же бути запропонований для тих випадків, коли немає можливості визначити криву намагнічування матеріалу осердя. Викладений вище метод дозволяє провести подальший аналіз у математичному пакеті моделювання *FEMM*.

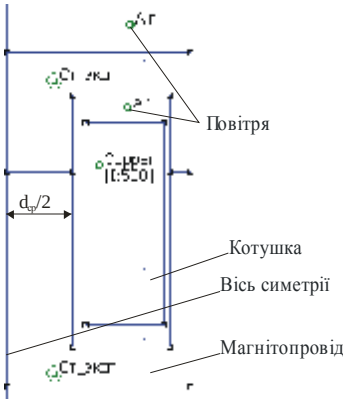

Рис. 6. Геометрична модель магнітної системи, відтворена у препроцесорі *FEMM*

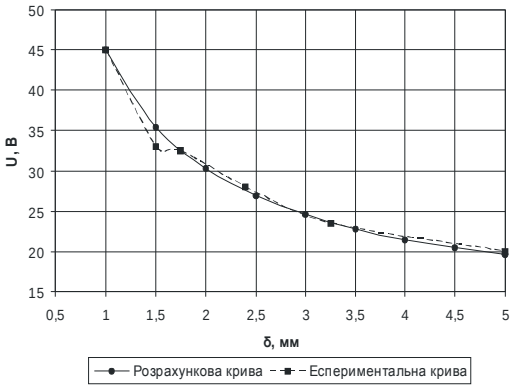

Рис. 7. Експериментальна та розрахункова ВАХ при струмі 1,5 А з різними зазорами

Список літератури: 1. *Данько В.Г., Гончаров Є.В.* Вибір еквівалентної моделі для розрахунку надпровідникового обмежувача струму // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование. – Харьков: Технологический центр, 2007 – № 3/3 (27). – С. 3-7. **2.** *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 336 с. **3.** *David Meeker* Finite Element Method Magnetics Version 4.2: User's Manual. – 2006 – 155 p.

Поступила до редколегії 23.05.08

УДК 621.316.925

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук,
А.Е. ВИШНЕВСКИЙ,
С.Ю. ГРИЩУК,
А.Н. РЖЕВСЬКИЙ
А.І. КУЗНЕЦОВ

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА ATMEGA16 ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ШВИДКОДІЮЧИХ ЗАПОБІЖНИКІВ

Розглянуто структурну схему автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників на базі мікроконтролера Atmega16, алгоритми роботи схеми й розрахунку їх захисних і комутаційних характеристик, алгоритм обробки результатів і побудови багатофакторних математичних моделей.

Рассмотрена структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом исследований быстродействующих предохранителей на базе микроконтроллера Atmega16, алгоритмы работы схемы и расчета их защитных и коммутационных характеристик, алгоритм обработки результатов и построения многофакторных математических моделей.

Вступ. У процесі розробки й проектування швидкодіючих запобіжників виникає необхідність за заданими значеннями захисних характеристик і параметрів електричного кола визначити необхідні геометричні й конструктивні параметри плавкого елемента. Для розв'язання цього завдання необхідно одержати аналітичні залежності, що зв'язують характеристики запобіжників з геометричними й конструктивними параметрами плавкого елемента й параметрами електричного кола. Найбільш ефективне розв'язання цього завдання може бути отримане на основі математичної теорії планування експерименту.

При проведенні досліджень на основі математичної теорії планування експерименту об'єкт дослідження зручно подавати в вигляді кібернетичної системи, що в [1] називають "чорним ящиком". Для проведення експерименту необхідно мати можливість впливати на поводження "чорного ящика". Всі способи такого впливу називаються факторами або "входами чорного ящика" [1, 2]. Характеристики цілей дослідження називають виходом "чорного ящика", цільовою функцією або відгуком.

При розв'язанні завдань на основі математичної теорії планування експерименту використовуються різні математичні моделі.

Згідно [1-4], головною вимогою, висунутою до математичної моделі, є її здатність передбачати з необхідною точністю результати експерименту в досліджуваній області. Досить важливою вимогою є простота моделі.

Метою роботи є розробка структурної схеми автоматизованої системи

керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників на базі мікроконтролера Atmega16, алгоритмів роботи схеми, розрахунку їх захисних і комутаційних характеристик, обробки результатів і побудови багатофакторних математичних моделей характеристик швидкодіючих запобіжників з алюмінієвими плавкими елементами.

Для нашого випадку згідно [4] цим вимогам найбільше повно задовольняє алгебраїчний поліном, тому що він лінійний щодо невідомих коефіцієнтів, що спрощує обробку спостережень.

Аналіз результатів проведених однофакторних експериментів, показує що в ряді випадків однофакторні залежності досліджуваних характеристик у розглянутих областях не можна представити лінійними рівняннями. Отже, у багатомірному випадку поверхня функції відгуку, безсумнівно, буде мати істотну кривизну. Внаслідок цього лінійна модель може виявитися не здатною передбачати результати експерименту в деякій області з необхідною точністю, тобто вона буде не адекватною. Як відомо адекватність моделі забезпечується збільшенням степеня полінома.

Виходячи з вищевикладеного, шукані математичні моделі досліджуваних характеристик запобіжників з алюмінієвими плавкими елементами й кварцовим наповнювачем доцільно вибрати у вигляді поліноміальних регресій другого порядку:

$$y = \sum_{j \le k=0}^{m} b_{jk} x_j x_k ,$$

де j = (1, 2, ..., m) – номера факторів; j, k – індекси коефіцієнтів регресії; b_{jk} – коефіцієнт регресії; m – число факторів; x_0 – фіктивний фактор, який дорівнює 1.

Для визначення значень коефіцієнтів регресії зручно скористатися ортогональним центральним композиційним планом другого порядку [5].

При проведенні експерименту відповідно до плану другого порядку кожний фактор варіюється на п’яти рівнях, умовно позначених -α, -1, 0, 1, α. Сполучення факторів задаються матрицею планування, яка складається з ядра плану, що представляє собою план дробового факторного експерименту із числом дослідів, рівним 2^{m-p}, до якого додані $2m$ так званих [5] "зоряних" крапок з величиною зоряного плеча α, одна нульова крапка в центрі плану з координатами (0, 0, ... , 0).

Для проведення експериментальних досліджень відповідно до складеної матриці планування необхідно вибрати число паралельних дослідів, проведення яких необхідно для виключення грубих помилок і визначення дисперсії відтворюваності. Це число може бути визначене попередньо, незалежно від спостережень, або в процесі досліджень. В [5] показано, що при проведенні експериментальних досліджень на основі теорії планування експерименту можливі чотири типові випадки, пов’язаних з дублюванням дослідів: 1) рівномірне дублювання, 2) нерівномірне дублювання, 3) дублювання в одній точці, 4) дублювання в окремій серії, з певним числом дослідів.

В [5] зазначено, що зазвичай віддають перевагу рівномірному дублюванню дослідів, тому що в цьому випадку вихідна ортогональність матриці планування (тобто ортогональність дубльованого плану) не порушується. В інших трьох випадках має місце порушення ортогональності дубльованих планів, що вимагає деяких змін у дисперсійному й регресійному аналізі при обробці результатів експерименту. Виходячи з вищевикладеного, доцільно вибрати рівномірний характер дублювання дослідів. Щоб виключити вплив систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами рекомендується проводити рандомізацію дослідів за часом [1]. З цією метою при постановці дослідів, запланованих матрицею, була прийнята випадкова послідовність, обрана за допомогою таблиці випадкових чисел [5]. Після побудови у такий спосіб плану експеримента і проведення рандомізації дослідів, можна безпосередньо приступати до проведення дослідів. Для визначення коефіцієнтів полінома другого порядку й побудови адекватної математичної моделі були використані алгоритм і програма, наведені в [6], які дозволили значно прискорити процес обробки ортогональних експериментів. Поряд із цим, застосування зазначеної програми дозволило істотно підвищити точність математичної моделі в тих випадках, коли поверхня відгуку погано апроксимувалася поліномом другого порядку, зокрема, при великому інтервалі варіювання факторів. Підвищення точності забезпечувалося шляхом введення поправкових множників у вигляді добутку статичних функцій факторів [6]:

$$P = \prod_{j=1}^{m} \left(x_j / x_{jo} \right)^{Pj} ,$$

де P – поправковий множник (поправка, функція поправки); P_j – показник ступеня при *j-му* співмножнику. Зазначений критерій дозволив звести до мінімуму максимум відносного відхилення між обмірюваним і передбаченим відгуком. Пошук оптимальних значень показників здійснювався методом координатного спуска (Гауса-Зейделя), що використовується в [5].

За умов, коли модель не адекватна, для підвищення ступеня її адекватності застосовують різні особливі способи як при проведенні досліджень, так і при обробці їх результатів. У таких випадках у роботі [5] для одержання адекватної моделі рекомендується виконати такі дії: зменшити інтервали варіювання факторів h_j всіх або деяких факторів; збільшити число паралельних дослідів (коефіцієнт дублювання); ввести нові, раніш не враховані фактори; врахувати взаємодію факторів більш високого порядку; змінити функцію відгуку, тобто замість функції y вводити перетворені функції $y' = \sqrt[n]{y}$ і інші, з наступними введеннями відповідних зворотних функцій.

Більш ефективним є збільшення порядку математичної моделі за рахунок введення поправкових множників у вигляді добутку степеневих функцій факторів, приклади використання яких наведено в роботі [7]. Приклади побудови моделей, статистичної обробки результатів і використання поправочних множників, разом з введенням перетворених функцій відгуку, наведено в ро-

ботах [5, 7]. Одержані в цих прикладах, в результаті проведення семи- і восьмифакторних експериментів, на основі планів ОЦКП і ДОЦКП другого порядку математичні моделі захисних, комутаційних і інтегральних характеристик швидкодіючих запобіжників (струму плавлення $I_{пл}$, струму обмеження I_o, перенапруги $U_{пер}$, інтеграла плавлення $W_{пл}$, інтеграла горіння дуги $W_г$, інтеграла Джоуля $W_в$, середньоінтегральної напруги на дузі $U_д$, енергії дуги $E_д$). в загальному вигляді зображені таким виразом:

$$y = \left[\prod_{j=1}^{m}\left(1+\frac{x_j h_j}{X_{j0}}\right)^{P_j}\sum_{j=0}^{m}\sum_{k=j}^{m} b_{jk}x_{jk}\right]^{\beta}$$

Перший множник цього виразу при m = 7 після підстановки числових значень кроків варіювання h_j і середніх натуральних значень факторів X_{j0} наведених у роботі [11] перетвориться у такий вираз:

$$\prod_{j=1}^{7}\left(1+\frac{x_j h_j}{X_{j0}}\right)^{P_j} = (1+0{,}333x_1)^{P_1}\times(1+0{,}25x_2)^{P_2}\times(1+0{,}4x_3)^{P_3}\times(1+0{,}4x_4)^{P_4}\times$$

$$\times(1+0{,}4x_4)^{P_4}\times\times(1+0{,}5x_5)^{P_5}\times(1+0{,}5x_6)^{P_6}\times(1+0{,}34x_7)^{P_7}.$$

Цей вираз є поправкою або функцією поправки, яка є добутком степеневих функцій факторів, з показником степені при j-х множниках P_j. Показники степені P_j вибираються так, щоб модель найкращим чином відображала результати експерименту. За критерій найкращого збігу приймається сума квадратів відхилень або максимум відносного відхилення між виміряними і передбаченими моделлю відгуками. Пошук оптимальних значень показників P_j (оптимізація) у роботі [7] здійснювалася чисельним методом координатного спуску (Гауса-Зейделя). Програма оптимізації показників P_j із застосуванням поправкових множників і різних перетворень відгуків та знаходження коефіцієнтів математичних моделей при обробці багатофакторних ортогональних планів наведена в роботі [5]. Другий множник виразу, якщо вважати що $x_{jk} = x_j x_k$, $x_0 = 1$, $m = 7$ і що квадратні ефекти враховуються за допомогою поправки φ, тобто $x_{jj} = x_j^2 - \varphi$, може бути наведений у вигляді семифакторної математичної моделі (регресії) другого порядку. Для одержання адекватної моделі в роботі [5] рекомендується застосовувати заміну натуральних факторів X_j на нові незалежні змінні у вигляді функцій $X_j' = f(X_j)$.

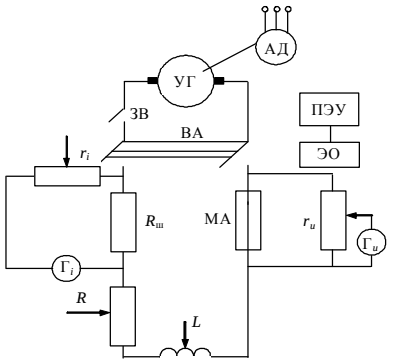

Рис. 1. Схема експериментального стенда для комутаційних досліджень електричних апаратів

Для розробки методик розрахунку захисних характеристик швидкодіючих запобіжників з алюмінієвими плавкими елементами й кварцовим наповнювачем необхідно визначити ступінь впливу кожного окремо фактора, а також їхній спільний вплив на характеристики запобіжників.

Розв'язання цього завдання доцільно проводити на основі експериментальних досліджень із ефективним використанням математичних методів. Одним з таких методів є математична теорія планування експерименту. Згідно [1], планування експерименту являє собою процедуру вибору числа й умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для розв'язання поставленого завдання з необхідною точністю. Як видно з [1, 2, 5], даний метод може бути використаний при розв'язанні найрізноманітніших завдань, таких як пошук оптимальних умов, побудова інтерполяційних формул, оцінка й уточнення констант теоретичних моделей і інших.

Для проведення багатофакторних експериментальних досліджень на основі математичної теорії планування експерименту згідно [1, 2, 5] необхідно здійснити вибір функцій відгуку. Згідно [5], функція відгуку є реакцією на вплив факторів, які визначають поводження обраного об'єкта дослідження. Виходячи з поставленого завдання, як досліджувані функції відгуку в нашому випадку доцільно прийняти наступні характеристики запобіжників: повний інтеграл відключення – W_n, інтеграл плавлення – $W_{пл}$, інтеграл горіння дуги – $W_г$, струм обмеження – I_o, струм плавлення – $I_{пл}$, перенапруга – U_n, средньоінтегральна напруга – $U_{ср}$, час плавлення – $t_{пл}$, час горіння дуги – $t_г$, повний час – t_n, довжина вигоряння плавкого елемента – $l_г$, енергія дуги – E_g.

Після вибору функцій відгуку необхідно здійснити вибір факторів, що мають істотний вплив на ту або іншу характеристику запобіжника, визначити їхню область і крок варіювання, установити відсутність кореляції між ними, перевірити їхню керованість, однозначність і сумісність на різних рівнях варіювання в межах обраних областей.

Розв'язання цих завдань можна здійснити на основі певної апріорної інформації. У зв'язку із цим були проведені однофакторні експериментальні дослідження розроблених макетів швидкодіючих запобіжників з алюмінієвими плавкими елементами й кварцовим наповнювачем на постійному струмі. Як змінні фактори були обрані геометричні й конструктивні параметри плавкого елемента і параметри електричного кола.

При проведенні експериментів використовувалася експериментальна

установка, схема якої наведена на рис. 1.

Головний ланцюг установки становлять: асинхронний двигун АД, ударний генератор постійного струму УГ ($U_н$ = 880 В, $I_{уд}$ = 70 кА), регульовані реактори *L*, регульований активний опір $R_а$, захисний вимикач – ЗВ, вмикаючий апарат – ВА, макет запобіжника – МА. Вимір струмів проводився за допомогою низькоомного шунта ($R_ш$ = 0,7 10^{-5} Ом). Струм короткого замикання й електромагнітна постійна часу контуру підбиралися при металевому короткому замиканні для заданої напруги генератора шляхом зміни величини індуктивності реакторів і величини активного опору. Напруга на дузі вимірялася за схемою дільника напруги.

При дослідженні короткочасних процесів горіння дуги в ШЗ (від 0,1 до 10 мс) для того, щоб забезпечити реєстрацію можливих гострих піків перенапруги, застосовують автоматизовану систему керування технологічним процесом досліджень (АСК ТПД) із застосуванням мікроконтролера (МК) [7].

Для проведення комутаційних досліджень швидкодіючих запобіжників проведена розробка структурної схеми АСК ТПД, а також алгоритму керування стендом випробувань або досліджень швидкодіючих запобіжників на постійному струмі й алгоритму програми для визначення їх захисних і інтегральних характеристик при чотирьох контрольованих параметрах (датчиках), у тому числі: струм; напруга; температура в центрі плавкого елемента; температура на виводах.

Для розв'язання цього завдання був проведений огляд і аналіз схем АСК ТПД, лабораторних стендів і застосовуваних у них мікроконтролерів [7,8]. Викладені в [7] схеми АСК ТПД, виконані на базі МК-51 і МК-251, мають ряд недоліків. Для їхнього створення, крім МК, потрібен цілий ряд окремих елементів, таких як АЦП, аналогові комутатори, джерела опорної напруги й ін., які необхідно вибрати й змонтувати в одному блоці. Все це приводить до збільшення матеріальних, часових і фінансових витрат на її розробку, монтаж, налагодження й експлуатацію. Аналіз умов завдання поставленого в даній роботі, схем АСК ТПД й характеристик існуючих мікроконтролерів показує, що для його рішення доцільно вибрати високоінтегрований МК Atmega16. Вибір мікроконтролера здійснювався за наступними характеристиками: швидкодія, надійність, перешкодостійкість, наявність необхідних периферійних пристроїв, енергоспоживання, вартість і ін.

МК сімейства Mega є 8-ми розрядними, призначеними для додатків, що вбудовуються. Вони виготовляються по малоспоживаючій КМОП-технології, що у поєднанні з удосконаленою RISC архітектурою дозволяє досягти найкращого співвідношення швидкодія/енергоспоживання. *До складу МК Atmega16 входять*: два 8-розрядні таймери/лічильники (таймери *T0* і *T2*); 16-розрядні таймери/лічильники (таймери *T1* і *T3*); сторожовий таймер WDT; аналоговий компаратор; многоканальний 10-розрядний АЦП, як з несиметричними, так і з диференціальними входами; повнодуплексний універсальний асинхронний приймач-передавач (UART); повнодуплексний універсальний синхронний/асинхронний приймач-передавач (USART); послідовний синхронний інтерфейс SPI; аналоговий комутатор і інші пристрої. Більш повний опис МК Atmega16 викладено в [9].

Запропонована структурна схема АСК ТПД, виконана на базі МК Atmega16 (рис. 2), містить у собі: датчики контрольованих параметрів (струму, напруги, температури плавкого елемента й виводів) Д1–Д4; нормуючі підсилювачі У1-У4; МК (утримуючий в собі використовувані в даній схемі наступні елементи: генератор тактових сигналів, пам'ять команд, ОЗП, аналоговий комутатор, АЦП, джерело опорної напруги U_{REF}, убудовані 4 порти й послідовний канал зв'язку RS232C); компаратори К1-К4 типу К554 СА3, виходи яких по «АБО» об'єднані з вихідними керуючими сигналами МК; пристрої узгодження й обміну УСО1-УСО4, які включають виконавчі пристрої силової установки, що задають режим випробувань або досліджень; комп'ютер РС. При дослідженні процесів тривалістю менше 0,1 мс у схемі використовується зовнішній АЦП.

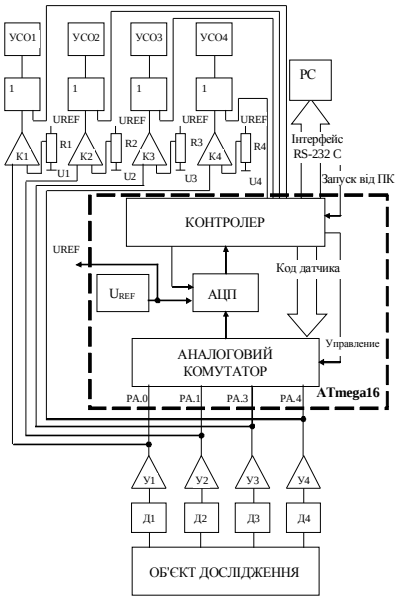

Рис. 2. Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень електричних апаратів

Підключені до об'єкта датчики відповідних контрольованих параметрів Д1-Д4, є перетворювачами струму, напруги, температури в напругу. Нормуючі підсилювачі, погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0-2,5 В і забезпечують низький вихідний опір. АЦП є швидкодіючим многоканальним десятирозрядним перетворювачем вхідної напруги в паралельний двійковий код. Запуск перетворювача виробляється мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, що є командою для зчитування даних. Через послідовний інтерфейс RS232C АСК ТПД дані надходять у комп'ютер, що може змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, обробляти, відображати й документувати результати досліджень.

Алгоритм роботи схеми АСК ТПД наведений на рис. 3. Він забезпечує опитування датчиків і передачу інформації в РС. На початку алгоритму виробляється установка вихідного стану всіх керуючих сигналів.

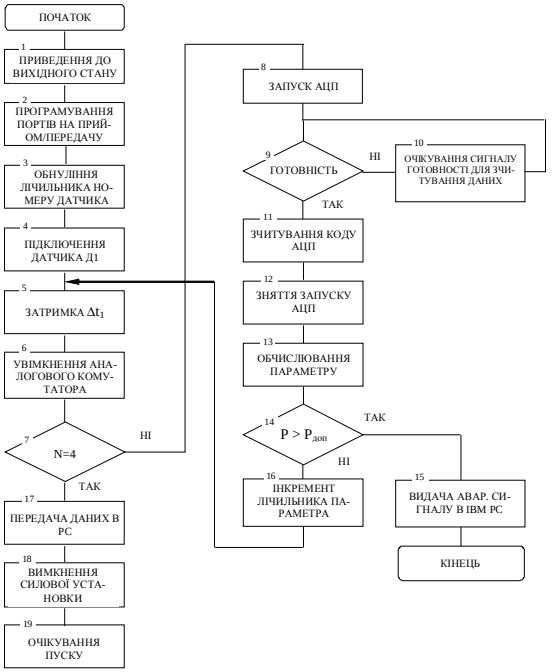

Рис. 3. Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників

Рис. 4. Алгоритм програми обробки даних, одержаних при дослідженні запобіжників

У головному циклі алгоритму (2-16) виробляється програмування портів, включення аналогового комутатора, установлюється лічильник параметрів. У внутрішньому циклі відбувається запуск АЦП і зчитування коду (8-13), з наступним обчисленням параметра (14). Потім відбувається настроювання зв'язку з РС (17), і передача масиву отриманих даних у РС. У випадку, коли $P>P_{доп}$, контролер видає сигнали на логічні елементи «АБО», пов'язані з УСО1-УСО4, які забезпечують керування об'єктом досліджень. Крім того, при виникненні аварійної ситуації ($P>P_{доп}$) і виході контролера з ладу, сигнал іде з підсилювачів на компаратори К1-К4 і після порівняння з $U1$-$U4$ подається на елементи «АБО», які у свою чергу, видають на УСО1-УСО4 імпульси для відключення всієї установки. Установка опорних напруг $U1$-$U4$ здійснюється резисторами $R1$-$R4$. При цьому використовується внутрішнє джерело опорної напруги U_{REF} мікросхеми МК Atmega16. При аварії МК переходить у режим переривання, виконання основної програми припиняється й МК видає повідомлення про аварійну ситуацію в РС (15).

Після передачі даних у комп'ютер (17), вони обробляються відповідно до алгоритму, представленого на рис. 4, за методикою, викладеною в [6]. Значення даних, отримані при дослідженнях ШЗ, зчитуються з файлу даних (1-2 (рис. 4)). Після чого, за формулами, наведеними в [6] розраховуються струм плавлення, максимальні значення струму к.з. і напруги, часи плавлення перешийка, горіння дуги і відключення струму к.з., інтеграли плавлення, горіння дуги і Джоулев інтеграл, а також значення енергії дуги і средньоінтегральної напруги на дузі (3-6). Результати розрахунків виводяться на екран (7 (рис. 4)).

Висновки. Побудовано математичні моделі другого порядку, що зв'язують характеристики ШЗ з геометричними й конструктивними параметрами алюмінієвих плавких елементів і параметрами електричного кола. Розроблена схема АСК ТПД і наведені алгоритми дозволяють багаторазово скоротити строки проведення досліджень швидкодіючих запобіжників, підвищити їхню економічну ефективність і достовірність результатів досліджень, а також можуть використовуватися при проведенні випробувань або досліджень інших комутаційних електричних апаратів і пристроїв електропобутової техніки.

Список літератури: 1. *Глух У. М., Зеленов В. Е.* Защита полупроводниковых преобразователей. – М.: Энергия, 1970 – 152 с. **2.** *Петинов О.В., Щербаков Е.Ф.* Испытания электрических аппаратов. – М.: Высш. школа, 1985.– 215 с. **3.** *Грищук Ю. С.* Применение многофакторного дробного эксперимента при исследовании быстродействующих предохранителей // Вестник ХПИ. – Харьков: ХПИ, 1987. **4.** *Зедгинидзе И. Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. **5.** *Грищук Ю. С.* Исследование процесса коммутации и разработка методики расчета быстродействующих предохранителей. – Дис. …канд. техн. наук. – Харьков, 1980 – 238 с. **6.** Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу "Основи математичної статистики та планування експерименту". Частина 2. "Основи математичної статистики" для студентів спеціальності 092206-02 "Електричні машини і апарати" усіх форм навчання / Уклад. Ю.С. Грищук. – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – 30 с. **7.** *Грищук Ю. С., Ржевский А. Н., Грищук С. Ю.* Автоматизированная система управления для коммутационных исследований и испытаний электрических аппаратов // Вісник НТУ "ХПІ".– Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – Вип. 17. – С. 48-50. **8.** Микропроцессорные устройства: Учебное пособие / Грищук Ю.С. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – 280 с. **9.** *Евстифеев А.В.* Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы "Atmel" – М.: Издательский дом "Додэка XXI", 2004. – 560 с.

Поступила в редколлегию 27.05.08