

УДК 681.58: 681.32

Ю. С. ГРИЩУК**ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ**

Розроблені структурні і принципові електричні схеми стендів автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень (АСК ТПД) електричних апаратів на базі мікроконтролерів МК1816BE51 і MSP430 та алгоритм її роботи.

Ключові слова: електричний апарат, автоматизація досліджень, швидкодіючий запобіжник, лабораторний стенд, мікроконтролер.

Разработаны структурные и принципиальные электрические схемы стендов автоматизированной системы управления технологическим процессом исследований (АСУ ТПИ) электрических аппаратов на базе микроконтроллеров МК1816BE51 и MSP430 и алгоритм ее работы.

Ключевые слова: электрический аппарат, автоматизация исследований, быстродействующий предохранитель, лабораторный стенд, микроконтроллер.

The structural and circuit diagrams stands automated process control system studies (ACS TPI) electric devices based on MCUs MK1816VE51 and MSP430 and the algorithm of its work.

Keywords: electrical apparatus, automation research, quick fuse, test machine, microcontroller

Вступ. В електричних апаратах та їх дослідженнях доцільно використовувати однокристалеві мікроконтролери (МК), які отримали широке розповсюдження в системах керування технічним, контрольно-дослідницьким обладнанням, електропобутовою технікою, електричним і електроенергетичним устаткуванням, технологічними процесами виробництва, випробування і дослідження. Невеликі розміри, вага і енергоємність МК дозволяє вбудовувати їх в об'єкт керування та забезпечувати досягнення необхідних користувачу характеристик.

Метою даної роботи являється розробка автоматизованої системи керування комутаційними дослідженнями електричних апаратів на базі мікроконтролерів, яка дозволить скоротити терміни проведення експериментальних досліджень електричних апаратів, підвищити достовірність результатів і економічну ефективність.

Застосування мікроконтролерів МК1816BE51 при автоматизації досліджень швидкодіючих запобіжників. Аналіз вимог, що пред'являються до електричних апаратів захисту (автоматичних вимикачів і швидкодіючих запобіжників і ін.) і методів їх випробувань, указує на вельми широкий перелік параметрів, які повинні перевірятися і досліджуватися при проведенні різних випробувань і досліджень. До таких параметрів відносяться: номінальний струм, струм перевантаження, струм короткого замикання, напруга на дузі, Джоулевий інтеграл, час відключення, температура на виводах, температура в центрі плавкого елемента, температура контактів, швидкість руху дуги в дугогасних решітках і т.ін. [1-4]. Все це указує на необхідність використання вельми широкого спектру відповідних датчиків, що дозволяють з необхідною точністю відстежувати зміну цих параметрів в процесі досліджень

При проведенні комутаційних досліджень на постійному струмі таких електричних апаратів, як швидкодіючі запобіжники, використовуються експериментальні установки, які включають головне коло і коло керування. Схема однієї із таких установок представлена на рис. 1 [1, 2]. Головне коло установки складають ударний генератор (УГ) ($U_n = 880$ В, $I_{yd} = 70$ кА), регульовані реактори L , регульований опір R_a , захис-

ний вимикач (ЗВ), вмикаючий апарат (ВА), макет апарату (МА). Проведення досліджень здійснюється за допомогою пульта електронного управління (ПЕУ) і електромеханічного або електронного осцилографа (ЕО).

Вимірювання струмів проводиться за допомогою шунта з опором $R_{ш} = 0,7 \cdot 10^{-5}$ Ом. Напруга на дузі вимірюється по схемі дільника напруги. Криві струму і напруги в стандартних експериментах записувалися на світлочутливий папір за допомогою світлопроектового осцилографа. В цьому випадку обробка осцилограм проводиться графічним методом, що вимагає великих трудових і фінансових витрат і часу і знижує точність вимірювань.

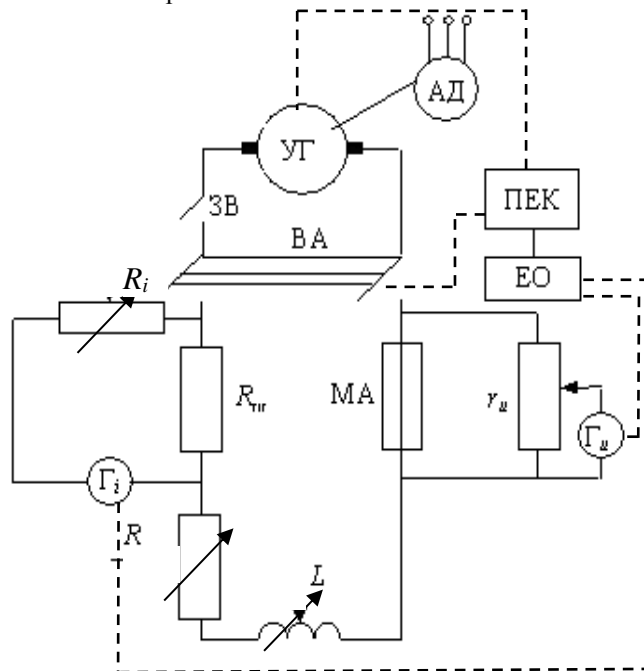


Рис. 1 – Схема експериментального стенду для комутаційних досліджень швидкодіючих запобіжників

При дослідженні маловивчених процесів для того, щоб забезпечити реєстрацію можливих гострих піків перенапруження, для запису кривих струму і напруги необхідно використовувати електронний осцилограф і здійснювати фотографування за допомо-

гою фотоприставки. У випадках, коли потрібна підвищена точність, обробка осцилограми проводиться за допомогою вимірювального мікроскопа. Все це також приводить до додаткових матеріальних, тимчасових і трудових витрат. Скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, понизити їх вартість можна, застосувавши розроблену автоматизовану систему керування технологічним процесом досліджень (АСКТПД) із застосуванням однокристального мікроконтролера.

Структурна схема АСКТПД, представлена на рис. 2. Вона виконана на базі мікроконтролера серії МК1816BE51 і включає:

- датчики контрольованих параметрів (струму, напруги, температури, Джоулевого інтеграла) Д1–Д4 (первинні перетворювачі);
- нормуючі підсилювачі П1–П4;
- чотириканальний комутатор аналогових сигналів типу КР590КИ6;
- аналого-цифровий перетворювач типу К1113ПВ1;
- мікроконтролер, що містить вбудований генератор тактових сигналів, пам'ять команд, ОЗП, вбудовані 3 порти і послідовний канал зв'язку;
- компаратори К1–К4 типу К554 СА3, виходи яких по «АБО» об'єднані з вихідними сигналами мікроконтролера, що управляють;
- пристрої узгодження і обміну ПЗО1–ПЗО4, які включають виконавчі пристрої силової установки, які задають режим випробувань або досліджень.

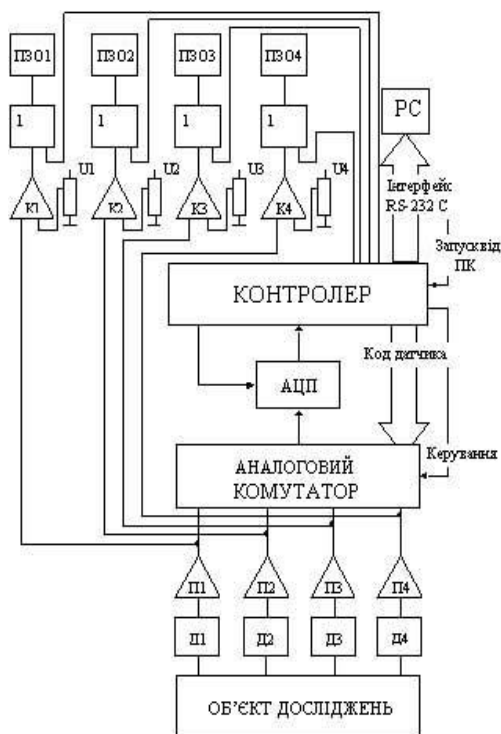


Рис. 2 – Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників

Через послідовний інтерфейс RS232C АСУ ТПД пов'язана з ПЕОМ, яка може змінювати режими випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятовувати, відображати і документувати резуль-

тати випробувань або досліджень.

До об'єкту дослідження підключені відповідні датчики. Датчики контрольованих параметрів Д1–Д4 є первинними перетворювачами струму, напруги, температури, Джоулевого інтеграла в напругу. Нормуючі підсилювачі погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0–10 В і забезпечують низький вихідний опір.

Комутатор аналогових сигналів перемикає один з входів на вихід залежно від керуючого коду, що поступив від мікроконтролера. Аналоговий сигнал з виходу комутатора поступає на АЦП який забезпечує перетворення його в цифровий код. Таке перетворення реалізовано найбільш швидкодіючим апаратним способом на основі ВІС АЦП, що підключається до порту МК. Вибраний АЦП є швидкодіючим десятириядним перетворювачем вхідної напруги в паралельний двійковий код. Запуск перетворювача проводиться за сигналом, який виробляється мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, який є командою для зчитування даних.

Мікроконтролер як мікропроцесорний пристрій, відповідно до записаної в пам'ять програми, управляє процесом досліджень або випробувань шляхом опиту із заданою періодичністю датчиків Д1–Д4 відповідно до алгоритму управління. Вихідні сигнали датчиків унаслідок їх різної фізичної природи можуть потребувати посилення і проміжного перетворення на АЦП або на схемах формувачів сигналів (ФС), які найчастіше виконують функції гальванічної розв'язки і формування рівнів двійкових сигналів стандарту ТТЛ. Мікроконтролер з необхідною періодичністю оновлює слова, що управляють, на своїх вихідних портах. Деяка частина слова, що управляє, може інтерпретуватися як сукупність прямих двійкових сигналів управління (СУ), які через схеми формувачів сигналів, (підсилювачі потужності, реле, оптрони і т.ін.) або пристрої зв'язку з об'єктом (ПЗО1–ПЗО4) поступають на виконавчі механізми (ВМ). Компаратори К1–К4 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів. ПЗО1–ПЗО4 є підсилювачами потужності, які управляють виконавчими пристроями ВМ силової установки.

Мікропроцесор для описаної вище системи вибирається виходячи з характеру досліджуваних процесів і умов досліджень:

- швидкості протікання процесів;
- кількості досліджуваних параметрів і частоти опиту датчиків;
- завдань по переробці інформації;
- умов експлуатації і вимог по надійності.

Аналіз вихідних даних цього завдання показує, що його рішення може бути здійснено на базі мікроконтролера серії МК51.

Система на базі цього мікроконтролера здатна опитувати датчики з частотою 100 мкс, тобто за час відключення запобіжника $t_{відк} \leq 10$ мкс система встигне опитати датчики 100 разів, чого цілком достатньо для зняття і побудови характеристик запобіжника з необхідною точністю.

Найбільш прийнятним для дослідження характеристик швидкодіючих запобіжників і автоматичних вимикачів є мікроконтролер типу МК1816BE51, що

має наступні технічні показники: тип – паралельний; розрядність паралельно оброблюваної інформації – 8 розрядів; форма представлення чисел – двійковий додатковий код; методи адресації – регістрова, пряма, непряма-регістрова безпосередня; одиниця, що адресується, – байт; кількість команд – 111, включаючи команди арифметичних і логічних операцій, стекових операцій, складання слів двійкової довжини, операції управління; формат команд – однобайтна, двобайтова, трибайтна; час виконання команд – 1-4 мкс; 32 РОН і набір регістрів спеціальних функцій; 128 визначаючих користувачем програмно-керованих прапорів; послідовний інтерфейс; чотири 8-розрядні програмовані канали вводу-виводу; два 16-бітові багаторежимні таймери/лічильники; система переривання з п'ятьма векторами і двома рівнями з програмною установкою пріоритету; місткість внутрішнього ОЗП – 128 байтів, ПЗП – 4 кбайта.

Діалог з МК здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу RS-232C через ПЕОМ або пульт управління.

Важливою особливістю арифметико-логічного пристрою (АЛП) мікроконтролера сімейства МК51 є його здатність оперувати не тільки байтами, але і бітами. Окремі програмно-доступні біти можуть бути встановлені, скинуті, інвертовані, передані, перевірені і використані в логічних операціях. Це дозволяє при керуванні об'єктами часто застосовувати алгоритми, що містять операції над вхідними і вихідними булевими змінними. АЛП являє собою паралельний 8-розрядний пристрій, що забезпечує виконання арифметичних і логічних операцій, а також операцій зсуву, обнуління тощо. АЛП може оперувати чотирма типами інформаційних об'єктів: булевими (біт), цифровими (4 біта), байтними (8 біт) і адресними (16 біт). У АЛП виконується 51 різна операція пересилки або перетворення цих даних. Оскільки використовується 11 режимів адресації (7 для даних і 4 для адрес), то шляхом комбінування «операція/режим адресація» базове число команд 111 розширюється до 255. В АЛП реалізується механізм каскадового виконання простих операцій для реалізації складних команд, наприклад таких як команда умовної передачі управління за результатами порівняння.

В ряді випадків, коли фізичні процеси при відключенні аварійних струмів вельми короткочасні і мають тривалість від 0,01 до 10 мс, а кількість контрольованих параметрів (датчиків) більше 6 з кількістю опитувань не менше тисячі за період, запропонована вище схема не забезпечує ефективне вирішення цих задач. Вирішити такі завдання і скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, знизити їх вартість дозволяє розроблений на базі МК MSP430 F16 мікроконтролерний лабораторний стенд, що розглянутий нижче.

Розробка схем лабораторних стендів на базі мікроконтролера MSP430. Аналіз вихідних даних цього завдання показує що його розв'язання може бути здійснене на базі високопродуктивного з наднизькою енергоспоживаністю мікроконтролера MSP430. Найбільш прийнятним для дослідження характеристик ЕА і електромеханічних систем є мікроконтролер типу MSP430 F16. На базі цього мікроконтролера до-

цільно розробити програмно-налагоджувальний стенд, призначений для моделювання і відладки мікропроцесорних пристроїв.

Для того щоб скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, понизити їх вартість пропонується при розробці автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень (АСК ТПД) електричних апаратів (ЕА) і електромеханічних систем застосувати програмно-налагоджувальний стенд, виконаний на базі однокристального мікроконтролера MSP430 F16.

Для цього пропонується застосувати зображену на рис. 3 вдосконалену принципову схему для комутаційних досліджень граничної комутаційної здатності електричних апаратів на постійному струмі із застосуванням вимірювального блока HCPL788J і стенда «MSP430».

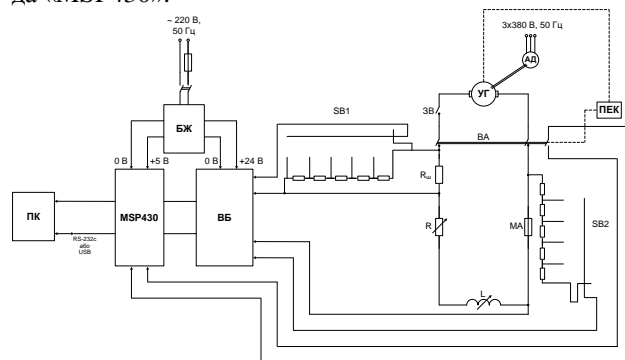


Рис. 3 – Принципова схема установки для комутаційних досліджень на постійному струмі із застосуванням стенду «MSP430»

Головне коло установки складає ударний генератор (УГ) ($U_n = 880$ В, $I_{уд} = 70$ кА), регульовані реактори L, регульований опір R, захисний вимикач (ЗВ), вмикаючий апарат (ВА), макет апарата (МА). Проведення досліджень здійснюється за допомогою пульта електронного керування (ПЕК), мікроконтролера та вимірювального блока, куди з перемикачів SB1 і SB2 подаються сигнали масштабованих струму та напруги.

Необхідні параметри з вимірювального блока подаються в мікроконтролер, а потім, через RS-232C надходять до комп'ютера.

Напруга до лабораторного стенду та вимірювального блока (рис. 5) подається з блока живлення (БЖ), який є гальванічно розв'язаним і видає вимірювальному блоку напругу 24 В, а лабораторному стенду 12 В і 5 В.

На рис. 4 наведено вдосконалену принципову схему для комутаційних досліджень граничної комутаційної здатності електричних апаратів (ЕА) на змінному струмі із застосуванням мікроконтролера MSP430 та вимірювального блока HCPL788J.

Сигнали з силової схеми надходять до вимірювального блока, а з нього необхідні параметри подаються в мікроконтролер, а потім, через RS-232C надходять до комп'ютера.

Цей варіант стенду має цілий ряд переваг над своїм попередником. Він повинен скоротити терміни проведення комутаційних досліджень, підвищити точність вимірювань, знизити їх вартість. Зниження ва-

рності досягається завдяки заміні вимірювальних трансформаторів струму та напруги на сучасний вимірювальний блок на базі мікросхеми HCPL788J та програмно – налагоджувального стенду «MSP430».

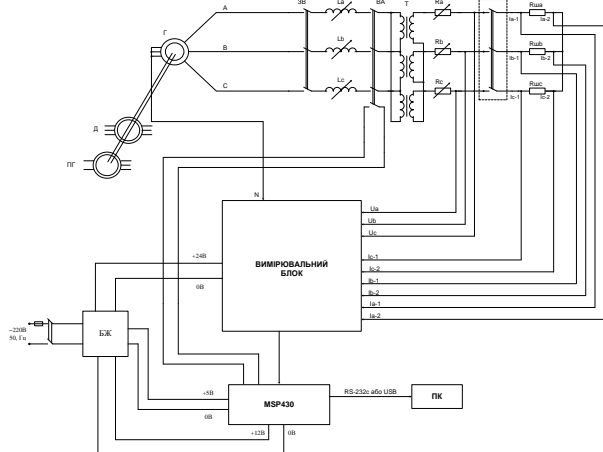


Рис. 4 – Принципова електрична схема установки для комутаційних досліджень на змінному струмі із застосуванням стенду «MSP430»

Схема вимірювального блока HCPL788J зображена на рис. 5. Він має 3 входи по напрузі і дозволяє вимірювати напругу в діапазоні від +750 В до -750 В і 3 входи для вимірювання струму як змінного так і постійного за допомогою безіндуктивних шунтів. Рекомендований діапазон напруги яка знімається з шунтів при вимірюванні струму знаходиться від +200 мВ до -200 мВ. Максимальне значення діапазону напруги з урахуванням нелінійності коефіцієнта передачі

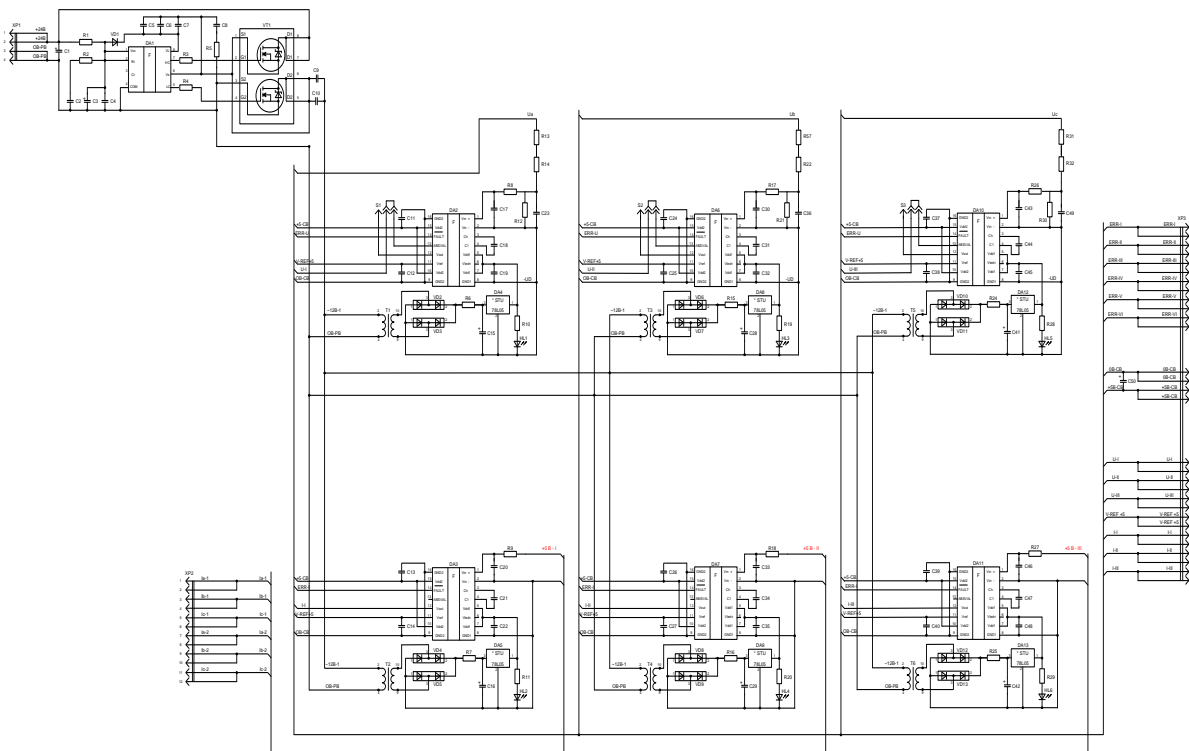


Рис. 5 – Принципова електрична схема вимірювального блоку на базі мікросхеми HCPL788J

Мікроконтролери сімейства MSP430 містять 16-розрядне RISC CPU, периферійні модулі й гнучку систему тактування, з'єднані через фон-нейманівську загальну адресну шину (MAV) пам'яті й шину пам'яті

HCPL788J може досягати від +250 мВ до -250 мВ. Вимірювальний блок HCPL788J має операційні підсилювачі і гальванічну розв'язку. Аналоговий сигнал з шунта або з дільника напруги поступає на АЦП з послідовним кодом, який перетворює його в його послідовний двійковий код і передає через оптрони, що забезпечують гальванічну розв'язку, на ЦАП, який перетворює двійковий код в аналоговий сигнал (напругу).

В подальшому цей сигнал поступає на мікроконтролер MSP430 і після обробки за заданим алгоритмом і програмою передається через послідовний порт RS-232C до комп'ютера. У випадку, коли при обробці результатів мікроконтролером виявиться, що струм або напруга набули аварійних величин, мікроконтролер видає сигнал на відключення дослідної установки.

Вибір мікроконтролера. Обґрунтування вибору мікроконтролера для АСКТПД для комутаційних досліджень запобіжників проводиться з урахуванням характеру досліджуваних процесів і умов досліджень: швидкості протікання процесів; кількості досліджуваних параметрів і частоти опитування датчиків; завдань по переробці інформації; умов експлуатації і вимог по надійності та енергоспоживанню. Аналіз вихідних даних цього завдання показує що його розв'язання може бути здійснене на базі мікроконтролера фірми Texas Instruments. Найбільш прийнятним для дослідження характеристик апаратів захисту є мікроконтролер типу MSP430 F16, архітектура якого зображена на рис. 6 [3].

даних (MDB). Поєднуючи сучасне CPU з відображуваними в пам'яті аналоговими й цифровими периферійними пристроями, сімейство MSP430 пропонує рішення для додатків зі змішаними сигналами.

Сімейство MSP430 має наступні ключові особливості:

Архітектура з ультранизьким споживанням, що збільшує час роботи при живленні від батарей:

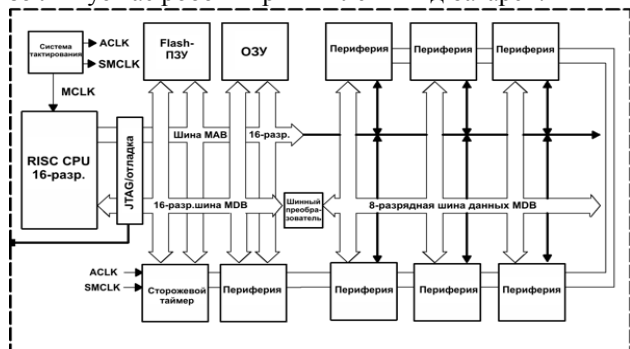


Рис. 6 – Архітектура MSP430

– для збереження вмісту ОЗП необхідний струм не більше 0,1 мкА;

– модуль тактування реального часу споживає 0,8 мкА;

– струм споживання при максимальній продуктивності становить 250 мкА.

Високоякісна аналогова периферія для виконання точних вимірів:

– убудовані модулі 12-розрядною або 10-розрядною АЦП швидкістю 200 ksp/s;

– температурний датчик і джерело опорної напруги VRef; здвоєний 12-розрядний ЦАП; таймери, керовані компаратором для виміру резистивних елементів; схема спостереження (супервізор) за напругою живлення;

16-розрядне RISC CPU, що допускає нові додатки до фрагментів коду:

– великий регістровий файл знімає проблему «вузького файлового горлечка»;

– компактне ядро має знижене енергоспоживання й вартість;

– оптимізовано для сучасного високорівневого програмування;

– набір команд складається з 27 інструкцій, підтримується сім режимів адресації; має розширені можливості векторних переривань.

Можливість внутрішнього схемного програмування Flash-пам'яті дозволяє гнучко змінювати й оновлювати програмний код, робити реєстрацію даних. Більш детально архітектура і система команд викладені в [3].

Розробка алгоритмів роботи. Робота схеми здійснюється по алгоритму і програмі у відповідності до технологічного процесу проведення досліджень швидкодіючих запобіжників.

Алгоритм роботи схеми лабораторного стенду наведений на рис. 7. Він забезпечує опитування датчиків і передачу інформації в РС. На початку алгоритму виробляється установка вихідного стану всіх керуючих сигналів. У головному циклі алгоритму (2-16) виробляється програмування портів, включення аналогового комутатора, встановлюється лічильник параметрів. У внутрішньому циклі відбувається запуск АЦП і зчитування коду (8-13), з наступним обчисленням параметра (14). Потім відбувається налаштування зв'язку з РС (17), і передача масиву отриманих даних

у РС. У випадку, коли $P > P_{\text{доп}}$, контролер видає сигнали на логічні елементи «АБО», пов'язані з ПЗО1–ПЗО3, які забезпечують керування об'єктом досліджень. Крім того, при виникненні аварійної ситуації ($P > P_{\text{доп}}$), сигнал іде з підсилювачів на компаратори і після порівняння з $U1-U3$ подається на елементи «АБО», які видають на ПЗО імпульси для відключення всієї установки.

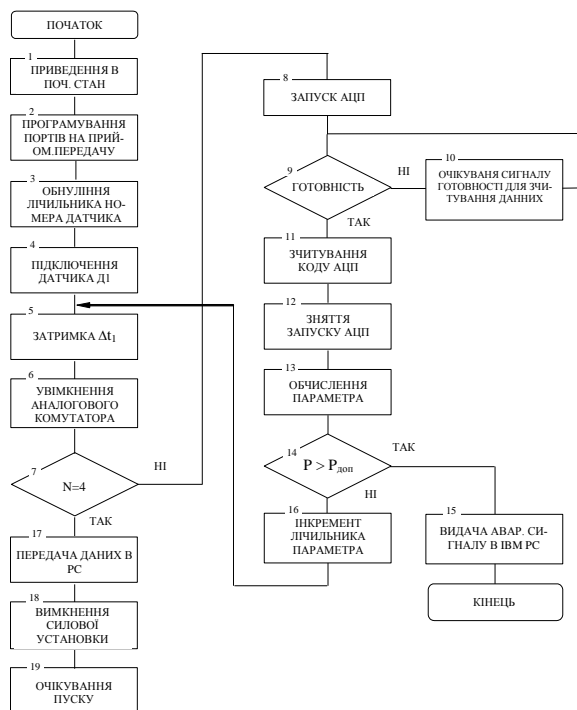


Рис. 7 – Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування технологічним процесом дослідження швидкодіючих запобіжників

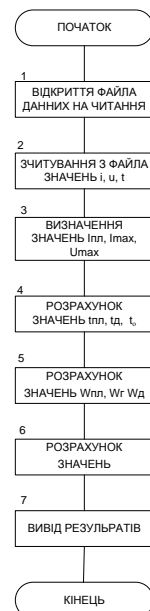


Рис. 8 – Алгоритм програми обробки даних, отриманих у результаті досліджень швидкодіючих запобіжників

Роль компараторів виконує блок цифро – аналогового перетворення. Установка опорних напруг $U1-U3$ здійснюється резисторами $R1-R3$. При цьому використовується внутрішнє джерело опорної напруги UREF мікросхеми МК Atmega16. При аварії МК пере-

ходить у режим переривання, виконання основної програми припиняється й МК видає повідомлення про аварійну ситуацію в РС (15).

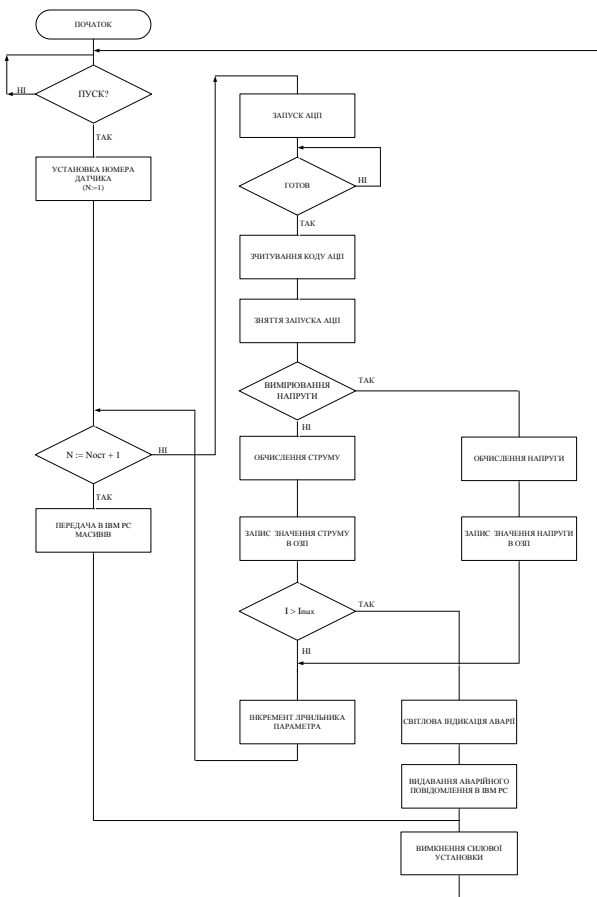


Рис. 9 – Алгоритм роботи лабораторного стенду на змінному струмі для комутаційних досліджень електричних апаратів

Після передачі даних у комп'ютер (17), вони обробляються відповідно до алгоритму, який приведений на рис. 7, Отримані значення даних, при дослідженні, зчитуються з файлу даних (1-2 (рис. 8)). Після чого, за методикою наведеною в [1] розраховуються струм плавлення, максимальні значення струму к.з. і напруги, часи плавлення перешийка, горіння

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Застосування мікроконтролерів при дослідженнях електричних апаратів / Ю. С. Гришук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 23-28. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Применение микроконтроллеров при исследованиях электрических аппаратов / Ю. С. Гришук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 23-28. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

The use of microcontrollers in studies of electric vehicles / Yu. S. Grischuk // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 23-28. Bibliography: 4. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гришук Юрій Степанович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричні апарати, м. Харків; тел.: (057) 707-68-64.

Гришук Юрий Степанович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры электрические аппараты, г. Харьков; тел.: (057) 707-68-64.

Grischuk Yuri Stepanovich – Candidate of Engineering Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of Department of Electrical Apparatus, Kharkiv; tel.: (057) 707-64-27.

дуги й відключення струму к.з., інтеграли плавлення, горіння й Джоулев інтеграл, а також значення енергії дуги й середньоінтегральної напруги на дузі (3-6). Результати розрахунків виводяться на екран (7) (рис. 8).

Алгоритм роботи лабораторного стенду на змінному струмі для комутаційних досліджень електричних апаратів захисту представлений на рис. 9.

Висновки. Проведено розробку структурної та принципів електричних схем стендів для досліджень захисних електричних апаратів на постійному та змінному струмі із застосуванням вимірювального блоку на базі *HCPL788J* та мікроконтролерного лабораторного стенду «MSP430».

Розроблено алгоритми роботи схем на постійному та змінному струмах та обробки отриманих результатів.

Розроблені структурні та принципові електричні схеми АСКТПД та алгоритми їх роботи на постійному та змінному струмі дозволяють автоматизувати процес досліджень і випробувань захисних та інших електричних апаратів і електромеханічних систем, скоротити терміни проведення досліджень, фінансові затрати на їх проведення та підвищити достовірність результатів і економічну ефективність.

Список літератури

1. Гришук Ю. С. Основы научных исследований: навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.
2. Гришук Ю. С. Микропроцессорні пристрої: навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 348 с.
3. Семейство микроконтроллеров MSP430x1xx. Руководство пользователя. ЗАО "Компел", 2004. – 368 с.
4. Петин О. В., Щербakov Е. Ф. Испытания электрических аппаратов. – М.: Высш. шк., 1985. – 215 с.

References (transliterated)

1. Hryshchuk Yu. S. *Osnovy naukovykh doslidzhen'* [Basics of the scientific research]. Kharkov : NTU «KhPI», 2008. 232 p.
2. Hryshchuk Yu. S. *Mykroprotsesorni prystroyi* [Microprocessor devices]. Kharkov : NTU «KhPI», 2008. 348 p.
3. *Semeystvo mykrokontrolerov MSP430x1xx*. ZAO "Kompel", 2004. 368 p.
4. Petinov O. V., Shherbakov E. F. *Ispytaniya jelektricheskikh apparatov* [Trials of electric apparatus]. Moscow: Vyssh. shk., 1985. 215 p.

Надійшла (received) 25.10.2016