

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

**Чепелюк Олександр Олександрович**

УДК 621.316.53:621.318.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З  
ПОПЕРЕЧНИМ РУХОМ ЯКОРЯ ДЛЯ КОНТАКТОРІВ ЗМІННОГО  
СТРУМУ ПОВОРОТНОГО ТИПУ**

Спеціальність 05.09.01- Електричні машини й апарати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі електричних апаратів Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Клименко Борис Володимирович,  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
професор кафедри електричних апаратів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Загірняк Михайло Васильович,  
Кременчуцький державний політехнічний уні-  
верситет, м. Кременчук,  
ректор;

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

Провідна установа: Одеський національний політехнічний універси-  
тет, кафедра електричних машин,  
Міністерство освіти і науки України, м. Одеса.

Захист відбудеться 06.04.2006 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.08 у 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 27.02. 2006 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час потреба в контакторах змінного струму з поворотною контактною системою категорії основного застосування АС-3 і АС-4 у народному господарстві України обчислюється десятками тисяч штук у рік. Задоволення цієї потреби відбувається в основному за рахунок контакторів серій КТ6000 і КМ26 (з керуванням змінним струмом) і контакторів серії КТП6000 (з керуванням постійним струмом). Контактори серій КТ6000 і КТП6000 різних величин, а також їх модифікації з защіплюючим механізмом (серії КТ6030/2, КТ6030/3), що випускаються промисловістю України і Росії, є морально застарілими і значно уступають сучасним закордонним аналогам по масі і габаритам. У зв'язку з відсутністю виробництва окремих типовиконань цих апаратів в Україні (контактори на номінальні струми 160 і 250А з керуванням постійним струмом та ін.) потреба в них задовольняється постачаннями з Росії, а також постачаннями їхніх аналогів ведучими закордонними фірмами (АВВ - Німеччина, Арена - Польща, ТЕ - Франція і ін.).

Для задоволення внутрішніх потреб держави в контакторах вищезгаданих серій (чи їхніх аналогах), з огляду на сформоване виробництво цих апаратів в Україні, актуальною стала задача розробки й освоєння у виробництві таких контакторів з високими техніко-економічними характеристиками. Для вирішення цієї важливої народногосподарської задачі потрібне проведення наукових досліджень, спрямованих на вибір і обґрунтування перспективних напрямків розвитку і шляхів удосконалення конструкцій цих апаратів з метою підвищення їхніх техніко-економічних показників (зменшення маси, габаритів, вартості, споживання електроенергії, підвищення терміну служби й ін.).

**Зв'язок роботи з науковими програмами і планами.** Дисертаційна робота була виконана на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП". Здобувач, як відповідальний виконавець, проводив дослідження в рамках науково-дослідної роботи "Розробка рекомендацій по удосконаленню конструкцій приводних електромагнітів контакторів змінного струму з управлінням постійним струмом", яка виконувалась у відповідності до договору №33280 від 04.03.2004 р., укладеного між НТУ "ХП" і ЗАТ "Електричні низьковольтні апарати і системи" (АТ "ЕНАС", м. Харків) та була пов'язана з планами розвитку даного підприємства. У зазначеному договорі було обговорено, що роботи з удосконалення конструкцій приводних електромагнітів постійного струму (ЕМП) контакторів змінного струму необхідно проводити ґрунтовно до базових контакторів серії КМ26 з управлінням змінним струмом (розробник - АТ "ЕНАС"; виробник - ВАТ "Укрелектроапарат" м. Хмельницький), які по своїх техніко-економічних показниках можуть бути прирівняні до кращих закордонних аналогів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка рекомендацій з удосконалення приводних ЕМП і вибору їхніх раціональних параметрів для контакторів змінного струму, зокрема, контакторів серій КМ26-33 і КМ26-35 з ціллю підвищення їхніх техніко-економічних показників, а саме: зниження енергоспоживання і витрат активних матеріалів (обмотувального проводу та постійного магніту - у ЕМП з магнітним залипанням) що приводить до зменшення маси, габаритів і вартості ЕМП в контактормі в цілому.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі були поставлені наступні задачі:

- Провести огляд і аналіз науково-технічної і патентної літератури по конструкціях приводних ЕМП контакторів змінного струму та системам керування ЕМП, а також по існуючих методах розрахунку ЕМП.
- Розробити нові технічні рішення ЕМП для контакторів змінного струму, спрямовані на підвищення техніко-економічних показників контакторів у цілому (ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами в робочих зазорах, ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням, а також системи керування ЕМП із магнітним залипанням).
- Розробити зручні у застосуванні з використанням ПЕОМ методики розрахунку статичних тягових характеристик, нагрівання, обмотувальних даних і магніторухових сил (МРС) удосконалених ЕМП.
- Дослідити вплив розмірів феромагнітних шунтів у ЕМП з поперечним рухом якоря на статичний тяговий момент у початковому положенні якоря.
- Розробити рекомендації щодо вибору раціональних параметрів магнітної системи ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами.
- Дослідити вплив розмірів постійного магніту та немагнітних ділянок у ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням на статичний тяговий момент у притягнутому положенні якоря.
- Розробити рекомендації щодо вибору раціональних параметрів магнітної системи ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням.
- Розробити рекомендації щодо вибору раціональних обмотувальних даних, спрямованого на зменшення витрат обмотувального проводу та споживаної потужності в запропонованих ЕМП з поперечним рухом якоря.
- Практично реалізувати нові технічні рішення електромагнітів з покращеними, внаслідок вибору раціональних параметрів, техніко-економічними показниками в конструкціях контакторів змінного струму і здійснити перевірку результатів розрахунків експериментальним шляхом.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні, магнітні і теплові процеси в ЕМП із поперечним рухом якоря.

*Предмет дослідження* – ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами в робочих зазорах і ЕМП із магнітним залипанням.

*Методи дослідження.* Дисертаційна робота базується на фундаментальних положеннях теорії електричних апаратів. У роботі використані чисельні методи розрахунку магнітних полів та нагрівання обмоток в ЕМП, методи теорії планування експериментів, які дозволили проаналізувати вплив геометричних параметрів магнітних систем на статичний тяговий момент у запропонованих ЕМП та визначити раціональні параметри магнітних систем і раціональні обмоткові дані в ЕМП.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

- Розроблено двовимірну розрахункову модель магнітних систем ЕМП з поперечним рухом якоря, в якій круглий у перерізі сердечник електромагніта замінений прямокутним за умови рівності в них магнітної енергії.
- Отримано розрахункові залежності статичного тягового моменту в ЕМП із попе-

речним рухом якоря в початковому положенні якоря від розмірів феромагнітних шунтів у робочих зазорах.

- Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних розмірів феромагнітних шунтів з метою зменшення МРС спрацювання ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами у робочих зазорах.
- Отримано розрахункову залежність статичного тягового моменту в ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням при притягнутому якорі від ширини постійного магніту та товщини немагнітної прокладки між ярмом та полюсним наконечником.
- Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних розмірів постійного магніту та немагнітної прокладки між ярмом та полюсним наконечником з метою зменшення об'єму постійного магніту в ЕМП з магнітним залипанням.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

- Розроблено конструкції приводного ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами в робочих зазорах, застосування якого у контакторах змінного струму, забезпечує більш раціональне їхнє конструювання і приводить до зменшення габаритних розмірів. Такі ЕМП рекомендовані для контакторів, працюючих у повторно-короткочасному режимі з великою частотою комутацій.
- Розроблено конструкцію ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням із двох і однообмотковим виконанням котушки, у якому утримання якоря в притягнутому положенні здійснюється за рахунок магнітного поля постійного магніту. Використання електромагніта даного типу в контакторах змінного струму забезпечує відсутність споживання електроенергії в увімкненому режимі, а також приводить до істотного зменшення витрати обмотувального проводу. Застосування таких електромагнітів доцільно в контакторах, призначених для роботи в тривалому і переривчасто-тривалому режимах.
- Розроблено системи керування двох і однообмотковим ЕМП із магнітним залипанням з випрямленням напруги живлення, застосування яких полегшує умови комутації перемикаючого контакту і, за рахунок збільшення струму в обмотках, приводить до додаткового зниження витрати обмотувального проводу.
- Врахування розроблених рекомендацій по вибору раціональних параметрів магнітних систем та обмоткових даних у запропонованих ЕМП із поперечним рухом якоря приводить до зниження у ЕМП енергоспоживання і витрат активних матеріалів (обмотувального проводу та постійного магніту - у ЕМП з магнітним залипанням).
- Результати і рекомендації, отримані в дисертації, враховані і практично реалізовані в АТ “ЕНАС” (м. Харків), а також використовуються на кафедрі електричних апаратів НТУ “ХП” при підготовці фахівців зі спеціальності “Електричні машини і апарати” у дисциплінах “Електричні апарати” і “Теорія і розрахунок електромагнітних систем” та при дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка нових технічних рішень ЕМП для контакторів змінного струму; методик розрахунку статичного тягового моменту, нагрівання, обмотувальних даних і МРС запропонованих ЕМП; дослідження впливу параметрів магнітних систем запропонованих ЕМП на статичний тяговий момент та

розробка рекомендацій по вибору їх раціональних значень; розробка рекомендацій по вибору раціональних обмоткових даних з метою зменшення енергоспоживання і витрат активних матеріалів у ЕМП (обмотувального проводу та постійного магніту - у ЕМП з магнітним залипанням). Внесок здобувача у спільних наукових працях по темі дисертації вказаний у списку опублікованих праць.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічних нарадах, що проводилися на кафедрі електричних апаратів НТУ “ХП” та в АТ “ЕНАС”, а також на IV і VI міжнародних науково-технічних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків, 1996 р., 1998 р.); на 3 міжнародній науково-технічній конференції Unconventional electromechanical and electrical systems - UEES’97 (м. Алушта, 1997 р.) та на міжнародних симпозіумах “Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (м. Харків, 2001 р., 2002 р., 2003 р., 2004 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи відображені в 10 публікаціях, серед яких 6 статей опубліковані у фахових виданнях ВАК України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків та 9 додатків. Повний обсяг дисертації складає 220 сторінок, з них 33 ілюстрації до тексту, 23 ілюстрації на 17 сторінках; 14 таблиць до тексту; 2 таблиці на 2 сторінках, 9 додатків на 54 сторінках; 135 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

**У першому розділі** проведено огляд і аналіз науково-технічної і патентної літератури по конструкціях ЕМП у контакторах змінного струму і системам керування ЕМП, а також проведений огляд існуючих методів розрахунку ЕМП, що дозволили зробити наступні висновки:

1. Для контакторів змінного струму що проектуються доцільною є розробка приводних ЕМП, у яких рух якоря здійснюється поперек напрямку осі котушки (ЕМП із поперечним рухом якоря), що забезпечить більш раціональне компонування контакторів.
2. Для контакторів змінного струму призначених для роботи в тривалому і переривчасто-тривалому режимах доцільною є розробка приводних ЕМП із магнітним залипанням. Використання таких ЕМП забезпечує відсутність споживання електроенергії в увімкненому режимі, а також дозволяє зменшити витрати обмотувального проводу в порівнянні з традиційними ЕМП.
3. Для ЕМП із магнітним залипанням у контакторах змінного струму доцільною є розробка систем керування змінним струмом з випрямленням напруги живлення.
4. Найбільш прийнятними методами розрахунку магнітних полів у ЕМП, метою яких є визначення тягових зусиль у електромагніті, є чисельні методи, серед яких найбільш часто в інженерній практиці використовуються метод електроаналогії (метод ділянок) і метод кінцевих елементів.
5. Метод теплового розрахунку з використанням формули Ньютона має прийнятну точність і найбільш часто використовується в практиці інженерних розрахунків об-

моток ЕМП.

У другому розділі розроблені нові технічні рішення приводних ЕМП із поперечним рухом якоря для контакторів змінного струму, а саме: варіанти конструкції ЕМП із феромагнітними шунтами в робочих зазорах (рис. 1, рис. 2); конструкція ЕМП із магнітним залипанням (рис. 3); системи керування двох і однообмотковим ЕМП із магнітним залипанням з випрямленням напруги живлення (рис. 4, рис. 5).

Рухома частина базового ЕМП на рис. 1 - якір 4 закріплений жорстко на валові 5, на якому обертаються і рухомі контакти. Вісь обертання якоря при цьому співпадає з віссю обертання вала (точка О), однак, робоча площа якоря зміщена щодо осі обертання вала (встановлена прокладка 6).

У результаті такого компонування електромагніта вісь сердечника 2 з котушкою 3, установлених між двох скоб (ярем) 1, розташовується паралельно площини установки контактора, що приводить до зменшення його габаритного розміру по глибині. Якір нахилений щодо нерухомої частини електромагніта, при цьому величини робочих зазорів будуть різними -  $\delta_1$  і  $\delta_2$ .

Для збільшення тягових зусиль при початкових кутах повороту якоря в ЕМП із поперечним рухом якоря нами запропоновано використання в робочих зазорах феромагнітних шунтів - рис. 2.

Попередні розрахунки магнітної системи на рис. 1 проводилися комбінованим методом [8], що сполучає у собі метод дихотомії і метод ітерацій при розрахунку ЕМП по схемах заміщення. Вказаний метод був реалізований у вигляді програми для ПЕОМ. Внаслідок попередніх розрахунків були визначені наступні геометричні параметри (в мм):  $a_{ск}=11,5$ ;  $c_{ск}=68$ ;  $v_{ск}=68$ ;  $d_c=32$ ;  $l_c=75$ ;  $a_я=8$ ;  $l_я=141$ ;  $v_я=68$ ;  $l_0=30$ ,  $c_0=17,5$ . Величини початкових робочих зазорів:  $\delta_1=6,5$  мм,  $\delta_2=21,5$  мм, що відповідає куту повороту якоря  $\alpha=9,8^0$ . Матеріал деталей магнітопроводу - сталь 10895.

Рис. 1. ЕМП з поперечним рухом якоря для контактора змінного струму

На підставі отриманих результатів був виготовлений макетний зразок контактора з запропонованими варіантами ЕМП та проведені експериментальні дослідження статичних тягових характеристик [4]. Число витків котушки досліджуваного ЕМП склало  $w=15500$ , діаметр міді обмоткового проводу  $d_m=0,224$  мм, марка проводу ПЕТ-155. Номінальна напруга живлення котушки  $U_n=220$  В. Розміри феромагнітних шунтів на рис. 2.2 з якими проводилися дослідження (в мм):  $c_{ш1}=40$ ;  $\Delta_{ш1}=3$ ;  $a_{ш1}=17$ ;  $v_{ш1}=68$ ,  $c_{ш2}=30$ ;  $\Delta_{ш2}=8$ ;  $h=10$ ;  $v_{ш2}=68$ .

Експериментальні дослідження статичних тягових характеристик запропонованих ЕМП показали, що кожне із запропонованих технічних рішень дає певну крутизну і положення тягової характеристики, які можуть бути змінені при зміні розмірів шунтів. Тяговий момент при початкових кутах повороту і на значному ході якоря найбільш істотно збільшується в ЕМП із двома феромагнітними шунтами.

Зменшення тягового моменту при притягнутому якорі у ЕМП з феромагнітними шунтами у даному випадку не є недоліком, оскільки в таких ЕМП тяговий момент при притягнутому якорі залишається більшим від максимального протидіючого моменту контактора, що гарантує надійне утримання якоря.

У розробленому ЕМП із постійними магнітами (рис. 3) пропонується використання постійних магнітів на основі композиції Nd-Fe-B (із залишковою магнітною індукцією  $B_r$  до 1,2 Тл і коерцитивною силою  $H_c$  до 1000 кА/м). Спрацьовування такого ЕМП відбувається при пропусценні через пускову обмотку 8 постійного струму, що створює в робочих зазорах ( $\delta_1$  - між якорем 1 і полюсним наконечником 3,  $\delta_2$  - між якорем і ярмом 10) магнітний потік, що діє в одному напрямку з потоком постійного магніту 4.

Після притягування якоря до сердечника 7 (або трохи раніше) обмотка відключається, і утримання якоря в притягнутому положенні відбувається за рахунок поля постійного магніту. Для відключення контактора через відключаючу обмотку 9 пропускають струм протилежного напрямку, що приводить до зменшення сумарного магнітного потоку у робочих зазорах та тягового моменту і рухові якоря під дією протидіючого моменту. Для переключення обмоток у ЕМП застосовується перемикаючий контакт, механічно зв'язаний з якорем.

Немагнітна прокладка 2 забезпечує механічну міцність ЕМП, оскільки для виключення розбивання крихкого постійного магніту між ним і полюсним наконечником (і скобою 5) встановлюються пружні прокладки. Таке конструктивне рішення також перешкоджає розмагнічуванню постійного магніту зустрічним магнітним потоком при відключенні.

Для попередніх розрахунків магнітної системи й оцінки впливу параметрів постійного магніту і розмірів деталей та ділянок магнітопроводу на тяговий момент у ввімкненому режимі було запропоновано і реалізовано у вигляді програми для ПЕОМ спрощену методику розрахунку магнітної системи по схемах заміщення без врахування втрат МРС у сталі. При виборі розмірів деталей магнітопроводу за зазначеною методикою необхідно контролювати значення магнітної індукції в цих деталях, з метою виключення насичення окремих його ділянок.

Внаслідок аналізу отриманих розрахункових залежностей сумарного тягового моменту від МРС відключаючої обмотки було встановлено, що для надійного відключення електромагніта МРС відклю-

Рис. 2. Варіанти конструкції ЕМП із поперечним рухом якоря (а - із шунтом у меншому зазорі, б - із шунтом у більшому зазорі, в - із шунтами в двох зазорах)



чаю-чої обмотки доцільніше розраховувати для номінальних параметрів постійних магнітів і обмотки, оскільки відхилення цих параметрів у реальних конструкціях ЕМП може від-буватися як у більшу, так і у меншу сторони.

На підставі проведених попередніх розрахунків та аналізу впливу параметрів постійного магніту і розмірів деталей та ділянок магнітопроводу на тяговий момент у ввімкненому режимі були визначені геометричні параметри базового варіанта ЕМП (в мм):  $l_c=48$ ;  $d_c=32$ ;  $a_{ск}=11,5$ ;  $b_{ск}=68$ ;  $a_m=12$ ,  $l_m=6$ ,  $b_m=68$  - ширина, висота та розмір постійного магніту в глибину креслення;  $a_n=29$ ,  $l_n=4$  - ширина и висота полюсного наконечника; ( $\delta_{np}=1$  - товщина немагнітної прокладки;  $\delta_m=0,25$  - величина неробочого зазору між постійним магнітом і полюсним наконечником (скобою 5)). Параметри постійного магніту:  $B_r=1,20$  Тл;  $H_c=800$  кА/м.

Рис. 3. ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням

Використання запропонованих нами систем керування двох і однообмотковим ЕМП із магнітним залипанням з випрямленням напруги живлення (рис. 4, рис. 5) полегшує умови комутації перемикаючого контакту і за рахунок збільшення струму в обмотках, приводить до додаткового зниження витрати обмотувального проводу.

У схемах на рис. 5 для зменшення струму відключення встановлено резистор R. Для усунення втрат у резисторі при відключенні в неробочий для обмотки напівперіод (струм протікає по R-VD3 - див. рис. 5а) у схемі на рис. 5б встановлено діод VD4.

Рис. 4. Схема включення ЕМП із магнітним залипанням із двохлапівперіодним випрямленням напруги живлення пускової обмотки П(І) та однохлапівперіодним - відключаючої обмотки О(0)

Рис. 5. Схеми включення однообмоткового ЕМП із магнітним залипанням з однохлапівперіодним випрямленням напруги живлення

Високі пульсації електромагнітної сили при однонапівперіодному випрямленні напруги живлення обмоток не мають негативного впливу на роботу електромагніта, оскільки обмотки працюють в імпульсному режимі, і після притягання якоря вони відключаються.

**У третьому розділі** за результатами розрахунків магнітних систем і статичного тягового моменту у запропонованих ЕМП розроблені рекомендації щодо вибору раціональних параметрів магнітних систем, при яких може бути забезпечене зниження витрат активних матеріалів (маси мідного обмотувального проводу і постійного магніту - у ЕМП з постійним магнітом) та зменшення енергоспоживання.

Для розрахунку магнітних систем і статичного тягового моменту у ЕМП запропонована двовимірна розрахункова модель з використанням при розрахунку магнітної системи методу кінцевих елементів.

Метод кінцевих елементів заснований на мінімізації функціонала магнітної енергії, що у випадку двомірного поля перетворюється до виду:

$$W = h \cdot \int_S \left( \int_B \vec{H} \cdot d\vec{B} \right) \cdot dS - \int_{S_1} \vec{A} \cdot \vec{j} \cdot dS_1, \quad (1)$$

де  $h$  - глибина магнітної системи перпендикулярно площини креслення ЕМП;  $S$  - площа поверхні магнітопроводу і навколишнього простору;  $S_1$  - площа, займана котушкою;  $\vec{j}$  - сумарна щільність струму в провідниках,  $\vec{A}$  - векторний магнітний потенціал (може бути введений за допомогою співвідношень:  $rot \vec{A} = \vec{B}$ ,  $div \vec{A} = 0$ ).

Формула для електромагнітного моменту, що діє на якір буде мати вигляд:

$$\vec{M} = \frac{1 \cdot h}{2} \cdot \int_L \left( \vec{r} \times \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot \vec{B} + \vec{r} \times \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot \vec{H} - \vec{r} \times \vec{n} \cdot \vec{B} \cdot \vec{H} \right) \cdot dl, \quad (2)$$

де  $L$  - контур, що охоплює об'єкт інтегрування (якір);  $\vec{r}$  - радіус-вектор;  $\vec{n}$  - вектор зовнішньої нормалі.

При переході до плоскої (двовірної) задачі круглий у перерізі сердечник ЕМП на рис.1 - рис.3 замінюється прямокутним, розміри якого можуть бути визначені з рівності магнітної енергії реального і розрахункового об'ємів (рис. 6).

Оскільки, як показали попередні розрахунки, значення магнітної індукції в будь-якій точці поперечного перерізу сердечника  $S_c$  на елементарній ділянці його дов-

жини  $dl_c$  практично постійне, для збереження умови рівності магнітної енергії, умова вибору еквівалентної висоти сердечника (рис. 6б) у розрахунковій моделі буде мати вигляд:

$$a_c = \frac{dV}{h \cdot dl_c} = \frac{S_c}{h} = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4 \cdot h}, \quad (3)$$

де  $a_c$  - розрахункова висота сердечника в моделі;  $dV$  - об'єм елементарної ділянки сердеч-

а б  
Рис. 6. Розташування якоря 1 і сердечника в електромагніті (а - у запропонованих варіантах виконання; б - у розрахунковій моделі)

ника  $dl_c$  в ЕМП з поперечним рухом якоря;  $h$  - розрахункова глибина сердечника (і якоря) в моделі;  $d_c$  - діаметр круглого сердечника 2 в ЕМП.

Розмір  $k_1 = k + \frac{d_c - a_c}{2}$  визначався з рівності магнітних провідностей між якорем і сердечником в реальній конструкції ЕМП і в розрахунковій моделі.

Розрахунки магнітних полів та статичного тягового моменту у магнітних системах ЕМП проводилися за допомогою програмного комплексу FEMM.

*Вибір раціональних параметрів магнітної системи ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами* (мінімізацію МРС магнітної системи за рахунок вибору раціональних розмірів феромагнітних шунтів) доцільно проводити при початковому положенні якоря, оскільки МРС намагнічуючої обмотки ЕМП визначається виходячи з необхідного тягового зусилля в початковому положенні.

Найбільшою мірою на параметри тягової характеристики в початкових положеннях якоря при фіксованій МРС магнітної системи впливають: довжина шунта в меншому робочому зазорі -  $a_{ш1}$ ; висота шунта в більшому робочому зазорі -  $h_{ш}$ ; товщина шунта в більшому робочому зазорі -  $\Delta_{ш2}$ .

Аналіз розрахункової залежності на рис. 7 свідчить про те, що збільшення довжини шунта в меншому робочому зазорі від 0 до конструктивно обґрунтованих розмірів (20 мм) приводить до збільшення початкового тягового моменту до 40%, що підтверджує доцільність його застосування в досліджуваному ЕМП. Довжину цього шунта можна вибрати найбільшою з урахуванням конструктивних обмежень.

За даними розрахунків залежності початкового тягового моменту від  $h_{ш}$  з використанням методу найменших квадратів була отримана аналітична залежність початкового тягового моменту від висоти феромагнітного шунта в більшому робочому зазорі (4), що приведена також і у вигляді графіка на рис. 8:

$$M(h_{ш}) = 4,166 \cdot 10^{-5} \cdot h_{ш}^3 - 4,225 \cdot 10^{-2} \cdot h_{ш}^2 + 2,512 \cdot h_{ш} - 36,5. \quad (4)$$

Аналіз функції (4) на екстремум показує, що при висоті шунта 31,2 мм початковий тяговий момент має максимальне значення 2,026 Н·м, що в 1,56 рази більше, ніж у базовому варіанті.

Рис. 7. Залежність тягового моменту в початковому положенні якоря від довжини шунта в меншому робочому зазорі

Рис. 8. Залежність тягового моменту в початковому положенні якоря від висоти шунта в більшому робочому зазорі

Аналіз розрахункової залежності на рис. 9 свідчить про наявність раціонального значення товщини шунта в більшому робочому зазорі при збільшеній його висоті (див. рис. 8), при яких досягається максимальне значення початкового тягового моменту в ЕМП. У даному випадку раціональною є товщина шунта в більшому робочому зазорі 4 мм. Тяговий момент при цьому - 2,28 Н·м.

Рис. 9. Залежність тягового моменту в початковому положенні якоря від товщини шунта в більшому робочому зазорі при збільшеній його висоті

При визначенні мінімальної МРС магнітної системи з раціональними розмірами шунтів необхідно виходити з вимоги технічних умов на контактори електромагнітні про неспрацьовування

електромагніта, при напрузі мережі менш 0,6 від номінального. МРС неспрацьовування магнітної системи може бути визначена графоаналітичним методом (див. рис. 10) і складає 955 А. Мінімальна МРС магнітної системи ЕМП при припустимому зниженні напруги мережі (0,85 від номінальної) при цьому складе 1353 А, що на 40% менше в порівнянні з базовим варіантом конструкції ЕМП із шунтами.

Зіставлення розрахункових характеристик на рис. 11 свідчить про працездатність покращеного, внаслідок вибору раціональних параметрів магнітної системи, варіанта конструкції ЕМП із феромагнітними шунтами. Коефіцієнт запасу по тяговому моменту при початковому куті повороту складає 1,67.

Рис. 10. Залежність початкового тягового моменту від МРС магнітної системи ЕМП і початковий протидіючий момент контактора

Рис. 11. Зіставлення статичної тягової характеристики ЕМП з раціональними параметрами магнітної системи з протидіючою характеристикою контактора

*Вибір раціональних параметрів магнітної системи ЕМП з магнітним залипанням має на меті зниження витрат постійного магніту та визначення необхідних (мінімальних) значень МРС включення та відключення магнітної системи. Вибір мінімальних розмірів постійного магніту та визначення МРС відключення необхідно проводити при притягнутому якорі.*

На значення тягового моменту в найбільшій мірі окрім розмірів і параметрів постійного магніту впливає товщина немагнітної прокладки (величина немагнітного зазору). Оскільки вплив розмірів постійного магніту і величина немагнітного зазору на тяговий магнітний момент взаємозалежні, їхній вплив можна оцінити за допомогою теорії планування експерименту.

Допущення, що приймаються при розрахунках:

- висота постійного магніту -  $l_m$ , виходячи з міцністних характеристик і технології виробництва, вибиралася мінімально допустимою (5 мм);
- у зв'язку з характером розрахункової моделі і реальною конструкцією постійного магніту, змінюваним параметром приймалася ширина постійного магніту  $a_m$  у площині рис. 3 (діапазон змінювання - 5-15 мм).
- величина немагнітного зазору -  $\delta_{np}$  змінювалася в діапазоні 1-5 мм.

У результаті обробки результатів числового двохфакторного експерименту другого порядку (ортогональний центрально-композиційний план другого порядку) на ПЕОМ, була отримана функція відгуку:

$$M = \left( \frac{X_1}{X_{01}} \right)^{1.7} \cdot \left( \frac{X_2}{X_{02}} \right)^{0.1625} \times \dots, \quad (5)$$

$$\times |3,462 + 1,367 \cdot x_1 - 1,123 \cdot x_1^2 - \varphi + 1,639 \cdot x_2 - 0,387 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,303 \cdot x_2^2 - \varphi|$$

де:  $X_1, X_2$  - натуральні значення факторів ( $a_m$  і  $\delta_{np}$ );  $X_{01}, X_{02}$  - натуральні значення нульових рівнів варіювання факторів;  $x_1, x_2$  - кодовані значення факторів;  $\varphi$  - поправка.

З урахуванням чисельних коефіцієнтів функція відгуку має вигляд:

$$M = 0,5 \cdot x_1 + 1 \cdot x_1^{1.7} \cdot 0,66 \cdot x_2 + 0,999 \cdot x_2^{0.1625} \times \dots \quad (6)$$

$$\times |5,08 + 1,367 \cdot x_1 - 1,123 \cdot x_1^2 + 1,639 \cdot x_2 - 0,387 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,303 \cdot x_2^2|$$

Максимальний модуль відносного відхилення у (6) становить 0,0111, що свідчить про досить високу точність апроксимації.

У зв'язку з тим, що вигляд функції відгуку (6) відносно простий (рис. 12), мінімальні значення ширини постійного магніту можна визначити методом сканування за умови задання мінімально допустимого тягового моменту. Для надійного утримання якоря це значення повинне перевищувати в 2-3 рази максимальне значення протидіючого моменту при притягнутому якорі, яке у макетному зразку контактора складає 4,6 Н·м. Поклавши допустиме значення тягового моменту 10 Н·м, одержимо оптимізаційне рівняння:

$$0,5 \cdot x_1 + 1 \cdot x_1^{1.7} \cdot 0,66 \cdot x_2 + 0,999 \cdot x_2^{0.1625} \times \dots \quad (7)$$

$$\times |5,08 + 1,367 \cdot x_1 - 1,123 \cdot x_1^2 + 1,639 \cdot x_2 - 0,387 \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,303 \cdot x_2^2| - 10 = 0$$

На рис. 13 показані лінії рівня тягового моменту в режимі утримання при притягнутому якорі, побудовані по (6). Причому, нижній рівень відповідає тяговому моменту 10 Н·м. Як випливає з рис. 13, мінімальне значення ширини постійного магніту 7,6 мм буде при товщині немагнітної прокладки 5 мм ( $x_1 = -0.48$  і  $x_2 = 1$ ). Подальше збільшення товщини немагнітної прокладки понад 5 мм виявляється не ефективним і конструктивно складним. Остаточна ширина постійного магніту була прийнята рівною 8 мм.

Рис. 12. Поверхня функції відгуку з лініями рівного рівня

Для визначення МРС відключення проводилися розрахунки сумарного тягового моменту при притягнутому якорі при різних ампервитках відключення системи (рис. 14). Як впливає з рис. 14, мінімальне значення тягового моменту при відключенні ЕМП складає 0,77 Н·м при МРС відключення 674 А. Діапазон ампервитків відключення, у якому тяговий момент менший або дорівнює протидіючому складає 365-778 А. З урахуванням аналізу крутизни кривої на рис. 14 може бути обране попереднє значення МРС відключення, яке є серединою інтервалу МРС, що гарантує відключення електромагніта. Остаточне значення МРС відключення може змінюватися в невеликих межах, як і у більшу, так і у меншу сторони.

Рис. 14. Залежність сумарного тягового моменту від МРС відключення при притягнутому якорі у ЕМП із магнітним залипанням

Розрахунок мінімальної МРС включення ЕМП із магнітним залипанням при напрузі 0,85 від номінальної може бути проведений на підставі вищеописаної методики, що базується на вимозі технічних умов на контактори про неспрацьовування при напрузі живлення менш 0,6 від номінальної. При напрузі 85% від номінальної мінімальна МРС включення склала 1550 А, а початковий тяговий момент - 0,92 Н·м, що в 1,46 рази перевищує протидіючий момент.

Рис. 13. Лінії рівня тягового моменту в ЕМП із магнітним залипанням при притягнутому якорі

Рис. 15. Тягова (1), утримуюча (2) характеристики ЕМП із магнітним залипанням з раціональними параметрами магнітної системи і протидіюча (3) характеристика контактора

Зіставлення розрахункових характеристик на рис. 15 свідчить про працездатність ЕМП із магнітним залипанням з раціональними параметрами магнітної системи.

**У четвертому розділі** розроблені рекомендації щодо вибору раціональних обмотувальних даних у ЕМП із раціональними параметрами магнітних систем, що забезпечують зниження витрат обмотувального проводу та зменшення енергоспоживання.

В основі задачі вибору раціональних обмотувальних даних у ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами лежить задача теплового розрахунку котушки, за результатами якого при мінімальних розмірах вікна намотування обмотки можуть бути обрані обмотувальні дані (діаметр проводу -  $d_m$  і число витків -  $w$ ), що забезпечують необхідне (визначене у третьому розділі) значення МРС магнітної системи і задовільний температурний режим котушки.

Задача теплового розрахунку вирішується з використанням узагальненої формули Ньютона, відповідно до якої середнє по об'єму перевищення температури обмотки -  $\theta$  над температурою навколишнього середовища -  $\vartheta_{nc}$  ( $\vartheta_{nc}=40^\circ\text{C}$ ) в сталому режимі:

$$\theta = \frac{U^2}{R_{\vartheta} \cdot h \cdot S} = \frac{U^2}{R_{\vartheta} \cdot h_0 \cdot (1 + \beta \cdot \theta) \cdot S}, \quad (8)$$

де:  $U = k_{\max} \cdot U_n$  - максимальна напруга джерела живлення обмотки,  $k_{\max}=1,05$  - максимальний коефіцієнт перевантаження по напрузі та струму;  $R_{\vartheta} = R_{nc} \cdot (1 + \alpha_{nc} \cdot \theta)$  - опір обмотки при температурі нагрівання обмотки  $\vartheta$ ,  $\alpha_{nc} = \alpha_0 / (1 + \alpha_0 \cdot \vartheta_{nc})$  - температурний коефіцієнт питомого опору матеріалу віднесений до температури  $\vartheta_{nc}$ ,  $\alpha_0$  - температурний коефіцієнт питомого опору матеріалу при температурі  $0^\circ\text{C}$ ;  $h = h_0 \cdot (1 + \beta \cdot \theta)$  - узагальнений коефіцієнт тепловіддачі,  $h_0, \beta$  - емпіричні коефіцієнти ( $h_0=9,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\beta=0,0059 \text{ 1}/^\circ\text{C}$ );  $S$  - площа поверхні охолодження.

При розрахунках  $S$  умови тепловіддачі з внутрішньої поверхні котушки ЕМП рекомендується враховувати за допомогою поправочного коефіцієнта  $\gamma$ :

$$S = S_H + \gamma \cdot S_{BH} + 2 \cdot S_T, \quad (9)$$

де  $S_H, S_{BH}, S_T$  - площі зовнішньої, внутрішньої і торцевої поверхонь котушки. Для досліджуваних у роботі способів намотування котушок коефіцієнт  $\gamma$  був уточнений на підставі експериментальних даних і склав 0,9.

Опір обмотки електромагніта при температурі  $\vartheta_{nc}$ :

$$R_{nc} = \frac{\rho_{nc} \cdot l_{cp} \cdot w}{s_m} = \frac{\rho_{nc} \cdot l_{cp} \cdot w}{\pi \cdot d_m^2 / 4}, \quad (10)$$

де:  $\rho_{nc} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \vartheta_{nc})$  - питомий опір матеріалу при температурі  $\vartheta_{nc}$ ;  $l_{cp} = \pi \cdot d_{вн} + a$  - довжина середнього витка обмотки,  $d_{вн}$  - внутрішній діаметр обмотки;  $w = k_3 \cdot a \cdot b / s_m$ ;  $s_m$  - площа поперечного перерізу міді обмотувального проводу;  $a, b$  - ширина та висота намотування обмотки.

Коефіцієнт заповнення обмотувального простору котушки -  $k_3$  визначався на основі отриманої, в результаті проведеного аналізу технічних даних, емпіричної залежності товщини ізоляції обмотувального проводу від діаметра міді у ньому ( $\Delta_{із} \approx 0,05 \cdot d_m + 0,0000125$ ) по формулі:

$$k_3 = k_y \frac{s_M}{s_1} = \frac{0,95 \cdot \pi \cdot d_M^2}{2 \cdot d_M + 0,00005}, \quad (11)$$

де  $s_1 = (d_M + 2 \cdot \Delta_{i3})^2$  - площа поперечного перерізу прямокутника в який вписане коло діаметром  $d_M + 2 \cdot \Delta_{i3}$ ,  $k_y$  - коефіцієнт укладки обмоткового проводу (приймається  $k_y \approx 0,9$ ).

При визначеній величині  $\theta$  мінімальне значення МРС обмотки:

$$F_{\min} = \frac{k_{\min} \cdot U_n \cdot w}{R_{nc} + \alpha_{nc} \cdot \theta}, \quad (12)$$

де  $k_{\min} = 0,85$  - мінімальний коефіцієнт перевантаження по напрузі та струму.

За результатами теплових розрахунків котушки ЕМП з феромагнітними шунтами за вказаною методикою, що була реалізована у вигляді програми для ПЕОМ, було визначено раціональні обмотувальні дані, які суттєво покращили цілий ряд техніко-економічних показників ЕМП (див. п.8 висновків).

*Вибір раціональних обмотувальних даних у ЕМП із магнітним залипанням* повинен проводитися з урахуванням обраної системи керування. Максимальне значення робочих струмів в обмотках таких ЕМП обмежується потужністю кіл керування, комутаційною здатністю перемикаючого контакту у схемі керування, а також, у випадку застосування запропонованих нами систем керування, максимальним значенням прямого струму діодів у схемах.

Котушки двохобмоткових ЕМП з постійними магнітами доцільніше виконувати каркасними, розділеними на дві секції, у яких намотуються пускова і відключаюча обмотки, що підвищує їхню ремонтоздатність. Висота вікон намотування кожної з обмоток може бути визначена при розрахунку обмотувальних даних за умови рівності ширини намотування обмоток. Сумарна висота котушки із двох обмоток закладена в електромагніті конструктивно.

Задача, спрямована на зменшення витрати обмотувального проводу у ЕМП з магнітним залипанням, полягає у визначенні при мінімальній ширині намотування обмоток діаметра обмотувального проводу і числа витків пускової (відключаючої) обмотки, при яких забезпечуються необхідні для надійної роботи МРС (визначені у третьому розділі) і струм в обмотках не перевищує припустимого значення при заданій напрузі мережі живлення.

Визначення раціональних обмотувальних даних пускової обмотки і розрахунок МРС необхідно проводити при мініальному значенні напруги живлення і максимальній температурі нагрівання. Оскільки обмотки електромагніта працюють в імпульсному режимі, зазначені розрахунки можуть бути проведені по залежностях (10)-(12) за умови нагрівання обмотки до максимального значення температури навколишнього середовища ( $\vartheta_{nc} = 40^\circ\text{C}$ ).

При визначенні обмотувальних даних відключаючої обмотки по залежностях (10)-(12) МРС по (12) варто розраховувати при усередненому по величині значенні напруги живлення, що знаходиться на середині інтервалу припустимого коливання напруги, оскільки за раціональне значення МРС відключення електромагніта було обране середнє значення інтервалу МРС гарантованого відключення. Температуру нагрівання відключаючої обмотки у (10) варто приймати середньою з інтервалу робочих температур навколишнього середовища, тобто  $20^\circ\text{C}$  (згідно ТУ  $\vartheta_{nc} = (0-40)^\circ\text{C}$ ).



При виборі раціональних обмотувальних даних ЕМП з магнітним залипанням, працюючих по схемах керування з випрямленням живлення, у розрахунках при визначенні МРС по (12) необхідно оперувати середніми значеннями напруги і струму, які складають 0,90 від діючих значень - при двохнапівперіодному випрямленні напруги живлення та 0,45 - при однонапівперіодному випрямленні напруги.

Вибір раціональних обмотувальних даних в однообмотковому ЕМП із магнітним залипанням з системою керування на рис. 5 слід виконувати при його включенні (за аналогічною методикою розрахунку двохобмоткового ЕМП), оскільки у такому ЕМП МРС включення перевищує МРС відключення.

Розрахунковий опір резистора в схемі керування при усереднених значеннях  $\vartheta_{nc}$  та напруги живлення може бути визначено, виходячи з необхідної для відключення електромагніта МРС (була визначена в третьому розділі):

$$R = \frac{k_{cp} \cdot U_{cp}}{i_{відкл}} - R_{обм20} = \frac{0,45 \cdot k_{cp} \cdot U \cdot w}{F_{відкл}} - R_{обм20}, \quad (13)$$

де:  $i_{відкл}$  - струм відключення електромагніта;  $R_{обм20}$  - опір обмотки ЕМП при усередненій температурі навколишнього середовища;  $k_{cp}=0,95$  - усереднене значення коефіцієнта перевантаження по напрузі та струму;  $U$  - номінальне діюче значення напруги.

Стандартизоване значення опору резистора знаходиться як найближче до розрахункового значення. Номінальна потужність резистора може бути визначена при порівнюванні енергії, що виділяється в резисторі за час відключення (не перевищує 0,2 с) значення потужності.

За результатами розрахунків обмотувальних даних у запропонованих ЕМП з магнітним залипанням за вказаними методиками, що були реалізовані у вигляді програм для ПЕОМ, було визначено раціональні обмотувальні дані у двох та однообмотковому виконаннях ЕМП, які суттєво покращили цілий ряд техніко-економічних показників ЕМП (див. п.9 висновків).

**У п'ятому розділі** показані макетні зразки контакторів змінного струму з новими технічними рішеннями ЕМП, а також приведені результати експериментальних досліджень запропонованих ЕМП.

Практична перевірка, отриманих у роботі рекомендацій по використанню в контакторах ЕМП із поперечним рухом якоря з феромагнітними шунтами проводилася по наступних напрямках:

- експериментальне визначення середнього перевищення температури нагрівання котушки над температурою навколишнього середовища;
- експериментальне визначення струмів спрацьовування і МРС котушки;
- експериментальне визначення статичних тягових характеристик ЕМП;
- експериментальне визначення часу спрацьовування досліджуваних ЕМП.

Практична перевірка, отриманих у даній роботі рекомендацій по використанню в контакторах ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням проводилася по наступних напрямках:

- експериментальне визначення струмів спрацьовування і МРС обмоток;
- експериментальне визначення тягового моменту при притягнутому якорі;
- експериментальне визначення часу включення і часу відключення ЕМП.

Зіставлення експериментальних даних з результатами розрахунків свідчить про

задовільну точність розрахунків, а, отже, і про адекватність запропонованих у даній роботі моделей і методик розрахунків.

## ВИСНОВКИ

У результаті аналізу літератури і стану проблеми по темі дисертаційної роботи були сформульовані мета і задачі науково-технічного дослідження, що полягають у розробці науково обґрунтованих рекомендацій з удосконалення конструкцій приводних ЕМП і вибору їхніх раціональних параметрів для контакторів змінного струму, зокрема, контакторів КМ26-33 і КМ26-35, з метою підвищення їхніх техніко-економічних показників, а саме: зниження енергоспоживання і витрат активних матеріалів (обмотувального проводу та постійного магніту - у електромагнітах з магнітним залипанням), що приводить до зменшення маси, габаритів і вартості електромагніта в контакторі у цілому. Для досягнення вказаної мети в дисертаційній роботі були вирішені наступні науково-технічні задачі та отримані наступні наукові результати:

1. Розроблено нові технічні рішення приводних ЕМП із поперечним рухом якоря для контакторів змінного струму, а саме:

- конструкцію ЕМП з феромагнітними шунтами в робочих зазорах, застосування якого у контакторах, працюючих у повторно-короткочасному режимі з великою частотою комутацій, забезпечує більш раціональне їх компонування (в межах габаритних розмірів контактора з управлінням змінним струмом);
- конструкцію ЕМП з магнітним залипанням. Використання таких ЕМП забезпечує відсутність споживання електроенергії в увімкненому режимі, а також приводить до істотного зменшення витрати обмотувального проводу і є доцільним в контакторах для тривалого і переривчасто-тривалого режимів роботи;
- системи керування двухобмотковим і однообмотковим ЕМП із магнітним залипанням з випрямленням напруги живлення, застосування яких полегшує умови комутації перемикаючого контакту і, за рахунок збільшення струму в обмотках, приводить до додаткового зниження витрати обмотувального проводу. Виконання електричних схем систем керування у вигляді окремого блоку, встановленого на контакторі, дозволяє використовувати контактор у колах керування змінного струму.

2. Розроблено зручну у застосуванні з використанням ПЕОМ методику розрахунку статичного тягового моменту у ЕМП, в основі якої лежить двовимірна модель розрахунку магнітних систем методом кінцевих елементів. При переході до двовимірної задачі розрахунку круглий у перерізі сердечник електромагніта замінений прямокутним за умови рівності в них магнітної енергії.

3. Отримано розрахункові залежності статичного тягового моменту в ЕМП із поперечним рухом якоря в початковому положенні якоря від розмірів феромагнітних шунтів у робочих зазорах ЕМП, на основі яких розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів магнітної системи (розмірів феромагнітних шунтів та МРС магнітної системи).

4. Отримано розрахункову залежність статичного тягового моменту в ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням при притягнутому якорі від ширини постійного магніту та товщини немагнітної прокладки між ярмом та полюсним нако-

нечником, на основі якої розроблено рекомендації щодо зменшення об'єму постійного магніту в ЕМП.

5. Розроблено рекомендації щодо вибору в ЕМП з магнітним залипанням раціональних (мінімальних) значень МРС включення та відключення магнітної системи.

6. Розроблено та реалізовано у вигляді комп'ютерних програм уточнені методики розрахунку нагрівання (для котушок ЕМП із феромагнітними шунтами), обмотувальних даних та МРС у запропонованих ЕМП.

7. Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних обмотувальних даних, спрямованого на зменшення витрат обмотувального проводу та споживаної потужності в запропонованих ЕМП з поперечним рухом якоря.

8. У результаті вибору раціональних параметрів ЕМП із феромагнітними шунтами вдалося зменшити споживану потужність (на 61% або до 19,8 Вт) і витрати обмотувального проводу (на 36% або на 0,22 кг), знизити температуру нагрівання котушки на 30°C (до 103,4°C), а також підвищити ремонтоздатність котушки електромагніта (виконана на поліамідному каркасі).

9. У результаті вибору раціональних параметрів ЕМП із магнітним залипанням вдалося зменшити об'єм постійного магніту в 1,8 рази (до 2,7 дм<sup>3</sup>) і витрати обмотувального проводу (у залежності від обраної системи керування: майже в 3 рази в двухобмотковому ЕМП із керуванням постійним струмом (до 0,203 кг) і більше (до 0,106 і 0,060 кг) - при використанні схем керування двухобмоткового й однообмоткового ЕМП із випрямленням напруги живлення).

10. Достовірність отриманих у роботі результатів підтверджується експериментальними дослідженнями ЕМП у макетних зразках контакторів, які проводилися в АТ "ЕНАС".

11. Результати дисертаційної роботи впроваджені в АТ "ЕНАС" та у навчальному процесі кафедри електричних апаратів НТУ "ХП".

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Клименко Б.В., Чепелюк А.А. Электромагнитные системы с "залипанием" для контакторов переменного тока // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №81. - С. 83-84.

*Здобувачем розроблено ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням.*

2. Клименко Б.В., Чепелюк А.А. Расчет электромагнитных систем с "залипанием" для контакторов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №84. - С. 123-126.

*Здобувачем розроблено спрощену методику розрахунку магнітної системи ЕМП із поперечним рухом якоря з магнітним залипанням з використанням схем заміщення.*

3. Клименко Б.В., Чепелюк А.А. Электрические схемы питания электромагнитных систем с залипанием в контакторах переменного тока // Вісник національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. - Харків: НТУ "ХП". - 2001. - №16. - С. 93-96.

*Здобувачем розроблені електричні схеми систем керування ЕМП із магнітним залипанням з випрямленням напруги живлення.*

4. Чепелюк А.А. Экспериментальное исследование влияния формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря // Елек-

тротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХП". - 2003. - №1. - С. 77-80.

5. Байда Е.И., Чепелюк А.А. Расчет электромагнитных систем с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах // Электротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХП". - 2003. - №3. - С. 7-11.

*Здобувачем для розрахунку ЕМП із поперечним рухом якоря розроблено двовимірну модель розрахунку магнітних систем методом кінцевих елементів.*

6. Чепелюк А.А. Оптимизация параметров электромагнитных систем с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах // Электротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХП". - 2005. - №2. - С. 55-58.

7. Гапоненко Г.Н., Клименко Б.В., Форкун Я.Б., Чепелюк А.А. Электромагнитные системы с поперечным якорем в контакторах постоянного и переменного тока // Материалы междунар. науч.-техн. конф.: "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ. - 1996. - Ч.1. - С. 70.

*Здобувачем запропоновано використання ЕМП із поперечним рухом якоря у контакторах змінного струму.*

8. Гапоненко Г.Н., Клименко Б.В., Омельченко В.В., Форкун Я.Б., Чепелюк А.А. Расчет многоконтурных нелинейных магнитных систем электромагнитов с поперечным якорем // Тр. междунар. науч.-техн. конф.: "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ. - 1997. - Ч.3. - С. 38-41.

*Здобувачем викладені особливості обчислювального процесу при використанні комбінованого методу розрахунку магнітної системи ЕМП із поперечним рухом якоря.*

9. Клименко Б.В., Форкун Я.Б., Чепелюк А.А. Нетрадиционные приводы электромагнитных контакторов постоянного и переменного тока // Proceedings of the 3rd international scientific and technical conference on Unconventional electromechanical and electrical systems - UEES'97. Szczecin: Technical University Press. - 1997. - Volume 2. - P. 315-320.

*Здобувачем запропоновано компоновання ЕМП із поперечним рухом якоря в контактній змінного струму, розроблена схема заміщення та запропоновано використання комбінованого методу розрахунку магнітної системи.*

10. Гапоненко Г.Н., Клименко Б.В., Омельченко В.В., Чепелюк А.А. Влияние формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря для контактора переменного тока // Сборник научных трудов ХГПУ: "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Харьков: ХГПУ. - 1998. - Ч.2. - С. 220-223.

*Здобувачем проведені оцінюючі розрахунки ЕМП із поперечним рухом якоря з полюсними наконечниками і ферромагнітним шунтом у меншому робочому зазорі комбінованим методом.*

## АНОТАЦІЇ

**Чепелюк О.О. Удосконалення електромагнітів постійного струму з поперечним рухом якоря для контакторів змінного струму поворотного типу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – Електричні машини й апарати. Національний технічний універ-

ситет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2005.

Дисертація присвячена удосконаленню приводних електромагнітів постійного струму з поперечним рухом якоря і вибору їхніх раціональних параметрів для контакторів змінного струму, зокрема, контакторів серії КМ26 з метою зниження енергоспоживання і витрат активних матеріалів (обмотувального проводу та постійного магніту – у електромагнітах з магнітним залипанням), що приводить до зменшення маси і габаритів електромагніта в цілому.

Розроблені нові технічні рішення приводних електромагнітів постійного струму з поперечним рухом якоря: електромагніти з ферромагнітними шунтами у робочих зазорах; електромагніт з магнітним залипанням; системи управління змінним струмом електромагнітами з магнітним залипанням.

Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів магнітних систем та обмоткових даних запропонованих електромагнітів із поперечним рухом якоря.

Внаслідок вибору раціональних параметрів суттєво покращені вищезгадані техніко-економічні показники удосконалених електромагнітів.

*Ключові слова:* контактор, електромагніт, шунт, постійний магніт, обмотка, система керування, тяговий момент.

**Чепелюк А.А. Усовершенствование электромагнитов постоянного тока с поперечным движением якоря для контакторов переменного тока поворотного типа.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук за специальностью 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2005.

Диссертация посвящена усовершенствованию приводных электромагнитов постоянного тока с поперечным движением якоря и выбору их рациональных параметров для контакторов переменного тока, в частности, контакторов серии КМ26 с целью повышения их технико-экономических показателей, а именно: снижения энергопотребления и расхода активных материалов (обмоточного провода и постоянного магнита - в электромагните с магнитным залипанием), что приводит к уменьшению массы, габаритов и стоимости электромагнита в контакторе в целом.

Для достижения указанной цели в работе разработаны новые технические решения приводных электромагнитов постоянного тока, а именно: конструкции электромагнита с поперечным движением якоря с ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах; конструкция электромагнита с поперечным движением якоря с магнитным залипанием; системы управления двух- и однообмоточного электромагнитов с магнитным залипанием с выпрямлением питающего напряжения. Применение электромагнита с шунтами в рабочих зазорах целесообразно в контакторах работающих в повторно-кратковременном режиме с большой частотой коммутаций. Применение электромагнита с магнитным залипанием обеспечивает отсутствие потребления электроэнергии в режиме удержания и целесообразно в контакторах продолжительного и прерывисто-продолжительного режимов работы.

Для расчета статических тяговых моментов, развиваемых в предложенных электромагнитах, разработана методика, в основе которой лежит двухмерная модель расчета магнитных систем методом конечных элементов.

Получены расчетные зависимости статического тягового момента от размеров

ферромагнитных шунтов в начальном положении якоря электромагнита, на основании которых разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров магнитной системы (размеров ферромагнитных шунтов и магнитодвижущей силы).

Получена расчетная зависимость статического тягового момента от ширины постоянного магнита и толщины немагнитной прокладки при притянута якоря электромагнита с магнитным залипанием, на основании которой разработаны рекомендации по уменьшению объема постоянного магнита. Разработаны рекомендации по выбору рациональных магнитодвижущих сил включения и отключения магнитной системы.

Разработаны методики расчета нагрева, обмоточных данных и магнитодвижущих сил в предложенных электромагнитах. По результатам расчетов разработаны рекомендации по выбору рациональных обмоточных данных, с целью снижения расхода обмоточного провода и потребляемой мощности в предложенных электромагнитах.

За счет выбора рациональных параметров электромагнита с ферромагнитными шунтами удалось уменьшить потребляемую мощность (на 61% или до 19,8 Вт) и расход обмоточного провода (на 36% или на 0,22 кг), снизить температуру нагрева катушки на 30°C (до 103,4°C), а также повысить ремонтпригодность катушки электромагнита (за счет выполнения ее на полиамидном каркасе).

За счет выбора рациональных параметров электромагнита с магнитным залипанием удалось уменьшить объем постоянного магнита в 1,8 раза (до 2,7 см<sup>3</sup>) и расход обмоточного провода (в зависимости от системы управления: почти в 3 раза в двухобмоточном электромагните с управлением постоянным током (до 0,203 кг) и более (до 0,106 и 0,060 кг) – при использовании схем управления двухобмоточного и однообмоточного электромагнитов с выпрямлением питающего напряжения).

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена экспериментальными исследованиями макетных образцов контакторов.

*Ключевые слова:* контактор, электромагнит, шунт, постоянный магнит, обмотка, система управления, тяговый момент.

**Chepelyuk O.O. Modernization of DC magnets with a transverse-motion armature for rotary AC contactors. – Manuscript.**

The Thesis is for the scientific degree of Technical Science Candidate specializing in the Electric Machines and Apparatus (05.09.01). - National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2005.

The dissertation is devoted to modernization of drive DC magnets with a transverse-motion armature and selection of their rational parameters for AC contactors, specifically, for KM26-series contactors, so as to reduce consumption of power and active materials (coils wire and permanent magnet - in electromagnets with a permanent magnet), which results in decreasing the magnet weight and size.

New engineering solutions of drive DC magnets with a transverse-motion armature are obtained, namely, electromagnets with ferromagnetic shunts in operating clearance, electromagnets with magnetic freezing, AC control systems for magnetic-freezing electromagnets.

Recommendations on selection of rational magnetic system parameters and winding data for the modernized electromagnets a transverse-motion armature are worked out.

The rational parameters selection has significantly improved the mentioned technical and economic indices of the modernized electromagnets.

*Key words:* contactor, electromagnet, shunt, permanent magnet, winding, control system, traction moment.

Підписано до друку 30.01.2006 р. Формат видання 145x215.  
Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний. Друк - ризографія.  
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 569237.

Надруковано СПД ФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.  
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10.