

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

Серета Олександр Григорійович

УДК 621.316.573:621.318.43:621.314.26

**ОПТИМІЗАЦІЯ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНОГО РОЗЧЕПЛЮВАЧА З  
МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ СТРУМООБМЕЖУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ  
ШВИДКОДІЮЧИХ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ**

Спеціальність 05.09.01 - Електричні машини і апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”,  
Міністерство освіти і науки України, м. Харків

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

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор  
Загірняк Михайло Васильович,  
Східноукраїнський національний університет,  
м. Луганськ, завідувач кафедри електромеханіки;

Кандидат технічних наук, доцент  
Гільов Олександр Олександрович,  
Севастопольський національний технічний університет, доцент  
кафедри електричних і промислових автоматизованих систем.

Провідна установа: Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”,  
кафедра електромеханіки,  
Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться “23” травня 2002 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 "Харків-  
ський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий “19” квітня 2002 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Болюх В.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми У країнах з обмеженими запасами енергоносіїв, до яких належить Україна, значна частка електроенергії виробляється атомними електричними станціями (АЕС). Підприємства атомної енергетики є потенційними джерелами підвищеної небезпеки. У зв'язку з цим, надзвичайно актуального значення набувають питання безпеки експлуатації АЕС, які полягають у комплексі мір, спрямованих на удосконалення систем захисту з метою запобігання наслідків ймовірних аварійних режимів. Підвищення швидкодії (виявлення, локалізації, переривання аварії) комутаційних апаратів зменшує термічний і динамічний вплив аварійних струмів на електрообладнання, збільшує стійкість енергосистеми і зменшує збиток.

Невід'ємною частиною систем безпеки є швидкодіючі автоматичні вимикачі (АВ), які застосовуються для аварійних відключень в режимі короткого замикання. Через чутливість електрообладнання до токових перевантажень ставиться вимога високої швидкодії АВ з метою обмеження аварійних струмів по тривалості і амплітуді.

Особлива увага приділяється захисту напівпровідникових перетворювачів, які мають низьку перевантажувальну здатність. Вихід з ладу (виникнення двосторонньої провідності) напівпровідникового прибору приводить до короткого замикання. Виникаючий аварійний струм характеризується високим ударним значенням, обумовленим відносно короткими кабельними лініями. Такі струми приводять до виходу з ладу неушкодженого обладнання, перегріву ліній електропостачання, порушенню ізоляції і, остаточно, до виникнення пожеж. Зменшення часу спрацьовування АВ забезпечує обмеження струму короткого замикання на такому рівні, коли еквівалентна теплова дія струму  $\int_0^t i^2 dt$  не приводить до порушення в роботі енергосистеми:

$$\int_0^t i^2 \cdot dt < I^2 \cdot t_{np}, \quad (1)$$

де  $t$  – час дії аварійного струму;  $i$  – миттєве значення аварійного струму;  $(i^2 \cdot t)_{np}$  – припустима перевантажувальна здатність напівпровідникового прибору.

Зменшити амплітуду струму короткого замикання можливо установкою мережних реакторів на вхід випрямляча. Однак, застосування мережних реакторів, як допоміжних засобів, приводить до значного подорожчання систем захисту. Крім того, у номінальному режимі мережні реактори приводять до додаткових втрат енергії.

У дисертаційній роботі обмеження амплітуди і тривалості струму короткого замикання досягається зменшенням часу спрацьовування АВ за рахунок зменшення часу спрацьовування дис-

танційного розчеплювача шляхом використання швидкодіючого розчеплювача індукційно-динамічного типу. Як показали дослідження, застосування індукційно-динамічного розчеплювача (ІДР) зменшує час спрацьовування вимикача АЗ792 з 10 мс до 5 мс, тобто розмикання контактів відбувається раніш максимуму струму короткого замикання. Зменшується руйнівна дія струму, що дозволяє зменшити індуктивність мережних реакторів, їх габарити і масу.

Дослідження, спрямовані на удосконалювання захисних властивостей струмообмежуючих автоматичних вимикачів, мають важливе значення з погляду підвищення рівня безпеки АЕС, а також зменшення матеріалоемності електрообладнання, що є актуальною проблемою теорії і практики електроапаратобудування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами і планами** Дисертаційна робота виконана у відповідність з договором №33830 від 12.03.2001 р., укладеного НТУ“ХП” із НДІ НВО “ХЕМЗ” м. Харкова і пов'язана з галузевими планами підприємств.

Результати роботи спрямовані на підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів серії АЗ790, і реалізовані в конструкції зазначеного апарата по рекомендаціям, приведеним у дисертаційній роботі.

**Мета і задачі дослідження** Метою дисертаційної роботи є оптимізація індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу з метою підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів.

Для досягнення мети в дисертації вирішені науково-технічні задачі:

- Розробити математичну модель індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу, яка дозволяє розрахувати його динамічні характеристики в залежності від геометричних, електричних і механічних параметрів системи.
- Розробити конструкцію індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу на основі аналізу науково-технічної літератури і огляду існуючих конструктивних рішень, спрямованих на підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів.
- Розробити алгоритм і програму оптимізації ІДР поворотного типу. Розробити рекомендації з вибору оптимальних параметрів розчеплювача з урахуванням обмеженості вільного простору в об'ємі вимикача.
- Експериментальна перевірка і практична реалізація нових технічних рішень.

*Об'єкт дослідження* – процес обмеження струму короткого замикання по тривалості і амплітуді швидкодіючим автоматичним вимикачем.

*Предмет дослідження* – дистанційний індукційно-динамічний розчеплювач поворотного типу з мінімальним часом спрацьовування.

*Методи дослідження* – методи теорії електричних ланцюгів для виводу основних рівнянь математичної моделі ІДР поворотного типу; метод Монте-Карло для чисельного інтегрування; метод Ейлера для рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь; метод багатофакторного ортогонального планування експерименту для представлення функції мети в явному вигляді.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

- Розроблено математичну модель індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу у вигляді системи нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь, які описують динаміку електромагнітних і механічних процесів у функції кута повороту рухливої частини. На відміну від існуючих у розробленій моделі запропонований уточнений аналітичний опис взаємної індуктивності токових котушок при малих кутах повороту їх площин.
- Розроблено методику розрахунку динамічних характеристик індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу з урахуванням зміни взаємної індуктивності, індуктивностей розсіювання, активних опорів котушки і диска у функції глибини проникнення електромагнітної хвилі в диск і ефекту близькості котушки і диска.
- Розроблено уточнену методику розрахунку взаємної індуктивності двох кільцевих контурів із струмом, при невеликих кутах повороту їх площин від 0 (включно) до 0,1 рад.
- Розроблено алгоритм оптимізації ІДР поворотного типу. Відмітною рисою алгоритму є двохкроковий пошук глобального екстремуму функції мети.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

- Розроблено конструкцію індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу для швидкодіючого автоматичного вимикача А3792БУЗ, яка дозволяє зменшити власний час спрацювання вимикача з 10 мс до 5 мс.
- Розроблено комплект комп'ютерних програм, які реалізують методику розрахунку динамічних характеристик індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу та алгоритм оптимізації його параметрів.
- Розроблено рекомендації з оптимального вибору параметрів індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу з урахуванням обмеженості вільного простору в об'ємі вимикача.

Результати роботи практично реалізовані в НДІ НВО “ХЕМЗ” і НВП “ЕОС”. Виготовлено макетний зразок автоматичного вимикача А3792БУЗ з дистанційним індукційно-динамічним розчеплювачем. Випробування макетного зразка дали позитивні результати, що свідчить про адекватність математичних моделей реальним фізичним явищам і достовірність теоретичних положень дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача** У роботі [1] розроблено математичну модель індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу. У роботі [2] розроблено алгоритм оптимізації

індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу за критерієм швидкодії. У роботі [3] проведена оцінка ефективності заміни дистанційного електромагнітного розчеплювача на індукційно-динамічний. У роботі [4] розроблено методику, яка дозволяє точніше існуючих розрахувати взаємну індуктивність кругових витків зі струмом, розташованих під кутом, при невеликих кутах повороту від 0 до 0,1 рад. У роботі [5] розроблено комп'ютерні програми розрахунку різними методами взаємної індуктивності котушок розташованих під кутом. У роботі [6] досліджено динамічні характеристики швидкодіючого реле струму, використовуваного як датчик спрацьовування ІДР. У роботі [7] розроблено конструкцію дистанційного індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу для автоматичного вимикача А3792БУЗ. Проведено експериментальне дослідження макетного зразка.

**Апробація результатів дисертації** Результати, отримані в ході виконання роботи, обговорювалися на міжнародних симпозіумах “Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (SIEMA'2000) 20 - 21 жовтня 2000 р., “Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (SIEMA'2001) 18 - 20 жовтня 2001 р.

**Публікації** Основні положення дисертаційної роботи були відбиті в сімох статтях, які опубліковані в спеціалізованих (фахових) виданнях.

**Структура й обсяг дисертації** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації складає 188 стор.; 58 ілюстрацій по тексту; 8 таблиць по тексту; 11 додатків на 35 стор.; 139 використаних літературних джерел на 13 стор.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**У першому розділі** проведено аналітичний огляд технічної літератури по темі, вибір напрямку дослідження, проаналізовані методи підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих АВ. Визначено, що підвищити струмообмежуючу здатність автоматичних вимикачів можливо, зменшивши час його спрацьовування. Найменший час спрацьовування мають автоматичні вимикачі, в конструкцію яких включені індукційно-динамічні приводи (ІДП). Застосування ІДП головних контактів не завжди економічно виправдано, у наслідок високої енергії конденсаторів (ємність, напруга заряду), необхідної для переміщення значної маси рухливих частин і подолання сили опору вузлів, що утримують контакти в замкнутому положенні.

Застосування індукційно-динамічних розчеплювачів, які впливають на заскокку пружинних приводів, значно підвищує швидкодію автоматичних вимикачів із пружинним приводом головних

контактів. Щоб не вносити конструктивних змін у кінематику вимикача доцільно застосувати ІДР поворотного типу. Значні успіхи у вивченні перехідних процесів, розробці інженерних методів розрахунку пов'язані з дослідженнями прямоходових індукційно-динамічних систем. Залишається невивченим питання розрахунку динамічних характеристик ІДР поворотного типу.

**В другому розділі** розроблено математичну модель і методику розрахунку динамічних характеристик індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу.

Параметри розчеплювача показані на кінематичній схемі (рис. 1): 1 – рухливий диск; 2 – котушка; 3 – рейка-заскочка вимикача; 4 – пружина диска; 5 – пружина рейки;  $r_{y\delta}$  – радіус удару рухливої частини;  $r_{np}$  – радіус дії пружини диска;  $r_0$  – радіус повороту диска;  $r_p$  – радіус повороту рейки;  $r_c$  – радіус дії пружини рейки.

Рис. 1. Кінематична схема ІДР

При розряді ємності на обмотку 2, під дією електродинамічних сил взаємодії струмів у котушці і диску, диск 1 рухається і, впливаючи на рейку 3, звільняє механізм АВ. Рух системи розглядається у функції кута повороту рухливої частини ?.

Спрацьовування ІДР супроводжується складними електромеханічними процесами перетворення енергії, обумовленими перехідним процесом проникнення поля в провідник, рухом диска і наявністю сил опору. Крім того, значна нерівномірність розподілу струму в провіднику. Котушку і диск ІДР представимо у вигляді повітряного трансформатора (рис. 2), який володіє активно-індуктивним опором первинного і вторинного ланцюга з магнітним зв'язком.

Рис. 2. Двоконтурна схема заміщення ІДР

Перехідний процес описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1 + \frac{dM}{d\alpha} \cdot \omega \cdot i_2 + M \cdot \frac{di_2}{dt} = U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_1 \cdot dt \\ L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + R_2 \cdot i_2 + \frac{dM}{d\alpha} \cdot \omega \cdot i_1 + M \cdot \frac{di_1}{dt} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $L_1, L_2$  – індуктивності розсіювання котушки 1 і диска 2;  $R_1, R_2$  – активні опори котушки і диска;

$M \frac{dM}{d\alpha}$  – взаємна індуктивність котушки і диска і її похідна по куті повороту;  $i_1, i_2$  – струми в

катушки і диску;  $C$ ,  $U_{C0}$  – ємність і початкова напруга конденсатора;  $t$  – час;  $\dot{\alpha}$  – кутова швидкість диска.

Рівняння руху рухливої частини ІДР поворотного типу:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{m_d r_0^2} \cdot \left( i_1 \cdot i_2 \frac{dM}{d\alpha} r_0 - M_c \right),$$

Момент опору руху  $M_c(\alpha)$  змінюється по наступному закону:

$$M_c = F_{d0} r_{np} + C_d r_{np}^2 \alpha \cos\alpha + m_d g r_0 \cos\alpha + \left[ \frac{r_{y\partial}}{r_p} \left( F_{r0} r_c + C_r r_c^2 \alpha - \alpha_c \frac{r_{y\partial}}{r_p} \right) \cos \left( \alpha - \alpha_c \frac{r_{y\partial}}{r_p} \right) \right] \times K_\alpha,$$

де  $K_\alpha = 0$ , якщо  $0 \leq \alpha < \alpha_c$ ;  $K_\alpha = 1$ , якщо  $\alpha_c \leq \alpha$ ;  $\alpha_c$  – кут повороту рухливої частини до зіткнення з заскочкою;  $F_{d0}$ ,  $F_{r0}$  – початкові зусилля пружин 4 і 5 (рис. 1);  $C_d$ ,  $C_r$  – жорсткість пружин 4 і 5,  $m_d$  – маса рухливої частини.

Нерівномірність розподілу струму в провіднику враховуємо еквівалентною глибиною проникнення електромагнітного поля в провідник:

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu_0} \cdot \sqrt{\left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \cdot C}},$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника.

Математичною моделлю індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу є система інтегро-диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + \frac{dM}{d\alpha} i_2 + M \frac{di_2}{dt} = U_{C0} - \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + \frac{dM}{d\alpha} i_1 + M \frac{di_1}{dt} = 0 \\ \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{1}{J} \cdot \left( i_1 i_2 \frac{dM}{d\alpha} - M_c \right) \\ \alpha(0) = 0; \quad \frac{d\alpha}{dt}(0) = \omega(0) = 0; \quad i_1(0) = 0; \quad i_2(0) = 0; \quad u_C(0) = U_{C0} \end{cases}$$



Ключовою задачею є визначення взаємної індуктивності котушок, розташованих під кутом. Використаємо формулу Неймана:

$$M_{1,2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \iint \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{D},$$

де  $M_{1,2}$  – взаємна індуктивність двох витків;  $D$  – відстань між векторами  $d\vec{l}_1, d\vec{l}_2$ .

Ведемо системи координат:  $xuz$  – зв'язану з нерухомим витком 2 і  $x'y'z'$  – зв'язану з рухливим витком 1 (рис. 3). На малюнку позначено:  $d_0$  – відстань між витками при  $\alpha = 0$ ;  $r_0$  – радіус обертання витка 1;  $r_1, r_2$  – радіуси витків;  $\Delta = r_0 \cdot (1 - \cos \alpha)$  – зсув центра витка 1 щодо осі  $z$  при його повороті.

Проекції векторів  $d\vec{l}_1, d\vec{l}_2$  у площині  $xOz$  визначимо з рис. 4:

$$\begin{aligned} d\vec{l}_{x1} &= -r_1 \cdot d\varphi_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \alpha; & d\vec{l}_{x2} &= -r_2 \cdot d\varphi_2 \cdot \sin \varphi_2; & d\vec{l}_{y1} &= r_1 \cdot d\varphi_1 \cdot \cos \varphi_1; \\ d\vec{l}_{y2} &= r_2 \cdot d\varphi_2 \cdot \cos \varphi_2; & d\vec{l}_{z1} &= r_1 \cdot d\varphi_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \alpha; & d\vec{l}_{z2} &= 0. \end{aligned}$$

Координати елементів довжини витків у системі  $xuz$  визначимо з рис. 3:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \alpha + \Delta; & y_1 &= r_1 \cdot \sin \varphi_1; & z_1 &= d_0 + r_0 \cdot \sin \alpha - r_1 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi_1; \\ x_2 &= r_2 \cdot \cos \varphi_2; & y_2 &= r_2 \cdot \sin \varphi_2; & z_2 &= z_{20}. \end{aligned}$$

Рис. 3. Розташування витків

Рис. 4. Проекції елемента  $d\vec{l}_1'$

Врахуємо зсув витків щодо базових площин на відстані  $\Delta z_1, \Delta z_2$  (рис. 5).

Взаємна індуктивність витків, розташованих під кутом  $\alpha$  (рис. 6):

$$M_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_1 \cdot r_2 \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \alpha + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot d\varphi_1 \cdot d\varphi_2}{\left( r_1^2 \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \alpha + r_0^2 (1 - \cos \alpha)^2 + \Delta z_1 \sin \alpha - r_2 \cos \varphi_2 \cdot z_1 + \right. \\ \left. + r_1^2 \sin^2 \varphi_1 + r_2^2 \sin^2 \varphi_2 + \left( d_0 + r_0 \sin \alpha - r_1 \sin \alpha \cos \varphi_1 + \frac{\Delta z_1}{\cos \alpha} - z_{20} + \Delta z_2 \right)^2 \right)^{0.5}}$$

Рис. 5. Зсув витків від базових площин

Рис. 6. Взаємна індуктивність у функції  $\alpha$ 

Взаємну індуктивність котушок визначимо методом “масивного витка”:

$$M = \frac{W_1 \cdot W_2}{r_1 \cdot h_1 \cdot r_2 \cdot h_2} \cdot \int_{h_1} \int_{h_2} \int_{r_1} \int_{r_2} M_{1,2} \cdot dr_1 \cdot dr_2 \cdot dh_1 \cdot dh_2,$$

де  $W_1$  – число витків котушки;  $W_2$  – число витків диска, рівне одиниці;  $r_1$  – радіус котушки зайнятий витками;  $r_2$  – радіус диска;  $h_1, h_2$  – висоти котушки 1 і диска 2.

Рівняння (2) вирішені в кінцево-різницевої формі неявної схеми Ейлера:

$$\begin{cases} \left( \frac{L_1}{\Delta t} + R_1 + \frac{\Delta t}{C} \right) i_1^{j+1} + \left( \frac{dM^j}{d\alpha} \omega^j + \frac{M^j}{\Delta t} \right) i_2^{j+1} = U_{C0} - \sum_{k=1}^{k=j} \frac{\Delta t}{C} i_1^k + \frac{L_1}{\Delta t} i_1^j + \frac{M^j}{\Delta t} i_2^j \\ \left( \frac{dM^j}{d\alpha} \omega^j + \frac{M^j}{\Delta t} \right) i_1^{j+1} + \left( \frac{L_2}{\Delta t} + R_2 \right) i_2^{j+1} = \frac{L_2}{\Delta t} i_2^j + \frac{M^j}{\Delta t} i_1^j \end{cases}$$

де  $\Delta t$  – крок часової координати;  $j$  – номер часового шару.

Для рішення рівняння руху використовуємо явну схему методу Ейлера:

$$\begin{cases} \omega^{j+1} = \omega^j + \frac{\Delta t}{m_d r_0^2} \cdot \left( i_1^{j+1} \cdot i_2^{j+1} \cdot \frac{dM^j}{d\alpha} - M_c \omega^j \right) \\ \alpha^{j+1} = \alpha^j + \Delta t \cdot \omega^j \end{cases}$$

Методика розрахунку динамічних характеристик ІДР поворотного типу з урахуванням зміни параметрів схеми заміщення у функції глибини проникнення електромагнітної хвилі в диск:

1. Уведення геометричних і механічних параметрів ІДР.
2. Уведення параметрів обмотки з урахуванням форми матеріалу (стрічка, провід).
3. Уведення параметрів рухливої частини з урахуванням матеріалу диска.
4. Попереднє обчислення активних опорів, індуктивності розсіювання, взаємній індуктивності, еквівалентної індуктивності і кругової частоти розрядного контуру.
5. Попереднє обчислення глибини проникнення електромагнітної хвилі.
6. Уточнення глибини проникнення з урахуванням положення рухливої частини.

7. Обчислення активних опорів, індуктивностей, взаємної індуктивності, еквівалентної індуктивності і кругової частоти розрядного контуру з урахуванням скоректованої глибини проникнення.
8. Розрахунок струмів у котушці і диску з урахуванням схеми підключення ємності.
9. Перевірка умови початку руху, якщо руху немає, то перевірка умови закінчення розрахунку, якщо розрахунок незакінчене – повернення до п.8.
10. Обчислення кута повороту рухливої частини і кутової швидкості з урахуванням положення рухливої частини і можливості удару диска по рейці.
11. Перевірка умови висновку розрахунків на печатку.
12. Перевірка умови закінчення розрахунку, якщо ні, то завдання наступного тимчасового кроку і повернення до пункту 6.

Глибина проникнення електромагнітної хвилі обчислюється на кожному тимчасовому кроці з урахуванням руху системи. На кожному тимчасовому кроці коректується значення активних опорів, індуктивностей розсіювання і взаємної індуктивності з урахуванням зміни глибини проникнення поля.

У третьому розділі проведено експериментальне дослідження макетного зразка ІДР поворотного типу для вимикача А3790 (рис. 7), яке дозволило: перевірити вірогідність розробленої математичної моделі; установити закономірність впливу параметрів ІДР на швидкодію; визначити параметри, оптимізація яких доцільна.

а)

б)

Рис. 7. Макетний зразок ІДР поворотного типу

Експериментальна установка для дослідження ІДР показана на рис. 8.

Рис. 8. Принципова схема експериментальної установки

Схема живлення ІДР: конденсатор ємністю  $C$ , тиристорний ключ VT1. Заряд ємності здійснюється від трансформатора T1 через випрямляч VD1-VD4. VD5 включається при аперіодичному розряді ємності, VD6 – при коливальному. Схема керування: джерело  $U_y$ , обмежуючий резистор  $R_{обм}$ . VT2 здійснює керування електронним таймером  $mS$ , включеним послідовно з головними контактами  $K$  вимикача. Рахунок часу відбувається до моменту розмикання контактів  $K$ . Фіксується власний час спрацьовування АВ.

Досліджувалися параметри: схема підключення ємності (аперіодичний, коливальний розряд), товщина  $h_0$  і радіус  $r_1$  диска, товщина стрічки  $\Delta_l$  обмотки котушки, радіус повороту  $r_0$  і радіус удару  $r_{y0}$  рухливої частини, параметри ємності. Результати дослідження приведені на рис. 9 – рис. 12 (1 – розрахунок; 2 – експеримент).

Рис. 9. Вплив радіуса диска

Рис. 10. Вплив товщини стрічки

Рис. 11. Вплив радіуса удару.

Рис. 12. Вплив радіуса повороту.

Результати експериментального дослідження динамічних характеристик макетного зразка ІДР підтверджують коректність розробленої математичної моделі. Максимальна погрішність розрахунків, у досліджуваному діапазоні, складає 8%. На динаміку ІДР найбільш впливають: параметри конденсатора, товщина і радіус диска рухливої частини, переріз стрічки обмотки, радіус удару і радіус повороту рухливої частини. Параметри конденсатора монотонно впливають на швидкодію ІДР. Чим більше енергія (ємність і початкова напруга), тим менше час спрацьовування, причому, починаючи зі значень 200 мкФ, 400 В, вплив стає незначним, при значному подорожчанні конденсаторів і збільшенні габаритів. З іншого боку обмеження енергії конденсатора викликано міцністю вузлів АВ.

Випадок внутрішнього короткого замикання керованого випрямляча є найбільш важким з погляду величини і тривалості аварійного струму:

$$i_{к.з} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi, \max}}{2 \cdot \sqrt{R_T^2 + \omega_c \cdot L_{\Sigma}^2}} \times \left[ \sin \omega_c \cdot t - \varphi - \sin(\alpha_{\kappa} - \varphi) e^{-\frac{R_T}{\omega \cdot L_{\Sigma}} \omega_c \cdot t - \alpha_{\kappa}} \right],$$

де  $L_{\Sigma} = L_T + L_P$ ;  $\varphi = \arctg\left(\frac{\omega_c \cdot L_{\Sigma}}{R_T}\right)$ ;  $U_{\phi, \max}$  – амплітуда фазної напруги;  $L_T, R_T$  – індуктивність і активний опір однієї фази живильного трансформатора;  $L_P$  – індуктивність мережних реакторів;  $\alpha_{\kappa}$  – кут керування;  $\omega_c$  – частота мережі.

Індуктивність мережних реакторів визначається часом спрацьовування АВ. Залежність (1) інтеграла відключення (рис. 13) дозволяє вибрати мережний реактор для напівпровідника з відомим параметром  $(I^2 t)_{np}$  і часом спрацьовування АВ. Для тиристора МТ-320-14 отримане приватне рішення задачі визначення сумарної індуктивності ланцюга (рис. 14).

Рис. 13. Інтеграл струму у функції часу вимикача і Рис. 14. Індуктивність мережі для захисту

У результаті заміни дистанційного електромагнітного розчеплювача на індукційно-динамічний власний час спрацьовування АВ зменшилося з 10 мс до 5 мс, що дозволяє знизити тепловий вплив аварійного струму в 4 рази (рис. 13). Індуктивність мережних реакторів, застосовуваних для захисту напівпровідникових перетворювачів у комплексі з АВ, зменшується в 3 рази (рис. 14), що дозволяє в 1,7 рази зменшити витрату міді в обмотках реактора.

У четвертому розділі проведена оптимізація параметрів ІДР поворотного типу для досягнення максимальної ефективності через обмеженість вільного простору в корпусі вимикача. Оптимізація ІДР проведена за критерієм максимальної швидкодії. Класичне рішення задачі оптимізації припускає наявність функціональної залежності часу спрацьовування від варійованих параметрів. Така функціональна залежність отримана методом ортогонального планування експерименту.

Алгоритм оптимізації ІДР поворотного типу:

- оцінка впливу параметрів ІДР на швидкодію з метою виявлення найбільш значущих;
- розрахунок динамічних характеристик у відповідність з ортогональним планом;
- обробка результатів на ЕОМ і розрахунок коефіцієнтів функції мети;
- визначення оптимальних значень варійованих факторів;
- експериментальна перевірка отриманих результатів.

У якості варійованих факторів прийнято наступні: товщина намотувальної стрічки (діапазон зміни: 0,05 – 0,25 мм); ширина намотувальної стрічки (діапазон зміни 5 – 10 мм); радіус диска (діапазон зміни 10 – 30 мм); товщина диска (діапазон зміни 1 – 4 мм.); радіус удару рухливої частини (діапазон зміни 10 – 70 мм); радіус повороту рухливої частини (діапазон зміни 30 – 40 мм).

Традиційні методи обробки ортогональних експериментів припускають одержання моделей у виді квадратичного полінома:

$$y = \sum_{i=1}^m b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m b_{i,j} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{i,i} x_i^2 - \varphi, \quad (3)$$

де  $x_i$  – фактори;  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  – коефіцієнти регресії, які необхідно розрахувати, користаючись результатами експерименту;  $m$  – число факторів моделі;  $\varphi$  - виправлення.

У деяких випадках точність моделі (3) залишається незадовільною. Одним з шляхів уточнення моделі є підвищення її порядку. Найбільш ефективним прийомом є зміна порядку моделі за рахунок уведення поправочних множників:

$$y = \prod_{i=1}^m \left( 1 + \frac{x_i \cdot h_i}{X_{i0}} \right)^{p_i} \times \left[ \sum_{i=0}^m b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m b_{i,j} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{i,i} x_i^2 - \phi \right], \quad (4)$$

де  $p_i$  – показники ступеня поправочних множників.

За допомогою комп'ютерної програми були розраховані коефіцієнти функції мети для моделі (3). Максимальний модуль відносного відхилення дорівнює майже 50%, що говорить про низьку точність апроксимації. Для підвищення точності моделі були проведені розрахунки для моделі (4). Максимальна помилка – 9%.

Адекватність моделі (4) підтверджена за критерієм Фішера.

Центральною задачею є пошук мінімуму функції мети. Методи нелінійного програмування (генетичні алгоритми, метод перебору, метод Гауса-Зейделя, симплекс-метод, градієнтні методи) мають недоліки, що полягають в значних обсягах обчислень, або знайдений екстремум може бути локальним. Переконатися в наявності глобального екстремуму можна у випадку інформації про всю поверхню функції мети.

Розроблено наступний алгоритм пошуку мінімуму функції мети:

1. По кожному напрямку в області пошуку рішення в  $n$ -мірному просторі рівномірно розподіляється за допомогою генератора випадкових величин деяке число крапок.
2. З безлічі крапок вибирається та, у якій цільова функція мінімальна.
3. Отримана крапка вибирається як центр області пошуку нового уточненого значення цільової функції, при цьому інтервали пошуку зменшені в  $\sqrt[n]{N}$  раз, якщо  $n$  – кількість напрямків пошуку,  $N$  – число випадкових крапок.
4. Якщо точність задовільна, процес закінчується, якщо ні – повернення до пункту 3.

Ілюстрація методу для двомірного випадку показана на рис. 15.

На рис. 16 – рис. 18 показані залежності, які дозволяють провести оптимізацію товщини обмотувальної стрічки, радіуса удару і радіуса повороту рухливої частини.

Рис. 15. Пошук мінімуму функції мети

Рис. 16. Вплив товщини стрічки (код  $x_1$ ) і радіуса удару (код  $x_4$ )

Рис. 17. Вплив товщини стрічки (код  $x_1$ ) і радіуса диска (код  $x_5$ )

Рис. 18. Вплив товщини стрічки (код  $x_1$ ) і радіуса обертання (код  $x_6$ )

Ширина обмотувальної стрічки не впливає на час спрацьовування ІДР, тому що глибина проникнення електромагнітної хвилі не перевищує мінімальної, технологічно здійсненої, ширини

стрічки для досліджуваного спектра частот розрядного контуру. Вплив товщини диска на швидкодію ІДР носить монотонний характер: чим тонше диск, тим вище швидкодія, за рахунок зменшення маси диску. Однак, зменшення товщини диска менш 1,0 мм не забезпечує міцності конструкції ІДР.

Ширина стрічки 10 мм і товщина диска 1 мм приймалися фіксованими.

За допомогою ЕОМ розраховані оптимальні параметри ІДР, при яких власний час спрацьовування мінімальний з урахуванням фіксованих параметрів конденсаторів, товщини диска, ширини обмотувальної стрічки. Отримано оптимальні параметри: товщина обмотувальної стрічки 0,18 мм; радіус диска 27 мм; радіус обертання 39,5 мм; радіус удару 65 мм. Розрахунковий час спрацьовування ІДР з оптимальними параметрами склало 0,57 мс. По оптимальних параметрах виготовлений макетний зразок ІДР поворотного типу. Експериментальний час – 0,65 мс. При цьому розбіжність між експериментальними і розрахунковими даними складає 12%.

## ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу літератури і стану проблеми по темі дисертаційної роботи визначені мета і задачі дослідження, що дозволяють одержати науково обґрунтовані методики, спрямовані на рішення конкретної науково-технічної задачі – оптимізація параметрів індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу з метою підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів, призначених для захисту напівпровідникових перетворювачів в аварійних режимах роботи електрообладнання. Удосконалення апаратів захисту дозволяє запобігти вихід з ладу неушкодженого електрообладнання, що значно знижує час простоїв.

2. Розроблено і реалізовано у виді комп'ютерних програм методику розрахунку динамічних характеристик індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу:

- Розроблено математичну модель індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу у виді системи нелінійних інтегро-диференційних рівнянь, що описують динаміку електромагнітних і механічних процесів у функції кута повороту рухливої частини. На відміну від існуючих у розробленій моделі запропонований уточнений аналітичний опис взаємної індуктивності токових котушок при малих кутах повороту їхніх площин.
- Розроблено методику розрахунку динамічних характеристик індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу з урахуванням зміни взаємної індуктивності, індуктивностей розсіювання, активних опорів котушки і диска у функції глибини проникнення електромагнітної хвилі в диск.
- Розроблено уточнену методику розрахунку взаємної індуктивності двох кільцевих контурів зі струмом, при невеликих кутах повороту їхніх площин  $0 - 0,1$  рад.

3. Вірогідність отриманих у дисертаційній роботі результатів підтверджується експериментальними дослідженнями, що були проведені на макетних зразках у НДІ НВО "ХЕМЗ", а також проведеною статистичною обробкою результатів і перевіркою адекватності по багатofакторній математичній моделі:

- Розроблено конструкцію дистанційного індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу для швидкодіючого автоматичного вимикача АЗ792БУЗ, що дозволяє зменшити власний час спрацьовування вимикача з 10 мс до 5 мс.
- Розроблено комп'ютерні програми, які реалізують методику розрахунку динамічних характеристик ІДР поворотного типу і алгоритм оптимізації його параметрів.
- Розроблено рекомендації з оптимального вибору параметрів ІДР поворотного типу з урахуванням обмеженості вільного простору в об'ємі вимикача.

4. Розроблено і реалізований у виді комп'ютерної програми алгоритм оптимізації параметрів ІДР поворотного типу за критерієм швидкодії:

- З використанням методу Монте-Карло розроблений алгоритм пошуку глобального екстремуму функції мети в гіперпросторі шести варійованих параметрів.
- Реалізована у виді комп'ютерної програми методика обробки результатів експериментів, проведених у відповідність з ортогональним планом II порядку.

5. Впровадження у виробництво швидкодіючого автоматичного вимикача АЗ792БУЗ з дистанційним індукційно-динамічним розчеплювачем поворотного типу підтверджується актом.

6. Основні результати роботи, отримані у виді рекомендацій і методів підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів, реалізовані у виді комп'ютерних програм.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Математическая модель и динамические характеристики электродинамического расцепителя быстродействующего автоматического выключателя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. №83. – С. 113-116.
2. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Оптимизация параметров быстродействующего индукционно-динамического расцепителя поворотного типа по критерию быстродействия // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – №17. – С. 83-87.
3. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Применение автоматических выключателей серии АЗ700 с индукционно-динамическим расцепителем для защиты полупроводниковых преобра-



зователей // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – №14. – С. 315-322.

4. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Расчет взаимной индуктивности круговых витков, лежащих в плоскостях расположенных под углом относительно друг друга // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. №77. – с. 71-73.
5. Клименко Б.В., Байда Е.И., Серeda А.Г. Сравнительные расчетные характеристики по расчету взаимной индуктивности круговых витков и катушек, расположенных под углом относительно друг друга // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. №79. – С. 66-68.
6. Могилевский Г.В., Серeda А.Г. Быстродействующее реле тока на магнитоуправляемых контактах // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – №16. – С. 117-120.
7. Серeda А.Г. Экспериментальное исследование дистанционного индукционно-динамического расцепителя автоматического выключателя А3792 // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. № 118. – С. 69-72.

#### Анотації

Серeda О.Г. “Оптимізація індукційно-динамічного розчеплювача з метою підвищення струмообмежуючої здатності швидкодіючих автоматичних вимикачів”. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01. – Електричні машини і апарати. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2001.

В дисертації розглянуто питання підвищення струмообмежуючої здатності низьковольтних швидкодіючих автоматичних вимикачів, призначених для захисту електрообладнання в режимі короткого замикання. Обмеження амплітуди і тривалості струму короткого замикання досягається зменшенням власного часу спрацьовування автоматичного вимикача за рахунок зниження часу спрацьовування дистанційного розчеплювача шляхом використання розчеплювача індукційно-динамічного типу. У зв'язку з особливостями конструкції автоматичних вимикачів доцільно використання індукційно-динамічного розчеплювача з поворотним якорем.

У дисертаційній роботі розроблено: математична модель індукційно-динамічного розчеплювача поворотного типу; методика розрахунку динамічних характеристик розчеплювача; методика розрахунку взаємної індуктивності двох кільцевих контурів зі струмом, розташованих під кутом;

алгоритм оптимізації індукційно-динамічного расцепителя поворотного типу за критерієм швидкодії; конструкція індукційно-динамічного розчеплювача для автоматичного вимикача АЗ792БУЗ.

У результаті заміни електромагнітного дистанційного розчеплювача на індукційно-динамічний час спрацьовування вимикача зменшився з 10 мс до 5 мс.

**Ключові слова:** струмообмежуючий автоматичний вимикач, індукційно-динамічний розчеплювач, напівпровідниковий перетворювач, коротке замикання, динамічні характеристики.

Серода А.Г. “Оптимизация индукционно-динамического расцепителя с целью повышения токоограничивающей способности быстродействующих автоматических выключателей”. – 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, 2001.

В диссертации решен вопрос повышения токоограничивающей способности низковольтных быстродействующих автоматических выключателей, предназначенных для защиты электрооборудования в режиме короткого замыкания, в частности выключателей серии АЗ790. Ограничение амплитуды и длительности тока короткого замыкания достигается уменьшением собственного времени срабатывания автоматического выключателя за счет снижения времени срабатывания дистанционного расцепителя путем применения расцепителя индукционно-динамического типа. При этом нет дополнительных конструктивных изменений кинематики и дугогасительной системы выключателя. Повышение токоограничивающей способности за счет уменьшения собственного времени срабатывания расцепителя не приводит к увеличению перенапряжения, что важно для полупроводниковых преобразователей.

В диссертационной работе разработано:

- Математическая модель индукционно-динамического расцепителя поворотного типа в виде системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, описывающих динамику электромагнитных и механических процессов в функции угла поворота подвижной части. В отличие от существующих в разработанной модели предложено уточненное аналитическое описание взаимной индуктивности токовых катушек при малых углах поворота их плоскостей.
- Методика расчета динамических характеристик индукционно-динамического расцепителя поворотного типа с учетом изменения взаимной индуктивности, индуктивностей рассеяния, активных сопротивлений катушки и диска в функции глубины проникновения электромагнитной волны в диск и эффекта близости катушки и диска.

- Методика расчета взаимной индуктивности двух кольцевых контуров с током, при небольших углах поворота их плоскостей от 0 (включительно) до 0,1 рад.
- Алгоритм оптимизации индукционно-динамического расцепителя поворотного типа. Отличительной чертой алгоритма является двухшаговый поиск глобального экстремума функции цели.
- Конструкция индукционно-динамического расцепителя поворотного типа для быстродействующего автоматического выключателя АЗ792БУЗ, которая позволяет уменьшить время срабатывания выключателя с 10 мс до 5 мс.

Математическая модель индукционно-динамического расцепителя поворотного типа решена в конечно-разностной форме неявной схемы Эйлера. Достоинство неявной схемы заключается в абсолютной сходимости метода. Математическая модель положена в основу методики расчета динамических характеристик индукционно-динамического расцепителя. Разработана компьютерная программа, реализующая методику расчета динамических характеристик индукционно-динамического расцепителя поворотного типа с учетом схемы подключения емкостного накопителя энергии, формы и материала обмотки, материала диска, геометрии расцепителя, глубины проникновения электромагнитной волны в диск, сил сопротивления.

Особенность срабатывания расцепителя заключается в том, что частота разрядного тока в контуре достаточно велика, поэтому учтена неравномерность распределения тока по сечению проводника. При расчетах активных сопротивлений, индуктивности рассеяния и взаимной индуктивности учитывалась глубину проникновения электромагнитной волны в диск. Кроме того, вследствие повышенной частоты разрядного тока в обмотке сильно выражены поверхностный эффект и эффект близости, если индуктор намотан медной лентой. Данное влияние взаимное, так как глубина проникновения электромагнитной волны в свою очередь влияет на значения электрических параметров схемы замещения. Неравномерность распределения тока по сечению проводника учтена эквивалентной глубиной проникновения электромагнитного поля в проводник.

В связи с особенностями конструкции низковольтных автоматических выключателей серии АЗ700, эффективно использование индукционно-динамических расцепителей с поворотным якорем. Электродинамический момент, развиваемый расцепителем, пропорционален производной от взаимной индуктивности по углу поворота подвижного элемента. В связи с этим в диссертационной работе решена задача определения взаимной индуктивности двух круговых витков и катушек, лежащих в плоскостях, расположенных под углом друг к другу.

Проведено экспериментальное исследование макетного образца расцепителя поворотного типа, которое позволило проверить достоверность разработанной математической модели, правильность алгоритмов и программ расчета динамических характеристик, оценить погрешность результатов численного расчета. При экспериментальном исследовании установлена закономерность

влияния геометрических размеров и электрических параметров на быстродействие расцепителя и определена чувствительность времени срабатывания к этим факторам. Результаты позволили определить параметры, оптимизация которых целесообразна. Наиболее существенное влияние оказывают: параметры емкостного накопителя энергии, толщина диска подвижной части, сечение обмоточной ленты катушки, радиус удара подвижной части, радиус вращения подвижной части; радиус диска.

Оптимизация проведена методом ортогонального планирования эксперимента.

В результате замены электромагнитного дистанционного расцепителя на индукционно-динамический собственное время срабатывания автоматического выключателя уменьшилось с 10 мс до 5 мс. Индуктивность сетевых реакторов, применяемых для защиты полупроводниковых преобразователей в комплексе с быстродействующим автоматическим выключателем, уменьшается приблизительно в 3 раза, в зависимости от индуктивности трансформатора, что позволяет в 1,7 – 1,9 раза уменьшить массу меди в обмотках реактора и существенно снизить его стоимость.

**Ключевые слова:** токоограничивающий автоматический выключатель, индукционно-динамический расцепитель, полупроводниковый преобразователь, короткое замыкание, динамические характеристики.

Sereda A.G. “Induction-dynamic release optimization with the purpose of current-limiting ability increase of high-speeding circuit breaker”. - Manuscript.

The dissertation for Technical Science Candidate degree. Specialty 05.09.01. - Electric Machines and Apparatus. National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2001.

A problem of current-limiting ability increase of low-voltage high-speeding circuit breaker is dedicated. Circuit breakers are intended for electric equipment protection in short circuit behaviour. The limitation of short-circuit current amplitude and duration is reached by response time reduction of an automatic release by application of an induction-dynamic release.

In dissertation is designed: mathematical model of the rotary type inductive-dynamic release (IDR); dynamic characteristic calculation method of a rotary type IDR; two ring-type currents contour mutual inductance calculation method, at small turn angles of their planes; optimization algorithm of the rotary type inductive-dynamic release; the rotary type inductive-dynamic release design which allows to reduce a switch time of a high-speeding circuit breaker А3792БУ3 with 10 ms to 5 ms.

**Key words:** current-limiting high-speeding circuit breaker, inductive-dynamic release, semiconductor converter, short circuit, dynamic characteristic.