналітичні співвідношення для розрахунку коефіцієнтів взаємної індуктивності елементів струмопроводів силового кола та елементів рамкової конструкції довільно розташованих у просторі;
 - розроблено метод кусково-ортогональної апроксимації криволінійних просторових електропровідних контурів силового кола та рамкової конструкції;
- запропоновано класифікацію асиметрій, що впливають на величину зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою;
- розроблено перелік рекомендацій щодо симетрування конструкції трифазного розподільного пристрою з метою зменшення його зовнішнього магнітного поля.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації обговорювалися і докладалися на: Міжнародних симпозиумах "Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA" (м. Харків, 2002 р., 2004 р., 2005 р., 2008 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я." (м. Харків, 2002 р., 2004 – 2007 рр.); Всеукраїнській науково-методологічній конференції "Проблеми та зміст фундаментальної освіти сучасного інженера, (м. Харків, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції "Электромеханические преобразователи энергии" (м. Томськ, 2005); науково-технічних нарадах на кафедрі загальної електротехніки НТУ "ХП" та Наукового технічного центру магнетизму технічних об'єктів (м. Харків).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 12 друкованих роботах, з яких 9 статей у фахових виданнях ВАК України, 1 патент України та 1 позитивне рішення на винахід.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 165 сторінок, з них: 57 ілюстрацій по тексту, 26 ілюстрацій на окремих 22 сторінках; 2 таблиці по тексту; 4 додатків на 5 сторінках; список використаних джерел із 104 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, зазначено зв'язок дисертації з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета і задачі досліджень, показано наукова новизна та практична цінність одержаних результатів.

У першому розділі проведено аналіз діючих нормативних документів з електромагнітної сумісності у частині магнітного поля, методів компенсації зовнішнього магнітного поля (ЗМП), математичних моделей ЗМП, приведено результати експериментальних досліджень впливу зміни чергування фаз на рівень ЗМП.

Показано що, головними джерелами магнітного поля є ЗМП контурів зі струмом та ЗМП намагнічених феромагнітних деталей конструкції електрообладнання, у тому числі розподільних пристроїв (РП).

В останні роки в електротехнічній галузі виконується безліч проектів, що дозволяють забезпечити зниження рівня ЗМП до 1 мкТл (так званий "sub-microtesla level"). Забезпечення такого низького рівня поля досягається в місцях тривалого перебування людини (будівлі, офіси, дитячі заклади, школи, бібліотеки); в місцях розташування електрообладнання, елементи якого можуть реагувати на рівень ЗМП (sensitive equipment): трансформаторні станції, кораблі, космічні станції, телевізійні студії. Наведено той факт, що магнітні поля рівня більш 0,4 мкТл є причиною дитячої лейкемії.

Експериментальні дослідження різноманітних видів електрообладнання (асинхронних двигунів, силових кабелів, напівпровідникових перетворювачів, трансформаторів, розподільних пристроїв) довели зміну ЗМП при прямому та зворотньому порядку чергування

фаз (ПЧФ). Дослідниками з різних країн світу отримані незалежні результати зміни рівня ЗМП при зміні ПЧФ живлення у 2–3 рази.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що для підвищення ефективності компенсації ЗМП РП необхідно урахування ПЧФ РП, а саме:

- удосконалення об'єднаної дипольної моделі ЗМП РП шляхом введення нового фактора – порядку чергування фаз;
- розробка методики розрахунку магнітного моменту (ММ) струмів РП;
- розробка нової структури систем автоматичної компенсації (САК);
- розробка рекомендацій щодо конструкції РП.

У другому розділі запропоновано класифікація основних видів асиметрій РП, що впливають на рівень його ЗМП. До таких асиметрій віднесені: геометрична, електрична, магнітна, конструктивна, управління, живлення, позиційна, схемна, технологічна.

Приклади конструктивних та геометричних асиметрій для типового РП показано на рис. 1. Конструктивна асиметрія пов'язана з конструкцією трифазного РП. Геометрична асиметрія обумовлена відхиленнями розмірів від номінальних. Електрична асиметрія пов'язана з відхиленнями амплітуд та фаз трифазного РП. Магнітна асиметрія обумовлена магнітними властивостями електромагнітних систем. Асиметрії управління та живлення характеризують неоднорідність формування струмів живлення генеруючими пристроями. Позиційна асиметрія – залежність поля магнітних мас РП при зміні розташування відносно магнітного поля Землі. Схемна асиметрія пов'язана з електричною схемою силового кола РП. Технологічна асиметрія проявляється в різниці параметрів РП, що з'являються завдяки відмінностям у технології виготовлення.

В роботі введено поняття магнітофазного ефекту як залежності величини магнітного поля від ПЧФ живлення трифазного РП. Для теоретичного дослідження магнітофазного ефекту використано спрощену фізичну модель РП, яка представлена плоскою трифазною системою струмопроводів (шинопроводів) та магнітозв'язаним контуром квадратної форми (рамкою), що асиметрично розташована в паралельній площині. Крайові шинопроводи утворюють два прямокутні контури з середньою шиною (рис. 2); перший контур утворено відрізками I та II шинопроводу, другий контур утворено відрізками II та III шинопроводу; рамка розташована поблизу першого контуру. Струми живлення трифазної системи шинопроводів позначаються як $i_1(t)$, $i_2(t)$ та $i_3(t)$, а струм рамки – $i_0(t)$. Всі струми живлення являються синусоїдальними та мають кут зсуву 120 ел. град. Коефіцієнти взаємних індуктивностей рамки та двох контурів позначено L_{10} та L_{20} . Розташування фізичної моделі у системі прямокутних координат x , y , z показано на рис. 2,а. Фізична модель РП характеризується трьома векторами: ММ першого $m_1(t)$ та другого $m_2(t)$ незалежних контурів і ММ рамки $m_L(t)$. На рис. 2,б показано розташування цих векторів в центрах відповідних контурів. Магнітні моменти фізичної моделі РП мають по одній просторовій компоненті.

Струми шинопроводів створюють бігуче магнітне поле у напрямку упоперек шин і цей напрямок змінюється при зміні ПЧФ. Внаслідок цього змінюється на протилежну фаза ЕРС та струму, що наводяться в рамці.

На комплексній площині $(1, j)$ побудовано: комплексні амплітуди струму рамки I_0 , I'_0 ; комплексні амплітуди струму першого контуру при прямому та зворотньому ПЧФ I_1 , I'_1 ; кути між струмом рамки та струмом першого контуру при прямому та зворотньому ПЧФ β , β' ; комплексні амплітуди ЕРС рамки при прямому та зворотньому ПЧФ E_0 , E'_0 (рис. 3).

Векторні діаграми ММ (рис. 4) побудовано для систем обертових векторів, напрямку обертання яких відповідає кутовій швидкості (циклічній частоті) $+\omega$ – для прямого та $-\omega$ – для зворотнього ПЧФ: комплексні амплітуди компоненти ММ рамки при прямому та зворотньому ПЧФ M_{0z} , M'_{0z} ; комплексні амплітуди компоненти ММ першого контуру при прямому та зворотньому ПЧФ M_{1z} , M'_{1z} ; комплексні амплітуди компоненти ММ другого контуру при прямому та зворотньому ПЧФ M_{2z} , M'_{2z} ; результуючі ММ контурів силового

кола \underline{M}_z , \underline{M}'_z . На обох векторних діаграмах початкова фаза відповідає моменту першого контуру при прямому та зворотньому ПЧФ. Аналіз векторних діаграм показує, що результуючі ММ першого та другого контурів не змінюються за величиною та напрямком, а ММ рамки змінює значення фази на протилежне. З урахуванням цього сумарні ММ фізичної моделі при прямому та зворотньому ПЧФ відрізняються за величиною.

Векторні діаграми сумарних ММ $\underline{M}_{\Sigma z}$, $\underline{M}'_{\Sigma z}$ та їх складових при прямому та зворотньому ПЧФ для моменту часу, коли ММ першого контуру направлений вздовж дійсної осі, наведено на рис. 5. На векторних діаграмах рис. 5 видно, що сумарні ММ є різними діагоналями рівних паралелограмів і тому відрізняються по величині; сторонами паралелограму P є результуючі ММ силового кола та рамки.

Сумарні ММ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\underline{M}_{\Sigma z} &= \underline{M}_{0z} + (\underline{M}_{1z} + \underline{M}_{2z}) = \underline{M}_{0z} + \underline{M}_z, \\ \underline{M}'_{\Sigma z} &= \underline{M}'_{0z} + (\underline{M}'_{1z} + \underline{M}'_{2z}) = \underline{M}'_{0z} + \underline{M}'_z = -\underline{M}_{0z} + \underline{M}_z.\end{aligned}\quad (1)$$

У співвідношеннях (1) новим є урахування складової ММ рамкової конструкції.

При симетричному розташуванні рамкової конструкції відносно шинопроводів силового кола в рамці наводяться ЕРС як струмом першого, так і струмом другого контурів; ці складові ЕРС створюють складові струми і відповідні складові ММ рамки ($\underline{M}_{0z} = \underline{M}_{01z} + \underline{M}_{02z}$). При цьому сумарні складові векторів ММ трифазного шинопроводу \underline{M}_z та рамки \underline{M}_{0z} на діаграмі розташовуються під прямим кутом, тобто паралелограм перетворюється в прямокутник (рис. 5, в).

При зміні ПЧФ результуючий вектор ММ рамки \underline{M}'_{0z} змінює напрямок відносно вектору \underline{M}_{0z} , не змінюючи своєї амплітуди. Внаслідок цього результуючі вектори ММ при прямому та зворотньому ПЧФ стають рівними за амплітудою $M_{yz} = M'_{yz}$, тобто магнітофазний ефект зникає. Цей висновок відкриває можливість усунення негативних наслідків магнітофазного ефекту шляхом симетрування розташування елементів рамкової конструкції відносно системи трифазних шинопроводів.

Отримані результати якісного аналізу фізичної моделі для однокомпонентних ММ дійсні для тривимірних векторів ММ РП внаслідок лінійності моделі.

Розроблено методику розрахунку струмів та ММ РП з урахуванням рамкової конструкції, яка включає в себе:

1. Складання схеми заміщення силового кола та рамкової конструкції.

4.2. Вибір системи незалежних контурів силового кола та визначення напрямку струму в них.

4.3. Визначення напрямків складових ЕРС взаємної індукції для кожної гілки рамкової конструкції.

4.4. Визначення повної ЕРС для кожної гілки рамкової конструкції.

4.5. Вибір системи незалежних контурів схеми заміщення рамкової конструкції та задання напрямку їх обходу.

4.6. Визначення повних опорів гілок рамкової конструкції.

4.7. Визначення струмів незалежних контурів рамкової конструкції.

4.8. Визначення косинусних та синусних складових струмів контурів рамкової конструкції.

4.9. Розрахунок значень компонент векторів площин рамкової конструкції для кожного з напрямків x , y , z .

4.10. Розрахунок косинусних та синусних складових компонент ММ трифазного РП.

4.11. Визначення повного ММ трифазного РП.

В запропонованій методиці використовується розкладання струмів та компонент ММ на косинусні та синусні складові, що спрощує операції над ними при визначенні максимального ММ. Спрощення полягає у тому, що система багатофазних векторів ММ джерел поля

РП зводиться до двох просторових векторів, що змінюються у часі за синусоїдальними та косинусоїдальними законами.

Визначення ЕРС в контурах рамкової конструкції виконується шляхом кусково-ортогональної апроксимації. Рамкова конструкція розглядається як сукупність електропровідних елементів (перегородки, стійки, плоскі панелі та інші, що утворюють електропровідні контури, ізольовані від струмопроводів силового кола трифазного РП). Запропонована апроксимація полягає у заміні криволінійних контурів силового кола та рамкової конструкції системами ортогональних прямолінійних відрізків. Розрахунок ЕРС при цьому спрощується, тому що враховуються тільки паралельні відрізки. З розрахунків виключаються усі взаємоперпендикулярні відрізки силового кола та рамкової конструкції. Апроксимація дозволяє однозначно визначити напрям всіх складових, що наводяться в елементах рамкової конструкції, та визначити величину ЕРС в контурі рамкової конструкції шляхом підсумовування складових ЕРС ділянок з урахуванням знаків.

За результатами досліджень в роботі запропоновано удосконалену математичну модель ЗМП трифазного РП:

$$\begin{cases} \underline{H}_{rc} = A_d \underline{M}_{rc}, \\ \underline{H}_{rs} = A_d \underline{M}_{rs}, \\ \underline{H}_{ic} = A_d \underline{M}_{ic}, \\ \underline{H}_{is} = A_d \underline{M}_{is}, \\ \underline{M}_{rc} = \underline{M}_{rc}(\underline{I}_{r1}, \dots, \underline{I}_{rK}), \\ \underline{M}_{rs} = \underline{M}_{rs}(\underline{I}_{r1}, \dots, \underline{I}_{rK}), \\ \underline{M}_{ic} = \underline{M}_{ic}(\underline{I}_{i1}, \dots, \underline{I}_{iK}), \\ \underline{M}_{is} = \underline{M}_{is}(\underline{I}_{i1}, \dots, \underline{I}_{iK}), \end{cases} \quad (2)$$

де $\underline{H}_{rc}, \underline{H}_{rs}, \underline{H}_{ic}, \underline{H}_{is}$ – косинусні (індекс r) та синусні (індекс i) вектори-стовпці компонент напруженості магнітного поля, що утворюються РП при прямому (індекс r) та зворотньому (індекс i) ПЧФ, комплексні величини яких формуються відносно базовій фази на множині P точок спостереження; A_d – приведена матриця плану на множині цих точок; $\underline{M}_{rc}, \underline{M}_{rs}, \underline{M}_{ic}, \underline{M}_{is}$ – косинусні та синусні вектори-стовпці складових компонент ММ незалежних контурів для двох ПЧФ; K – множина контурів, складена з незалежних контурів силового кола та рамкової конструкції РП; $\underline{I}_{r1}, \dots, \underline{I}_{rK}, \underline{I}_{i1}, \dots, \underline{I}_{iK}$ – комплексні величини струмів незалежних контурів силового кола РП для двох ПЧФ.

Удосконалення математичної моделі ЗМП РП отримано за рахунок введення параметрів, що враховують ПЧФ струмів живлення. Такими параметрами є набори косинусних та синусних складових ММ незалежних контурів.

У **третьому розділі** проведена розробка структурних схем параметричних САК магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля трифазного РП з урахуванням ПЧФ живлення за рахунок використання датчику чергування фаз живлення. Структурна схема параметричної САК ММ трифазного РП з несинусоїдальними струмами приведена на рис. 6.

До складу структурної схеми (рис. 6) входять такі елементи: датчик струму ДС; універсальний пристрій компенсації УПК; основний блок регулювання БРО; пристрій ортогонального розкладення ПОР; додатковий блок регулювання БРД; підсилювач з регулюючим коефіцієнтом передачі П; перемикач полярності ПП; суматор С; керований комутатор каналів К; блок компенсації (БК); джерело живлення ДЖ; електромагніт компенсатор ЕК; x, y, z – канали регулювання; датчик порядку чергування фаз ДПЧФ; аналого-цифровий перетворювач АЦП.

На основі моделі (2) отримано умови компенсації компонент ММ трифазного РП, що є базою для синтезу структури САК:

$$\begin{aligned} M_{rcu} &= -M'_{rcu}, & M_{rsu} &= -M'_{rsu}, \\ M_{icu} &= -M'_{icu}, & M_{isu} &= -M'_{isu}, \quad (u = x, y, z), \end{aligned} \quad (3)$$

де $M_{rcu}, M_{rsu}, M_{icu}, M_{isu}$ – складові u -тої компоненти ММ РП, що створюються для прямого (індекс r) та зворотнього (індекс i) ПЧФ косинусними (індекс c) та синусними (індекс s) складовими струмів живлення силового кола та рамкової конструкції.

На підставі (3) отримані співвідношення для струмів ЕК САК:

$$\begin{aligned} I'_{rcu} &= p \sum_{k=1}^K \frac{I_{kc}}{p} \alpha_{kcu}, & I'_{rsu} &= p \sum_{k=1}^K \frac{I_{ks}}{p} \alpha_{ksu}, \\ I'_{icu} &= p \sum_{k=1}^K \frac{I_{kc}}{p} \alpha_{kcu}, & I'_{isu} &= p \sum_{k=1}^K \frac{I_{ks}}{p} \alpha_{ksu}, \quad (u = x, y, z), \end{aligned} \quad (4)$$

де p – масштабний коефіцієнт перетворення датчиків та трансформаторів струму; b_{kcu}, b_{ksu} – коефіцієнти перетворення складових струмів.

Коефіцієнти b_{kcu}, b_{ksu} є параметрами регулювання САК і для забезпечення повної компенсації вони повинні відповідати співвідношенням:

$$\alpha_{kcu} = -\sum_{k=1}^K \frac{S_{ku}}{S_{cu}} I_{kc}, \quad \alpha_{ksu} = -\sum_{k=1}^K \frac{S_{ku}}{S_{su}} I_{ks}, \quad (5)$$

де S_{cu}, S_{su} – проекції на напрямок u повних векторів площин обмоток ЕК, що застосовуються для компенсації косинусних і синусних складових ММ.

Налагодження електромагнітів компенсаторів САК ММ проводиться окремо при живленні струмом кожного з незалежних контурів. Для стендового настроювання САК ММ зроблено засіб, в якому підбір коефіцієнтів підсилювачів робиться для прямого та зворотнього ПЧФ живлення. Для САК ММ з несинусоїдальними струмами підбір коефіцієнтів підсилювачів проводиться для всіх вибраних частот.

Розроблено структури САК, використання яких забезпечує ефективну компенсацію ММ та ЗМП РП незалежно від ПЧФ.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують вплив ПЧФ струмів живлення на величину ММ трифазного РП, тобто магнітофазного ефекту, а також експериментальне визначення ефективності САК при компенсації ММ струмів перетворювача типу ТПС 1000-320.

Проведено експерименти, що підтверджують зміну фази наведеного у рамковій конструкції струму на 180 ел. град. при зміні ПЧФ живлення. Електричні схеми включення трансформаторів струму ТТ1 і ТТ2 для вимірювання струму одного контуру шинопроводу та струму рамки наведено на рис. 7, а осцилограми відповідних струмів – на рис. 8.

Для експериментального підтвердження магнітофазного ефекту проведено ряд вимірів ММ для симетричного та асиметричного розташування рамки відносно шинопроводу фізичної моделі. Зміна ПЧФ здійснювалася за допомогою магнітного пускача МП. Було розглянуто три варіанти розташування рамки Р та шинопроводу Ш (рис. 9): варіант 1 – симетричне розташування, центри Р і Ш відповідно 0 та 0_c розміщені на осі z ; варіант 2 – асиметричне розташування, при якому центр Р має додатковий зсув по осі y в точку 0_a ; варіант 3 – асиметричне ромбовидне розташування, при якому Р повернено на кут 45^0 відносно осі z , а центр розміщений в точці 0_a .

Гістограми ММ для цих трьох варіантів розташування Р і Ш побудовано на рис. 10 з урахуванням величини струму $I = 50, 70, 90$ А та ПЧФ. Для варіанту 1 значення ММ для прямого та зворотнього ПЧФ практично не відрізняються.

У всіх інших випадках несиметричного розташування (варіанти 2 та 3) значення ММ помітно відрізняються між собою. Чисельний розрахунок теж показав співпадіння значень ММ для

симетричного варіанту та різницю в 1,25 разів для несиметричних варіантів при струмі живлення 90 А.

Експериментальні дослідження САК ММ несинусоїдальних струмів проведено у складі шафи напівпровідникового перетворювача типу ТПС 1000-320. Загальний вигляд універсального пристрою компенсації приведено на рис. 11.

Ефективність зниження основних гармонік ММ за допомогою розробленого пристрою компенсації характеризують діаграми на рис. 12. Амплітуди M_f гармонік ММ приведено у відносних одиницях, за базову вибрано основну гармоніку частоти живлення 50 Гц. Рівень вимог позначено M_c . Темні і світлі стовпці відповідають рівням амплітуд гармонік ММ з пристроєм компенсації та без нього.

Розроблено рекомендації на проектування трифазних РП з урахуванням ПЧФ живлення:

1. Застосування САК магнітного поля з датчиком ПЧФ для трифазного РП, до якого встановлюються вимоги щодо рівня ЗМП поблизу поверхні електроустановки.

4.2. Симетричне виконання рамкової конструкції шинопроводу.

4.3. Для РП, в яких є трифазні шинопроводи та вільний простір поблизу них, рекомендується багатократне розщеплення шинопроводу кожної фази та їх симетричне розташування.

4.4. В місцях болтових з'єднань розщепленого шинопроводу рекомендується вживання свинцевих прокладок, які вирівнюють опір шинопроводу.

Основні види запропонованих рекомендацій відображено на схемі трифазного РП на рис. 13.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично та експериментально обґрунтовано відмінність величин зовнішнього магнітного поля при зміні порядку чергування фаз живлення трифазного розподільного пристрою, удосконалено математичну модель трифазного розподільного пристрою як джерела зовнішнього магнітного поля та запропоновано структури систем автоматичної компенсації та рекомендації по симетруванню конструкції, що забезпечують виконання вимог електромагнітної сумісності в частині зовнішнього магнітного поля.

1. Існуюча тенденція збільшення струмів та рівня зовнішнього магнітного поля розподільного пристрою приводить до загострення проблеми електромагнітної сумісності з чутливими елементами автоматики та мікропроцесорної техніки та проблеми екологічної безпеки. Показано, що відомі засоби та технічні рішення не завжди забезпечують зниження зовнішнього магнітного поля, особливо у випадку, коли порядок чергування фаз живлення може змінюватися з прямого на зворотній, що підтверджено експериментально. Тому перспективною стає задача розробки технічних рішень, які забезпечують виконання вимог електромагнітної сумісності розподільних пристроїв з урахуванням порядку чергування фаз живлення.

4.2. Виконано аналіз особливостей зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою при різних порядках чергування фаз живлення, які впливають на величину зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою.

4.3. Удосконалено математичну модель трифазного розподільного пристрою як джерела зовнішнього магнітного поля, яка включає в себе параметри, що враховують порядок чергування фаз живлення.

4.4. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена залежність магнітного моменту системи шинопроводів з трифазними струмами від порядку чергування фаз живлення. Встановлено, що навіть при відсутності феромагнітних елементів рамкової конструкції трифазного розподільного пристрою, магнітний момент залежить від порядку чергування фаз живлення струмопроводів при їх асиметричному розташуванні відносно рамкової конструкції.

4.5. Розроблено структурні схеми параметричних систем автоматичної компенсації магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою з датчиком порядку чергування фаз живлення; струми електромагнітів компенсаторів системи автоматичної компенсації формуються в залежності від порядку чергування фаз. Реалізація систем дає можливість знизити магнітний момент у 100 разів, що підтверджено експериментально.

4.6. Запропоновано методику розрахунку струмів та магнітних моментів рамкової конструкції розподільного пристрою. Методика заснована на кусково-ортогональній апроксимації рамкової конструкції та криволінійних контурів силового кола розподільного пристрою, на багатократному розрахунку коефіцієнтів взаємних індуктивностей паралельних відрізків; розрахунку ЕРС, струмів незалежних контурів та магнітного моменту рамкової

Формат: Список

Формат: Список

конструкції. Методика дозволяє визначити магнітний момент всього трифазного розподільного пристрою з урахуванням рамкової конструкції.

7. Розширено перелік рекомендацій на проектування трифазних розподільних пристроїв, виконання яких дозволяє підвищити ефективність зниження їх зовнішнього магнітного поля для забезпечення існуючих та перспективних вимог електромагнітної сумісності. Суть рекомендацій полягає у симетруванні конструкції струмопроводів та рамкової конструкції, симетруванні магнітних моментів окремих джерел поля за допомогою феромагнітних елементів та використанні параметричних систем автоматичної компенсації, що враховують порядок чергування фаз живлення.

8. При проведенні експериментів на макеті зафіксовано величину відміни магнітних моментів при прямому та зворотньому порядку чергування фаз 25 %, а в реальних розподільних пристроях відміна сягає 200 – 300 %.

9. Достовірність основних положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи підтверджено використанням коректних методів досліджень, відповідністю даних теорії та експерименту, апробацією основних положень та результатів на наукових конференціях. Основні результати дисертаційної роботи впроваджені у НТЦ магнетизму технічних об'єктів НАН України, на ВАТ "Запорізький завод "Перетворювач" та у навчальному процесі в НТУ "ХПІ".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крюкова Н.В. Особенности расчета внешнего магнитного поля сложного кусочно-линейного контура с током / В.С. Лупиков, Н.В. Себякина, Н.В. Крюкова, С.В. Выровец // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. – 2002. – №8. – С. 169-178. *Здобувачем проведено дослідження особливостей вибору системи координат для розрахунку поля кусково-лінійних контурів.*

1.2. Крюкова Н.В. Анализ магнитного момента трехфазных цепей / Б.В. Клименко, В.С. Лупиков, С.В. Выровец, Н.В. Крюкова, О.А. Гелярская // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – №1. – С. 28-36. *Здобувачем зроблено теоретичне обґрунтування залежності магнітного моменту трифазного розподільного пристрою від порядку чергування фаз живлення.*

1.3. Крюкова Н.В. Анализ моделей магнитного поля электрооборудования при обеспечении электромагнитной совместимости / Б.В. Клименко, В.С. Лупиков, С.В. Выровец, В.Л. Емельянов, Н.В. Крюкова // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – №1 – С.41-48. *Здобувачем виконано аналіз інтегральних моделей зовнішнього магнітного поля та можливостей їх використання для рішення зворотньої задачі магнітостатики.*

1.4. Крюкова Н.В. Проблема компенсации внешнего магнитного поля электрооборудования с позиции теории симметрии / В.С. Лупиков, О.А. Гелярская, Н.В. Крюкова // Електромашинобудування та електрообладнання. – Київ. – 2004. – №63 – С. 99-103. *Здобувачем отримано аналітичне співвідношення умов компенсації зовнішнього магнітного поля з точки зору теорії симетрії.*

1.5. Крюкова Н.В. Система автоматической компенсации магнитного момента трехфазного электрооборудования / В.С. Лупиков, О.Ю. Пилогина, С.В. Петров, Н.В. Крюкова, О.А. Гелярская // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – №48. – С. 67-76. *Здобувачем виконані експериментальні дослідження системи автоматичної компенсації магнітного моменту трифазного електроустаткування.*

1.6. Крюкова Н.В. Методика определения магнитного момента рамочной конструкции электротехнического устройства / Н.В. Крюкова, О.А. Гелярская, В.Г. Данько, В.С. Лупиков, А.Г. Серeda // Електротехніка і Електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – №2 –

Формат: Список

С.81-86. *Здобувачем розроблено приблизний метод отримання магнітного моменту рамкової конструкції електромеханічного пристрою.*

~~4.7.~~ Крюкова Н.В. Переменный магнитный момент токов силовой цепи и рамочной конструкции распределительного устройства // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №24. – С. 43-47

~~4.8.~~ Крюкова Н.В. Усовершенствованная модель магнитного поля распределительного устройства // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №25. – С.38-44.

9. Крюкова Н.В. Экспериментальное подтверждение магнитофазного эффекта для трехфазного электрооборудования / В.С. Лупиков, Н.В. Крюкова, А.В. Гетьман, Ю.Д. Рудас, С.В. Петров, А.В. Ерисов, Л.Ф. Ивлева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №40. – С84-94. *Здобувачем виконано експериментальні дослідження трифазного розподільного пристрою.*

10. Пат. № 78069 Україна, МПК G01R 33/00. Спосіб автоматичної компенсації змінного магнітного поля розподільного пристрою в заданій точці / О.А. Геляровська, А.В. Єрисов, Н.В. Крюкова, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов № а 2005 00852. Дата подання заявки 31.01.2005; Дата публ. 15.02.2007, Бюл.№2 – 6с. *Здобувачем запропоновано розташування електромагнітів компенсаторів відносно точці компенсації зовнішнього магнітного поля.*

~~4.11.~~ Позитивне рішення на патент України МПК G01R 33/00. Спосіб і система автоматичної компенсації змінного магнітного моменту струмів трифазного електроустаткування/ Н.В. Крюкова, В.С. Лупіков, В.Г. Данько, О.А. Геляровська, О.Г. Серета, В.Ю. Розов, А.В. Єрисов – № а 2008 11597. – Заявлено 29.09.2008.

~~4.12.~~ Крюкова Н.В. Влияние рамочной конструкции электрооборудования на его внешнее магнитное поле / В.С. Лупиков, Н.В. Крюкова, О.А. Геляровская, И.С. Варшамова // Материалы международной науч.-техн. конф. "Электромеханические преобразователи энергии", Томск, Россия: –Томск: ТПУ. – 20-22 октября 2005. – С. 66-69. *Здобувачем сформульовано завдання, на основі яких пояснюється магнітофазний ефект.*

Формат: Список

АНОТАЦІЇ

Крюкова Н.В. Підвищення ефективності компенсації зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою методом симетрування конструкцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини й апарати. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2009.

У дисертації розв'язано актуальна задача підвищення ефективності компенсації зовнішнього магнітного поля трифазного розподільного пристрою методом симетрування конструкцій для забезпечення вимог електромагнітної сумісності та екологічної безпеки. Запропоновано рекомендації, що усувають вплив асиметрій.

У роботі обґрунтовано магнітофазний ефект – залежність величини магнітного поля від порядку чергування фаз живлення розподільного пристрою. Удосконалено математичну модель магнітного поля, розроблено нову методику розрахунку струмів та магнітних моментів трифазного розподільного пристрою, структурні схеми систем автоматичної компенсації магнітного поля трифазного розподільного пристрою з урахуванням порядку чергування фаз, використання яких підвищує ефективність компенсації у 100 разів.

Ключові слова: електричний апарат, методи проектування та конструювання, трифазний розподільний пристрій, порядок чергування фаз, зовнішнє магнітне поле, магнітний момент, параметрична система автоматичної компенсації.

Крюкова Н.В. Повышение эффективности компенсации внешнего магнитного поля трехфазного распределительного устройства методом симметрирования конструкции. – Рукопись.

Диссертация посвящена повышению эффективности снижения внешнего магнитного поля трехфазного распределительного устройства для обеспечения требований электромагнитной совместимости в части магнитного поля частоты сети. В диссертационной работе дана классификация видов асимметрий, встречающихся в трехфазных распределительных устройствах, и выделены основные асимметрии (геометрическая, магнитная и электрическая), влияющие на величину внешнего магнитного поля. Предложены рекомендации, устраняющие воздействия этих основных асимметрий.

В работе проведено теоретическое и экспериментальное обоснование магнитофазного эффекта – зависимости величины магнитного поля от порядка чередования фаз питания для магнитосвязанных контуров при отсутствии ферромагнитных элементов; дано его теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение. С учетом магнитофазного эффекта в работе предложена усовершенствованная математическая модель ВМП трехфазного РУ, в которой магнитные моменты представлены функциями, зависящими от порядка чередования фаз питания. С учетом магнитофазного эффекта предложен метод симметрирования рамочной конструкции относительно токопроводов силовой цепи.

Разработана новая методика расчета токов и магнитных моментов трехфазного распределительного устройства с учетом влияния его рамочной конструкции. В основу методики положена аппроксимация криволинейных контуров шинопроводов и рамочной конструкции с помощью кусочно-ортогональных отрезков, что позволило упростить расчет магнитного момента рамочной конструкции.

Разработаны структурные схемы систем автоматической компенсации магнитных моментов и магнитных полей для трехфазного распределительного устройства, в состав которых введен датчик порядка чередования фаз питания, который позволяет автоматически отслеживать порядок чередования фаз и формировать токи электромагнитов компенсаторов с учетом этого порядка. Реализация предложенных систем автоматической компенсации позволяет снизить величину магнитного момента в 100 раз при частоте питающей сети 50 Гц, что подтверждено экспериментально.

Ключевые слова: электрический аппарат, методы проектирования и конструирования, трехфазное распределительное устройство, порядок чередования фаз, внешнее магнитное поле, магнитный момент, параметрическая система автоматической компенсации.

Krukova N.V. Increasing of compensation efficiency of external magnetic field in the three-phase switchboard by symmetrizing its construction. – Manuscript.

PhD thesis on specialty 05.09.01 – Electric machines and apparatus. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2009.

In the thesis an actual task of increasing of external magnetic field compensation efficiency in the three-phase switchboards was been solved using the symmetrization method to their constructions for providing of electromagnetic compatibility requirements. Recommendations removing these asymmetries influences are offered.

The magnetic-phases effect dependences of the magnetic field from feeding phases set in the switchboards is grounded. The mathematical model of the magnetic field is improved, structures of parametrical systems for automatic compensation of the three-phase switchboards magnetic field are developed taking into account set phases; their using promotes increasing of compensation efficiency of magnetic field up to 100.

Keywords: electrical apparatus, designing and engineering methods, three-phase switchboard, phases set, external magnetic field, magnetic moment, parametrical system of automatic compensation.