

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

Гречко Олександр Михайлович

УДК 621.316.54:621.318.3

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИСТЕМ
ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЗАХИСТУ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис

Робота виконана 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
університет, м. Кременчук,
ректор

кандидат технічних наук
Кобозев Олександр Сергійович,
закрите акціонерне товариство
"Електричні низьковольтні
апарати і системи", м. Харків,
технічний керівник

Захист відбудеться "07" жовтня 2009 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

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

Автореферат розісланий "29" серпня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При експлуатації електрообладнання у розподільних мережах середньої напруги (СН) 6-35 кВ виникають аварійні режими, найбільш небезпечними з яких є короткі замикання (КЗ). Виходячи зі значень струму, максимальну небезпеку для комплектних розподільних пристроїв (КРП) СН являють внутрішні трифазні КЗ, що супроводжуються виникненням потужної електричної дуги. Струми трифазного КЗ, що доходять до десятків тисяч ампер, завдають максимальну електродинамічну і термічну дію. Це призводить до руйнувань як струмопровода, так і встановленого у КРП електрообладнання – ізоляторів, трансформаторів, комутаційної апаратури тощо. Зменшити наслідки від аварії можливо за рахунок швидкого вимикання пошкодженої ділянки за допомогою силових вимикачів (circuit-breakers).

При створенні потужних електроенергетичних комплексів висувають підвищені вимоги до таких апаратів з точки зору підвищення швидкодії і здатності до вимикання струмів КЗ, збільшення надійності, зниження маси, габаритів, скорочення витрат на обслуговування, підвищення терміну служби. Сукупність цих вимог викликає необхідність удосконалення вже існуючих та створення нових, досконаліших конструкцій електричних апаратів. Збільшення надійності розподільної мережі СН при одночасному зниженні витрат на її обслуговування можливе шляхом встановлення комутаційних апаратів нового покоління, до яких відносяться вакуумні вимикачі (ВВ), одним із основних вузлів яких є привідний механізм. З точки зору надійності та забезпечення високого ресурсу найбільш поширеними є ВВ з електромагнітним приводом (ЕМП), від працездатності, надійності і швидкодії якого багато в чому залежить і надійна робота ВВ в цілому. Тому удосконалення ЕМП мають важливе значення для енергетичних систем України та визначають напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП" у відповідності з госпдоговірною науково-дослідною роботою "Розробка нових технічних рішень електромагнітних систем приводних електромагнітних механізмів для вакуумних вимикачів середньої напруги" (ТОВ "АВМ АМПЕР", м. Кременчук), де здобувач був одним з виконавців.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення електромагнітних систем вакуумних вимикачів середньої напруги для підвищення ефективності захисту обладнання від струмів короткого замикання і покращення техніко-економічних показників вакуумних вимикачів. Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі поставлені такі задачі:

- провести дослідження залежності інтегралу Джоуля від швидкодії ВВ СН у режимі КЗ для струмопроводів, які захищаються цими вимикачами;
- провести дослідження дослідного зразка ЕМП з однопозиційною магнітною зачіпкою (ОПМЗ) з використанням висококоерцитивних постійних магнітів (ПМ), що забезпечує підвищення швидкодії ВВ СН, розробити систему керування для ВВ СН з ЕМП;
- розробити рекомендації щодо розрахунку лінійних розмірів магнітопроводу і обмоткових даних котушки ЕМП при заданих габаритних розмірах та силі утримання якоря;
- встановити вплив різних параметрів на швидкодію ЕМП, визначити залежність часу спрацьовування від цих параметрів;

- для перевірки достовірності отриманих результатів і визначення похибки розрахунків провести експериментальні дослідження ЕМП;
- експериментально встановити вплив вихрових струмів в осерді ЕМП з ОПМЗ на його динамічні характеристики.

Об'єкт дослідження – процес вимикання струмів коротких замикань вакуумним вимикачем середньої напруги при спрацьовуванні електромагнітного приводу.

Предмет дослідження – прямоходовий електромагнітний привід з однопозиційною магнітною зачіпкою на базі висококоерцитивних постійних магнітів.

Методи дослідження. Дисертаційна робота базується на фундаментальних положеннях теорії електричних апаратів. У роботі використані: чисельний метод розрахунку магнітних полів (метод скінченних елементів) для дослідження впливу лінійних розмірів магнітопроводу та магніторушійних сил (МРС) обмоток на статичні характеристики ЕМП і визначення початкових даних для розрахунку динамічних характеристик; метод Ейлера та метод Рунге-Кутта для розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь, що описують динаміку спрацьовування ЕМП та перехідні процеси при коротких замиканнях відповідно. При проведенні досліджень використовувалися комп'ютерні програми: Maple V; Femm ver.4.2 (freeware).

Наукова новизна одержаних результатів.

- Розроблено математичну модель вимикання струмів симетричного трифазного короткого замикання вакуумним вимикачем середньої напруги.
- Вперше встановлено діапазон значень повного часу розмикання контактів вакуумних вимикачів середньої напруги, при якому забезпечується підвищення термічної стійкості об'єктів захисту.
- Визначені мінімальні значення параметрів ємнісного накопичувача енергії та діапазон обмоткових даних котушки електромагнітного приводу вакуумного вимикача середньої напруги, які забезпечують підвищення термічної стійкості об'єктів захисту.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи знайшли застосування в електротехнічній галузі України.

Результати і рекомендації, отримані в дисертації, практично реалізовані при випуску ВВ СН серії ВБ4-Е виробництва ТОВ "АВМ АМПЕР" (м. Кременчук).

За участю здобувача виготовлено дослідний зразок ЕМП з ОПМЗ, однією котушкою (двообмоткове виконання), двома робочими повітряними зазорами з використанням висококоерцитивних ПМ для ВВ СН серії ВБ4-Е.

Надані рекомендації щодо розрахунку лінійних розмірів магнітопроводу ЕМП з ОПМЗ, які дозволяють за рахунок раціонального вибору лінійних розмірів якоря, корпусу та осердя підвищити силу утримання якоря при незмінному об'ємі ПМ і незначному збільшенні маси магнітопроводу.

Створено ЕМП з двопозиційною магнітною зачіпкою (патенти України та Російської Федерації на корисну модель), який дозволяє зменшити споживання енергії від зовнішнього джерела живлення при спрацьовуванні.

Спроектовано та виготовлено систему керування ВВ СН з ЕМП, яка забезпечує його спрацьовування при живленні від джерел як змінної так і постійної напруги, передбачає ряд захисних блокувань, які направлені на розширення функціональних можливостей вимикача.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП" при підготовці фахівців зі спеціальності "Електричні машини і апарати" у дисциплінах "Електричні апарати" і "Технологія виробництва електричних апаратів", а також у дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: теоретичне дослідження перехідних процесів при вимиканні ВВ СН струмів КЗ; розробка рекомендацій щодо розрахунку лінійних розмірів магнітопроводу ЕМП з ОПМЗ; теоретичне та експериментальне дослідження ЕМП з ОПМЗ; експериментальне дослідження впливу вихрових струмів в осерді ЕМП з ОПМЗ на його динамічні характеристики.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на: міжнародних симпозіумах "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA" (м. Харків, 2004 р., 2006 р., 2008 р.); XII, XIII, XIV міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2004 р., 2005 р., 2006 р.); семінарі у рамках міжнародної виставки ELCOM (м. Київ, 2005 р.); науково-технічних семінарах, що проводилися на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП" та в ТОВ "АВМ АМПЕР".

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 10 наукових працях, з них 7 – у фахових виданнях ВАК України, 1 – патент України, 1 – патент Російської Федерації.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків та 6 додатків. Повний обсяг дисертації складає 226 сторінок, з них: 52 ілюстрації до тексту, 30 ілюстрацій на 25 сторінках; 13 таблиць до тексту, 13 таблиць на 11 сторінках; 6 додатків на 37 сторінках; список використаних літературних джерел складається із 122 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, зазначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналітичний огляд і аналіз науково-технічної та патентної літератури з конструкцій привідних механізмів ВВ СН, проведено огляд методів розрахунку електромагнітів постійного струму, з яких основну увагу приділено методам розрахунку динамічних характеристик. Доведено, що з точки зору простоти конструкції, надійності, періодичності обслуговування найбільш поширеними є комутаційні апарати СН із застосуванням ЕМП. Обґрунтовано, що у зв'язку з широким застосуванням в електроапаратобудуванні нових матеріалів, зокрема висококоерцитивних ПМ на основі рідкоземельних металів, перспективним напрямком є розробка нових конструкцій ЕМП з утриманням якоря за рахунок магнітного поля ПМ. Це призводить, по-перше, до відсутності споживання електроенергії у режимі утримання, по-друге, до зменшення габаритів магнітної системи ЕМП, а отже до підвищення його швидкодії, що дозволяє зменшити ступень термічної дії струмів КЗ на об'єкти захисту, по-третє, до збільшення тягового зусилля, тобто до збільшення сили контактного натиснення, що дозволяє зменшити силу зварювання контактів

вакуумної дугогасної камери (ВДК), зменшити роз'єднуюче зусилля, компенсувати силу відкидання контактів при протіканні наскрізних струмів КЗ, підвищити електродинамічну стійкість і здатність до вимикання струмів КЗ.

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

У другому розділі розроблено математичну модель вимикання струмів симетричного трифазного КЗ вакуумним вимикачем середньої напруги.

При комутації ВВ СН струмів трифазних КЗ, в певних ситуаціях, зменшення повного часу розмикання контактів вимикача t_p (часу від моменту виникнення КЗ до моменту розмикання контактів ВДК) може призводити до збільшення ступеня термічної дії струмів КЗ на струмопроводи, яка визначається інтегралом Джоуля G

$$G = \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (1)$$

де i – миттєве значення струму КЗ; t_k – час протікання струму КЗ.

Це пов'язано з особливостями комутації кіл СН у вакуумі: по-перше, при розмиканні контактів вакуумна дуга практично не впливає на форму кривої струму, оскільки падіння напруги на ній (до 100 В) є набагато меншим за напругу мережі (6-35 кВ); по-друге, згасання дуги у відповідній фазі відбувається після моменту розмикання контактів вимикача при першому ж проходженні струму цієї фази через нуль.

У якості розрахункової схеми розглянуто вмикання вимикачем Q трифазного джерела живлення на існуюче КЗ (рис. 1).

Напруга джерел живлення є симетричною трифазною системою

$$\begin{cases} u_A = U_m \sin(\omega t + \psi); \\ u_B = U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_C = U_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{2\pi}{3}\right), \end{cases} \quad (2)$$

Рис. 1. Електрична схема кола симетричного трифазного КЗ

де u_A, u_B, u_C – напруга фаз А, В, С відповідно; U_m – амплітуда фазної напруги; ω – кругова частота зміни напруги; ψ – фаза моменту початку КЗ.

Пасивні параметри кола КЗ визначаються із діючих значень фазної напруги, очікуваного усталеного струму КЗ та значення коефіцієнта потужності кола КЗ

$$R_A = R_B = R_C = \frac{U}{I} \cos \varphi; \quad (3)$$

$$L_A = L_B = L_C = \frac{U}{I} \left(\frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}}{\omega} \right), \quad (4)$$

де $R_A, R_B, R_C, L_A, L_B, L_C$ – еквівалентні опори та індуктивності ліній і обмоток трансформатора фаз А, В, С відповідно; U – діюче значення фазної напруги; I – очікуване усталене значення струму КЗ; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності кола КЗ.

Процеси горіння та гасіння вакуумної дуги у відповідній фазі моделюються заміною полюсів вимикача Q нелінійними опорами R_{dA} , R_{dB} , R_{dC} (рис. 2), які визначаються залежно від конкретних значень моменту часу та струму у фазі

$$\begin{aligned} R_{dA} &= \begin{cases} \infty, \text{ якщо } t \geq t_p \text{ та } |i_A(t)| \leq \varepsilon; \\ 0, \text{ в інших випадках;} \end{cases} \\ R_{dB} &= \begin{cases} \infty, \text{ якщо } t \geq t_p \text{ та } |-i_A(t) - i_C(t)| \leq \varepsilon; \\ 0, \text{ в інших випадках;} \end{cases} \\ R_{dC} &= \begin{cases} \infty, \text{ якщо } t \geq t_p \text{ та } |i_C(t)| \leq \varepsilon; \\ 0, \text{ в інших випадках;} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Рис. 2. Розрахункова схема

де ε – деяка мала величина (приймається рівною 0,01).

Враховуючи, що $i_B(t) = -i_A(t) - i_C(t)$, математичною моделлю вимикання струмів симетричного трифазного КЗ вакуумним вимикачем середньої напруги є система диференціальних рівнянь з початковими умовами

$$\begin{cases} u_A(t) - u_B(t) = R_A + R_{dA} i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + R_B + R_{dB} (-i_A - i_C) \times \\ \quad \times i_A + i_C + L_B \left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right); \\ u_B(t) - u_C(t) = -R_B + R_{dB} (-i_A - i_C) - L_B \left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_C}{dt} \right) - \\ \quad - R_C + R_{dC} i_C - L_C \frac{di_C}{dt}; \\ i_A(0) = 0; i_C(0) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Характер перехідних процесів залежить від параметрів кола, початкових умов, фази початку КЗ. Один з варіантів перехідних процесів при замкнених контактах вимикача, нульових початкових умовах та $\psi = 0$ ілюструють криві на рис. 3.

Моменти часу t_1, t_2, \dots, t_7 відповідають моментам переходу через нуль струмів у фазах при замкнених контактах вимикача. Якщо контакти розмикаються, то після моменту розмикання контактів вид графіків вказаних струмів зазнає певних змін, характер яких обумовлений згаданими особливостями комутацій кіл СН у вакуумі.

Враховуючи це, можна стверджувати, що характер кривих струмів у фазах практично не залежить від моменту розмикання контактів, якщо повний час розмикання t_p лежить між двома найближчими моментами переходу через нуль струмів у фазах при замкнених контактах вимикача (рис. 3). Перетворення розрахункової схеми при розмиканні контактами вимикача Q кола симетричного трифазного КЗ показано на рис. 4.

Рис. 3. Зміна струмів у фазах при замкнених контактах вимикача

Рис. 4. Перетворення розрахункової схеми:

а – контакти ВВ замкнені; б – контакти ВВ розімкнені, на них горять дуги, але струм в жодній з фаз ще не досяг нуля; в – струм досяг нуля в одній з фаз (фазі В), схема перейшла в однофазний режим, струми у фазах А і С однакові; д – струм у фазах А і С досяг нуля, дуги у відповідних ВДК погасли і ВВ повністю вимкнув коло КЗ.

Після переходу струму через нуль в одній з фаз, наприклад, у фазі В, схема переходить в *однофазний* режим (струми у фазах А і С – однакові). При цьому графіки струмів у фазах А і С істотно змінюються, і після переходу струму в цих фазах через нуль дуги у відповідних ВДК гаснуть.

Графіки перехідних процесів зміни струмів у фазах у кратності до діючого значення очікуваного струму КЗ з урахуванням вказаних вище особливостей за нульових початкових умов, $\cos\varphi = 0,1$ та нульової фази початку КЗ ($\psi = 0$) приведені на рис. 5 (суцільна лінія – при вимиканні ВВ струму КЗ; пунктирна лінія – при замкнених контактах ВВ). Графіки побудовані для таких інтервалів повного часу розмикання контактів: а – для ($0 < t_p \leq 6$) мс; б – для ($7 \leq t_p \leq 12$) мс; в – для ($13 \leq t_p \leq 16$) мс.

Рис. 5. Графіки перехідних процесів зміни струмів у фазах

Показано, що для ВВ, що здійснюють комутації у колах СН, існує оптимальний з погляду мінімального значення інтегралу Джоуля повний час розмикання контактів. Зменшення повного часу розмикання нижче цього значення не призводить до зменшення термічного дії струмів КЗ на струмопроводи, а у ряді випадків навіть викликає його збільшення.

Зменшення повного часу розмикання t_p більш ніж в два рази – від 16 мс до 7 мс, зменшує повний час вимикання ВВ усього на 9 % – від 19,9 до 18,1 мс; але при цьому максимальне значення інтегралу Джоуля у фазах струмопроводів не тільки не зменшується, а навіть зростає на 6,9 %. Хоча для інтервалу $13 \leq t_p \leq 16$ мс (рис. 5, в) повний час вимикання збільшується, найбільший інтеграл Джоуля має місце не у фазах В або С, через яких струм тече 19,9 мс, а у фазі А, через яку струм тече тільки 16,7 мс. З іншого ж боку, для інтервалу $7 \leq t_p \leq 12$ мс (рис. 5, б) найбільший інтеграл Джоуля має місце також у фазі А, але в даному випадку струм у фазі тече довше – 18,1 мс, причому до 12 мс струми у фазі А однакові в обох випадках.

Тому, незважаючи на більш швидке розмикання контактів, інтеграл Джоуля, а отже і термічна дія струму КЗ на струмопроводи, виявляються більше, ніж у разі більш пізнішого розмикання контактів ВДК (рис. 6).

Розроблена математична модель вимикання струмів симетричного трифазного КЗ дозволяє встановити діапазон значень повного часу розмикання контактів з погляду мінімального значення інтегралу Джоуля для ВВ СН. Проведені серії розрахунків інтегралу Джоуля у фазах А, В, С та повного часу вимикання вимикача для різних значень: повного часу

Рис. 6. Підінтегральна функція інтегралу Джоуля у фазі А при $t_p = 7$ мс (а) і $t_p = 16$ мс (б), нульових початкових умовах для $\cos\varphi = 0,1$

розмикання t_p , фази початку короткого замикання ψ , коефіцієнту потужності $\cos\varphi$.

За результатами розрахунків побудовані залежності найбільшого (з трьох фаз) значення зведеного інтегралу Джоуля G^* (обирається з максимальних значень при різних фазах початку КЗ $\psi = 0; \pi/4; \pi/2; 3\pi/4$) від повного часу розмикання t_p для різних значень коефіцієнту потужності $\cos\varphi$ (рис. 7). Під зведеним інтегралом Джоуля G^* мається на увазі відношення інтегралу Джоуля (1) до базового інтегралу Джоуля G_r , у якості якого прийнято інтеграл Джоуля півхвилі очікуваного струму КЗ

$$G_r = I_p^2 T / 2, \quad (7)$$

де I_p – діюче значення очікуваного струму КЗ; T – період зміни струму I_p (у сталому режимі при частоті 50 Гц дорівнює 0,02 с).

Графіки, наведені на рис. 7, дозволяють стверджувати про немонотонний характер залежності інтегралу Джоуля від швидкодії ВВ СН у режимі КЗ для струмопроводів, які захищаються ВВ СН. Це означає, що зменшення повного часу розмикання ВВ СН за певних умов призводить до збільшення інтегралу Джоуля. Зазначені залежності носять немонотонний, ступінчастий характер, із загальною тенденцією до зростання інтегралу Джоуля при збільшенні повного часу розмикання t_p . Важливою особливістю цих залежностей є наявність практично горизонтальних ділянок – інтеграл Джоуля залишається незмінним, якщо повний час розмикання t_p лежить між двома найближчими

моментами переходу через нуль струмів у фазах при замкнених контактах вимикача. Якщо повний час розмикання ВВ складає, наприклад, 40 мс, то нема необхідності у його зменшенні до 26 мс; проте, зменшення повного часу розмикання до 22 мс призводить до значного зменшення інтегралу Джоуля. Подальше зменшення повного часу розмикання не призводить до зменшення інтегралу Джоуля, причому спостерігається

Рис. 7. Залежності найбільшого значення зведеного інтегралу Джоуля від часу t_p для різних значень $\cos\varphi$

навіть його зростання. Наведені міркування призвели до встановлення діапазону значень повного часу розмикання контактів ВВ СН, при якому забезпечується мінімальне значення інтегралу Джоуля у режимі КЗ при комутації кіл середньої напруги вакуумними вимикачами. Даний діапазон складає 14-22 мс. Зменшення повного часу розмикання нижче цих значень вимагає витратних технічних рішень, проте, зрештою, не призводить до значного зменшення термічної дії струмів КЗ на струмопроводи, а у ряді випадків навіть викликає збільшення інтегралу Джоуля.

Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі вимикання ВВ СН струмів симетричного трифазного КЗ проведена за результатами незалежних випробувань вакуумного вимикача ВБ4-П виробництва ТОВ "АВМ АМПЕР" (м. Кременчук), що проводилися у ВАТ "НДЦ ВВА" (м. Москва). Осцилограми випробувань приведені на рис. 8, з яких видно, що після розмикання контактів ВВ (час t_1) при першому переході струму i_A через нуль дуга у фазі А гасне (час t_2) – при цьому на контактах ВВ у фазах В і С продовжують горіти дуги і, відповідно, протікати струми i_B та i_C .

Рис. 8. Осцилограми вимикання ВВ СН кола трифазного КЗ

У момент часу t_2 миттєві значення струмів у фазах В і С рівні по величині та протилежні по напрямку; після моменту часу t_2 струми i_B та i_C продовжують протікати, залишаючись при цьому рівними до моменту їх першого переходу через нуль. На осцилограмах видно теоретично передбачену істотну зміну графіків струмів i_B та i_C після розмикання контактів ВВ у момент переходу струму i_A через нуль та переходу

схеми в однофазний режим. Порівнюючи графіки струмів у фазах при замкнених контактах ВВ із графіками струмів при розімкнених контактах ВВ, можна побачити характерну зміну ("викривлення") графіків струмів i_B та i_C .

У **третьому розділі** на базі винаходу, створеного на кафедрі електричних апаратів НТУ "ХП", здобувачем розроблено ЕМП з ОПМЗ з двома робочими повітряними зазорами з висококоерцитивними ПМ (рис. 9). Сила утримання якоря створюється у двох робочих зазорах – між якорем і осердям δ_1 та між якорем і корпусом δ_2 . Завдяки такому рішенню сила утримання збільшується приблизно в 2 рази при тій самій величині магнітного потоку, тобто при незмінних масі ПМ та поперечному перетині магнітопроводу. Збільшення сили утримання ЕМП, як відомо з літературних джерел, дозволяє збільшити здатність до вимикання струмів КЗ вакуумних вимикачів.

ЕМП складається з нерухомої частини магнітопроводу (осердя 3 з виступом у середній частині і корпуса б), рухомої частини (немагнітного штока 2, розташованого у середині прохідного отвору осердя і якоря 1), котушки з двома обмотками (4 – вмикальна; 5 – вимикальна), постійних магнітів 7. Вмикання ЕМП відбувається при підключенні вмикальної обмотки до ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ). Магнітний потік, що створюється вмикальною обмоткою, має бути направлений згідно з поляризуючим магнітним потоком ПМ. Сила тяжіння якоря збільшується, і в момент, коли вона стає більше сили протидіючих пружин, починається рух якоря, під час якого у пружинах накопичується потенційна енергія для вимикання ЕМП. Після притягування якоря вмикальна обмотка знеструмується – ЕМП залишається в увімкненому положенні за рахунок залишкового магнітного потоку ПМ. Для вимикання ЕМП необхідно вимикальну обмотку підключити

Рис. 9. ЕМП з ОПМЗ

до ЄНЕ таким чином, щоб магнітний потік цієї обмотки був направлений *проти* поляризуючого магнітного потоку ПМ в області якоря. При цьому відбувається витіснення поляризуючого магнітного потоку з області робочих зазорів у повітряний проміжок між осердям і корпусом поза областю розміщення ПМ. Сила утримання якоря зменшиться і під впливом потенційної енергії, яка була накопичена у протидіючих пружинах при вмиканні, якір відірветься від нерухомої частини магнітопроводу і повернеться у первинне положення. Таке рішення дозволяє підвищити швидкодію ЕМП, підвищити ефективність захисту обладнання від струмів КЗ.

Розроблено рекомендації щодо розрахунку лінійних розмірів ділянок магнітопроводу (осердя, корпусу і якоря) та ПМ, при яких забезпечуються мінімальні маса, габарити, максимальна сила утримання якоря при знеструмлених обмотках і одночасній відсутності насичення магнітної системи при заданих габаритних розмірах ЕМП.

Результати моделювання магнітної системи методом скінченних елементів за допомогою програми Femm дають можливість зробити висновок, що найбільший вплив на силу утримання мають:

- лінійні розміри та характеристики ПМ;
- лінійні розміри магнітопроводу: форма якоря (найбільший вплив має різниця між максимальною та мінімальною висотами якоря Δ_h); зовнішній діаметр осердя

в області котушки d_{c2} ; внутрішній діаметр корпусу $d_{к1}$; висота ділянки осердя в області котушки $h_{скт}$; різниця ($\Delta_{кя}$) між зовнішніми діаметрами якоря $d_{я2}$ і корпусу $d_{к2}$.

Для збільшення коефіцієнту заповнення постійними магнітами зазору між осердям і корпусом рекомендується ширину ПМ a_m обрати виходячи з механічної міцності та технології виробництва (для ПМ типу NdFeB марки NQ3G ($B_r = 1,14$ Тл; $H_c = 750$ кА/м) приймаємо $a_m = 5$ мм). Глибина ПМ b_m попередньо прийнята рівною 10 мм; при меншому значенні існує вірогідність невірної, з погляду напряму намагніченості, розміщення ПМ. Для запобігання цього, зважаючи на кругове розташування ПМ між осердям і корпусом, запропоновано обрати ПМ з трапецієдальним поперечним перетином з кутом у 84° при більшій стороні довжиною 10,8 мм. Це також дозволило збільшити коефіцієнт заповнення ПМ з 83,8 % до 86,1 %. Висота ПМ h_m попередньо прийнята рівною 20 мм; її мінімальне значення, що забезпечує необхідну по технічному завданню (ТЗ) силу утримання (3,5 кН) за умови відсутності насичення ділянок магнітопроводу визначена після вибору лінійних розмірів ділянок магнітопроводу.

Якір ЕМП попередньо обирався з прямокутним поперечним перетином ($\Delta_h = 0$) з лінійними розмірами (тут і надалі – в мм) $h_{я1} = 6$; $d_{я1} = 10$; $d_{я2} = 99$. Сила утримання при вказаних параметрах і розмірах ПМ та магнітопроводу ($d_{к1} = 90$; $d_{к2} = 99$; $d_{c1} = 20$; $d_{c2} = 42$; $d_{c3} = 79$; $h_{скт} = 30$; $h_b = 10$) склала 2100 Н.

Для підвищення сили утримання запропоновано змінити поперечний перетин якоря з прямокутної форми на дископодібну – збільшувати окремі (центральні) ділянки якоря (Δ_h , $\Delta_{я1}$, $\Delta_{я2}$, $\Delta_{я3}$ – рис. 9), де спостерігалось насичення, суттєво не змінюючи масу якоря.

Виявлено, що найбільш на силу утримання впливає величина Δ_h , значення ж $\Delta_{я1}$, $\Delta_{я2}$, $\Delta_{я3}$ при фіксованому Δ_h майже не впливають на силу утримання. У результаті прийнято: $\Delta_h = 6$; $\Delta_{я1} = 10$; $\Delta_{я2} = 9$; $\Delta_{я3} = 18,5$; $h_{я1} = 6$; $d_{я1} = 10$; $d_{я2} = 99$. Зміна форми якоря дозволила збільшити силу утримання до 2547,4 Н.

Результати покрокового вибору лінійних розмірів магнітопроводу, при яких забезпечується максимальна сила утримання F , приведені у вигляді залежностей на рис. 10-12. Після вибору розміру $d_{к1}$ проведено зменшення висоти ділянки осердя в області котушки $h_{скт}$ з 30 мм до 24 мм. Це дозволяє зменшити витрати матеріалу, збільшити силу утримання з 3524,6 Н до 3675,6 Н при практично відсутності впливу на магнітну індукцію на решті ділянок магнітопроводу. Таким чином:

- збільшення d_{c2} з 42 мм до 50 мм збільшило силу утримання з 2547,4 Н до 3133,0 Н;
- зменшення $d_{к1}$ з 90 мм до 87 мм збільшило силу утримання з 3133,0 Н до 3524,6 Н;
- зменшення $h_{скт}$ з 30 мм до 24 мм збільшило силу утримання з 3524,6 Н до 3675,6 Н;

Рис. 10. $F = f(d_{c2})$

Рис. 11. $F = f(d_{к1})$

Рис. 12. $F = f(\Delta_{кя})$

- різниця $\Delta_{\text{кя}} = 3$ мм між зовнішніми діаметрами якоря $d_{\text{я2}}$ і корпусу $d_{\text{к2}}$ збільшила силу утримання з 3675,6 Н до 3895,6 Н.

Змінюваним параметром для варіювання сили утримання ЕМП при одночасній відсутності насичення магнітопроводу рекомендується використовувати висоту ПМ h_m (рис. 13). В конструкції ЕМП з ОПМЗ мають застосовуватись ПМ з максимальними значеннями залишкової магнітної індукції B_r і коерцитивної сили H_c . Це дає

Рис. 13. $F = f(h_m)$

змогу зменшити габарити магнітної системи, як результат – підвищити швидкодію ВВ СН, що дозволяє зменшити ступень термічної дії струмів КЗ на об'єкти захисту.

Розроблено систему керування для ВВ СН з ЕМП, що забезпечує його спрацьовування при усіх циклах роботи при живленні від джерел як змінної так і постійної напруги, передбачає ряд захисних блокувань, що направлені на розширення функціональних можливостей ВВ СН, а саме: обмеження часу підключення обмоток контакторів і ЕМП до джерела живлення, що унеможлиблює їх вихід з ладу через перегрівання; неможливість вмикання і вимикання вимикача при недостатній напрузі на ЄНЕ; неможливість одночасної видачі команди на вмикання і вимикання; неможливість видачі команди на вимикання при вимкненому положенні вимикача; захист від повторного вмикання (повторного розряду ЄНЕ на обмотку).

У четвертому розділі за допомогою метода скінченних елементів визначені статичні тягові характеристики ЕМП (залежність тягового зусилля F від робочого зазору δ при незмінній МРС обмотки F_m) та характеристики намагнічування (залежність магнітного потоку, зведеного по потокозчепленню Φ_ψ від МРС обмотки F_m при незмінному робочому зазорі δ), які є основою розрахунку динамічних характеристик.

З проведеного огляду методів розрахунку динаміки електромагнітів постійного струму в якості базового обрано метод, основні припущення якого такі:

1. Вторинні контури (короткозамкнені обмотки і контури вихрових струмів) замінюються еквівалентним короткозамкненим контуром – одновитковою вторинною обмоткою, зчепленою з тим же магнітним потоком, що і намагнічуюча обмотка.
2. Між намагнічуючою і вторинною обмотками існує повний магнітний зв'язок.
3. Протидіюче зусилля залежить тільки від ходу якоря і не залежить від швидкості рухомої системи.
4. Активний опір обмоток і маса рухомої системи при спрацьовуванні є незмінними.

Друге припущення дозволяє отримати вираз для сумарної МРС системи

$$F_m = iw + i_e w_e, \quad (8)$$

де i , w – струм і число витків намагнічуючої обмотки; i_e , w_e – струм і число витків еквівалентного вторинного контуру.

З урахуванням прийнятих припущень динамічні процеси характеризуються системою, що складається з рівнянь електричного кола (9, 10) та рівнянь переміщення рухомої системи (11, 12)

$$u = iR + w \frac{d\Delta\Phi_{\psi}}{dt}; \quad (9)$$

$$0 = i_e R_e + w_e \frac{d\Delta\Phi_{\psi}}{dt}; \quad (10)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F(F_m, \delta) - Q(\delta); \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = v, \quad (12)$$

де u – напруга, що прикладена до намагнічуючої обмотки; R, R_e – активний опір намагнічуючої обмотки і еквівалентного вторинного контуру відповідно; $\Delta\Phi_{\psi}$ – магнітний потік, зведений по потокозчепленню ψ , особливість визначення якого розглянута далі; δ – хід якоря; $F(F_m, \delta)$ – тягове зусилля, що залежить від сумарної МРС системи F_m і ходу якоря δ ; m, v – зведена маса і швидкість рухомої системи; $Q(\delta)$ – протидіюче зусилля, що залежить від ходу якоря δ (визначається конкретною конструкцією апарату, тому розглядається як задана).

Визначення величини $\Delta\Phi_{\psi}$. На рис. 14 приведені: характеристики намагнічування для вмикання (а), вимикання (б) ЕМП та принцип їх застосування (в, д) при складанні рівнянь (9, 10). При розрахунку ЕМП з постійними магнітами необхідно враховувати характер взаємодій магнітного потоку намагнічуючої обмотки та поляризованого магнітного потоку ПМ.

а

б

в

д

Рис. 14. До визначення Φ_{ψ}

направлений згідно з потоком, що створюється вмикальною обмоткою $\Delta\Phi_{\psi}$, тому результуючий зведений магнітний потік $\Phi_{\psi} = \Phi_{\psi 0} + \Delta\Phi_{\psi}$ (рис. 14, в). При вимиканні потік, що створюється вимикальною обмоткою $\Delta\Phi_{\psi}$ направлений зустрічно з поляризованим магнітним потоком ПМ $\Phi_{\psi 0}$. Тому результуючий зведений магнітний потік дорівнює $\Phi_{\psi} = \Phi_{\psi 0} - \Delta\Phi_{\psi}$ (рис. 14, д). Отже, у рівняннях (9, 10) необхідно застосовувати саме вели-

чину магнітного потоку, що створюється при вмиканні вмикальною обмоткою, при вимиканні – вимикальною обмоткою, тобто величину $\Delta\Phi_{\psi}$.

Рівняння (9, 10) дозволяють отримати зв'язок між струмами у намагнічуючій та вторинній обмотках: $u = iR - wR_e i_e / w_e$. Розв'язуючи це рівняння разом з (8), отримуємо зв'язок між струмом і МРС

$$i = \frac{u + R_e' \frac{F_m}{w}}{R + R_e'}, \quad (13)$$

де R_e' – зведений опір еквівалентного вторинного контуру

$$R_e' = R_e \frac{w^2}{w_e^2}. \quad (14)$$

Для осердя круглого поперечного перетину значення R_e може бути знайдене з відомого виразу

$$R_e = \frac{8\pi\rho_{oc}}{l}, \quad (15)$$

де ρ_{oc} – питомий опір матеріалу осердя; l – довжина осердя.

З урахуванням (13) система диференціальних рівнянь динаміки набуває вигляд

$$\frac{d\Delta\Phi_\psi}{dt} = \frac{R_e'}{w(R + R_e')} \left(u - R \frac{F_m}{w} \right); \quad (16)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_m \delta - Q}{m}; \quad (17)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = v. \quad (18)$$

Початковими даними для розрахунку є результати двомірної апроксимації даних, отриманих із розрахунку статичних тягових характеристик $F = f(F_m, \delta)$ і характеристик намагнічування $\Phi_\psi = f(F_m, \delta)$, обмоткові дані котушки, напруга та ємність ЄНЕ, протидіюча характеристика вимикача.

Встановлено, що найбільший вплив на швидкодію ЕМП мають: напруга U та ємність C ЄНЕ, кількість витків w та діаметр проводу обмотки d_m , маса рухомої системи m . Залежність часу вмикання від параметрів ЄНЕ та обмоткових даних вмикальної обмотки приведено на рис. 15, 16. Дослідження щодо визначення залежності швидкодії ЕМП від маси рухомої системи показали монотонне зростання часу вмикання і монотонне зменшення максимальної швидкості якоря при збільшенні маси

рухомої системи та про більший ступінь впливу напруги ЄНЕ у порівнянні з ємністю як на час вмикання ЕМП, так і на максимальну швидкість якоря. Середня швидкість переміщення якоря не перевищує 2 м/с.

Рис. 15. Вплив на $t_{\text{вмик}}$ параметрів ЄНЕ

Рис. 16. Вплив на $t_{\text{вмик}}$ обмоткових даних вмикальної обмотки

Розрахунок процесу вимикання ЕМП полягає у пошуку такої мінімальної напруги і ємності ЄНЕ, обмоткових даних обмотки при заданій масі рухомої системи, при яких власний час вимикання ЕМП не перевищує 10 мс. При такому значенні забезпечується необхідний для підвищення термічної стійкості об'єктів захисту повний час розмикання контактів вимикача – 22 мс (з урахуванням часу реагування релейного захисту і автоматики вимикача, що складає 10-12 мс).

Результати розрахунку процесу вимикання приведені на рис. 17, 18. Встановлено, що варіювання параметрів ЄНЕ при фіксованій масі рухомої системи практично не впливає на максимальну швидкість якоря, яка складає приблизно 5,3 м/с. Це

пов'язано з принципом вимикання ЕМП за рахунок дії протидіючих пружин. Як і для процесу вимикання встановлено монотонне зростання часу вимикання та монотонне зменшення максимальної швидкості якоря

Рис. 17. Вплив на $t_{\text{вим}}$ параметрів ЄНЕ

Рис. 18. Вплив на $t_{\text{вим}}$ обмоткових даних вимикальної обмотки

при збільшенні маси рухомої системи. На час вимикання більшою мірою впливає напруга ЄНЕ у порівнянні з ємністю.

Встановлено немонотонну залежність часу вимикання та часу вимикання ЕМП від обмоткових даних відповідних обмоток, що дозволяє зробити висновок про існування їх оптимальних значень з точки зору швидкодії ЕМП. Відмінність результатів, отриманих у дисертації, від результатів, що знайшли відображення у відомих роботах Тер-Акопова А.К. полягає у тому, що в ЕМП з ОПМЗ: магнітопровід виготовлений цілісним; початковий робочий зазор в 6 разів більший (12 мм); при розрахунках враховано вплив вихрових струмів.

У п'ятому розділі з метою перевірки достовірності чисельного розрахунку сили утримання і динамічних характеристик проведено експериментальні дослідження виготовленого дослідного зразка ЕМП з ОПМЗ з використанням висококоерцитивних ПМ – композиція NdFeB ($B_r = 1,14$ Тл; $H_c = 750$ кА/м).

Сила утримання F ЕМП з ОПМЗ: розрахунок методом скінченних елементів $F = 3515,5$ Н; експеримент $F = 3700,0$ Н; відносна похибка $\Delta = 5,2$ %.

Зіставлення результатів розрахунків (суцільна лінія) і експериментальних досліджень (пунктирна лінія) часу вимикання ЕМП приведено на рис. 19, часу вимикання – на рис. 20. Залежності приведені для рекомендованих мінімальних напруги та ємності ЄНЕ. Результати експериментальних досліджень підтверджують задовільну точність розрахунку сили утримання і динамічних характеристик. Максимальна похибка розрахунків у досліджуваному діапазоні для часу вимикання складає 12 %, для часу вимикання – 15 %.

Рис. 19. Залежність часу вмикання ЕМП від параметрів ЄНЕ

Рис. 20. Залежність часу вимикання ЕМП від параметрів ЄНЕ

За допомогою дослідних зразків ЕМП з цілісним і розрізаним осердям експериментально досліджено ступінь впливу вихрових струмів в осерді ЕМП на його динамічні характеристики. Оскільки магнітна система *при вмиканні* є розімкненою, вихрові струми в осерді не мають суттєвого впливу на динамічні характеристики – в залежності від напруги (225-350 В) і ємності (2000-3000 мкФ) час зрушення збільшується в 1,05-1,32 рази, час вмикання – в 0,9-1,06 рази. *При вимиканні* вихрові струми завдають значну демпфуючу дію на швидкість наростання струму в обмотці до початку руху якоря, збільшують час руху якоря, що зменшує час вимикання в цілому. В залежності від напруги (100-200 В) і ємності (300-1200 мкФ) час зрушення збільшується в 1,7-4,5 рази, час вимикання – в 1,2-1,8 рази. Для підвищення швидкодії рекомендується осердя ЕМП виконувати з радіальними розрізами.

Експериментально встановлено значний вплив максимальної сили протидіючих пружин на швидкодію ЕМП при вимиканні.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності захисту обладнання від струмів короткого замикання і покращення техніко-економічних показників вакуумних вимикачів середньої напруги (збільшення здатності до вимикання струмів КЗ, зменшення маси та габаритів) шляхом удосконалення електромагнітних систем цих вимикачів.

1. Аналіз технічних характеристик ВВ СН показав, що їх час вимикання знаходиться в інтервалі 25-60 мс. Невисока швидкодія призводить до недостатньо ефективного захисту обладнання від термічної дії струмів КЗ. Підвищити ефективність

захисту можливо за рахунок підвищення швидкодії ВВ СН шляхом зменшення власного часу спрацьовування їх приводного механізму.

2. Розроблено математичну модель вимикання струмів симетричного трифазного КЗ вакуумним вимикачем середньої напруги, у якій процеси горіння і гасіння вакуумної дуги моделюються заміною полюсів вимикача в електричній схемі кола КЗ нелінійними опорами, що визначаються залежно від конкретних значень моменту часу та струму у фазі.

3. Встановлено немонотонну залежність інтегралу Джоуля від швидкодії ВВ СН у режимі КЗ для струмопроводів, які захищаються цими вимикачами. При $\cos\varphi = 0,1$ незалежно від фази моменту початку КЗ зменшення повного часу розмикання контактів вимикача з 16 мс до 7 мс (повний час вимикання вимикача при цьому зменшується з 19,9 мс до 18,1 мс) призводить до збільшення інтеграла Джоуля на 6,9 %.

4. Встановлено діапазон значень повного часу розмикання контактів ВВ СН, при якому забезпечується мінімальне значення інтегралу Джоуля в режимі КЗ струмопроводів. Оптимальне значення повного часу розмикання контактів вимикача знаходиться у діапазоні 14-22 мс. З урахуванням часу реагування релейного захисту і автоматики вимикача (10-12 мс) власний час вимикання ЕМП не повинен перевищувати 10 мс.

5. Досліджено ЕМП з ОПМЗ і двома робочими повітряними зазорами. Таке технічне рішення дозволяє збільшити силу утримання ЕМП приблизно до 3500 Н (сила утримання ЕМП одного з найпоширеніших вимикачів виробництва "Таврида Електрик" серії TEL дорівнює 1250 Н). Збільшення сили утримання дозволяє збільшити здатність до вимикання струмів КЗ вакуумних вимикачів.

6. Показано, що застосування висококоерцитивних постійних магнітів дозволяє зменшити габарити магнітної системи ЕМП і спільно з використовуваним при вимиканні принципом витіснення магнітного потоку з області робочих зазорів в область повітряного шунта дає можливість зменшити час вимикання ВВ СН, підвищити ефективність захисту обладнання від термічної дії струмів КЗ.

7. Розроблено рекомендації щодо розрахунку лінійних розмірів магнітопроводу ЕМП, які дозволили встановити параметри, що найбільш впливають на силу утримання:

- лінійні розміри і характеристики постійних магнітів;
- лінійні розміри магнітопроводу: форма якоря, зовнішній діаметр і висота ділянки осердя в області розміщення котушки, внутрішній діаметр корпусу, різниця між зовнішніми діаметрами якоря і корпусу.

Визначено раціональні лінійні розміри ЕМП, при яких забезпечуються мінімальні маса, габаритні розміри, максимальна сила утримання.

8. Розроблено рекомендації щодо визначення обмоткових даних котушки ЕМП з урахуванням імпульсного характеру роботи, які дозволили визначити мінімальні значення МРС вмикальної (10694 А) та вимикальної (1996 А) обмоток, що забезпечують працездатність ЕМП запропонованої конструкції.

9. Удосконалено математичну модель розрахунку динамічних характеристик електромагнітів постійного струму з постійними магнітами. Це дозволило: розрахувати динамічні характеристики ЕМП; встановити параметри, що найбільш впливають на швидкодію ЕМП – ємність і напруга ЄНЕ, обмоткові дані котушки, маса рухомої системи. При заданій масі рухомої системи визначені мінімальні напруга та ємність ЄНЕ, діапазон обмоткових даних вимикальної обмотки (марка ПЕВ-2),

при яких забезпечується необхідний власний час вимикання ЕМП: напруга – 200 В; ємність – 300 мкФ; діаметр проводу вимикальної обмотки – 0,265-0,3 мм; кількість витків вимикальної обмотки – 200-300; власний час вимикання ЕМП – 7,2-8,7 мс.

10. За допомогою виготовлених дослідних зразків ЕМП з цілісним і розрізаним осердям експериментально встановлено ступінь впливу вихрових струмів в осерді ЕМП з ОПМЗ на його динамічні характеристики.

11. Розроблено систему керування для ВВ СН з ЕМП, що забезпечує його спрацьовування при живленні від джерел як змінної, так і постійної напруги, передбачає ряд захисних блокувань, що направлені на розширення функціональних можливостей ВВ СН.

12. Достовірність отриманих в дисертаційній роботі результатів підтверджується експериментальними дослідженнями дослідних зразків ЕМП, які проводилися в електротехнічній лабораторії ТОВ "АВМ АМПЕР".

13. Результати дисертаційної роботи впроваджені при виробництві ВВ СН серії ВБ4-Е в ТОВ "АВМ АМПЕР" та у навчальному процесі кафедри електричних апаратів НТУ "ХП".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений / Б.В. Клименко, В.М. Бугайчук, А.М. Гречко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХП", 2004. – № 42. – С. 73-80. *Здобувачем проведено аналітичний огляд ЕМП, які використовуються у ВВ СН.*
2. Гречко А.М. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения / Б.В. Клименко, В.М. Бугайчук, А.М. Гречко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2005. – № 2. – С. 23-27. *Здобувачем показано технічне вирішення проблеми підвищення сили утримання ЕМП, доведено збільшення здатності до вимикання струмів КЗ вакуумних вимикачів.*
3. Гречко А.М. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения / Б.В. Клименко, А.М. Гречко, С.В. Выровец, В.М. Бугайчук // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2006. – № 4. – С. 22-26. *Здобувачем проведено розрахунок магнітних полів ЕМП з ОПМЗ методом скінченних елементів, виготовлено дослідну установку та проведено попередні дослідження динамічних характеристик ЕМП.*
4. Гречко А.М. О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями / Б.В. Клименко, Е.И. Байда, А.М. Гречко, С.В. Боев // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2007. – № 1. – С. 30-33. *Здобувачем проведено аналіз залежності інтегралу Джоуля від повного часу розмикання ВВ СН кола симетричного трифазного КЗ.*
5. Гречко А.М. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения / Б.В. Клименко, А.М. Гречко, А.В. Ерьсько // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2007. – № 6. – С. 40-43. *Здобувачем показано можливість підвищення швидкодії ЕМП, зменшення споживання енергії від зовнішнього джерела живлення при спрацьовуванні ЕМП.*

6. Гречко А.М. Исследование и расчет размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой / А.М. Гречко, В.М. Бугайчук // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків, 2008. – № 2. – С. 15-20. *Здобувачем проведено розрахунок лінійних розмірів магнітопроводу ЕМП з ОПМЗ; показано, що за рахунок їх раціонального вибору вдається підвищити силу утримання якоря.*
7. Гречко А.М. Динамические характеристики электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой / А.М. Гречко // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків, 2008. – № 6. – С. 14-18.
8. Пат. 25222 Україна, МПК Н01Н 33/42, Н01F 7/08, Н01Н 33/28. Электромагнитный привод / Клименко Б.В., Гречко А.М., Ересько А.В.; заявл. 20.04.07; опубл. 25.07.07, Бюл. №11. *Здобувачем проведено дослідження ЕМП.*
9. Пат. 75251 Российская Федерация, МПК Н01Н 33/42. Электромагнитный привод / Клименко Б.В., Гречко А.М., Ересько А.В.; заявл. 20.04.07; опубл. 27.07.08, Бюл. №21. *Здобувачем проведено дослідження ЕМП.*
10. Гречко А.М. Математическое моделирование энергосберегающего электромагнитного привода вакуумного выключателя / В.М. Бугайчук, Б.В. Клименко, А.М. Гречко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. XII міжн. наук.-практ. конф., 20-21 травня 2004 р.: анотації доповідей*. – Харків, 2004. – С. 365. *Здобувачем встановлено, що перспективним напрямком покращення характеристик ВВ СН є створення нових конструкцій ЕМП з використанням ПМ на базі рідкоземельних композицій.*

АНОТАЦІЇ

Гречко О.М. Удосконалення електромагнітних систем вакуумних вимикачів середньої напруги для підвищення термічної стійкості об'єктів захисту. – Рукопис.

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

У дисертації розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності захисту обладнання від струмів короткого замикання і покращення техніко-економічних показників вакуумних вимикачів середньої напруги. Ця задача розв'язана за рахунок визначення діапазону значень повного часу розмикання контактів вимикача, при якому зменшується термічна дія струмів короткого замикання (14-22 мс) та розробки рекомендацій щодо удосконалення електромагнітних систем вакуумних вимикачів, виконання яких забезпечує встановлений діапазон часу розмикання.

Розроблено математичну модель вимикання струмів симетричного трифазного короткого замикання вакуумним вимикачем середньої напруги.

Розроблено рекомендації щодо розрахунку лінійних розмірів магнітопроводу електромагнітного приводу з однопозиційною магнітною заціпкою.

Ключові слова: моделювання і дослідження електричних апаратів на фізичних і натурних об'єктах, розрахунок характеристик електричних апаратів, створення конструкцій елементів електричних апаратів.

Гречко А.М. Усовершенствование электромагнитных систем вакуумных выключателей среднего напряжения для повышения термической стойкости объектов защиты. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2009.

В диссертации решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности защиты оборудования от токов короткого замыкания и улучшения технико-экономических показателей вакуумных выключателей среднего напряжения. Эта задача решена за счет определения диапазона значений полного времени размыкания контактов выключателя, при котором уменьшается термическое действие токов короткого замыкания, и разработки рекомендаций по усовершенствованию электромагнитных систем выключателей, выполнение которых обеспечивает установленный диапазон времени размыкания.

С помощью разработанной математической модели отключения токов симметричного трехфазного короткого замыкания вакуумным выключателем среднего напряжения установлена немонотонная зависимость между его быстродействием и степенью термического действия тока короткого замыкания на токопроводы. Установлен диапазон значений полного времени размыкания контактов выключателей (14-22 мс), при котором обеспечивается минимальное значение интеграла Джоуля. С учетом времени реагирования релейной защиты и автоматики выключателя собственное время отключения электромагнитного привода должно быть менее 10 мс.

Исследован опытный образец электромагнитного привода, который позволяет:

- за счет применения высококоэрцитивных постоянных магнитов уменьшить габариты магнитной системы, уменьшить время отключения вакуумных выключателей, повысить эффективность защиты оборудования от термического действия токов короткого замыкания;
- за счет конструкции с двумя рабочими воздушными зазорами увеличить силу удержания электромагнитного привода, увеличить отключающую способность вакуумных выключателей.

С помощью разработанных рекомендаций определены рациональные линейные размеры электромагнитного привода, при которых обеспечиваются минимальные масса, габариты, максимальная сила удержания.

Разработаны рекомендации по определению обмоточных данных катушки, которые позволили определить минимальные значения магнитодвижущих сил обмоток, обеспечивающие работоспособность электромагнитного привода.

Определены минимальные напряжение и емкость емкостного накопителя энергии, диапазоны диаметра провода и количества витков отключающей обмотки электромагнитного привода, при которых обеспечивается необходимое быстродействие и повышение термической стойкости объектов защиты.

С помощью опытных образцов электромагнитного привода с цельным и разрезанным сердечником экспериментально установлена степень влияния вихревых токов в сердечнике на динамические характеристики электромагнитного привода.

Разработана система управления вакуумным выключателем, обеспечивающая его срабатывание при питании от источника как переменного, так и постоянного на-

пряжения, предусматривающая ряд защитных блокировок, направленных на расширение функциональных возможностей выключателя.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается экспериментальными исследованиями опытных образцов электромагнитных приводов. Результаты работы практически реализованы при выпуске вакуумных выключателей среднего напряжения серии ВБ4-Э производства ООО "АВМ АМПЕР" (г. Кременчуг).

Ключевые слова: моделирование и исследование электрических аппаратов на физических и натуральных объектах, расчет характеристик электрических аппаратов, создание конструкций элементов электрических аппаратов.

Grechko A.M. Improvement of Electromagnetic Systems for Average Voltage Vacuum Circuit-Breakers with the Purpose of Thermal Firmness Increase on Protected Equipment. – Manuscript.

PhD thesis in field 05.09.01 – Electric Machines and Apparatus. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2009.

In the thesis the actual scientific and practical problem of equipment's protection efficiency increase from short-circuit currents and improvement of technical and economic indices of average voltage vacuum circuit-breakers. It is decided due to range of circuit-breakers' contacts break-time determination at which diminishing short-circuit currents thermal action (14-22 ms) and development of recommendations with the goal to improvement of vacuum circuit-breakers electromagnetic systems implementation of which provides the set range of break-time.

Mathematical model of symmetric three-phase short-circuit breaking by average voltage vacuum circuit-breakers is created.

Recommendations on calculation of magnetic system linear sizes for electromagnetic drive with single position magnetic latch are developed.

Keywords: modeling and research of electric apparatus on physical and model objects, characteristics calculation of electric apparatus, elements constructions creation of electric apparatus.

Підп. до друку 26.05.2009 р. Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний.
Друк лазерний. Надруковано на цифровому видавничому комплексі
Konica Minolta bizhub 1050. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Замовлення № 0291/0809.

Видавництво "Точка", 61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 8
Свідоцтво про внесення до державного реєстру суб'єктів видавничої діяльності
Серія ДК № 1790 від 19.05.2004 р.

Видруковано в ТОВ "Друкарня Мадрид"
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 8

