

О.М. Сизоненко, О.І. Христо

Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА SPS ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Визначено основні завдання для інформаційно-вимірювальної системи у складі установки іскро-плазмового спікання дисперсних матеріалів, розроблена структурна схема цієї системи та проаналізовано принципи роботи її вимірювальних блоків. Отримано аналітичні вирази параметрів процесу спікання за якими обчислювальний блок здійснює перетворення вхідних сигналів з його аналогових портів до їх числового зображення відповідного формату. Комп'ютерне програмне забезпечення утворює двосторонній зв'язок з системою моніторингу через стандартний або віртуальний послідовний порт, виводить параметри процесу іскро-плазмового спікання у окремі текстові блоки у фоновому режимі за попередньо встановленим періодом дискретизації та алгоритмом обробки.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, SPS процес, аналого-цифровий перетворювач.

О.Н. Сизоненко, А.И. Христо

ИНФОРМАЦИОННО - ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА SPS ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Определены основные задачи для информационно-измерительной системы в составе установки иско-плазменного спекания дисперсных материалов, разработана структурная схема этой системы и проанализированы принципы работы ее измерительных блоков. Получены аналитические выражения параметров процесса спекания, по которым микроконтроллер осуществляет преобразование входных сигналов, поступающих на его аналоговые порты к числовому виду соответствующего формата. Компьютерное программное обеспечение образует двухстороннюю связь с системой мониторинга через стандартный или виртуальный последовательный порт, выводит параметры процесса иско-плазменного спекания в отдельные текстовые блоки в фоновом режиме с установленным периодом дискретизации и алгоритмом обработки.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, SPS процесс, аналогово-цифровой преобразователь.

О.М.Сизоненко, О.І.Христо

INFORMATION-MEASURING SYSTEM SPS PROCESS SINTERING DISPERSED MATERIALS

The main tasks for the information-measuring system as part of the installation for spark-plasma sintering of dispersed materials have been determined, the structural diagram of this system has been developed and the principles of operation of its measuring units have been analyzed. Analytical expressions are obtained for the parameters of the sintering process, according to which the microcontroller converts the input signals arriving at its analog ports to the numerical form of the corresponding format. In the places of connection, a monitoring system with the units of the technological installation information signals are transported through an optical amplifier with a linear transmission coefficient. The computer software forms a two-way communication with the monitoring system through a standard or virtual serial port, outputs the parameters of the spark-plasma sintering process into separate text blocks in the background with a set sampling period and processing algorithm.

Keywords: information - measuring system, spark-plasma sintering machine, analog-to-digital converter.

Постановка проблеми. Актуальність застосування автоматизованих інформаційно – вимірювальних комплексів у процесах електроспікання композиційних дисперсних матеріалів зумовлена насамперед покращенням якості композитних матеріалів, яка досягається в першу чергу за рахунок одночасного контролювання по декільком параметрам технологічного процесу спікання у реальному часі з можливістю їх автоматичного корегування згідно з обраним режимом або програмою консолідації матеріалів. Ефективне проектування зазначених систем моніторингу дає можливість науковцям дослідити кінетику ущільнення і консолідацію порошкових матеріалів, її залежності від тиску навантаження та інтенсивності електронагріву, а також визначити оптимальні параметри технологічного процесу. Незважаючи на високий рівень розвитку інтегральної обчислювальної техніки все ж таки залишаються питання у покращенні електромагнітної сумісності системи моніторингу з технологічними вузлами SPS установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі зазначено, що спікання це процес консолідації порошкових матеріалів [1], який відбувається нижче точки їхнього плавлення за умови високої сили їх стиснення, спрямований на зміну структури матеріалу. Існують багато різних методів спікання, з яких можна виділити метод іскро - плазмового спікання (ІПС) [2,3], що

відбувається одночасно за рахунок пропускання через зразок імпульсного модульованого струму та під дією зовнішньої одноосової сили при низькому атмосферному тиску з метою високошвидкісного ущільнення порошкового матеріалу. Лабораторні установки [4-6], які забезпечують відзначений процес спікання, мають задовольняти таким його параметрам, як швидкості нагріву та охолодження, силі навантаження, швидкості стиснення, глибині вакууму та потужності введення енергії до матеріалу. Важливими елементами такої установки є вакуумна камера з системою створення механічного навантаження, потужний генератор випрямленого пульсуючого струму, системи водоохолодження та вакуумування камери, а також системи керування та моніторингу процесу спікання. Керування процесом спікання може відбуватися, як вручну так й в автоматичному режимі по заданому алгоритму зміни його визначальних характеристик. Система моніторингу у складі ПС установки відіграє важливу роль у тому сенсі, що повинна забезпечити якісну обробку інформаційних сигналів з метою їх збереження та подальшому впровадженні у математичних розрахунках. Але в той же час у сучасній літературі аспекти побудови систем моніторингу процесу іскро - плазмового спікання все ж таки залишаються недостатньо розкритими, як з боку апаратного так й програмного забезпечення [7,8]. У цьому сенсі назріла невід'ємна потреба в проведенні дослідження у напрямку визначення та розробки основних функціональних елементів цієї системи, що забезпечать відповідний рівень характеристик інформаційних сигналів на протязі усього циклу перетворення починаючи від сигналу з окремого датчика до виводу числового параметру на екрані комп'ютера або рідкокристалічної матриці.

Постановка завдання. Метою роботи є створення апаратно-програмного комплексу моніторингу електричних, механічних та теплових характеристик у складі багатofункціональної установки іскро - плазмового спікання матеріалів.

Основний матеріал. Головним завданням вимірювального комплексу є якісна обробка аналогових сигналів, які надходять з датчиків вмонтованих у технологічних вузлах ПС установки (генератор струму, вакуумна камера, механічний прес) для визначення наступних характеристик

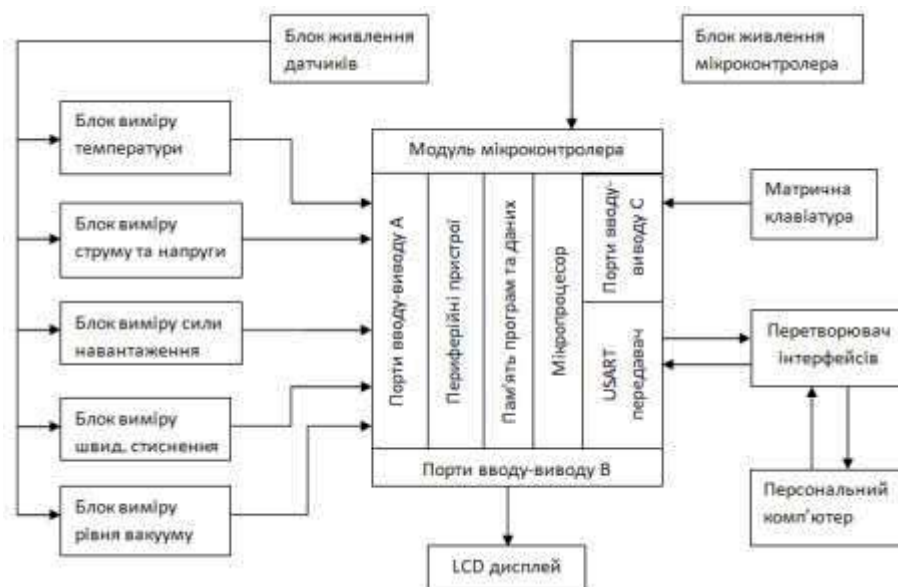


Рис.1. Структурна схема системи моніторингу ПС

процесу: температура спікання зразка, тиск механічного навантаження, середнє значення імпульсного струму через зразок, швидкість стиснення, тиск залишкового вакууму у камері, середній рівень напруги на зразку й виділену потужність. Передача отриманих даних до персонального комп'ютера з можливістю зміни кроку дискретизації процесу теж є одним із вагомих завдань системи, структурна схема якої відображена на рис.1.

Можна зазначити, що кожен вузол відображений на структурній схемі приєднаний до зовнішніх портів мікроконтролера (МК) представляє собою відокремлений модуль розширення на якому окрім датчика можуть розміщуватися такі елементи, як диференційний посилювач сигналу, інтегруюча або диференційна ланка, перетворювач рівнів сигналу, елемент гальванічної розв'язки

з лінійним коефіцієнтом передачі, джерело живлення та інші об'язувальні елементи. Крім того система повинна забезпечити стійкість до електромагнітних перешкод, що надходять у першу чергу з напівпровідникового генератора імпульсного струму та з інших пристроїв автоматизованого керування процесом ПС.

Блок виміру температури зразка. Технологія спікання порошкового матеріалу, щорозміщено у графітовій матриці стиснутого з обох боків пуансонами під дією, як струму високої щільності так й зовнішнього механізму навантаження відбувається за температурними показниками 2000 – 2500 °С. Основними підходами для виміру таких високих температур є безконтактний спосіб, що заснований на інфрачервоній пірометрії, а також контактний за допомогою термопарного спаю різнорідних металів. Треба зазначити, що пірометричний метод більш сприятливий для виміру поверхневої температури нагрітого тіла. Зважаючи на те, що найбільшого теплового розсіювання слід очкувати у середині графітової матриці, то вимірювання все ж таки бажано проводити якомога ближче до зони максимального прогріву матеріалу. Термопарний метод має перевагу, тим що дозволяє проводити вимірювання в безпосередній близькості від нагрітого зразка за рахунок встановлення кінця термопарного спаю у отвір пробурений в графітовій матриці. Тому з урахуванням зазначеної переваги, вимірювання температури нагрітого зразка прийнято проводити вольфрам - ренієвою термопарою [9]. Слабкий сигнал з термопари на рівні 5-30мВ подається на вхід інструментального диференціального підсилювача AD627 та підтягується до рівня достатнього для оцифрування й направляється на один з входів вбудованого модуля АЦП 8-ми розрядного мікроконтролера сімейства AVR [10]. Крім того для усунення попадання високої напруги на порти МК в схемі передбачена гальванічна розв'язка [11] силової частини від вимірювального тракту. Така обережність пов'язана з можливістю виникнення величезних значень ЕРС самоіндукції на спікаємому зразку в результаті короткочасного обриву струму, що проходить через нього величиною порядку 1кА і більше.

Блок виміру швидкості стиснення. У процесі ПС, чимало важливим завданням є створення зовнішньої сили для рівномірного навантаження матеріалу, що знаходиться в прес формі. Як правило, механізми, що дозволяють створювати високий тиск розрізняються за типом подання навантаження в основу яких покладено гідравлічний або гвинтовий принцип дії. Гідравлічні преса зазвичай розраховані на великі навантаження більше 10 тонн, однак їх істотний недолік пов'язаний з точністю позиціонування механізму навантаження, яке в більшій мірі визначається швидкістю переміщення штока, що штовхає гідроциліндр. У свою чергу механічний прес обладнаний автоматичною системою керування має істотну перевагу у позиціонування та крім цього дозволяє у більш зручний спосіб організувати інтерфейс під'єднання до його виконавчих вузлів для визначення швидкості стиснення порошкового матеріалу. Механічний прес представляє собою конструкцію в якому рухома платформа переміщується за рахунок обертання одного чи декількох ходових гвинтів, які вставлено у шарикопідшипники міцного каркасу машини. У такий спосіб функціональний устрій механічного преса дозволяє визначати швидкість стиснення матеріалу (переміщення активної платформи) на підставі кута повороту одного з його ходових гвинтів. Прикладом механічного пресу є автоматизована розривна машина Р-05, яка окрім основної дії, дозволяє випробовувати матеріал на стиснення завдяки використанню спеціального реверсивного механізму.

Одним з найпростіших приладів для вимірювання кута повороту є стандартний механічний інкрементальний енкодер. Однак через слабку роздільну здатність (24 імпульсу за оборот) і небажаного брязкоту контактів кращою альтернативою є використання безконтактного поворотного енкодера, як приклад магнітний поворотний енкодер на основі ефекту Холла AS5040 [12] з дозволом 0,35 градусів або 1024 імпульсу за оборот. Дія датчика запускається від обертового двополосного магніту, який встановлюється на один з ходових гвинтів через діамагнітну пластину і розміщується паралельно торцевій поверхнею мікросхеми на висоті 0,5 - 1,8 мм. При цьому центральна вісь магніту вирівнюється в межах 0,25 мм зміщення в його радіусі, щодо геометричного центру корпусу самої мікросхеми. З урахуванням 10 бітної розрядності датчика одиничний імпульс відповідає куту повороту 0,35 град. При мінімальній швидкості машини 1мм / хв, ходовий гвинт за одну хвилину повернеться на кут 60 градусів, що відповідає близько 170 імпульсам енкодера. З цього випливає, що отримана точність є занадто завищеною, тому доцільно скоротити діапазон часу підрахунку імпульсів до 10 секунд. Сигнали з енкодера надходять на входи блоку зовнішнього переривання int0 і int1 МК. Підрахунок кількості імпульсів здійснюється в тілі функції обробника зовнішнього переривання (для кожного каналу свій обробник), у той же

час черговість виклику переривань дозволяє встановити напрямок обертання ходового гвинта. Функція викликається усякий раз, коли на одному з вхідних каналів з'являється сигнал з наростаючим переднім фронтом. Для фіксування тимчасового інтервалу використовується 16 бітний таймер лічильник, частота якого з урахуванням коефіцієнта ділення прив'язана до частоти тактування мікропроцесора. Кожен раз по досягненню рахункового регістра таймера певного значення, яке відповідає значенню регістра порівняння (відносяться до периферійних пристроїв МК) відбувається виклик функції обробки цієї події, в тілі якої значення рахункового регістра обнуляється для підготовки до наступної обчислювальної ітерації. При частоті тактування мікропроцесора від зовнішнього кварцового резонатора рівній 16 МГц і максимальному коефіцієнті дільника 1024, частота роботи таймера становить 15625Гц. Розрахунок швидкості переміщення активного захвату виконується в тілі функції обробки переривання від таймера згідно з формулою:

$$v = 6 \cdot \frac{n \cdot \Delta\phi^0 \cdot h}{360^0} \text{ мм / хв.}, \quad (1)$$

де n - кількість імпульсів, $\Delta\phi^0$ - крок кута повороту гвинта, h - крок різьби ходового гвинта.

Далі отримане число кодується за допомогою BCD алгоритму і передається на дисплей у вигляді рядка.

Блок виміру струму. Тепловий нагрів випробовуваних порошкових сумішей з метою їх подальшої консолідацією виконується контактним способом шляхом пропускання струму через зразок, імпульсного випрямленого або знакозмінного струму, що надходить від спеціальних силових перетворювальних пристроїв. Для досягнення належного ефекту рівномірного прогріву матеріалу до таких пристроїв пред'являється ряд вимог щодо, потужності, що вводиться в навантаження, глибини модуляції сигналу, середньоквадратичної величини струму, швидкості його зростання, а також стабільності роботи в умовах пробою або короткого замикання. В якості таких пристроїв можуть бути використані мережеві понижуючі трансформатори або імпульсні напівпровідникові інвертори струму. Потужність зазначених пристроїв повинна складати близько 10 кВт і більше при струмі, що розвивається в навантаженні від 100А до декількох кА з можливістю регулювання і стабілізацією цих параметрів.

Сучасною промисловістю випускаються досить широкий перелік датчиків струму компенсаційного типу на основі ефекту Холла (Closed Loop Current Sensors) [13]. Наприклад, модель CSNK591 дозволяє вимірювати струми амплітудою до 1200А. Живлення датчика здійснюється від біполярного джерела $\pm 15\text{В}$. Вихід датчика в своєму роді є джерелом струму навантажений на опір порядку 40-70 Ом. Внаслідок цього сигнал напруги на резисторі виявляється пропорційним струму в первинному колі поділений на кількість витків додаткової обмотки. Значення струму можна обчислити за формулою:

$$I = \frac{V_H \cdot N}{R_L}, \quad (2)$$

де V_H - напруга на опорі навантаження, N - кількість витків компенсаційної обмотки, R_L - навантажувальний опір.

У зв'язку з наявністю високочастотної складової в випрямленому струмі та обмеженою частотою дискретизації АЦП, вихідний сигнал попередньо повинен бути згладжений шляхом використання інтегруючого вузла. Схема інтегратора сигналу являє собою вхідний і вихідний повторювач побудовані на двох операційних підсилювачах між якими, розміщений RC фільтр нижніх частот. Так як конструкція датчика забезпечує гальванічну розв'язку з силовим контуром то усереднений сигнал струму, без будь-яких додаткових ланцюгів оптичної розв'язки подається безпосередньо на один з входів АЦП МК для подальшої обробки. Для отримання прийнятної точності оцифровування, частота дискретизації повинна, щонайменше на порядок перевершувати граничну частоту в спектрі аналогового сигналу. У той же час, як відомо для отримання найбільшої точності оцифровування частоту перетворення АЦП слід виставляти як можна меншою. З урахуванням частоти тактування мікропроцесора і максимальному коефіцієнті дільника, частота перетворення становить 125 кГц. Після кожного акту перетворення в регістр даних АЦП заноситися значення тільки за певним попередньо вибраним каналом. Тому в дійсності з урахуванням необхідності реєстрування шести інформаційних параметрів процесу спікання результуюча частота дискретизації буде набагато нижче. Крім того видача результатів перетворення прив'язується до вектору переривання відповідального за переповнення 8-ми

розрядного таймера лічильника. При частоті тактування таймера в 250 кГц така подія буде виконуватися 976 раз в секунду. Однак через необхідність послідовного сканування шести каналів результуюча частота дискретизації по кожному каналу окремо стане рівною близько 160 Гц, що цілком задовольняє зазначеному критерію за вибором частоти дискретизації. Також слід зазначити, що в якості джерела опорної напруги АЦП взято напругу живлення МК, яка підтримується стабільною за рахунок мікросхеми лінійного стабілізатора на рівні 5В. Роздільна здатність АЦП становить 10 - біт, тому відповідно до обраного джерела опорної напруги мінімальна, дискретна точність перетворення становить близько $5В / 1024 \approx 5мВ$. Аналогові сигнали датчиків за допомогою вихідних коригувальних ланок підтягуються з 10-ти кратним перевищенням зазначеної дискретної точності щодо своїх вихідних рівнів.

Блок виміру сили навантаження на зразку. Зусилля до порошкової суміші в матриці, що знаходиться між двома графітовими пуансонами передається через ходові стрижні (виконують також роль струмоведучих контактів), які вводяться в поступальний рух під дією реверсорного механізму, зчепленого із захватами розривної машини. Величину сили навантаження зразка можна оцінити по куту відхилення штанги маятника силовимірювача розривної машини. В результаті навантаження двуплечового важільного механізму силовимірювача через крутий блок змушує штангу маятника, забезпечену противагою відхилитися в сторону протилежну дії тяги. На штанзі є спеціальний язичок, що приводить в рух через ползунковий механізм вертикальний засічений стрижень, зчеплений з шестернею відповідальною за показання стрілки шкали циферблата зусилля. На циферблаті є три шкали для навантажень 100, 250 і 500 кгс. Діапазон вимірювання виставляється шляхом розміщення на штанзі маятника відповідного противажильного вантажу, що входить в комплект машини. Згідно механічного пристрою силовимірювального блоку машини, зусилля, що розвивається на зразку виявляється прямо пропорційно куту відхилення штанги маятника і як наслідок кутку повороту шестерні силовимірювача. Така вигідна обставина дає можливість аналізувати силу навантаження без використання спеціального тензорезистивного датчика тиску, установка якого тільки б ускладнила конструкцію вакуумної камери, а також призвела до збільшення її габаритів. Навпаки, аналізуючи силу навантаження на підставі кута повороту маятника можна значно спростити вимірювальний вузол. Дотримуючись підходу покладеному, як і в разі визначення швидкості стиснення для цих цілей також використовується інкрементальний магнітний енкодер з дозволом в 1024 імпульсами за повний оберт, встановлений над двополюсним магнітом, центр якого сполучений з віссю шестерні. Таким чином, знаючи максимальний кут повороту шестерні циферблата, сила навантаження може бути розрахована за формулою:

$$F_p = \frac{\Delta\varphi^0 \cdot 500 \text{ кгс}}{320^0} \quad (3)$$

Особливості розрахунку та відображення інформації. Програмне забезпечення для плати мікроконтролерного модуля написано на мові C з урахуванням особливостей синтаксису середовища розробки CodeVisionAVR [14], яке вміщує компілятор та модуль внутрисхемного програмування. Вихідний код програми у форматі .rom зашифо у мікроконтролер через платформу STK200/300 по SPI інтерфейсу з'єднуючи обраний мікроконтролер з LPT портом персонального комп'ютера. Обробка аналогових сигналів, що надходять від вимірювальних блоків відбувається за допомогою вбудованого багатоканального модуля АЦП. Перетворення АЦП запускається кожного разу після виклику функції переривані по переповненню 8-ми розрядного таймера лічильника. Підрахунок кількості імпульсів від інкрементальних енкодерів виконується у функціях обробки зовнішніх переривань по каналах int1 та int2. Для відображення результатів вимірювання на дисплеї по кожному з параметрів використовується функція, що перетворює число у рядок символів. В свою чергу під кожен параметр у програмі відведено конкретна кількість знаків числа. Для виводу струму відводиться 4 знака (4-х значене ціле число), напруга - 3-х значне дробове число з двома знаками після коми, сила навантаження - 3-х значне ціле число, швидкість переміщення - 3-х значне дробове число з двома знаками після коми, температура - 4-х значне ціле число. Кожен з перелічених параметрів зберігається у пам'яті МК, як двохбайтне число, тому для його виводу використовується алгоритм кодування двійкового числа десятковими цифрами з тим урахуванням, що для зберігання кожного знаку числа відводиться один байт оперативної пам'яті. Числа виводяться на дисплей посимвольно відповідно до 256 символної кодової таблиці вибраного дисплея, що є наближеної до ASCII коду.

В алгоритмі програми перетворення до десяткового числа відбувається ітераційним діленням числа на основу системи та виділенням часток, що є розрядами десяткового числа. Якщо число містить дробову частину, то в алгоритмі за умовою значення діленого меншого за дільник виконується множення діленого на десяткову основу для відокремлення від цілої частини, а потім знаходження частки числа та його остачі як різниці між діленим та добутком часткою на дільник, з якої починається ітераційний процес визначення наступного розряду. В результаті виконання деяких спрощень, параметри, що відслідковуються інформаційно-виміральною системою розраховуються за такими формулами:

$$V = 5 \cdot (adc + 1) / 1024 \quad (6)$$

$$I = 2500 \cdot adc / 1024 \quad (7)$$

$$v = 9 \cdot pulse / 64 \quad (8)$$

$$Ef = 219 \cdot pulse / 100 \quad (9),$$

де V - напруга, I - струм, v - швидкість стиснення, E_f - сила навантаження, adc - двобайтовий результат перетворення АЦП по відповідному каналу, $pulse$ - кількість підрахованих імпульсів від магнітного енкодера. Визначення температури виконується за іншим алгоритмом ніж попередні параметри. Це пов'язано з тим, що градуїрочна крива залежності температури від термо - ЕРС апроксимується достатньо складаною формулою, що вміщує ступені високих порядків. За відсутності у 8-ми розрядному мікропроцесорі вбудованого математичного співпроцесору, виконання операцій множення, необхідно реалізовувати за окремими алгоритмами, що не завжди може бути ефективним з точки зору витрат часу та точності розрахунку. Згідно табличних даних для вольфрам-рентгенової термопари в програмі Excel побудовано графік оберненої функціональної залежності температури від термо - ЕРС та за допомогою вбудованого математичного апарату отримано її апроксимаційне наближення на основі поліному третього порядку точності. З урахуванням коефіцієнту посилення сигналу термопари, що дорівнює 100, апроксимаційна крива температури визначається за формулою:

$$T = 35,212 \cdot E_T^3 - 105,81 \cdot E_T^2 + 695,72 \cdot E_T + 3,469 \quad (10)$$

де E_T - термо - ЕРС термопари.

Виходячи з потреби знаходження більш раціонального визначення температури з урахуванням можливостей 8-ми розрядного МК вирішено апроксимаційну криву температур (форм. 10) розділити на декілька ділянок в межах яких закон зміни температури залишається достатньо лінійним. Отримано наступні формули, які відображено у функції розрахунку температури відповідно до кожного інтервалу температур:

$$\begin{aligned} T_1 &= 625 \cdot E_T & 0 < T_1 < 1000 \\ T_2 &= 771 \cdot E_T - 290 & 1000 < T_2 < 1253 \\ T_3 &= 932 \cdot E_T - 708 & 1253 < T_3 < 1716 \\ T_4 &= 1102 \cdot E_T - 1220 & 1716 < T_4 < 2089 \end{aligned} \quad (11)$$

У програмі вибір тої чи іншої ділянки організується операторами розгалуження на підставі значення регістру даних перетворення АЦП.

Вибір мікроконтролера та зв'язок з комп'ютером. Візуалізація процесу вимірювання проведено у програмі комп'ютерного моделювання та розробки електронною схеми Proteus. За основу системи обрано 8-ми розрядний мікроконтролер atmega16, який має 8-м аналогових входів та три входи зовнішнього переривання. Параметри моніторингу відображаються на чотирьох рядковому дисплею з 20 символною довжиною. Для спрощення налагодження системи, функції датчиків струму, напруги, та температури, сигнали яких надходять до каналів АЦП, з'імітовано за допомогою потенціометрів, що виконано на змінних резистивних дільниках напруги. Це заміщення дозволяє регулювати напругу у повному діапазоні вимірювання від 0 до 5В. У тому ж сенсі енкодер, що відповідає за визначення швидкості переміщення змодельоване за допомогою мультиплексора на входи, якого подаються сигнали від генераторів прямокутних імпульсів з різною частотою слідування. Після виконання програмного моделювання виміральної системи було виконано її матеріальне втілення, макетний варіант якої зображено на рис.2.

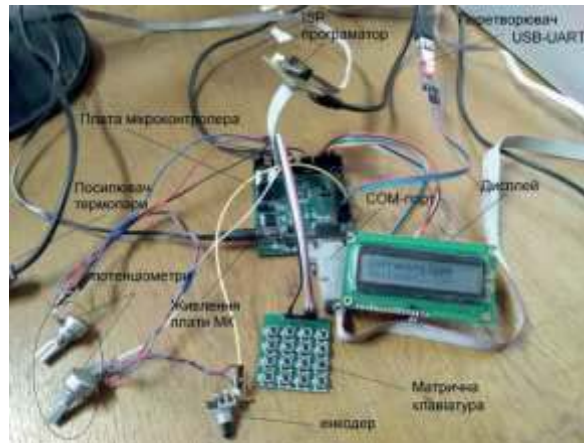


Рис.2. Макетний варіант системи

До системи входять такі елементи, як мікропроцесорна плата на базі atmega16, рідко - кристалічний дисплей WH1602A, матрична кнопкова клавіатура, ISP програматор мікроконтролера, перетворювач інтерфейсів USB-UART, посилювач сигналу термодари, змінні резистори, механічний енкодер, блок живлення та з'єднувальні дроти. Мікропроцесорна плата оснащена додатково флеш пам'ятю об'ємом 4Мбайта, що дозволяє зберігати вимірювальні характеристики процесу за окремий проміжок часу. Зв'язок МК з комп'ютером відбувається за допомогою вбудованого модуля послідовного прийомо-передача UART, який з'єднується з USB портом за рахунок використання зовнішнього перетворювача інтерфейсів USB-UARTCP2102. Крім того мікропроцесорна плата оснащена власним перетворювачем рівнів для організації передачі даних по RS-232 протоколу за наявності у системі комп'ютера COM порта, що дозволяє спростити налагодження програми, тому що не вимагає встановлення на комп'ютері додаткового програмного забезпечення. Навпаки для передачі даних через USB порт потрібно виконати інсталяцію драйвера CP2102, який дозволяє розглядати під'єднаний пристрій, як додатковий COM порт, тобто передавати дані у режимі віртуального COM порту. Вигідною обставиною є те що, робота з віртуальним COM портом не відрізняється від звичайного порту, тому що його драйвер підтримує бібліотеку стандартних функцій для стандартного COM порту. Програмне забезпечення для комп'ютера розроблено у середовищі об'єктно-орієнтованого програмування BorlandC++ Builder 6 [15].

Результати моніторингу по шести параметрам включаючи параметр часу заносяться в окремі текстові блоки, що зберігають усі прийняті дані в процесі роботи програми та дозволяють їх окремо скопіювати у блокнот або занести до таблиці Excel для подальшої побудови графіків зміни характеристик процесу спікання в залежності від часу або за потребою користувача. Програма дозволяє змінювати час дискретизації процесу моніторингу вибираючи потрібний час з випадаючого списку, що резервує такі константи дискретизації, як 1000мс, 500мс, 200мс та 100мс. Передача даних від МК відбувається на запит програми комп'ютера, що ініціюється у тілі функції обробника події компонента Timer бібліотеки VCL за інтервалом вказаним у його властивостях. Програма МК у відповідь перевіряє код запиту та відсилає по UART шині пакет даних одразу по всім параметрам процесу ППС.

Висновки. Проаналізовано принципи роботи вимірювальних блоків системи моніторингу процесу ППС та розроблена її структурна схема з врахуванням інтерфейсу їх під'єднання до обчислювального пристрою та одночасним забезпеченням гальванічної розв'язки логічних елементів системи, за умови підтримання лінійності передачі інформаційних сигналів, від технологічних вузлів силової установки де можлива поява струмів високого потенціалу.

Отримано аналітичні вирази параметрів процесу спікання за якими програма мікроконтролера здійснює перетворення вхідних сигналів до їх числового зображення відповідного формату з врахуванням системи команд його вбудованого арифметично-логічного пристрою для досягнення найбільшої ефективності у витраті часу та точності розрахунку.

Розроблено комп'ютерне програмне забезпечення для 8-ми розрядної мікропроцесорної платформи на базі atmega16 системи моніторингу процесу спікання та реалізовано її макетний варіант, що дозволяє відтворювати та зберігати наступні характеристики процесу ППС:

температура спікання зразка, тиск механічного навантаження, середнє значення модульованого імпульсного струму та напруги на зразку й швидкість його стиснення.

Список використаної літератури

1. Munir Z.A. Electric current activation of sintering: a review of the pulsed electric current sintering process. Journal of the American Ceramic Society. 2011. V. 94. P. 1-19.
2. Guillon O., Gonzalez-Julian J., Dargatzis B. Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments. Adv Eng Mater. 2014. V.16. No.7. P.830-849.
3. Cavaliere P. Spark plasma sintering of materials: advances in processing and applications. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019. 781p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05327-7>.
4. Suárez M., Fernández A., Kessel H., Kessel T. Challenges and opportunities for spark plasma sintering: a key technology for a new generation of materials: INTECH Open Access Publisher, 2013. URL: <https://doi.org/10.5772/53706>.
5. Pristash N.S., Sizonenko O.N., Zaychenko A.D. Influence of the heating rate during spark-plasma sintering on the kinetics of compaction, structure formation and properties of materials of the Fe-Ti-C-system (B). News of the Ukrainian Material Association. 2016. V.2. No.4. P.3-5.
6. Сизоненко О.М., Івлів А.І., Райченко О.І., Литвинов В.В., Конотоп С.В., Зайченко А.Д. (25.07.2012). Патент 71816, МПК В22F3/14. Пристрій для іскро-плазмового спікання порошків (Україна). u201200951; заявлено 30.01.2012; бюл. № 14
7. Подоба Я.О. Система моніторингу і управління процесом електроспікання кам на металевій зв'язці. Збірник наукових праць "Інструментальне матеріалознавство". 2011. №14. с.583-588.
8. Сизоненко, О.М. Литвинов, В.В. Конотоп, С.В. Коваленко, О.О. Автоматизація процесу вимірювання температури, струму і напруги при іскро - плазмовому спіканні дисперсних композицій. Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. 2014. № 21 (1064). с. 130-140.
9. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965. 304 с.
10. AVR instruction set manual. Microchip Technology. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-0856-avr-instruction-set-manual.pdf>
11. Vishay Semiconductors. IL300 Datasheet, Linear Optocoupler. URL: <http://www.vishay.com/docs/83622/il300.pdf>
12. 10Bit 360° Programmable Magnetic Rotary Encoder. URL: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5040_DS000374_3-00.pdf
13. Closed Loop Current Sensors URL: <http://www.farnell.com/datasheets/2602959.pdf>
14. Getting Started with the CodeVision AVR C Compiler. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/doc2500.pdf>.
15. Swart B., Cashman M. Borland C++ Builder Developer's Guide. Indiana: SAMS, 2003. 1128 p. URL: <http://index-of.es/C++/Sams Publishing - Borland C++ Builder 6 Developer's Guide.pdf>

Рецензенти:

Кускова Н. І., заст. директора з наукової роботи, д.т.н., професор (Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв)

Дубовий О.М., д.т.н., професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Заслужений працівник народної освіти України, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів.