ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ТІМОФЄЄВ ОЛЕКСАНДР ГЕННАДІЙОВИЧ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ ПРИ ДУГОВИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В МЕРЕЖІ 380/220 В

Спеціальність 09.06.03 – «Електропостачання промислових підприємств та міст»

Автореферат
дисертації на здобуття ступеня
магістр-електротехнік

Донецьк 2005

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Ковальов Олександр Петрович**, професор кафедри "Електропостачання промислових підприємств і міст" Донецького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Державною програмою забезпечення пожежної безпеки, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 3.04.95 № 238, передбачене проведення досліджень в області розробки математичних моделей і методів по визначенню і прогнозуванню ймовірності виникнення пожеж, ефективних способів їх попередження і ліквідації наслідків.

Діючі нормативні документи, зокрема ДСТ 12.1.004-91 «Пожежна безпека», ПУЕ, відомчі норми і правила не завжди дозволяють об'єктивно оцінити небезпеку загоряння в електричних мережах житлових і суспільних будівель. Електротехнічні вироби (кабелі, шнури, проводи й ін.) належать до найбільш пожежонебезпечних видів продукції, оскільки в їхній конструкції використовуються горючі електроізоляційні матеріали. При ушкодженні таких виробів, які знаходяться під напругою, можуть виникати джерела ініціювання пожеж (іскри, електричні дуги, розбризкування розплавлених металевих часток).

За даними УДПО УМВС України в Донецькій області за період 1986-1995 рр. від теплових проявів електричного струму (короткі замикання, ослаблені і небезпечно нагріті контактні з'єднання, перевантаження) відбулося 12517 пожеж, з них від ушкодження кабельних мереж і проводів – 6459. Тільки за 1999-2000 рр. у житловому секторі відбулося 8413 пожеж, загинуло у вогні 584 осіб, збитки склали 6418,3 тис. грн.

Приведені дані свідчать про те, що розробка нових, більш точних у порівнянні з існуючими, методів оцінки і прогнозування пожежної небезпеки систем електропостачання 380/220 В, а також розробка нових засобів захисту, що у комплексі з організаційними заходами дозволять забезпечити нормований рівень пожежної безпеки мережі є важливою науковою задачею і служить економіці України.

Слід зазначити, що в роботі не розглядаються процеси горіння і гасіння при загорянні ізоляції в електричних мережах 380/220 В, коло питань обмежується оцінкою і прогнозуванням подій, що можуть призвести до пожеж у приміщеннях. Головна ж задача, розв'язувана в роботі – не допустити випадки загорянь електричної проводки й електроустаткування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в плані одного з основних наукових напрямків ДонНТУ й у рамках держбюджетної роботи «Підвищення ефективності систем електропостачання і електроспоживання» (Н 27/2000).

Мета роботи. Удосконалювання методів оцінки і прогнозування небезпеки загоряння в електричних мережах 380/220 В с глухозаземленою нейтраллю і розробка нових засобів захисту, що дозволяють зменшити число пожеж у мережі від усіх видів збурювань, що супроводжуються іскровим розрядом.

Ідея роботи. Виявлення впливу частоти і тривалості появи струмів короткого замикання, надійності систем відключення автоматичних вимикачів, захисного відключення і термінів їхньої профілактики на пожежну безпеку мережі, а також розробка технічних рішень, що дозволяють запобігти пожежам від іскрових розрядів.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **задачі дослідження**:

провести статистичний аналіз інтервалів часу між екзогенними пожежами в електричних мережах житлових приміщень і адміністративних будівель, виявити найбільш небезпечні елементи мережі й одержати залежність, яка дозволить прогнозувати зріст пожеж на найближчі роки;

розробити нову математичну модель, що дозволить прогнозувати ймовірність загоряння елементів мережі і горючих матеріалів у приміщеннях у залежності від частоти і тривалості появи струмів короткого замикання, надійності системи відключення автоматичного вимикача, пристрою захисного відключення і термінів їхньої профілактики;

установити залежність ймовірності загоряння ізоляції електричної проводки в приміщеннях протягом часу t від частоти і тривалості появи струмів короткого замикання, надійності системи відключення автоматичного вимикача і пристрою захисного відключення, а також термінів їхньої профілактики;

розробити методику оцінки і прогнозування пожежної безпеки при коротких замиканнях в елементах мережі;

розробити принцип побудови реле іскрозахисту, що дозволить забезпечити пожежну безпеку мережі при іскрових розрядах у силових контактних з'єднаннях або дугових коротких замиканнях з великим перехідним опором;

дослідити динамічні процеси, що протікають у реле іскрозахисту з появою іскроутворень в ослаблених (окислених) контактних з'єднаннях.

Об'єкт дослідження - система електропостачання, максимальний струмовий захист і пристрій захисного відключення.

Предмет дослідження – надійність системи відключення автоматичного вимикача, пристрою захисного відключення, терміни їхньої профілактики, частота і тривалість появи струмів короткого замикання, процеси, що протікають у реле іскрозахисту.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі використовувалися аналітичні методи і методи, засновані на експериментальних дослідженнях, що базуються на

основних поняттях теорії ймовірностей і надійності. Аналітичні дослідження і математичне моделювання виконувалися за допомогою персональної ЕОМ.

Основні наукові положення і результати, що виносяться на захист і їх новизна.

1. Розроблено математичну модель, що дозволяє прогнозувати ймовірність загоряння електричної проводки від джерел електричного походження, яка базується на положеннях теорії випадкових марковських процесів, що відрізняється врахуванням тривалості існування небезпечних подій і дозволяє визначати середній час до першої пожежі, дисперсію цього часу, ймовірності перебування системи в кожному з можливих станів, повний очікуваний економічний ефект, який система приносить за час *t*.

2. Уперше встановлені аналітичні залежності ймовірності загоряння електропроводки в будь-який момент розглянутого періоду часу від: частоти і тривалості появи небезпечного джерела електричного походження; надійності систем відключення автоматичного вимикача і пристрою захисного відключення, а також термінів їхньої профілактики.

3. Запропоновано нову математичну модель датчика реле іскрозахисту, яка дозволяє досліджувати динамічні процеси, що протікають при іскрових розрядах.

Обґрунтування і вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректним застосуванням основних теоретичних методів і методів, заснованих на експериментальних дослідженнях: теорії однорідних марковських процесів, теорії матриць; теорії ймовірностей; моделювання явищ на ЕОМ; відповідністю обсягу даних спостережень РД 50-69-89 і ДСТУ 2862-94; задовільною збіжністю результатів оцінки пожежобезпеки елементів мережі електропостачання квартир з даними галузевої статистики; гіпотезами про види розподілу досліджуваних випадкових величин, підтверджуваними з довірчою ймовірністю не нижче 0,8 і граничною відносною помилкою не вище 0,2; позитивними результатами впровадження розробленої методики розрахунку і рекомендацій.

Наукове значення роботи полягає в розробці нової математичної моделі і залежностей, що дозволяють прогнозувати ймовірність загоряння ізоляції електричних проводок від струмів короткого замикання. Уперше запропоновані аналітичні залежності частоти виникнення пожеж від частоти появи струму короткого замикання, його тривалості існування, надійності системи відключення автоматичного вимикача, захисного відключення і термінів їхньої профілактики. Запропоновано математичну модель датчика реле іскрозахисту, яка дозволяє досліджувати динамічні процеси, що протікають у ньому при іскрових розрядах.

Практичне значення роботи полягає в розробці методики оцінки ймовірності загоряння ізоляції електропроводки, що базується на встановлених у роботі залежностях; в обґрунтуванні надійності системи відключення автоматичного вимикача, захисного відключення, термінів їхньої

профілактики необхідних для забезпечення нормованого рівня пожежної безпеки (ДСТ 12.1.004-91); у розробці вимог до реле іскрозахисту і його принципової схеми.

Реалізація висновків і рекомендацій роботи. Основні наукові результати роботи використовуються в держтемі ДонНТУ "Розвиток основ теорії оцінки пожежної безпеки систем електропостачання 330-220В житлових приміщень" (Д6-03), нормативних документах: «Методика оцінки ймовірності виникнення вибухонебезпечних ситуацій у системах електропостачання газових промислів, на технологічних установках і приміщеннях, у яких вони експлуатуються», «Методика оцінки рівня безпеки систем електропостачання газових промислів, технологічних установок, електроустаткування і засобів захисту при їхній експлуатації», розроблених трьома організаціями: ДонНТУ, Російським ВАТ «Газпром», РДУ нафти і газу ім. І.М.Губкіна за період 1995-2000 рр., «Методика оцінки вибухобезпеки тупикової виробітки при експлуатації електроустаткування», розробленої МакНДІ і ДонНТУ (2000 р) і «Методика оцінки електробезпеки на ділянках вугільних шахт», розробленої МакНДІ і ДонНТУ (2002 р).

Особистий внесок автора полягає в розробці математичної моделі, що дозволяє прогнозувати ймовірність загоряння елементів електричної проводки приміщень і будівель, у встановлені аналітичних залежностей ймовірності загоряння електричної проводки від частоти і тривалості появи струмів короткого замикання, надійності системи відключення автоматичного вимикача, захисного відключення і термінів їхньої профілактики; у розробці схеми заміщення і математичної моделі, яка дозволяє досліджувати динамічні процеси, що протікають у датчику іскрозахисту при іскрових розрядах, у розробці вимог до датчика іскрозахисту і його принципових схем.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

<u>У вступі</u> розглянута актуальність проблеми, зазначена мета роботи, ідея, викладені основні наукові положення і результати, що виносяться на захист, їхня новизна.

<u>Розділ</u> присвячений розробці технічних рішень, що дозволять підвищити пожежну безпеку мережі і дослідженню динамічних характеристик пропонованого в роботі реле іскрозахисту (РІЗ).

Сутність пропонованого технічного рішення полягає в тому, що традиційний пристрій захисного відключення оснащується додатковим каналом (РІЗ). Вхідні сигнали ПЗВ і РІЗ впливають на електромагніт відключення єдиного автоматичного вимикача відповідно до логічної операції «ЧИ».

Канал РІЗ призначений для відключення ділянки електричної мережі, що захищається, напругою 380/220В з появою в зоні захисту тривалого інтенсивного іскріння силових контактних з'єднань чи у випадку утворення слабкострумової електричної дуги між фазними і нульовими провідниками (рис.1).

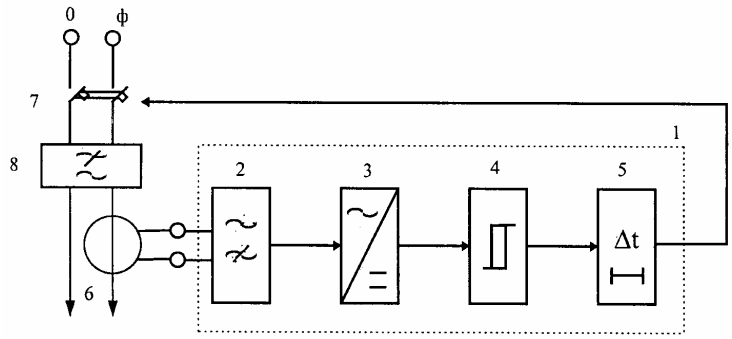


Рис. 1. Структурна схема реле іскрозахисту:

1 - Блок-схема реле іскрозахисту; 2- фільтр ВЧ; 3- випрямувач; 4- граничний елемент; 5 - блок витримки часу; 6 - вимірювальний перетворювач струму; 7 - автоматичний вимикач; 8 - силовий фільтр НЧ.

Зазначені нестаціонарні режими роботи мережі супроводжуються появою в кривій струму навантаження широкого спектра високочастотних коливань. Зазначена обставина дозволяє виявити несправне приєднання і відключити його, або подати звуковий і світловий сигнали.

Для дослідження динамічних характеристик датчика реле іскрозахисту була складена схема його заміщення рис. 2.

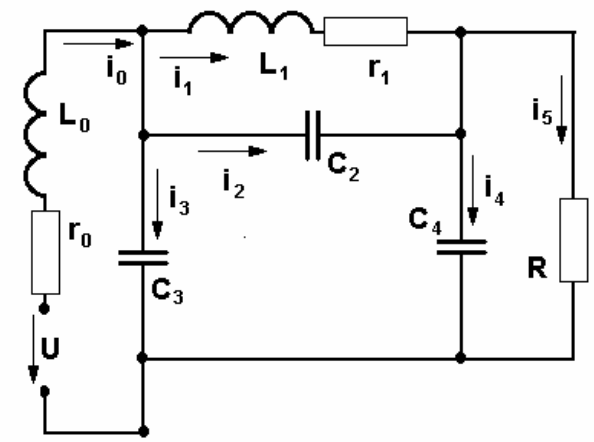


Рис. 2. Схема заміщення датчика реле іскрозахисту:

- еквівалентний генератор, представлений джерелом напруги $u(t)$ і внутрішнім опором r_0, L_0;

r_1, L_1, C_2 - резонансний контур;

C_3, C_4 - низькочастотний фільтр;

R - опір навантаження.

Виникнення іскрового розряду імітується стрибкоподібною зміною опору навантаження R, що в принципі відповідає дійсності, тому що іскра замикає собою деяку частину ланцюга навантаження.

Схема заміщення датчика разом з живильною мережею і ланцюгом навантаження містить п'ять накопичувачів енергії. Але з них три ємності створюють замкнуте коло, унаслідок чого напруга тільки двох з них є незалежною. Це означає, що для математичного моделювання схеми досить чотири перемінні стану, значення яких цілком і однозначно визначають стан змодельованої системи рис. 2 у будь-який момент часу. У якості останніх приймемо два струми індуктивностей i_0, i_1 а також напруги на двох ємностях u_{c2}, u_{c3}. Таким чином, схема рис. 2. описується в динаміці наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} r_0 \cdot i_0 + L_0 \cdot i_0' + u_{c3} &= u(t); \\ r_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot i_1' - u_{c2} &= 0; \\ i_0 - i_1 - C_2 \cdot u_{c2}' - C_3 \cdot u_{c3}' &= 0; \\ i_1 + u_{c2}/R + (C_2 + C_4) \cdot u_{c2}' - u_{c3}/R - C_3 \cdot u_{c3}' &= 0. \end{aligned}\right\}$$

Ця ж система рівнянь, записана в символічній формі, моделює сталий синусоїдальний режим досліджуваного ланцюга:

$$\left.\begin{aligned} I_0\cdot(r_0+j\cdot\omega\cdot L_0) + U_{c3} = U(\alpha);\\ I_1\cdot(r_1+j\cdot\omega\cdot L_1) - U_{c2}=0;\\ I_0 - I_1 - j\cdot\omega\cdot C_2\, U_{c2} - j\cdot\omega\cdot C_2\, U_{c3} = 0;\\ I_1 + U_{c2}/R + j\cdot\omega\cdot(C_2 + C_4)\cdot U_{c2} - U_{c2}/R - j\cdot\omega\cdot C_3\cdot U_{c3} = 0. \end{aligned}\right\}$$

Зважаючи на те, що досліджувана схема являє собою систему четвертого порядку, рішення однозначне визначено тільки при наявності шістнадцяти початкових умов. Чотири з них відомі з рішення системи . Це незалежні початкові умови, тобто значення постійних часу при $t = 0$. Інші дванадцять повинні бути знайдені з додаткової системи рівнянь. При цьому всі значення функцій у рівняннях розглядаються в момент комутації (t=0).

Сутність дослідження властивостей динамічної системи полягає в тому, щоб знайти і дослідити рішення системи диференціальних рівнянь при заданих початкових умовах. Останні, у свою чергу, можуть бути визначені в результаті аналізу сталого режиму до комутації, для чого необхідне рішення системи . Така задача вирішується тільки за допомогою моделювання на ЕОМ.

$$\left.\begin{aligned} r_0\cdot i_0(0) + L_0\cdot i_0'(0) + u_{c3}(0) = u(0);\\ r_1\cdot i_1(0) + L_1\cdot i_1'(0) - u_{c2}(0) = 0;\\ i_0(0) - i_1(0) - C_2\cdot u_{c2}'(0) - C_3\cdot u_{c3}'(0) = 0;\\ i_1(0) + u_{c2}(0)/R + (C_2 + C_4)\cdot u_{c2}'(0) - u_{c3}(0)/R - C_3\cdot u_{c3}'(0) = 0\\ r_0\cdot i_0'(0) + L_0\cdot i_0''(0) + u_{c3}'(0) = u'(0);\\ r_1\cdot i_1'(0) + L_1\cdot i_1''(0) - u_{c2}'(0) = 0;\\ i_0'(0) - i_1'(0) - C_2\cdot u_{c2}''(0) - C_3\cdot u_{c3}''(0) = 0;\\ i_1'(0) + u_{c2}'(0)/R + (C_2 + C_4)\cdot u_{c2}''(0) - u_{c3}'(0)/R - C_3\, u_{c3}''(0) = 0;\\ r_0\cdot i_0''(0) + L_0\cdot i_0'''(0) + u_{c3}''(0) = u''(0);\\ r_1\cdot i_1''(0) + L_1\cdot i_1'''(0) - u_{c2}''(0) = 0;\\ i_0''(0) - i_1''(0) - C_2\cdot u_{c2}'''(0) - C_3\cdot u_{c3}'''(0) = 0;\\ i_1''(0) + u_{c2}''(0)/R + (C_2 + C_4)\cdot u_{c2}'''(0) - u_{c3}''(0)/R - C_3\, u_{c3}'''(0) = 0. \end{aligned}\right\}$$

Передбачалося, що виникнення іскри імітується стрибкоподібною зміною опору навантаження з 220 до 50 *Ом*, а комутація виникає в момент переходу напруги: $\alpha_1=\pi/2$ (рис. 3а), $\alpha_2=\pi/4$, $\alpha_3=-\pi/2$.

З проведених трьох досвідів одержали, що амплітуда першої напівхвилі вихідного сигналу датчика функціонально зв'язана з кутом комутації, і, таким чином, дає можливість відрізняти

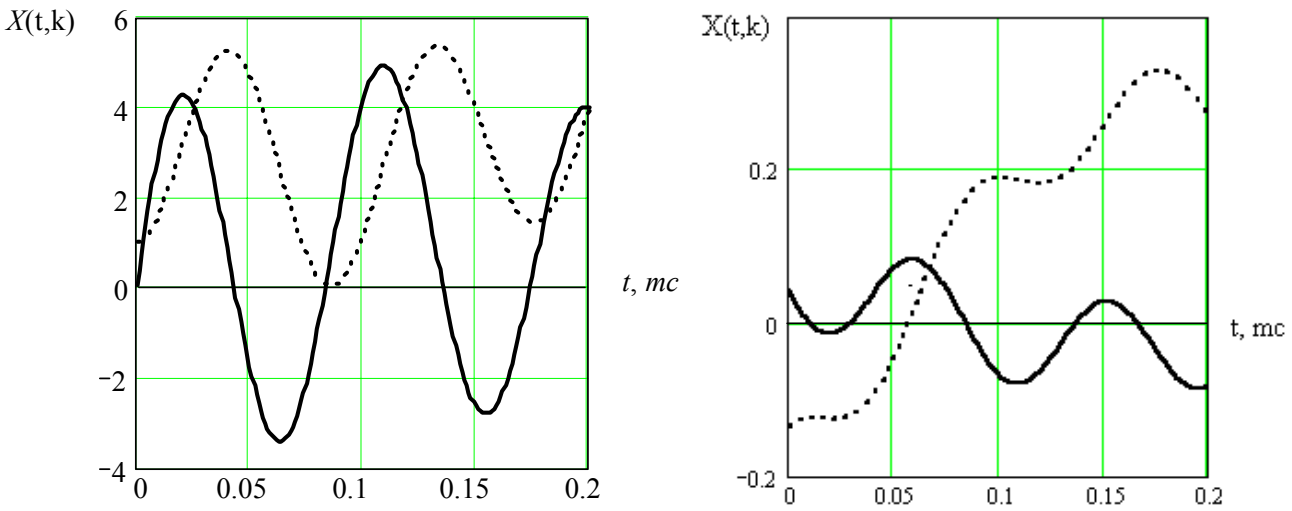
сигнали датчика, обумовлені виникненням іскріння в навантаженні від випадкових збурювань, що надходять з мережі живлення (табл. 1).

Таблиця 1

Результати дослідження датчика іскрозахисту

Кут комутації, α_1, °	Миттєві значення перемінних стану $X(0,k)$			
45	1,055	1,02	0,132	217,019
90	1,405	1,405	0,139	309,409
-90	-1,405	-1,405	-0,139	-309,149

Практичне значення для оцінки стійкості і працездатності реле іскрозахисту може мати комутація, обумовлена загасанням іскри. Найбільше ймовірно, що це відбувається в момент проходження напруги живлення через нуль. Результати цього досвіду приведені на рис. 3б. Зникнення іскри імітується зворотною комутацією з меншого опору навантаження (R_1=50*Ом*) на більше (R_2=220*Ом*). Основний результат – практична відсутність вихідного сигналу (значенням амплітуди на рівні 0,1*В* зневажаємо). Дійсно, основний перехідний процес, обумовлений виникненням іскри, до цього моменту вже закінчився, а новий, обумовлений її зникненням, починається при нульовому значенні напруги.



а) б)

Рис. 3. – Результати досліду датчику реле іскрозахисту.

З метою дослідження “глибини” комутації, тобто на яку величину виникаюча іскра може зменшити еквівалентний опір навантаження і як це вплине на динамічні властивості РІЗ було простежено за зміною коренів характеристичного рівняння на комплексній площині. Досліджуючи кореневі годографи при зміні опору R в інтервалі від 250 до 25 *Ом* із кроком 1*Ом*, було

встановлено, що найбільш визначальними для формування вихідного сигналу реле іскрозахисту є корені p_2 і p_3, що забезпечують більш високу частоту коливань (12 *кГц*). Характерно, що ці корені в даному досвіді при зміні *R* майже не змінюють своїх значень. Незначно змінюється лише їхня дійсна частина, а уявна частина, що визначає частоту коливань у контурі L_1–C_2, залишається практично незмінною. Два інших корені p_0 і p_1 проходять більш значний шлях на комплексній площині, причому, обумовлені ними складові вихідного сигналу датчика низькочастотні, а при $R \leq 30$ *Ом* стають експонентними (корені p_0 і p_1 стають дійсними). Це означає, що від цих складових легко відбудуватися при синтезі схеми іскрозахисту і, таким чином, підвищити стійкість її роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі дане рішення актуальної наукової задачі прогнозування ймовірності загорянь в електромережах, що полягає в розробці математичної моделі і встановленні аналітичних залежностей, які дозволяють розробляти організаційні і технічні заходи, що забезпечують нормований ДСТ 12.1.004-91 рівень пожежної безпеки.

Основні результати виконаної роботи полягають у наступному:

1. Використання гнучких металевих екранів, одягнених поверх ізоляції фазних провідників у мережах 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю дозволить звести захист від дугових коротких замикань у мережі до захисту від замикання фази на заземлюючий контур, що з успіхом може бути вирішене за допомогою ПЗВ, які випускаються серійно.

2. Використання реле іскрозахисту дозволить виключити пожежі в житлових приміщеннях від ослаблених і небезпечно нагрітих силових контактних з'єднань. Цей пристрій доцільно використовувати разом з ПЗВ, що серійно випускається.

3. Розроблено нову принципову схему блоку іскрозахисту для мереж 380/220В з дією на відключення і сигнал.

4. Уперше розроблена схема заміщення датчика реле іскрозахисту з індуктивним зв'язком і резонансним контуром і математична модель, що адекватно описує реальні фізичні процеси, що протікають у РІЗ.

5. Розроблено програму для дослідження математичної моделі реле іскрозахисту, яка дозволяє з достатньою для практичної мети точністю моделювати процеси, що протікають у мережі як у перехідному, так і в сталому режимі роботи.

6. Моделювання процесів за допомогою ЕОМ показало, що основна складова реакції РІЗ на збурювання з частотою близько 12 *кГц* по своїй амплітуді і початковій фазі функціонально зв'язана з фазою струму навантаження в момент комутації, що дозволяє синтезувати схему захисту таким чином, щоб відбудуватися від випадкових збурювань і перешкод, що можуть надійти з живильної мережі. Розроблене реле іскрозахисту відповідає поставленим технічним вимогам.

Основні публікації по темі дисертації

1. Шевченко О. А., Тимофеев А.Г. О пожарной опасности сетей напряжением 380-220 В промышленных предприятий и жилых зданий//Сб. научн. трудов ДонНТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 28.–Донецк: ДонНТУ.– 2001. – С. 182-185.

3. Тімофєєв О.Г., Чорноус Є. В. Про вплив надійності захисного відключення на безпеку систем електропостачання дяльниці вугільногї шахти. Сб. научн. трудов ДонНТУ. Серия: электротехника и энергетика–Донецк: ДонНТУ.– 2004. – С. 232-234.

6. Ковалев А. П., Тимофеев А.Г., Спиваковский А. В., Шевченко О. А. Оценка надежности структурно-сложных схем, элементы которых могут находиться в трех состояниях//Сборник трудов IV Международной научной конференции «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий». Секция: надежность электроснабжения.–Мариуполь.–2000.– С. 157-160.

АНОТАЦІЯ

Тімофєєв О. Г. Математичне моделювання процесів, що протікають при коротких замиканнях в мережі 380/220 В - Рукопис.

Робота на здобуття ступеня магістр-електротехнік за спеціальністю 09.06.03 - «Електропостачання промислових підприємств та міст». Донецький національний технічний університет, Донецьк - 2005.

Застосування розробленого реле искрозащиты дозволить виключити пожежі в житлових помешканнях від небезпечно нагрітих і ослаблених контактних силових з'єднань. Розроблені нові принципові схеми блока іскрзахисту для мереж 380/220В із дією на сигнал і відключення.

Ключові слова: небезпека загоряння, побутове обладнання, коротке замикання, марковські процеси, ослаблені контактні з'єднання, економічна оцінка, захисне відключення, реле іскрозахисту.