

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРЬКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Лупіков Валерій Сергійович**

УДК 621.314.632: 621.3.013

**НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ  
КОМПЕНСАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ  
ПОБЛИЗУ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КОМПЛЕКТНИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Електричні апарати" в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Клименко Борис Володимирович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут",  
завідувач кафедри "Електричні апарати".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Загірняк Михайло Васильович**,  
Кременчуцький державний  
політехнічний університет, м. Кременчук,  
ректор;

доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Подольцев Олександр Дмитрович**,  
Інститут електродинаміки Національної  
академії наук України, м. Київ,  
провідний науковий співробітник.

доктор технічних наук, професор  
**Фінкельштейн Володимир Борисович**,  
Харківська державна академія  
міського господарства, м. Харків,  
професор кафедри електротехніки;

Провідна установа: Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут" Міністерства  
освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться "29" січня 2004 р. о 14<sup>30</sup> годин 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 в бібліотеці Національного технічного університету  
"Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий " 15 " грудня 2003 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Низьковольтні комплектні пристрої (НКП), як сукупність апаратів комутації, захисту, керування й автоматики, застосовуються для розподілу електричної енергії поблизу споживачів, керування процесами пуску і регулювання електродвигунів і механізмів, захисту мереж та електроустановок. Вони стали масовою продукцією фірм в багатьох країнах світу (наприклад, фірми Legrand, Франція; ABB, Moeller, Siemens, Німеччина), розширюється їх виробництво й в Україні (ДП "Особливе конструкторське бюро комплектних пристроїв", ТОВ "Ампер", ЗАТ "ХЗЕМВ-1"). Досвід експлуатації НКП у складі технічних об'єктів показав, що створюване ними зовнішнє магнітне поле (ЗМП) може заважати нормальному функціонуванню засобів автоматики (релейний захист, мікропроцесорні комплекси керування), негативно впливають на людину і навколишнє середовище, знижують ступінь магнітного захисту спеціальних маломанітних суден від зброї, яка реагує на магнітні поля. У цьому зв'язку актуальною стає задача компенсації (зниження) ЗМП НКП. Виникаючі при цьому проблеми електромагнітної сумісності, магнітної екології, навігації і магнітного захисту суден виходять за рамки можливостей окремих країн. Для рішення цих проблем Міжнародна асоціація захисту від випромінювання (IRPA/INICR) виробила рекомендації з застосування в європейських країнах припустимих і гранично припустимих рівнів напруженості ЗМП у промислових і непромислових умовах, на основі яких розробляються національні стандарти. Застосовувані в різних країнах рівні ЗМП відрізняються по величині:  $10^{-6}$  -  $10^{-4}$  Тл (0,8 – 80 А/м), а для забезпечення потреб навігації і магнітного захисту суден ці рівні знижуються до  $10^{-9}$  Тл ( $8 \cdot 10^{-4}$  А/м). Частотний діапазон цих слабких ЗМП складає 0-10000 Гц.

Теоретичні розробки по зниженню рівня ЗМП електроустановок виконувалися виходячи з практичних потреб морської навігації і магнітного захисту кораблів, починаючи із сорокових років ХХ століття. Серед ряду розроблених методів виділяється автоматична компенсація, яка характеризується найбільшою ефективністю – відношенням рівнів вихідного і компенсованого ЗМП на контрольній поверхні, яка охоплює НКП. Ці методи забезпечують необхідну компенсацію ЗМП тільки в області простору на відстані більш трьох габаритів НКП. При цьому НКП моделюється джерелом дипольного типу, яке характеризується магнітним моментом (ММ). Компенсація ММ забезпечується шляхом зміни просторової конфігурації струмопроводів, введенням намагнічених феромагнітних елементів і спеціальних систем автоматичної компенсації (САК) в об'єм НКП.

Традиційна технологія компенсації ММ являє собою сукупність процесів, пов'язаних з

визначенням вихідного ММ, синтезом засобів компенсації ММ з урахуванням конкретного конструктивного виконання НКП і настроюванням засобів компенсації за даними вимірів ММ. Однак в області простору поблизу НКП, на відстані від його поверхні менш трьох габаритів, ця технологія не забезпечує належного ефекту. Фактично тільки екранування забезпечує цілеспрямоване зниження ЗМП поблизу НКП в 2-10 разів, що недостатньо для сучасних вимог.

Недоліки відомих методів і засобів зниження ЗМП пов'язані зі складною залежністю просторової і часової структур ЗМП поблизу поверхні НКП від сполучення одночасно включених фідерів і ряду факторів, що неможливо врахувати при проектуванні. Для подолання цих недоліків необхідно застосування комплексного підходу до розв'язання взаємопов'язаних задач *ефективної компенсації ЗМП поблизу поверхні НКП*: моделювання ЗМП, синтез засобів його компенсації і їх налагодження за даними вимірів напруженості поля.

Крім того, необхідно враховувати й існуючі тенденції збільшення струмів НКП до декількох кілоамперів і відповідне зростання рівнів ЗМП, ріст числа магніточутливих елементів автоматики і наближення місць їх розташування до поверхні НКП.

Тому дослідження, спрямовані на наукове обґрунтування технології компенсації ЗМП поблизу його поверхні є актуальними і вирішують важливу проблему, що має наукове, практичне і соціальне значення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Розробки за темою дисертації проводилися при особистій участі здобувача в 1992-2003 р. у рамках науково-дослідних робіт за затвердженим Постановою Президії НАН України №265 від 07.10.92 науковим напрямком "Дослідження магнітних полів технічних об'єктів і розробка методів цілеспрямованого впливу на їх структуру, розв'язання проблем магнітного захисту технічних об'єктів, магнітної сумісності технічних засобів", у відповідності до комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики" (теми "Зварювання" №ДР 0195U006479, 1994; "Зазор", №ДР 0195U010015, 1996. Здобувач – керівник тем), у рамках державної програми 04.08 "Високоєфективні енергозберігаючі енерготехнології та електротехнічні системи" (тема "Локалізація", №ДР 0198U002220, 1997. Здобувач – керівник теми), згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України з наукового напрямку "Енергоефективні і ресурсозберігаючі технології в промисловості та агропромисловому комплексі" (теми М3302, №ДР 0100U001648, 2002; М3303, №ДР 0103U001508, з 2003 року. Здобувач – відповідальний виконавець тем).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення сукупності ефективних методів і засобів компенсації ЗМП, яке створюється НКП поблизу його поверхні.

Для досягнення цієї мети в дисертації вирішувалися наступні основні задачі:

- створення наукових основ технології компенсації ЗМП, яке створюється НКП поблизу його поверхні;
- теоретичне обґрунтування моделі НКП як джерела ЗМП, параметри моделюючих диполів якої визначаються за даними розподілу напруженості поблизу поверхні на фізичній моделі або готовому зразку НКП;
- розробка методу оптимального синтезу засобів, які застосовуються у комбінації для компенсації ЗМП НКП;
- удосконалення методу схем заміщення (М-схем) для аналізу ММ силового кола НКП;
- розвиток теорії побудови структур параметричних систем автоматичної компенсації ЗМП НКП;
- розробка способу налагодження параметрів електромагнітів компенсаторів САК за даними вимірів ЗМП;
- розробка способу визначення параметрів джерел поля за даними вимірів ЗМП поблизу поверхні НКП.

*Об'єкт дослідження* – низьковольтний комплектний пристрій як джерело зовнішнього магнітного поля.

*Предмет дослідження* – технологія компенсації зовнішнього магнітного поля, яке створюється НКП поблизу його поверхні.

*Методи дослідження.* Для вирішення поставлених задач використовувалися методи математичного і фізичного моделювання НКП як джерела ЗМП, методи вимірів напруженості магнітного поля і методи статистичної обробки результатів вимірів. Теоретичні дослідження, пов'язані з розробкою математичної моделі, базуються на використанні методу просторового сферичного гармонійного аналізу і чисельних методів розв'язання систем алгебраїчних рівнянь. Для аналізу просторової і часової структури ЗМП використані методи аналізу електричних кіл, теорії графів і методи матричної алгебри. При розробці методів вимірювань ММ використані методи апроксимації функцій за допомогою поліномів Чебишева і сплайнів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертації запропоновані наступні наукові положення:

- \* розроблені наукові основи технології компенсації ЗМП, яка представлена сукупністю трьох процесів: визначення параметрів моделюючих джерел поля НКП по відомому розподілу напруженості поблизу його поверхні; синтез засобів компенсації поля і їх налагодження;

\* розроблено метод і алгоритм оптимального синтезу засобів, які застосовуються у комбінації для забезпечення заданої ефективності компенсації ЗМП НКП, особливістю яких є урахування взаємних зв'язків усіх параметрів оптимізації – ефективностей засобів компенсації, і нелінійної залежності їх вартості від величин параметрів. Алгоритм побудований на досягненні локального мінімуму функції мети при варіюванні пари обраних параметрів і фіксованих інших (перший критерій) і визначенні глобального мінімуму шляхом перебору пар параметрів і варіювання їх відхилень до досягнення заданої величини погрішності (другий критерій);

\* теоретично обґрунтована об'єднана дипольна модель НКП як джерела ЗМП, яка базується на представленні його у виді системи моделюючих диполів, розташованих рівномірно в його об'ємі, магнітні моменти яких відрізняються. Модель представлена системою лінійних алгебраїчних рівнянь, які зв'язують компоненти напруженості в точках спостереження з компонентами ММ моделюючих диполів, і трьох умов, які визначають належність цих точок до області існування моделі, повноту представлення в ній всіх моделюючих диполів і відсутність точок з нульовим рівнем поля серед множини точок спостереження;

\* створено метод модифікованих ММ-схем для аналізу ММ трифазних кіл зі струмами.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі запропонованих наукових основ технології створено методологію компенсації ЗМП як сукупність методів прогнозування і розрахунку ММ і ЗМП НКП, визначення ММ моделюючих джерел поля по відомому розподілу напруженості поблизу поверхні НКП, визначення параметрів засобів компенсації, їх оптимізації і налагодження.

Розроблено рекомендації з проектування струмопроводів і шинопроводів силового кола, структурні схеми САК, пропозиції щодо розташування їх електромагнітів компенсаторів у шафі НКП і спосіб незалежного налагодження цих електромагнітів.

Розроблено і вперше введено в дію три державних стандарти України й один стандарт Росії, що діє в Україні, в області електромагнітної сумісності технічних засобів в частині ЗМП.

Результати дисертаційної роботи використані у ВАТ "Завод ПЕРЕТВОРЮВАЧ" (Запоріжжя) при створенні комплексу безперебійного живлення спеціального призначення АП-370к, зокрема, при розробці технології мінімізації рівня його ЗМП, включаючи проектування силових шинопроводів з низьким рівнем ЗМП і методи налагодження засобів компенсації за даними виміру поля; у Відділенні магнетизму Інституту електродинаміки НАН України (Харків) при розробці технології зниження ЗМП розподільчих пристроїв і розробці державних стандартів

в галузі електромагнітної сумісності; у навчальному процесі в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” для спеціальності 092206 “Електричні машини і апарати”.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення та результати, які представлено у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Здобувачем розроблено: теоретичне обґрунтування технології компенсації магнітного поля поблизу НКП; теоретичне обґрунтування об’єднаної дипольної моделі НКП для дослідження ЗМП поблизу його поверхні; метод оптимального синтезу засобів компенсації поля і критерії оптимізації; метод модифікованих ММ-схем для аналізу ММ трифазних кіл; метод компенсації ЗМП шляхом балансування ММ моделюючих джерел НКП; структурні схеми САК; спосіб незалежного налагодження електромагнітів компенсаторів САК.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на 18 міжнародних науково-технічних конференціях, нарадах, семінарах, симпозіумах: "Измерительные информационные системы" (Росія, Москва, 1989); "Микроэлектронные датчики в машиностроении" (Росія, Ульяновськ, 1990); "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (Росія, Москва, 1990; Гурзуф, 1992); "Датчики систем измерения, контроля и управления" (Росія, Пенза, 1991); "Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці (Львів, 1995); "Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования" (Харків, 1998); Друга Міжнародна науково-технічна конференція по суднобудуванню "ISC'98" (Росія, С.-Петербург, 1998); “MicroCAD – Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 1999, 2002, 2003); "ТЕМ-2001 – Інформаційна техніка та електромеханіка на порозі XXI-го століття" (Луганськ, 2001); "SIEMA – Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (Харків, 2000-2002); семінар "Методи та засоби зменшення магнітних полів технічних об’єктів" наукової ради НАН України "Наукові основи електроенергетики" (Харків, 1995, 1998, 2003).

**Публікації результатів наукових досліджень.** Результати дисертації представлені у 50 публікаціях, з них 4 – державні стандарти, 30 – статті у фахових виданнях, 3 – авторські свідоцтва і патент, 1 – препринт, 2 – депоновані роботи, 10 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації складає 369 сторінок. Робота містить 80 ілюстрації на 69 сторінках, 13 таблиць до тексту; список використаних джерел із 269 найменувань на 30 сторінках; 1 додаток на 6 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 264 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено дані про зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, наведено відомості про їх апробацію, публікації та впровадження.

У першому розділі проведено аналіз моделей магнітного поля, методів і засобу його компенсації і методів виміру, зв'язаних з технологією компенсації ЗМП НКП.

Терміном ЗМП позначене магнітне поле, яке виникає в області зовнішнього простору щодо поверхні НКП (рис. 1). Ця область розбита на три області: далеку  $V_d$ , проміжну  $V_p$  і ближню  $V_b$ , нижня границя якої  $G_b$  визначена як поверхня, вилучена на відстань  $h$  від поверхні НКП. При аналізі використані наступні допущення: режими роботи НПК – сталі, у навколишньому просторі відсутні джерела і вихри поля, а діє тільки магнітне поле Землі; джерела поля НКП і засоби компенсації розташовуються в межах його об'єму. При цих допущеннях ЗМП є квазістаціонарним і розглянуті моделі поля трьох типів: інтегральні, мультипольні і дискретні. Аналіз проведено з урахуванням можливості розв'язання наступних задач: визначення параметрів джерел поля шляхом розрахунку поля і за даними вимірювань (зворотна задача), синтез засобів компенсації ЗМП і їх налагодження.

*Інтегральні моделі* будуються на основі рівнянь Максвелла для стаціонарного магнітного поля. Для ЗМП, яке створюється стаціонарними струмами НКП щільністю  $\mathbf{J}$  у провідниках, розташованих в об'ємі  $V_p$ , і намагніченістю  $\mathbf{M}$  ферромагнетиків, розташованих в об'ємі  $V$  з границею  $G$  і орієнтованою нормаллю  $\mathbf{n}$ , справедливе рівняння Лапласа. Його рішення – функція повного скалярного магнітного потенціалу  $\Phi$ , похідна від якої дає вектор напруженості  $\mathbf{H}$  у точці спостереження  $p$  з радіусом-вектором  $\mathbf{r}$

(1)

Ці моделі дозволяють розрахувати ЗМП НКП. При рішенні зворотної задачі застосування цієї моделі утруднено, оскільки число елементарних джерел нескінченно. Перехід від реальних до фіктивних джерел (метод вторинних джерел) на базовій поверхні, яка охоплює реальні джерела поля НКП, дозволяє за експериментально одержаним розподілом напруженості визначити розподіл потенціалу подвійного шару, а через нього - розподіл напруженості в точках на поверхні  $G_b$  і області  $V_b$ . Синтез компенсуючих джерел поля проводиться виходячи з умови

(2)

де  $H(p_j)$ ,  $H_k(p_j)$  – напруженість ЗМП НКП і компенсуючих джерел;  $\epsilon_H$  – нормований рівень напруженості;  $p_j$  – точка спостереження.

Співвідношення (2) не дозволяє визначити число компенсуючих джерел, їх геометрію, розташування, параметри і методи налагодження. В наслідок чого ці моделі не використовуються в задачах компенсації ЗМП.

*Мультипольні моделі* відповідають частковим рішенням рівняння Лапласа і отримуються розкладанням функції  $\Phi$  в степеневий ряд щодо радіуса точки спостереження. У сферичній системі координат мультипольна модель  $n$ -го ступеня має вигляд

$$\Phi = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_{nm} r^n + h_{nm} r^{-n-1}) P_{nm}(\cos\theta) \quad (3)$$

де  $r, \theta, \varphi$  – координати точки спостереження;  $g_{nm}, h_{nm}$  – коефіцієнти просторових гармонік;  $R$  – радіус базової поверхні (однієї з граничних сфер відповідних областей  $G'_\delta, G'_n$  або  $G'_d$ ), на якій визначаються ці коефіцієнти;  $P_{nm}(\cos\theta)$  – приєднані функції Лежандра ступеня  $n$  порядку  $m$ .

Співвідношення (3) характеризує мультиполь – фіктивне джерело, розташоване у центрі системи координат і утворене системою певним чином симетрично розташованих зміщених диполів, зсувами яких можна зневажити в порівнянні з радіусом точки спостереження. Диференціювання (3) дає співвідношення для компонент напруженості ЗМП.

Реальне НКП на видаленні 3–5 габаритів розглядається як диполь ( $n=1$ ), розміри якого малі в порівнянні з  $r$ , а модель називається *дипольною* і застосовується в області  $V_d$ . В областях  $V_\delta$  і  $V_n$  модель ускладнюється за рахунок необхідності обліку мультиполей. Мультипольні складові напруженості ступеню  $n > 2$  спадають пропорційно  $r^{-(n+2)}$  і ці моделі – поліноміальні. Визначення коефіцієнтів  $g_{nm}, h_{nm}$  (зворотна задача) здійснюється методом просторового гармонійного аналізу за відомими значеннями напруженості для точок на  $G_\delta$ , або рішенням системи алгебраїчних рівнянь, складених для точок об'єму  $V_\delta$ . В обох випадках поліноміальний характер моделі істотно знижує точність визначення параметрів мультиполей. Зокрема, при  $n > 6$  виникає проблема поганої обумовленості систем рівнянь, коли точності вихідних даних і результатів розрахунків можуть відрізнятись на кілька порядків.

При визначенні параметрів мультиполей, крім сферичних, можуть застосовуватися сфероїдальні, циліндричні і прямокутні системи координат, які дозволяють наблизити точки границі  $G_\delta$  до поверхні НКП без збільшення ступеня мультиполей моделі. Їх застосування не дозволяє помітно скоротити число диполів, які складають мультипольні джерела.

Синтез засобів компенсації на основі мультипольних моделей виконується виходячи з умов компенсації виду:

$$\Phi_n = \epsilon_n \quad (4)$$

де  $\epsilon_n$  – погрішність компенсації мультиполя ступеня  $n$ ;  $(\Phi_n)_k$  – складова скалярного магнітного потенціалу компенсуючих джерел  $n$ -го мультиполя.

Зниження точності експериментального визначення параметрів мультиполей, необхідність визначеного розташування систем диполів, які утворюють мультиполі, поблизу центра НКП і

складність процесу їх налагодження за даними вимірів напруженості послужили причинами того, що з множини можливих мультипольних моделей ЗМП у даний час використовуються дипольна (область  $V_d$ ) і дипольно-квадрупольна (область  $V_n$ ), для яких  $N \leq 2$ . Питання застосування мультипольних моделей ступеня  $N > 2$  для компенсації ЗМП в області  $V_6$  залишається відкритим.

*Дискретні моделі* засновані на співвідношенні (1) і отримуються розбивкою областей інтегрування ( $V$ ,  $V_n$  і  $G$ ) на виділені об'єми (ВО) кубічної форми та обмежуючі їх грані й усередненні щільності струмів у провідниках і намагніченостей феромагнітних елементів у цих об'ємах

(5)

де  $q$  – номер ВО,  $q = \overline{1, Q}$ ;  $v$  – номер грані ВО;  $\Delta G_{vq}$  – площа грані ВО;  $\mathbf{n}_{vq}$  – вектор зовнішньої нормалі до  $v$ -ї грані ВО;  $\mathbf{J}_{jq}$  – середня щільність струму в  $j$ -му провіднику у ВО;  $\mathbf{M}_q$  – вектор середньої намагніченості мас ВО.

Відповідно до (5), розподіл напруженості ЗМП (похідної від  $\Phi$ ) на базовій поверхні  $G_6$  замінюється відповідними розподілами на поверхнях ВО. За певних умов можна приблизно вважати ці розподіли дипольними і розглядати кожний ВО як диполь, вектор ММ  $\mathbf{m}_q$  якого поміщений у його центрі. Система матричних рівнянь, які зв'язують багатомірні вектори напруженості  $\mathbf{H}$  у точках спостереження і компоненти ММ  $\mathbf{M}$  має вигляд

(6)

де  $\mathbf{A}$  – матриця плану, елементи якої є функції координат точок спостереження і зміщень векторів ММ.

Система рівнянь (6) є лінійною щодо векторів ММ диполів, що спрощує їх визначення за обмірюваними даними напруженості  $\mathbf{H}$  в точках спостереження, розташовуваних в області  $V_6$  або на її границі  $G_6$

(7)

Компенсація ЗМП при цьому може бути зведена до компенсації ММ кожного ВО шляхом установки в ньому компенсуючих джерел та їх налагодження. Теоретичне обґрунтування такої дискретної моделі, яка встановлює зв'язок числа, параметрів диполів, точності дипольної апроксимації розподілів поля джерел ВО від відстаней до точок спостереження, а також методи налагодження компенсуючих джерел в даний час відсутні.

Проведений аналіз показав, що вказані моделі не дозволяють визначити параметри джерел за даними вимірів ЗМП поблизу поверхні НКП.

*Аналіз методів і засобів компенсації* показує, що вони ефективні при компенсації ЗМП на видаленні від поверхні НКП більш трьох габаритів і забезпечують компенсацію дипольної складової поля, пропорційної ММ. В даний час відсутні методи, які дозволяють оцінити ефективність компенсації поля при комбінованому застосуванні засобів компенсації. Найбільшу

ефективність (до 300 разів) має метод автоматичної компенсації ММ. Його реалізація забезпечується за допомогою САК, побудованої за принципом розімкнутої (параметричної) системи автоматичного регулювання. Її елементи – датчики параметрів НКП, пристрій управління, джерело живлення і електромагніти компенсатори поля (ЕК) – розташовуються усередині об'єму НКП. При налагоджених параметрах ЕК створюють компенсуюче поле в області компенсації ( $V_d$  і  $V_n$ ). При синтезі САК визначаються кількість і орієнтація ЕК, алгоритми обробки параметрів, структура формованих струмів. У даний час для НКП відсутні структури САК на основі дискретної моделі і методи налагодження їх параметрів.

*Аналіз методів вимірів* параметрів (коефіцієнтів просторових гармонік, компонентів ММ), які використовуються при налагодженні засобів компенсації й експериментальному підтвердженню їх ефективності, показує, що для досягнення високої ефективності компенсації ЗМП необхідне виконання їх вимірів з погрішністю не більше 0,01. Погрішність визначення параметрів досягає величини 0,05 – 0,25 і істотно більше, ніж погрішність виміру компонент напруженості ЗМП у точці (0,001). Це визначається методичною погрішністю, яка залежить від моделі поля і побудованого на її основі алгоритму обробки даних вимірів, і інструментальною погрішністю, обумовленою нелінійністю характеристик датчиків поля. Особливістю вимірів поблизу поверхні НКП є великий обсяг оброблюваної інформації. В даний час задачі збору інформації із систем датчиків і її автоматичної обробки не мають остаточного рішення. На основі проведеного аналізу моделей ЗМП, методів і засобів його компенсації і методів вимірів сформульовані мета і задачі роботи.

У другому розділі приведене теоретичне обґрунтування об'єднаної дипольної моделі поля (ОДМ) і досліджені особливості розподілу ЗМП поблизу джерел поля НКП.

Як базова прийнята дискретна модель ЗМП. Погрішність  $\varepsilon_H$  представлення ЗМП у точках на сфері  $G'_\delta$  радіуса  $a$  задана, а первинними джерелами поля є ділянки струмопроводів і намагнічені елементи, розташовані у ВО. На основі моделювання НКП системою зміщених диполів визначені умови, при яких його ЗМП в області  $V_\delta$  описується лінійною системою алгебраїчних рівнянь. Для цього вирішені задачі визначення максимуму поля системи диполів, розташованих в об'ємі сфери заданого радіуса; визначені границі дипольної моделі цих джерел для детермінованого і вірогідного характеру їх розташування в об'ємі НКП; визначена загальна область існування дипольних моделей джерел, розташованих у ВО.

Показано, що при дослідженні на максимум поля система  $Q$  зміщених диполів може бути замінена одним еквівалентним диполем із ММ, рівним сумі модулів ММ диполів системи і поміщених у точку сфери, найближчу до точки спостереження. Представляючи потенціал диполя у виді

$$, \quad (8)$$

шляхом диференціювання і розкладання в степеневий ряд отримані вираження сферичних складових компонентів  $H_m$ ,  $H_{\theta n}$ ,  $H_{\varphi n}$  напруженості мультиполя і досліджено на максимум функцію модуля

$$H_n = \sqrt{H_m^2 + H_{\theta n}^2 + H_{\varphi n}^2}^{1/2}, \text{ яка дорівнює} \quad (9)$$

за тих самих умов, що і максимум поля еквівалентного диполя.

Введено поняття границі значимості  $n$ -ї мультипольної складової напруженості як сфери, радіус якої  $L_n$  визначається з умови  $\varepsilon_H = H_{n\max}$ , де  $\varepsilon_H$  – рівень (похибка) компенсації поля. На основі (9) визначені далека  $G(L_1)$  і ближня  $G(L_2)$  границі області існування дипольної моделі зміщеного диполя, яка має форму сферичного шару:

$$(10)$$

Для детермінованої моделі оцінки (10) є максимальними і при істотній зміні величини ММ ці границі міняються незначно.

У реальному НКП джерела (ВО) розташовуються у об'ємі, які має форму прямокутного паралелепіпеда, напрямки векторів ММ яких можуть не збігатися, що зменшує рівень результуючого поля. Оцінка ближньої границі дипольної моделі, отримана з використанням методів теорії вірогідності, дозволяє наблизити ближню границю до базової сфери на відстань у 4,3 рази менше в порівнянні з оцінкою (10).

На основі співвідношення (3) сформульовані умови розташування точок спостереження, при яких ця система рівнянь містить тільки дипольні складові полів джерел і стає лінійною відносно  $r^{-3}$ .

Для цього виділена дипольна складова у компоненти напруженості (наприклад, у  $H_r$ )

де  $\alpha_{11} - \alpha_{13}$  – коефіцієнти, пропорційні  $r^{-3}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнти, пропорційні  $r^{-(n+2)}$  для  $n \geq 2$ ;  $\delta_n$  – коефіцієнти зв'язку, які враховують належність точки  $p$  області  $V$  існування дипольної моделі зміщеного диполя (рис. 2,а):

Для  $Q$  диполів напруженість поля представляється аналогічно (12) і, опускаючи складові мультиполей більш високих ступенів, має вигляд

де  $\delta^q$  – коефіцієнт зв'язку, рівний 1 або 0 у залежності від умов (12) належності точки спостереження області існування  $V^q$  дипольної моделі  $q$ -го диполя.

Співвідношення для компонент  $H_\theta, H_\phi$  напруженості аналогічні (13).

Таке представлення дозволяє отримати загальну область існування ОДМ  $V$  об'єднанням областей  $V^q$ . Область  $V$  являє собою оболонку, яка охоплює НКП, далека і ближня границі якої утворені об'єднанням відповідних границь  $G^q(L_1)$  і  $G^q(L_2)$  областей  $V^q$ . На рис. 2,б,в показані варіанти побудови цієї області для двох окремих ВО, обмежених сферами, і у виді кубів.

З огляду на зв'язок дипольних коефіцієнтів з компонентами  $m_x, m_y, m_z$  ММ джерела  $g_{11} = m_x / 4\pi$ ,  $h_{11} = m_y / 4\pi$ ,  $g_{10} = m_z / 4\pi$ , аналогічні рівняння сформовані й у прямокутній системі координат.

Об'єднана дипольна модель, отримана на основі досліджень, має вигляд:

(14)

де  $\mathbf{H}$  – вектор компонент напруженості, упорядкованих на множині  $P$  точок спостереження;  $\mathbf{A}$  – матриця плану;  $\mathbf{D}$  – матриця зв'язку;  $\mathbf{M}$  – вектор компонент ММ, упорядкованих на множині з  $Q$  ВО;  $\mathbf{A}_d$  – приведена матриця плану, елементи якої одержують множенням елементів матриці  $\mathbf{A}$  на коефіцієнти зв'язку;  $V$  – область існування ОДМ;  $G^q(L_1), G^q(L_2)$  – зовнішня і внутрішня границі області існування дипольної моделі  $q$ -го джерела;  $\mathbf{D}_c$  – компактна матриця зв'язку;  $H_p$  – модуль вектора напруженості в точці  $p$ .

Основним рівнянням ОДМ є перше рівняння системи (14). Формування матриць проводиться відповідно до співвідношень:

(15)

(16)

де  $\delta_{pq}$  – коефіцієнт зв'язку, який встановлює належність точки  $p$  області  $V^q$ ;  $x_p, y_p, z_p$  – координати радіусу  $r$  точки спостереження;  $a_{xq}, a_{yq}, a_{zq}$  – координати центра  $q$ -го ВО;  $m_{xq}, m_{yq}, m_{zq}$  – компоненти ММ  $q$ -го ВО.

Система (16) дозволяє за даними напруженості визначити ММ моделюючих диполів ВО відповідно (7) з використанням відомих методів рішення лінійних алгебраїчних рівнянь при виконанні умов, представлених трьома останніми співвідношеннями в (14).

Перша умова гарантує вибір точок спостереження в області існування ОДМ, чим досягається лінійність моделі.

Друга умова визначає повноту представлення в моделі всіх джерел і є *необхідною* умовою однозначного рішення рівнянь (15), коли ранг матриці  $A_d$  дорівнює  $Q$ . Перевірку цієї умови спрощено з огляду на рівність коефіцієнтів зв'язку в блоці матриці  $A_d$  у формі (16) і зведено до дослідження визначника компактної матриці зв'язку  $D_c$ , у якій кожен елемент заміняє блок розміру  $(3 \times 3)$  однакових коефіцієнтів зв'язку в матриці  $A_d$

(17)

Дослідження показали, що вибір місць розташування точок спостереження в ОДМ не може бути довільним. Зокрема, для точок  $p_1$  і  $p_2$  в області існування одного з джерел  $V^1$  на рис. 2,б сформована система (17) не має однозначного рішення, оскільки відсутня інформація про друге джерело. В ідеалі закон розташування цих точок повинен прагнути до рівномірного на поверхні  $G_b$  або в об'ємі  $V_b$  (точки  $p_1$  і  $p_3$  на рис. 2,б).

Третя умова є *достатньою* для єдиності рішення системи (16). Для його виконання необхідно, щоб система (16) не була однорідною і при формуванні рівнянь необхідно виключити точки з нульовим рівнем поля.

Теоретичні дослідження показали, що такі точки дійсно існують не тільки на осі кільцеподібних постійних магнітів, намагнічених уздовж осі, але і поблизу контурів зі струмом, вектори магнітних моментів яких рівнобіжні. Ці точки використані для налагодження електромагнітів САК.

Для практичного використання ОДМ запропоновано умовно розбивати об'єм НКП на кубічні ВО зі стороною  $b = 1,5 - 1,8 \sqrt{\epsilon_H} L$ , що забезпечує мінімальне число моделюючих диполів  $Q \approx L_x L_y L_z / b^3$ , де  $L_x, L_y, L_z$  – розміри шафи НКП по осям координат і  $L$  – найбільший габаритний розмір.

Перевірка ОДМ проведена шляхом моделювання ЗМП з розмірами  $0,8 \times 0,6 \times 1,8$  м і рішення зворотної задачі для системи 16 однофазних диполів, рівномірно розташованих у об'ємі НКП (рис. 3). Як вихідні використовувалися розрахункові значення напруженості в 32 точках спостереження, розташованих рівномірно на поверхнях, віддалених від поверхні НКП на 0,7 м. Облік погрішності вимірів проводився введенням у ці дані випадкової погрішності, розподіленої в діапазоні відхилень  $\pm 0,01$  від точного значення. У результаті моделювання визначені ММ моделюючих диполів з погрішністю, яка не перевищує 0,01 максимального ММ, що підтверджує працездатність ОДМ в області поблизу поверхні НКП. Переваги ОДМ: у порівнянні зі

сферичною мультипольною моделлю отримане рішення для точок області, одна частина яких розташована усередині, а інша – зовні базової поверхні сфери, яка охоплює НКП; у порівнянні з детермінованими дискретними моделями зменшене число ВО у 80 разів і точність рішення відповідає точності завдання напруженості ЗМП.

Використання ОДМ спрощує процес визначення числа і параметрів моделюючих диполів за експериментальними даними на етапах розробки і випробувань НКП.

У третьому розділі розглянутий удосконалений метод модифікованих ММ-схем; визначена часова і просторова структура ЗМП поблизу поверхні трифазного НКП; запропоновано метод компенсації ЗМП; розроблені структурні схеми САК ММ і ЗМП і алгоритми настроювання їх параметрів; дані рекомендації з компенсації ЗМП НКП.

Для усунення складностей, пов'язаних з визначенням і компенсацією миттєвих значень ММ трифазних струмопроводів з синусоїдальними струмами, автором запропоновано удосконалений метод модифікованих схем заміщення – ММ-схем, поширений на комплексні величини ММ. Введено поняття комплексного вектора площі і визначена комплексна амплітуда ММ контуру зі струмом  $I_k$  у вигляді

(18)

де  $\dot{S}_k = S_k e^{-j\varphi_k}$  – комплексний вектор площі  $k$ -го контуру;  $\varphi_k$  – фаза струму.

Підсумовуванням ММ  $\dot{m}_k$  контурів визначається ММ  $\dot{m}$  будь-якого складного трифазного кола. Для відтворення  $\dot{m}$  за допомогою котушок зі струмами потрібно дві котушки з ММ  $\dot{m}_c$  і  $\dot{m}_s$ , осі яких не збігаються, а струми змінюються за законами косинуса і синуса. На практиці потрібна прив'язка осей цих джерел до осей  $x, y, z$ . Вектор ММ у цьому випадку має шість компонент і така система джерел названа дипольною структурою

(19)

Максимум ММ дипольної структури отримано у вигляді,

(20)

де  $M_c, M_s$  – модулі векторів  $\dot{m}_c$  і  $\dot{m}_s$ ;  $\alpha$  – кут між векторами  $\dot{m}_c$  і  $\dot{m}_s$ .

Напрямок максимуму поля відповідає напрямку вектора  $M_{\max}$ . Ця властивість вектора максимуму поля використана при обґрунтуванні вибору орієнтації датчика поля в розроблених державних стандартах.

Метод застосований для аналізу часової структури ММ НКП. На прикладі трифазного трифідерного НКП проведена модифікація його електричної схеми (рис. 4,а), отримана ММ-схема (рис. 4,б) перетворена до системи незалежних контурів і визначена часова структура ММ. На схемах використані позначення:  $K_1 - K_3$  – вимикачі фідерів;  $I_A, I_B, I_C$  – амплітуди струмів живлення;  $I_1 - I_{15}$  – амплітуди струмів гілок схеми;  $I_{e1} - I_{e,K}$  – амплітуди струмів обраних незалежних контурів ( $K=6$ );  $\dot{S}_1 - \dot{S}_{15}$  – елементи площин;  $Z_7 - Z_{15}$  – опори навантаження. З використанням дерева графа, гілки якого виділені товщеними лініями на рис. 4,б, визначаються незалежні контури з еквівалентними елементами площин за встановленими правилами методу М-схем для послідовного з'єднання елементів площин:

З врахуванням (21) визначена часова структура ММ НКП як однієї дипольної структури

(рис. 5,а)

(22)

де  $\gamma_k$  – коефіцієнт стану ключів схеми, який приймає значення 1 – у замкнутому і 0 – у розімкнутому положенні ключа.

З використанням ОДМ і ММ-схем встановлено, що часова структура ЗМП аналогічна ММ. При дискретизації об'єму НКП кожний ВО представляється як дипольна структура з ММ у вигляді лінійної комбінації струмів незалежних контурів (рис. 5,б)

(23)

де  $\dot{m}_q$  – комплексний ММ дипольної структури ВО з номером  $q$ ;  $\beta_{qk}$  – коефіцієнт, який враховує приналежність частини  $k$ -го незалежного контуру  $q$ -му ВО,  $\beta_{3q-3+u.k} = S_{3q-3+u.ek} / S_{u.ek}$ ;  $u$  – індекс, який приймає значення 1, 2, 3 відповідно для осей  $x, y, z$ ;  $S_{3q-3+u.ek}$  – проекція вектора площі частини  $k$ -го незалежного контуру, розташованої в  $q$ -му ВО (елемент площі  $\dot{S}'_{q13}$  на рис. 5,б);  $S_{u.ek}$  – проекція вектора площі  $k$ -го незалежного контуру;  $\dot{c}_{qk}$  – коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням (15) і (23) напруженість поля, представлена багатомірним вектором дійсних (косинусних) складових на множині точок спостереження, у матричній формі також характеризується лінійною залежністю від струмів незалежних контурів

(24)

де  $S$  – матриця векторів площин частин незалежних контурів, обмежених ВО;  $I$  – матриця струмів цих контурів;  $T = A_d S$  – матриця коефіцієнтів.

Аналогічна лінійна залежність уявних (синусних) складових напруженості ЗМП від струмів незалежних контурів НКП.

Умови компенсації ЗМП при використанні ОДМ мають вигляд:

(25)

де  $\dot{m}_q$  – вектор ММ  $q$ -тієї дипольної структури;  $\dot{m}_k$  – вектор ММ ЕК, розташованого у ВО з номером  $q$ ;  $\varepsilon_m$  – погрішність компенсації ММ.

Автором розроблений новий метод компенсації ЗМП, названий "методом балансування", що реалізує співвідношення (25). Метод полягає в балансуванні ММ дипольних структур шляхом введення в кожний ВО системи ЕК, які відтворюють компоненти ММ дипольної структури з протилежним знаком, і їх налагодження за даними вимірів поля.

Синтез структур САК, які реалізують метод балансування, заснований на рівняннях для струмів  $\dot{I}_{u.c}^q$ ,  $\dot{I}_{u.s}^q$  ЕК, призначених для компенсації косинусної і синусної складових вектора ММ  $q$ -й дипольної структури в просторовому напрямку  $u$ . Співвідношення для струмів отримані з (25) при підстановці величин струмів і елементів площин:

(26)

де  $1/p$  – коефіцієнт перетворення струмів кола до слабкострумів сигналів САК;  $\alpha_{uk}^q$ ,  $\alpha_{uk}^q$  – коефіцієнти пропорційності вихідної і компенсуючої дипольних структур;  $\beta_{uk}^q$ ,  $\beta_{uk}^q$  – коефіцієнти відносин площі частини  $k$ -го контуру в  $q$ -м ВО до повної площі контуру:

$$C_u \geq 1 \quad (27)$$

– коефіцієнт підсилення ММ котушки ЕК феромагнітним осердям, який дорівнює одиниці при його відсутності.

Розроблені структурні схеми САК ЗМП і ММ трифазного НКП приведені на рис. 6. Позначення на схемах: Д – датчик струму; ДЖ – джерело живлення; ЕК – електромагніт компенсатор поля; П – перемикач полярності; ПОП – пристрій ортогонального перетворення сигналу на косинусну і синусну складові; ПУ – пристрій управління; С – суматор; ФС – формувач сигналів; РП – регульованій підсилювач; X, Y, Z - канали регулювання.

На рис. 6,а показаний зв'язок елементів САК при формуванні косинусних і синусних складових  $x$ -компонент векторів ММ ЕК при компенсації ММ  $q$ -й дипольної структури по каналу X. Коефіцієнти підсилення РП регулюються в процесі налагодження параметрів ЕК. Перетворення сигналів у цій схемі відповідає рівнянням (27). У випадку, коли НКП розглядається як одна дипольна структура, САК забезпечує компенсацію ММ і її структура спрощується. На рис. 6,б показаний варіант САК ММ, у якій за рахунок застосування фазовертача Ф зменшено в два рази число ЕК.

Автором розроблений алгоритм незалежного налагодження кожного ЕК САК ЗМП у два етапи. На першому етапі датчики поля встановлюються для виміру ММ, для ЕК, які налагоджується, у САК встановлюється коефіцієнт  $\beta_{uk}^q = 1$  і при почерговому підключенні незалежних контурів силового кола за даними вимірів регулюються коефіцієнти  $\alpha_{uk}^q$  відповідно до умови (25) компенсації ММ. На другому етапі датчик поля встановлюється в точку нульового поля і величини коефіцієнтів  $\beta_{uk}^q$  регулюється за даними вимірів компонент напруженості ЗМП за умовою, що у цій точці при спільній роботі НКП і ЕК, які налагоджується, вона пропорційна його ММ, величина якого визначена до початку налагодження. Алгоритм налагодження САК ММ обмежується першим етапом.

Експериментальні дослідження САК ММ виконані на макеті розподільчого щита й у складі промислового зразка комплексу безперебійного живлення спеціального призначення АП-370к. При використанні на макеті як датчики трансформаторів струму класу 1,0 і виконанні пристрою формування на основі засобів мікроелектроніки ефективність компенсації складала 70 одиниць, для промислового зразка – 12 разів.

За результатами досліджень розроблені рекомендації в частині конструкції струмопроводів, а другі відносяться до застосування САК. Перші включають виконання шинопроводів фідерів в одній із площин, рівнобіжної координатної площини НКП, обмеження кроку скрутки гнучких струмопроводів і відстані між вузлами транспозиції шинопроводів розмірами ВО (рис. 7,а,б), оригінальному виконанню вузла транспозиції з шинопроводами фаз, які розщеплюються в одній площині (рис. 7,в). Другі установлюють вимоги до розташування ЕК САК по можливості ближче до центрів відповідних ВО (рис. 7,г), в ЕК з феромагнітним осердям його установку в центрі котушки, забезпечення подачі роздільного живлення в незалежні струмові контури при налагодженні САК і доступ до органів регулювання.

У четвертому розділі приведено опис розроблених способів і системи для високоточного виміру ММ НКП, способу автоматичної компенсації у вимірювальній системі сигналу завади від поля кабелю живлення, способу поділу на складові статичного ЗМП феромагнітних мас елементів НКП, способу визначення положення точки нульового поля.

Відмітними ознаками способу виміру ММ є облік мультипольних складових поля в корисному сигналі при обробці даних вимірів і вибір точок установки датчиків на відрізьку радіусу відповідно розподілу Чебышева

$$r = r_1 + \frac{r - r_1}{P-1} \cdot (p-1), \quad (28)$$

де  $r_1, r$  – початок і кінець відрізьку радіусу;  $P$  – число точок виміру.

На основі даних вимірів однойменних компонент напруженості ЗМП формується система рівнянь виду

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon, \quad (29)$$

де  $Y$  – матриця приведених значень компонент напруженості в точках установки датчиків  $r_p$  ( $p = \overline{1, P}$ ) з елементами  $[y] = H_p r_p^3$ ;  $X$  – матриця плану з елементами  $[x] = x_p^{n-1}$ ;  $\beta$  – матриця мультипольних коефіцієнтів з елементами  $[\beta_n]$  ( $n = \overline{1, N}$ );  $\varepsilon_p$  – матриця приведених сигналів завади, обумовленої неврахованими складовими мультиполів ступеня вище  $N$ , сторонніми джерелами поля й обчислювальною погрішністю, з елементами виду  $[\varepsilon] = \varepsilon_p r_p^3$ . Рішення системи (29) для коефіцієнту  $\beta_1$  дає ММ

$$\beta_1 = \frac{B_{11}^{-1} \cdot c}{B_{11} - B_{1P} \cdot c}, \quad (30)$$

де  $B_{11} - B_{1P}$  – коефіцієнти матриці  $B = (X^T X)^{-1} X^T$ ,  $c$  – коефіцієнт, рівний  $2\pi$  для радіальної компоненти і  $4\pi$  – для інших компонент ММ.

Як показали результати експериментальних досліджень, при  $N \leq 6$  погрішність визначення ММ при розташуванні датчиків поблизу джерел поля не перевищує 0,01. Це досягнуто за рахунок того, що матриця  $(X^T X)$  стає діагональною і спрощується її обертання.

На практиці установка датчиків у ці точки не завжди можлива при їх одночасному використанні, наприклад в автоматизованій системі. Для усунення цього недоліку розроблено спосіб, у якому датчики розташовуються рівномірно на відрізьку радіусу, а висока точність визначення ММ забезпечується за рахунок обробки даних вимірів. Спосіб передбачає вибір штучного плану точок виміру на відрізьку радіусу, які відповідають умові (28), і інтерполяцію даних вимірів ( $Y$ ) у ці точки ( $Y^*$ ) з використанням сплайнів. Алгоритм визначення ММ будується на покроковому збільшенні розмірності матриць рівняння

$$Y^* = \Phi \cdot \gamma, \quad (31)$$

де  $\Phi$  – матриця ортогональних поліномів Хайеса;  $\gamma$  – матриця з елементами.

Вибір оптимальної величини  $N$  досягається з використанням критерію Фішера. Алгоритм дозволяє скоротити об'єм обчислень за рахунок того, що при формуванні матриць у рівнянні (31), значення їх елементів, визначених на попередньому кроці, не міняються.

Для реалізації алгоритму (31) розроблена структура автоматизованої системи (АМВС) вимірів ММ (рис. 8). Позначення на схемі: АЦП – аналого-цифровий перетворювач; Д – датчик поля; ДС – датчик струмів фаз НКП; ЕФ – еталон фази; І – інтегратор; КЗ – компенсатор завади; КПК – компенсатор поля кабелю; ПВ – пристрій відображення; ПД – перемикач датчиків; ПК – перемикач каналів  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ; ПОР – пристрій ортогонального розкладання; Ф – фільтр. Експериментальні дослідження основних вузлів АМВС показали можливість зниження погрішності визначення ММ до 0,01 за рахунок використання алгоритму обробки корисного сигналу ( $H_{НКП}$ ) і компенсації сигналів завади ( $H_3$ ) та кабелю ( $H_K$ ).

Теоретично обґрунтовано спосіб автоматичної компенсації сигналу завади від поля кабелю при вимірі ММ НКП. Спосіб включає вимір струмів фаз і сигналів поля кабелю, що включається окремо від НКП, їх перетворення в цифрові коди, запам'ятання у вимірювальній системі і відтворення на їх основі компенсуючих сигналів після підключення кабелю до НКП. Спосіб реалізований у вимірювальній системі у Відділенні магнетизму ІЕД НАН України. За рахунок використання цифрової обробки даних підвищена точність і зменшено до 0,1 с час компенсації завади.

Розроблено спосіб поділу на індуковану і залишкову складові тривимірного статичного ЗМП феромагнітної деталі за даними вимірів поблизу поверхні деталі, поміщеної в однорідне намагнічуюче поле, яке створюється накладеними на її поверхню контурними орієнтованими ортогонально обмотками. Відмінною рисою способу є черговість включення і значення струмів цих обмоток. Спосіб захищений патентом України і рекомендований для використання при компенсації статичного ЗМП, створюваного намагніченими феромагнітними масами НКП.

Розроблено спосіб визначення положення точки нульового поля поблизу НКП за даними магнітних вимірів. У якості вихідних даних використані значення нормальної компоненти напруженості в точках, розташованих поблизу НКП на площинах, рівнобіжних його поверхні (рис. 9). На основі цих даних побудовані плоскі "цифрові" топограми розподілу поля, які характеризують області однакового знака (ООЗ) напруженості (рис. 10). Вибір відстані між цими площинами здійснюється в залежності від швидкості зближення ООЗ і точності визначення координат точки нульового поля. Координати точки нульового поля визначаються по місцю зіткнення ООЗ (точка 0,000 топограми на рис. 10). Правильність способу підтверджена результатами чисельного моделювання. Спосіб використаний при налагодженні параметрів ЕК САК.

У п'ятому розділі проведений аналіз ефективності методів компенсації при їх незалежному і комбінованому застосуванні, сформульована і вирішена задача оптимального синтезу засобів компенсації, результати досліджень узагальнені у виді наукових основ технології компенсації ЗМП.

На основі проведеного аналізу погрішностей компенсації ЗМП і ММ із використанням відомих методів встановлено, що при їх незалежному застосуванні вони ранжируються відповідно до співвідношення

(32)

де  $\delta_E, \delta_T, \delta_S, \delta_1, \delta_A$  – погрішності методів екранування, конструктивно-технологічних методів, симетрування, автоматичної компенсації ММ і основних гармонік ЗМП.

При цьому гранична ефективність  $\xi_{i\max}$   $i$ -го методу визначена як величина, зворотна його погрішності

(33)

де  $H_0, H_k, m_0, m_k$  – максимальні величини напруженості ЗМП і ММ до і після компенсації.

Кількісні оцінки граничної ефективності методів, приведені в таблиці, отримані на основі експериментальних досліджень і розрахунку (\*).

При комбінованому застосуванні методів найбільший ступінь зниження рівня поля досягається при використанні методу найбільшого рангу, методи характеризуються не граничними ( $\xi_{i\max}$ ), а реальними величинами ефективностей ( $\xi_i$ ), які забезпечують часткове зниження рівня ЗМП (від  $H_{i-1}$  до  $H_i$ ), а результуюча ефективність дорівнює

(34)

Зниження реальної ефективності кожного методу в порівнянні з її граничною величиною не зменшує результуючу ефективність і використано для зменшення вартості засобів компенсації. Залежність вартості від величини ефективності засобу компенсації в більшості випадків може бути наближена наростаючою гілкою квадратної параболи.

Задача оптимального застосування комбінації методів компенсації формулюється таким чином: визначити мінімум вартості за умови, що добуток реальних ефективностей компенсації методів є величина постійна і для кожного методу відома залежність вартості від ефективності. Уводячи модифіковані параметри  $x_i = \ln \xi_i, q = \ln \xi$ , модель представляється у виді

(35)

де  $p_i$  – функція вартості засобів компенсації, які реалізують  $i$ -й метод;  $a_i, b_i$  – коефіцієнти апроксимуючої параболи.

Система (35) є нелінійною, а її параметри – зв'язаними. Рівняння, які встановлюють зв'язок відхилень  $\Delta x_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) модифікованих параметрів між собою і залежність збільшення функції вартості  $\Delta p$  від цих відхилень, отримані диференціюванням співвідношень (35):

(36)

На основі аналізу (36) встановлено, що мінімальне число цих відхилень дорівнює двом, вони мають протилежні знаки й убувають у зворотній послідовності щодо номера методу компенсації. Виражаючи один з параметрів через інший і підставляючи у вираження відповідних функцій вартості, задача оптимізації в граничному випадку зводиться до визначення мінімуму функції одного параметра. Ці властивості відхилень і функцій вартості покладені в основу алгоритму пошуку глобального мінімуму функції  $p$  (рис. 11). Початкові значення параметрів  $x_1[0], \dots, x_n[0]$  запропоновано визначати з умови  $p_i(x_i) = p_1(x_1)$  ( $i = \overline{1, n}$ ). Для визначення глобального мінімуму функції мети передбачено два вкладених цикли, які використовують два критерії оптимізації. *Перший критерій* характеризує досягнення локального мінімуму функції мети у випадку варіювання відхилень  $\Delta x_i[j], \Delta x_{i+1}[j]$  пари параметрів при ітераціях  $j$  внутрішнього циклу,

(37)

При виконанні умови (37) фіксуються відхилення пари параметрів, вони виключаються з процесу варіації, процес продовжується для наступної пари параметрів доти, поки число параметрів  $N$  зменшиться до двох і цикл закінчується. *Другий критерій* – умова рівності відхилення параметра варіації заданій погрішності  $\epsilon$  для зовнішнього циклу,

(38)

Величина відхилення параметра зменшується, при виконанні (38) цикл закінчується і для отриманих значень параметрів  $x_i[j_i]$  визначається функція мети. Розроблена програма для ЕОМ підтвердила працездатність алгоритму і швидкість одержання рішення (одиниці секунд).

Результати проведених досліджень узагальнені у виді наукових основ технології компенсації ЗМП поблизу НКП, яка включає три процеси. *Перший процес* – визначення структури ЗМП, включає: визначення числа дипольних структур, які моделюють ЗМП у залежності від точності компенсації поля і розмірів шафи НКП; визначення часової структури ММ НКП із використанням удосконаленого методу ММ-схем; визначення ММ дипольних структур шляхом розрахунку на етапі розробки НКП і уточнення за даними вимірів ЗМП готового зразка шляхом рішення зворотної задачі з використанням ОДМ. *Другий процес* – синтез засобів компенсації, включає: визначення необхідних величин ефективності компенсації ММ дипольних структур; оптимальний синтез засобів компенсації при їх комбінованому застосуванні з урахуванням мінімуму вартості; розробку структури САК ЗМП. *Третій процес* – налаштування параметрів САК, включає: визначення положення точок нульового поля для різних режимів роботи НКП; узгодження часової структури ММ САК і НКП; узгодження просторової структури ЗМП САК і НКП шляхом регулювання ММ ЕК, які налагоджується, до значення, рівного по величині і протилежного за знаком ММ дипольної структури.

Запропонована технологія дозволяє використати добре відомі засоби зниження ММ за новим призначенням – для ефективної компенсації ЗМП поблизу поверхні НКП.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі набула подальшого розвитку теорія компенсації зовнішнього магнітного поля, яке створюється низьковольтним комплектним пристроєм поблизу його поверхні, на основі якої створені методи моделювання і проектування нового класу пристроїв з низьким рівнем поля поблизу поверхні. Отримані результати роблять істотний внесок у рішення проблем електромагнітної сумісності і магнітної екології.

1. В даний час існують тенденції збільшення струмів і рівнів магнітного поля низьковольтних комплектних пристроїв, зростання числа магніточутливих елементів автоматики і наближення місць їх розташування до поверхні пристроїв, зростання впливу цих полів на здоров'я людини. Традиційна технологія компенсації зовнішнього магнітного поля не забезпечує необхідного зниження його рівня поблизу поверхні низьковольтних комплектних пристроїв. В зв'язку з цим актуальним є використання наукоємних технологій при створенні нового класу низьковольтних комплектних пристроїв з низьким рівнем зовнішнього магнітного поля поблизу їх поверхні.

2. Обґрунтовано положення про технологію компенсації зовнішнього магнітного поля, яке створюється низьковольтним комплектним пристроєм поблизу його поверхні, як сукупності процесів визначення параметрів джерел поля в його об'ємі за даними розподілу напруженості на множині точок поблизу поверхні, синтезу засобів компенсації в об'ємі пристрою, і їх налагодження. Отримані результати дозволяють в комплексі розв'язувати питання компенсації зовнішнього магнітного поля поблизу поверхні низьковольтного комплектного пристрою і використовувати технічні рішення, які пройшли практичну апробацію при компенсації магнітного моменту.

3. Теоретично обґрунтована об'єднана дипольна модель низьковольтного комплектного пристрою як джерела зовнішнього магнітного поля. Її використання дозволяє моделювати тривимірне магнітне поле обмеженою кількістю моделюючих диполів – дипольних структур, мінімізувати їх число в залежності від погрішності представлення поля і відстані до точок його компенсації, і мінімізувати кількість компенсуючих джерел поля, які додатково вводяться в об'єм низьковольтного комплектного пристрою.

4. Розроблено метод оптимального синтезу засобів, які застосовуються у комбінації для компенсації зовнішнього магнітного поля низьковольтних комплектних пристроїв. Метод дозволяє визначити оптимальні ефективності кожного із засобів, які в комбінації забезпечують потрібну ефективність компенсації при мінімумі їх вартості з урахуванням умов конкретного виробника.

5. Отримав подальший розвиток метод М-схем, на базі якого розроблено метод модифікованих схем заміщення (ММ-схем) для аналізу магнітного моменту складних трифазних

електричних кіл. Використання методу дозволило встановити залежності магнітного моменту і напруженості поля від амплітуд струмів фідерів при різних варіантах їх сполучень, що істотно спрощує синтез засобів компенсації поля.

6. Розвинута теорія побудови систем електромагнітів компенсаторів зовнішнього магнітного поля низьковольтного комплектного пристрою і на її основі запропоновані параметричні системи автоматичної компенсації поля, елементи яких розташовуються в об'ємі пристрою. В цих системах як регулюючі параметри використовуються струми фідерів, а як виконавчі елементи – система електромагнітів компенсаторів, кожний з яких розташовується поблизу відповідної дипольної структури комплектного пристрою. Ці системи дозволяють знизити на два порядки рівень магнітного поля поблизу поверхні низьковольтного комплектного пристрою.

7. Розроблено спосіб налагодження параметрів електромагнітів компенсаторів системи автоматичної компенсації за даними вимірів напруженості магнітного поля. На відміну від відомих способів забезпечує незалежне налагодження кожного електромагніта компенсатора. Спосіб підвищує ефективність компенсації поля за рахунок зменшення методичної погрішності вимірювань в обмеженому числі точок поблизу поверхні низьковольтного комплектного пристрою.

8. Розроблено й експериментально підтверджено спосіб високоточного виміру магнітного моменту, захищений авторським свідоцтвом на винахід. Відмінною рисою способу є вимірювання спаду рівня напруженості зовнішнього магнітного поля з урахуванням завад у точках, розташованих на відрізку радіусу відповідно до розподілу Чебишева. Спосіб дозволяє знизити відносну погрішність визначення магнітного моменту до 0,01 за даними вимірювання напруженості зовнішнього поля в точках поблизу поверхні низьковольтного комплектного пристрою.

9. Розроблено і введено вперше в дію три державні стандарти України в галузі електромагнітної сумісності технічних засобів, які визначають стійкість цих засобів до дії зовнішнього магнітного поля і гармонізовані з стандартами Міжнародної електротехнічної комісії, а також стандарт з нормами параметрів цього поля.

10. Основні результати розробок дисертації використані при розробці технології мінімізації зовнішнього магнітного поля промислових зразків комплексу безперебійного живлення спеціального призначення АП-370К у ВАТ "Завод ПЕРЕТВОРЮВАЧ", Запоріжжя; при обґрунтуванні технології зниження магнітного поля розподільчих пристроїв у Відділенні магнетизму Інституту електродинаміки НАН України, Харків; в учбовому процесі за фахом 092206 "Електричні машини і апарати" в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут", Харків.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. ГОСТ Р 50010-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Электрооборудование силовое. Нормы параметров низкочастотного периодического магнитного поля. – Введ. 01.07.93. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 5 с.  
*Здобувач прийняв участь у розробці стандарту, отримав співвідношення для розрахунку норм низькочастотного періодичного магнітного поля комутаційної апаратури, доля участі – 20 %.*
2. ДСТУ 2465-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до магнітних полів частоти мережі. Технічні вимоги та методи випробувань. Введ. 01.01.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 29 с.  
*Здобувач здійснював керівництво розробкою стандарту, запропонував формулювання технічних вимог і методів випробувань технічних засобів на стійкість до магнітного поля частоти мережі, доля участі – 40 %.*
3. ДСТУ 2625-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до загасаючого магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 28 с.  
*Здобувач здійснював керівництво розробкою стандарту, запропонував формулювання технічних вимог і методів випробувань технічних засобів на стійкість до загасаючого магнітного поля, доля участі – 40 %.*
4. ДСТУ 2626-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. Введ. 01.07.95. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 26 с.  
*Здобувач здійснював керівництво розробкою стандарту, запропонував формулювання технічних вимог і методів випробувань технічних засобів на стійкість до імпульсного магнітного поля, доля участі – 40 %.*
5. Лупиков В.С., Брыкова Е.В. Датчик магнитного момента для высокоточной измерительной системы // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвузовский сборник научных трудов. – Пенза: Пенз. политехн. ин-т. – 1991. Вып. 11. – С. 18-22.  
*Здобувач обґрунтував метод визначення магнітного моменту.*
6. Лупиков В.С., Брыкова Е.В. Метод определения магнитного момента по результатам измерения ВМП вблизи электрооборудования // Измерительная техника. – М. – 1992. – №10. – С. 36-37.  
*Здобувач теоретично обґрунтував метод визначення магнітного моменту.*
7. Лупиков В.С., Соколов А.А. Разделение статического магнитного поля ферромагнитной заготовки на составляющие // Техническая электродинамика. – Киев. – 1995. – №3. – С. 3-5.  
*Здобувач теоретично обґрунтував спосіб поділу статичного магнітного поля ферромагнітної деталі на індуковану і залишкову складові.*

8. Лупиков В.С., Гетьман А.В., Пелевин Д.Е. Максимально возможное поле системы точечных источников // Техническая электродинамика. – Киев. – 1995. – №4. – С. 8-12.  
*Здобувач отримав рішення задачі визначення максимуму напруженості поля, створюваного системою зміщених диполів.*
9. Лупиков В.С. Магнитный диполь и максимальная напряженность его мультиполей // Техническая электродинамика. – Киев. – 1996. – №1. – С. 14-17.
10. Лупиков В.С., Дегтярев В.В., Кукуш В.Д. Способ измерения внешнего магнитного поля каждого из электротехнических устройств при их совместной работе // Техническая электродинамика. – Киев. – 1997. – № 2. – С. 10-12.  
*Здобувач запропонував варіанти чергування фаз струмів живлення для селекції поля окремого електротехнічного пристрою за даними вимірів.*
11. Лупиков В.С. Зачепа Ю.А. Автоматическая компенсация сигнала помехонесущего поля питающего кабеля при измерении магнитного момента электрооборудования // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 3. – С. 70-73.  
*Здобувач описав структури поля трифазного кабеля живлення і компенсуючого сигналу у вимірювальній системі.*
12. Лупиков В.С. Магнитное поле электрооборудования вблизи поверхности и пути его снижения // Сборник научных трудов ХГПУ "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып. 6, Ч. 2. – С. 283-285.
13. Лупиков В.С. Структурный анализ магнитного момента тока электрических цепей // Технічна електродинаміка. – 1999. – № 4. – С. 9-16.
14. Лупиков В.С. Границы значимости мультипольных составляющих внешнего магнитного поля электрооборудования // Сборник научных трудов ХГПУ "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 7, Ч. 3. – С. 121-123.
15. Лупиков В.С. Алгоритм оптимального выбора средств снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 55. – С. 82-84.
16. Лупиков В.С. Анализ временной структуры магнитного момента токов распределительного устройства // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 58. – С. 65-67.
17. Клименко Б.В., Лупиков В.С. Автоматизация измерений магнитного момента электрооборудования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 59. – С. 91-93.

*Здобувач розробив структурну схему магнітовиміральної системи.*

18. Клименко Б.В., Лупиков В.С. Структура внешнего магнитного поля вблизи поверхности распределительного устройства // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 65. – С. 47-53.

*Здобувач запропонував аналітичний опис структури магнітного поля поблизу поверхні розподільчого пристрою.*

19. Клименко Б.В., Лупиков В.С., Крюкова Н.В. Вероятностная оценка размеров объемного источника магнитного поля // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 66. – С. 112-119.

*Здобувач отримав вірогідну оцінку розмірів об'ємного джерела поля.*

20. Клименко Б.В., Любчик М.А., Лупиков В.С., Емельянов В.Л., Крюкова Н.В. Особенности распределения напряженности магнитного поля вблизи поверхности электрооборудования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 75. – С. 109-115.

*Здобувач теоретично обґрунтував існування особливих точок з нульовим рівнем магнітного поля поблизу поверхні електроустаткування.*

21. Лупиков В.С. Оптимальное использование методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: СУДУ. – 1999. – №6(22). – С. 113-123.

22. Клименко Б.В., Лупиков В.С. Повышение точности измерений магнитного момента комплектного распределительного устройства // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: СУДУ. – 2000. – №1(23). – С. 31-38.

*Здобувач сформулював ідею компенсації сигналу зовнішньої завади й запропонував алгоритм обробки даних вимірів магнітного поля.*

23. Лупиков В.С. Спектр мультипольных составляющих напряженности внешнего магнитного поля электрооборудования // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 77. – С. 69-71.

24. Лупиков В.С. Повышение эффективности методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования // Технічна електродинаміка. – 2000. – №1. – С. 7-13.

25. Лупиков В.С. Компенсация магнитного поля при наличии магнитных аномалий вблизи поверхности распределительных устройств // Технічна електродинаміка. – 2000. – №6. – С. 18-24.

26. Клименко Б.В., Лупиков В.С. Особенности снижения внешнего магнитного поля вблизи поверхности распределительного устройства // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 84. – С. 117-122.  
*Здобувач виконав аналіз мультипольної моделі і сформулював умови компенсації магнітного поля поблизу поверхні розподільчого пристрою.*
27. Розов В., Лупиков В. Прогнозирование магнитного поля, создаваемого полупроводниковыми преобразователями // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вып. 5. – С. 129-136.  
*Здобувач запропонував методику розрахунку мультипольних складових напруженості довільно зміщеного точкового джерела поля.*
28. Клименко Б.В., Лупиков В.С., Емельянов В.Л., Выровец С.В., Гелярская О.А. Алгоритм определения положения точек магнитных аномалий вблизи поверхности распределительного устройства // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вып. 16. – С. 87-92.  
*Здобувач дав теоретичне обґрунтування алгоритму визначення положення точок нульового поля поблизу розподільчого пристрою.*
29. Лупиков В.С. Теоретическое обоснование объединенной дипольной модели внешнего магнитного поля электрооборудования // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вып. 17. – С. 95-102.
30. Клименко Б.В., Лупиков В.С., Выровец С.В., Крюкова Н.В., Гелярская О.А. Анализ магнитного момента трехфазных цепей // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – №1. – С. 28-36.  
*Здобувач обґрунтував удосконалення методу аналізу магнітного моменту трифазних кіл за допомогою М-схем.*
31. Лупиков В.С., Пелевин Д.Е. Определение источников магнитного поля технического объекта // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – №2. – С. 43-46.  
*Здобувач обґрунтував застосування об'єднаної дипольної моделі в алгоритмі локалізації точкових джерел поля.*
32. Лупиков В.С. Метод балансирования магнитных моментов при компенсации внешнего магнитного поля распределительных устройств // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – № 3. – С. 47-54.
33. Лупиков В.С., Себякина Н.В., Крюкова Н.В., Выровец С.В. Особенности расчета внешнего магнитного поля сложного кусочно-линейного контура с током // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ: СУНУ. – 2002. – № 8 (54). – С. 169-178.

*Здобувач виконав аналіз особливостей взаємного розташування відрізка зі струмом і радіус-вектора точки спостереження.*

34. Клименко Б.В., Лупиков В.С., Выровец С.В., Емельянов В.Л., Крюкова Н.В. Анализ моделей магнитного поля электрооборудования, используемых при обеспечении электромагнитной совместимости // *Електротехніка і електромеханіка.* – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – № 1. – С. 41-48.

*Здобувач запропонував класифікацію моделей зовнішнього магнітного поля силового електроустаткування.*

35. Устройство для измерения дипольного магнитного момента электрооборудования: А.с. 1699258 СССР, МКИ G 01 R 33/06. / Е.В. Брыкова, В.И. Дегтярев, В.С. Лупиков, И.В. Мезенцев. – №4740755/21; Заявлено 03.07.89. – 5 с.

*Здобувач виконав теоретичне обґрунтування методу визначення магнітного моменту.*

36. Устройство для измерения компонент дипольного магнитного момента электрооборудования: А.с. 1701031 СССР, МКИ G 91 R 33/00 / Е.В. Брыкова, В.И. Дегтярев, В.С. Лупиков, Г.К. Файрузов. – №4748139/21; Заявлено 11.09.89. – 6 с.

*Здобувач сформулював технічну ідею способу компенсації сигналу зовнішньої завади за рахунок використання датчиків з різною чутливістю.*

37. Пат. 14813А Україна, МПК G 01 R 33/24. Спосіб визначення залишкової та індукованої складових компонента магнітної індукції статичного зовнішнього магнітного поля ферромагнітного виробу / А.В. Єрисов, В.С. Лупіков, В.Ю. Розов, О.О. Соколов, В.В. Теличко. – №95125251. Заявлено 12.12.95; Опубл. 30.06.97, Бюл. №3. – 2 с.

*Здобувач виконав теоретичне обґрунтування способу поділу статичного магнітного поля на індуковану і залишкову складові.*

38. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лупиков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей: Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; №791. – К.: 1996. – 47 с.

*Здобувач запропонував методи визначення часової структури магнітного поля і структурні схеми систем автоматичної компенсації магнітного поля розподільчих пристроїв.*

39. Способ измерения дипольного магнитного момента вблизи электрооборудования / В.С. Лупиков, Е.В. Брыкова, И.В. Мезенцев; Укр. заочн. политехн. ин-т. – Харьков, 1989. – 7 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 17.11.89, №2650-Ук89.

*Здобувач обґрунтував спосіб визначення магнітного моменту за результатами виміру магнітного поля поблизу електроустаткування.*

40. Инженерная методика расчета мультипольных составляющих напряженности точечного источника поля / В.С. Лупиков, Е.В. Брыкова; Укр. заочн. политехн. ин-т. – Харьков, 1990. – 13 с. – Рус. – Деп. в УкрНИИНТИ 06.09.90, №1533-Ук90.

*Здобувач отримав аналітичні співвідношення для мультипольних складових напруженості зміщеного точкового джерела магнітного поля.*

41. Лупиков В.С., Брыкова Е.В. Разработка магнитоизмерительной системы с анализатором спектра мультиполей // Тез. докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. "Измерительные информационные системы" (ИИС-89). ЦП ВНТО приборостроителей им. С.И. Вавилова. – Ульяновск: НПК УЦМ. – 1989. – С. 73.

*Здобувач обґрунтував метод визначення магнітного моменту.*

42. Дегтярев В.И., Лупиков В.С., Мезенцев И.В. Магнитоизмерительный датчик с автоматической калибровкой в процессе измерений // Тез. докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. "Микроэлектронные датчики в машиностроении". – Ульяновск: НПК УЦМ. – 1990. – С. 134.

*Здобувач обґрунтував технічну ідею використання короткого імпульсу для автоматичного калібрування вимірювального датчика.*

43. Дегтярев В.И., Лупиков В.С., Мезенцев И.В. Система магнитоизмерительных датчиков, устойчивых к воздействию внешних помехонесущих полей // Тез. докладов II Всесоюз. совещания молодых ученых и специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления". – М.: Московский ин-т электронного машиностроения. – 1990. – С.21.

*Здобувач сформулював ідею автоматичної компенсації сигналу завади шляхом її попереднього запам'ятовування і відтворення в процесі вимірів.*

44. Брыкова Е.В., Заутнер Ф.Л., Лупиков В.С. Широкополосный первичный индукционный преобразователь // Тез. докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. "Методы и средства измерения механических параметров в системах контроля и управления". – Пенза: Приволжский Дом экономических и научно-технических знаний. – 1992. – С. 76-78.

*Здобувач сформулював ідею лінеаризації характеристики первинного індукційного перетворювача в області низьких частот.*

45. Дегтярев В.И., Лупиков В.С., Брыкова Е.В. Устройство ортогонального разложения переменного сигнала для магнитоизмерительной системы // Тез. докладов IV Научно-техническое совещание ученых и специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления". – М.: Московский ин-т электронного машиностроения. – 1992. – С. 83.

*Здобувач обґрунтував розкладання змінного сигналу вимірювальної системи на синусну і*

*косинусу складові.*

46. Лупіков В. Об'єднана дипольна модель системи точкових джерел магнітного поля // Тез. доп. 1-ї Міжнар. науч.-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці". – Львів: Держ. ун-т "Львівська політехніка". – 1995. – С. 34-35.
47. Лупіков В., Пелевин Д. Магнитная диагностика остаточной намагниченности ферромагнитной детали // Сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. "Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования. Элементная база и комплектующие для приборов НК. Подготовка специалистов в сфере неразрушающего контроля и технической диагностики". – Харьков: Харьк. гос. техн. ун-т радиоэлектроники. – 1998. – С. 222-227.  
*Здобувач обґрунтував застосування об'єднаної дипольної моделі для визначення поля залишкової намагніченості ферромагнітної деталі.*
48. Розов В.Ю., Волохов С.А., Лупіков В.С., Кильдишев А.В., Ерисов А.В. Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению "ISC'98". – Т. 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27.  
*Здобувач запропонував наукове обґрунтування технології компенсації магнітного поля в частині розподільчих пристроїв і комутаційної апаратури.*
49. Лупіков В.С., Пилюгина О.Ю. Комплексная оценка эффективности методов снижения магнитного поля электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению "ISC'98". – Т. 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 35-43.  
*Здобувач виконав узагальнення експериментальних даних по ефективності методів зниження зовнішнього магнітного поля розподільчих пристроїв і запропонував методику оцінки ефективності.*
50. Клименко Б.В., Лупіков В.С., Байда Е.И., Емельянов В.Л. Исследование магнитных аномалий вблизи кольцевого постоянного магнита // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вип. 16. – С. 74-79.  
*Здобувач виконав теоретичне обґрунтування існування особливих точок поля поблизу кільцевого постійного магніту.*

## АНОТАЦІЇ

**Лу́пиков В.С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2003.

Дисертація присвячена вдосконаленню конструкції низьковольтних комплектних пристроїв в частині ефективної компенсації зовнішнього магнітного поля, створюваного ними поблизу поверхні, для вирішення проблем електромагнітної сумісності і магнітної екології. Створено наукові основи технології компенсації поля як сукупності процесів визначення часової і просторової структур поля за даними магнітних вимірювань, синтезу засобів компенсації і налагодження електромагнітних систем автоматичної компенсації. Теоретично обґрунтовано модель поля, яка забезпечує визначення структури моделюючих джерел за даними магнітних вимірювань. Визначена часова структура поля у залежності від амплітуд струмів незалежних контурів силового кола. Розроблено метод оптимального синтезу засобів компенсації поля при їх комбінованому застосуванні. Запропоновано структури систем автоматичної компенсації і метод налагодження їх параметрів. Основні результати досліджень використані при виконанні держбюджетних робіт, зменшенні магнітного поля електроустановок і в навчальному процесі.

*Ключові слова:* низьковольтний комплектний пристрій, електромагнітна сумісність, екологічність, зовнішнє магнітне поле, теорія і методи досліджень, способи вимірювання, електромагніт компенсатор поля.

**Лу́пиков В.С. Научные основы технологии компенсации магнитного поля вблизи низковольтных комплектных устройств.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, 2003.

Диссертация посвящена развитию теории компенсации внешнего магнитного поля, создаваемого низковольтными комплектными устройствами вблизи поверхности, и совершенствованию их конструкции для решения проблем электромагнитной совместимости и магнитной экологии.

Разработаны научные основы технологии компенсации внешнего магнитного поля как совокупности процессов определения пространственной и временной структур источников поля низковольтного комплектного устройства на основе распределения напряженности, синтеза

средств компенсации, которые дополняют конструкцию этого устройства, и настройки электромагнитов систем автоматической компенсации.

Теоретически обоснована объединенная дипольная модель как разновидность дискретных моделей, в которой моделирующими источниками являются магнитные моменты выделенных объемов, полученных условной разбивкой (дискретизацией) объема шкафа низковольтного комплектного устройства на меньшие объемы. Использование модели повышает точность определения магнитных моментов выделенных объемов по данным измерений напряженности вблизи низковольтного комплектного устройства и позволяет приближать границу области компенсации поля к его поверхности при увеличении числа выделенных объемов.

Усовершенствован метод анализа временной структуры магнитного момента сложных трехфазных цепей с помощью модифицированных схем замещения (ММ-схем). Установлена идентичность временных структур напряженности поля и магнитного момента низковольтного комплектного устройства и их зависимость от амплитуд токов независимых контуров силовой цепи. Метод позволяет упростить синтез средств компенсации поля и минимизировать число режимов работы низковольтного комплектного устройства при настройке средств компенсации.

Разработан метод оптимального синтеза средств, которые применяются в комбинации для компенсации внешнего магнитного поля низковольтных комплектных устройств. Метод позволяет определить оптимальные величины эффективности кожного из средств, которые в комбинации обеспечивают требуемую эффективность компенсации при минимуме их стоимости с учетом условий конкретного производителя.

Разработан метод компенсации внешнего магнитного поля трехфазных комплектных устройств, основанный на балансировании магнитных моментов выделенных объемов с помощью дополнительно устанавливаемых в них компенсирующих источников. Для реализации метода разработаны структурные схемы параметрических систем автоматической компенсации магнитного момента и внешнего магнитного поля низковольтных комплектных устройств и алгоритмы независимой настройки их электромагнитов компенсаторов по данным измерений напряженности поля. Обоснована возможность компенсации поля с помощью таких систем с эффективностью до 100 единиц.

Даны рекомендации по конструктивному выполнению токопроводов и элементов системы автоматической компенсации, выполнение которых позволяет достичь высокой эффективности компенсации внешнего магнитного поля практически не влияя на основные технические параметры низковольтных комплектных устройств.

Разработаны и реализованы способы высокоточного (с погрешностью не более 0,01) определения магнитного момента по данным измерений напряженности магнитного поля

вблизи поверхности низковольтного комплектного устройства.

Разработаны и введены впервые в действие три государственных стандарта Украины в области электромагнитной совместимости технических средств, устанавливающих их стойкость к воздействию внешнего магнитного поля, а также стандарт с нормами параметров этого поля.

Результаты исследований использованы при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ, в технологии минимизации уровня магнитного поля промышленных образцов устройств и в учебном процессе.

*Ключевые слова:* низковольтное комплектное устройство, электромагнитная совместимость, экологичность, внешнее магнитное поле, теория и методы исследований, способы измерения, электромагнит компенсатор поля.

**Lupikov V.S. Scientific foundations of technology of magnetic field compensation in the vicinity of low-voltage complete devices.** – Manuscript.

Thesis for Doctor's degree in Engineering Sciences by specialty 05.09.01 – Electrical Machines and Apparatus. – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2003.

The dissertation deals with perfection of low-voltage complete devices construction concerning effective compensation of their external magnetic field created in the vicinity of their surface and solves electromagnetic compatibility and magnetic ecology problems. Scientific foundations of field compensation technology are formulated as complex of processes including determination of the field time and spatial structures using magnetic measuring data, synthesis of field compensating means and adjustment of electromagnets in automated compensation systems. A field model for determination of field-simulating sources structure on the basis of magnetic measuring data is theoretically grounded. Time structure of the field is obtained as function of power circuit currents amplitudes. A method of optimal synthesis of the field compensating means is developed under their combined application. Structures of automated compensation systems and a method of their parameters adjustment are developed. The main research results are utilized and implemented at accomplishment of state budget projects, in technology of power equipment magnetic field diminishment and in students training.

*Key words:* low-voltage complete device, electromagnetic compatibility, magnetic ecology, external magnetic field, theory and methods of researches, methods of measuring, field compensating electromagnet.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АМВС	– автоматизована магнітовимірювальна система;
ВО	– виділений об'єм;
ЕК	– електромагніт компенсатор поля;
ЗМП	– зовнішнє магнітне поле;
ММ	– магнітний момент;
ММ-схема	– модифікована схема електричного кола;
НКП	– низьковольтний комплектний пристрій;
ОДМ	– об'єднана дипольна модель;
ООЗ	– область однакового знаку;
САК	– система автоматичної компенсації.

Підп. до друку 11.12.2003 р. Формат видання 145×215.

Формат папіру 60×90/16. Папір Captain. Друк – ризографія.

Обсяг 1,9 авт. арк. Наклад 100 прим. Зам. № 544.

---

Видавничий центр НТУ "ХПІ". Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---