

УДК 621.317:004.38

DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.19

О.М. Сизоненко, О.І. Христо, С.В. Конотоп*Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв***ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ІСКРО-ПЛАЗМОВОГО СПІКАННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Проаналізовано принципи стабілізації швидкості навантаження у системі імпульсно-фазового керування електроприводом розривної машини R-0,5, яка задіяна у режимі стиснення матеріалу за рахунок використання спеціального реверсорного механізму. Виявлено основні шляхи поширення електромагнітної перешкоди до слабкострумних ланок системи керування та моніторингу й запропоновано основні заходи щодо посилення рівня її електромагнітної сумісності з потужним джерелом імпульсного струму. Розкрито конструктивні особливості сполучення блоків виміру сили навантаження та швидкості стиснення з механічними передачами обертового руху розривної машини та зазначено основні чинники, що впливають на точність перетворення сигналу абсолютного кутового положення з ШИМ виходу магнітного енкадера.

Ключові слова: розривна машина, система моніторингу, ІПС процес.

О.Н. Сизоненко, А.И. Христо, С.В. Конотоп**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОМ ИСКРО-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Проанализированы принципы стабилизации скорости нагружения в системе импульсно-фазового управления электроприводом разрывной машины R-0,5, задействованной в режиме сжатия материала за счет использования специального реверсорного механизма. Выявлены основные пути распространения электромагнитной помехи к слаботочным узлам системы управления и мониторинга, а также предложены основные меры по усилению уровня ее электромагнитной совместимости с мощным источником импульсного тока. Раскрыты конструктивные особенности сопряжения измерительных блоков силы нагружения и скорости сжатия с механизмами вращательного движения разрывной машины и отмечены основные факторы, влияющие на точность преобразования сигнала абсолютного углового положения с ШИМ выхода магнитного энкодера.

Ключевые слова: разрывная машина, система мониторинга, ИПС процесс.

О.М. Sizonenko, O.I. Khrysto, S.V. Konotop**A MONITORING SYSTEM'S BUILDING FEATURES FOR THE DISPERSED MATERIALS SPARK-PLASMA SINTERING PROCESS**

The loading rate stabilization principles in pulse-phase control system of tensile testing machine R-0.5 electric drive, which is involved in material compression mode by using special reverse mechanism are analyzed. The main ways of electromagnetic interference propagation to low-current nodes of the control and monitoring system are revealed, and also the basic measures for strengthening of its electromagnetic compatibility level with a powerful source of pulse current are offered. The interface design features of measuring units for the loading force and compression rate with rotating mechanisms of tensile testing machine are disclosed and the main factors affecting on accuracy of absolute angular position signal conversion from the magnetic encoder PWM output are noted.

Keywords: tensile testing machine, monitoring system, SPS process.

Постановка проблеми. В даний час все більшу значимість набувають роботи, спрямовані на розробку нових способів отримання матеріалів з поліпшеними фізичними та функціональними властивостями. Одним з найбільш перспективних методів є іскро-плазмове спікання (ІПС) дисперсних композитів. Для забезпечення якісного та ефективного спікання необхідно проводити синхронний моніторинг одразу кількох параметрів, що впливають на даний процес: температуру, струм, напругу, силу навантаження і т. д. Попре те складність визначення зазначених параметрів процесу залежить на сам перед від ефективності рівня забезпечення електромагнітної сумісності системи керування та моніторингу з технологічними вузлами ІПС установки.

Аналіз останніх досліджень й публікацій. Ця стаття є логічним продовженням попереднього циклу робіт авторів по даній тематиці [1-3] та присвячена, вирішенню актуальної задачі синтезу та розробці основних функціональних елементів системи керування та моніторингу, що забезпечать керуваність процесу ІПС за рахунок автоматизації вимірювання інформаційних сигналів у напрямку покращення якості композитних виробів.

Постановка завдання. Метою роботи є створення апаратно-програмного комплексу керування та моніторингу установки іскро-плазмове спікання, що включає механічне

навантаження вихідних дисперсних композицій, систему реєстрації та управління, систему охолодження та вакуумування для одержання дисперснозміцнених композитів.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, фізичний експеримент, реєстрація швидкоплинних електричних процесів.

Об'єкт дослідження – принципова схема технологічного вузла експериментального обладнання для іскро-плазмового спікання дисперсних композицій.

Система керування електромеханічним пресом (розривна машина Р-0,5)

В процесі іскро - плазмового спікання порошків чимало важливим завданням є підтримання рівномірного навантаження матеріалу, що знаходиться в прес формі. Як правило, механізми, що дозволяють створювати високий тиск розрізняються за типом подання навантаження (переміщення траверси) в основу яких покладено гідравлічний або гвинтовий принцип дії [4]. 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 регулювання швидкості навантаження в таких механізмах часто виконується за допомогою систем автоматичного керування побудованої на базі електроприводу змінного або постійного струму [5]. Одна з таких систем використовується в машині розривної Р-0,5, функціональні можливості якої розширюються, шляхом використання спеціального реверсорного механізму, що дозволяє також проводити випробування матеріалу на його стиснення. Головними елементами електроприводу є напівпровідниковий перетворювач і двигун постійного струму. Сполучною ланкою між цими двома елементами є система імпульсно-фазового керування СІФК (рис.1). Основним завданням СІФК є забезпечення плавного регулювання швидкості обертання валу двигуна, що дозволяє підтримувати постійну швидкість руху активного захвату машини. Регулювання і стабілізація обертів двигуна досягається за рахунок введення негативного зворотного зв'язку по швидкості.

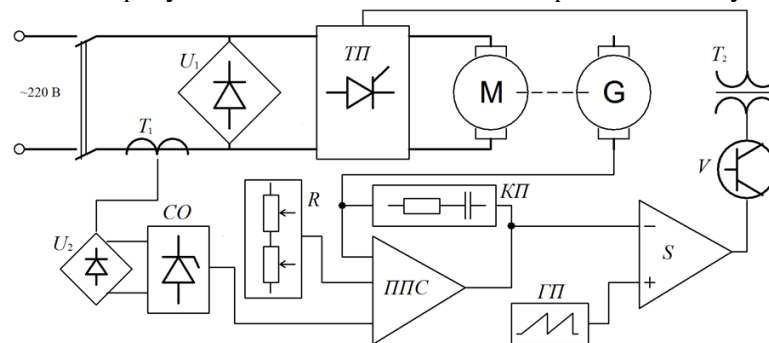


Рис.1. Структурна блок схема електроприводу Р-0,5

М – електродвигун постійного струму; *ТП* – тиристорний перетворювач; *S* – ШІМ компаратор; *ППС* – підсилювач постійного струму; *ТГ* – тахогенератор; *U₁*, *U₂* – діодні випрямлячі, *СО* – вузол струмообмеження; *КП* – коригувальний пристрій; *ГП* – генератор пилкоподібної напруги, *T₁* – мережевий трансформатор, *T₂* – імпульсний трансформатор, *V* – транзистор.

При цьому, система керування електроприводом розглядається, тільки як складова частина загальної системи автоматичного управління всім комплексом технологічного процесу вакуумного спікання й механічного навантаження оброблюваних порошкових сумішей. Виконавчим механізмом електроприводу є електродвигун постійного струму, оснащений тахогенератором для контролю оборотів валу. У міру стиснення зразка навантаження на валу двигуна поступово зростає, що тягне до зниження швидкості обертання валу і як наслідок до порушення сталості швидкості навантаження матеріалу. Для її підтримки необхідно поступово підвищувати потужність, що підводиться до електродвигуна. Однак коректний приріст потужності може бути оцінений тільки завдяки введенню слідкуючого зв'язку за швидкістю. Такий вид зв'язку забезпечує сигнал напруги, що знімається з обмотки тахогенератора, який пропорційний швидкості обертання валу двигуна. До складу СІФК входять генератор пилкоподібної напруги [6], коригувальний підсилювач, ШІМ компаратор, випрямляч сигналу тахогенератора, силовий перетворювач, логіка формування керуючого сигналу, а також блок захисту по перевищенню струму навантаження. В основу даного пристрою покладений принцип формування імпульсів з регулюванням їх шпаруватості. Центральним елементом пристрою є ШІМ - компаратор [7], функціональним призначенням якого є порівняння сигналів, що надходять на його входи для формування результуючого вихідного сигналу. Так як компаратор це той же підсилювач тільки з нескінченним

коефіцієнтом посилення, то його вихідним сигналом будуть пороги напруг, прив'язані до рівнів напруги джерела живлення. При цьому частота перемикання компаратора задається частотою пилоподібної напруги, яка надходить на його прямий вхід, а тривалість імпульсу визначається сигналом завдання, який подається на його інверсний вхід. На підставі порівняння виробляється результуючий сигнал широтно-імпульсної модуляції. Розмах напруги пилоподібного сигналу та його частота залишаються постійними в часі і задаються за допомогою пасивних елементів генераторного блоку. У свою чергу сигнал завдання, що надходить на компаратор з коригуючого пристрою, є постійно змінюваним сигналом, який формується на підставі посилення помилки незгодженості вхідного і вихідного сигналів системи керування. Коригувальний пристрій являє собою сумуючий диференційний підсилювач з підсумовуванням напруги завдання і напруги з тахогенератора на прямому його вході за вирахуванням опорної напруги на його інверсному вході. Результуючий сигнал може бути визначений, як $U_{\text{зад}} = K_y \cdot (U_0 + U_{\text{ТХГ}} - U_{\text{оп}})$. Додаткове інтегрування результуючого сигналу завдання дозволяє також усунути небажані пульсації напруги тахогенератора і як наслідок підвищити точність регулювання. У точках перетину сигналу завдання з пилоподібним сигналом буде відбуватися перемикання виходу компаратора, при цьому рівень сигналу завдання близький до рівня опорної напруги, тобто коли їх різниця близька до нуля, це викличе максимально можливе розширення вихідного імпульсу, а в разі збільшення різниці до його звуження. Таким чином, при початковому запуску приводу сигнал з тахогенератора ще тимчасово відсутній, що змушує компаратор сформувати найбільше розширення імпульсу. По мірі розгону двигуна сигнал з обмотки тахогенератора зростає і як наслідок результуючий керуючий імпульс ШІМ - компаратора звужується. Якщо в процесі роботи двигуна необхідно змінити його обороти, то для здійснення його м'якого пуску або гальмування в корегуючому пристрої передбачена відповідна інтегруюча ланка, що забезпечує плавне зростання і спад напруги завдання. Також в системі передбачений захист по перевантаженню, що досягається шляхом відстеження струму якірного ланцюга двигуна блоком струмового захисту. В силу того, що сигнал управління виробляється єдиним ШІМ компаратором, в системі також передбачена логіка, що дозволяє розподілити імпульси тактування по діагональним парам транзисторів, які відповідають за потрібний напрямок переміщення траверси. Кожний транзистор міста керується від окремого оптично розділеного драйвера. Напруга на силовий міст подається після двуніпівперіодного діодного випрямляча зашунтованого фільтруючою електролітичною ємністю.

Сполучення системи керування процесом ІПС з електричними вузлами електромеханічного пресу, генератором імпульсного струму "Гефест" [3], системами охолодження та вакуумування.

Системи керування та моніторингу об'єднано та виконано на базі промислового восьмирозрядного мікроконтролерного модулю Atmega2560 [8].

Живлення МК відбувається через USB роз'їм, вбудований на його платі та підключений відповідним кабелем до одного з портів персонального комп'ютера. Структурну схему сполучення мікроконтролера з технологічними вузлами установки ІПС представлено на рис. 2.



Рис.2. Структурна схема системи керування ІПС

Окрім контакторів машини та генератора до релейного модуля під'єднуються обмотки магнітних контакторів, що вмикають відповідно вакуумний або водяний насоси. В свою чергу, рівень вакууму у вакуумній камері та температура рідини охолоджувального контуру є сигналами зворотного зв'язку, за якими виконується автоматична підтримка кожного із параметрів. Для сполучення МК з контакторами систем керування електромеханічного пресу та генератором імпульсного струму використано двохстановий 16-канальний релейний модуль [9].

Програмне керування швидкістю стиснення досягається через механічний зв'язок потенціометрів регулювання грубо / точно з кроковими двигунами, які під'єднуються до МК через драйвери керування DRV8825 [10]. З'єднання валу крокового двигуна зі шпинделем потенціометра досягається через обтискову муфту, яка скріплює обертові механізми радіально врізаними гвинтами. Спеціальний стенд, на якому співвісно розміщуються потенціометри та крокові двигуни, показано на рис. 3.

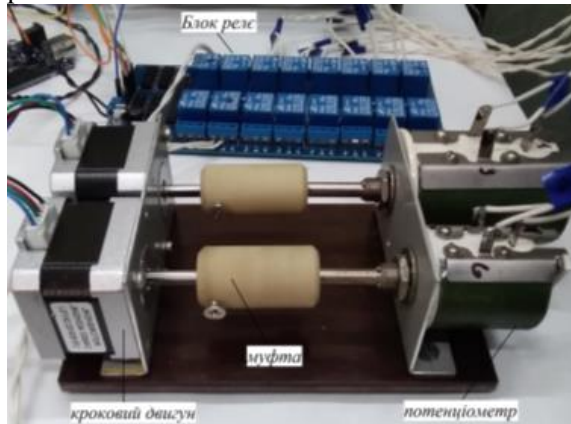


Рис. 3. Сполучення потенціометрів із кроковими двигунами

Модулі виміру напруги, струму та температури на графітовій матриці від генератора імпульсного струму «Гефест»

Технологія спікання порошкового матеріалу, який розміщено у графітовій матриці стиснутого з обох боків пуансонами під дією, як струму високої щільності, так й зовнішнього механізму навантаження, відбувається за температурними показниками до 1500 °С. Вимірювання температури нагрітого зразка прийнято проводити хромель-алюмельовою термопарою [11]. Сигнал із термопари на рівні від 5 мВ до 50 мВ подається на вхід інструментального диференціального підсилювача AD627 [12] та підтягується до рівня, достатнього для оцифрування, й направляється на один із входів вбудованого модуля АЦП МК Atmega2560. Крім того, для усунення попадання високої напруги на порти МК в схемі передбачено гальванічну розв'язку силової частини від вимірювального тракту на основі лінійної оптопари ПЛ300 [11]. Таку обережність пов'язано з можливістю виникнення величезних значень електрорушійної сили (ЕРУС) самоіндукції на зразку, що спікається, в результаті короткочасного обриву струму, що проходить через нього величиною порядку 1 кА і більше. Коефіцієнт посилення підсилювача AD627 визначається за формулою та задається резистором на його вході:

$$K_{\pi} = 5 + 200000 \text{ Ом} / R_{\text{г}}, \quad (1)$$

де $R_{\text{г}}$ – опір резистора на вході підсилювача AD627, Ом.

Значення цього коефіцієнту задається з урахуванням напруги насичення обраної термопари, а результуючий сигнал не повинен перевищувати опорної напруги АЦП МК. Максимальне значення хромель-алюмельової термопари при температурі 1350 °С сягає 50 мВ. Якщо коефіцієнт посилення дорівнює $K_{\pi}=45$, амплітуда сигналу буде сягати 2,43 В, що є прийнятною напругою на вході АЦП. Лінійну оптопару ПЛ300 може бути налаштовано, як для фотодіодного, так і для фотогальванічного режиму підсилювання. Як відомо, фотогальванічна топологія забезпечує кращу лінійність, найнижчий рівень шуму та дрейфові характеристики. Якщо лінійний оптрон побудувати з ОП LM358 [13], то лінійність передачі можна отримати на частоті сигналу приблизно до 2 кГц. Так як процес нагріву або охолодження зразку в матриці відбувається достатньо повільно, то отримана частотна смуга пропускання оптрона вважається прийнятною.

Для виміру струму у навантаженні використано датчик струму компенсаційного типу на основі ефекту Холла [14]. Модель CSNR161 дозволяє вимірювати змінний, постійний або

імпульсний струми амплітудою ± 200 А з частотою до 150 кГц. Генератор імпульсного струму працює на частоті до 50 кГц, але амплітуда імпульсів може сягати 1200 А. Струмознімальний контакт генератора виконано у вигляді широкої мідної шини розміром 70 мм \times 50 мм. Переріз вікна обраного датчика струму складає всього 10 мм \times 13,5 мм, тому його вбудовано у шину таким чином, щоб охоплювати тільки деяку частину її поверхневої площі. Якщо зробити припущення, що вимірювальний струм розподіляється рівномірно по перерізу шини, то частину струму, що проходить через вікно датчика, можна визначити за відношенням їх перетинів $S_d/S_{ш} = 1/7$. Живлення датчика здійснюється від біполярного джерела ± 12 В. Вихід датчика в своєму роді є джерелом струму, який навантажено на опір порядку від 30 Ом до 40 Ом. Внаслідок цього сигнал напруги на резисторі виявляється пропорційним струму в первинному колі, поділеному 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, В;

N – кількість витків компенсаційної обмотки, од.;

R_L – навантажувальний опір, Ом.

Для обраної моделі датчика $N=1000$, $R_L=30$ Ом. Результуюче значення струму розраховується з урахуванням коефіцієнту відношення перетинів.

Так як сигнал струму у своєму спектрі може містити високочастотну складову, то перед подачею на вхід АЦП його потрібно попередньо проінтегрувати (згладити) для отримання середнього значення. Треба також зазначити, про необхідність введення випрямляючої ланки сигналу датчика струму на випадок, якщо спікання буде відбуватися від генератора змінного струму. Випрямляч зібраний на двох ОП, тому потребує біполярного джерела для їх живлення. 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 із входів АЦП МК для подальшої обробки. Вимірювання напруги на навантаженні теж відбувається за подібним принципом як і для струму, але з тою відмінністю, що перед подачею на АЦП МК усереднений сигнал напруги подається на лінійний оптрон ІЛ300 для забезпечення гальванічного розв'язування з силовим контуром. Сигнал напруги з вузлів навантаження подається на вхід блоку напруги через коаксіальну екрановану лінію. Під'єднання лінії з обох її кінців як до навантаження, так і до блоку здійснюється через байонетні роз'єми.

Генератор імпульсного струму «Гефест» [3], представляє собою напівпровідниковий перетворювач із однотактною схемою керування однією транзисторною діагональною парою мосту. В протилежній діагоналі знаходяться рекуперативна швидкодіюча діодна пара. Керуючі сигнали на затвори транзисторів надходять за принципом широтно-імпульсної модуляції сигналу від одноканального контролера UC3845 [15]. Частота тактування задається фіксованою на рівні 50 кГц зовнішнім RC ланцюгом. Контролер має зворотній зв'язок за струмом у первинному колі силового трансформатора, що дозволяє виконувати стабілізацію струму через динамічне навантаження процесу ПС. Генератор видає багатоскладовий сигнал струму (напруги), який окрім основної гармоніки (50 кГц) вміщує високочастотну складову на рівні 20 МГц. Встановлено, що збудження високої частоти відбувається в моменти перемикання транзисторів. Це пов'язано з присутністю в електромагнітній системі перетворювача паразитних ємнісних зв'язків, як між обмотками трансформатора, так й провідниками печатної плати силового модуля. Власні частоти коливання цих контурів співмірні з тривалістю перемикання транзистору. Струмові лінії, що з'єднують генератор з камерою через гнучкий силовий кабель, представляють собою відкритий коливальний контур. Як відомо, високочастотні коливання струму у відкритому контурі можуть збуджувати потужну електромагнітну перешкоду, яка спроможна виводити з ладу слабкоструміву електронну техніку, призводити до спотворення або зашумлення інформаційних сигналів, та як наслідок до великої похибки обчислення. Тому усі вразливі слабкострумові блоки та вимірювальні кабелі повинні знаходитися у екранованій оболонці. При цьому одна частина електромагнітної перешкоди з виходу генератора розповсюджується у ефірному просторі, а інша за рахунок безпосереднього електричного зв'язку перетворювача потрапляє у мережу. На рис. 4,а наведено осцилограму напруги на елементах перетворювача генератора. Окрім високочастотної складової, що майже становить 200 кГц, у сигналі присутня високочастотна гармоніка, спричинена процесом перемикання транзисторів перетворювача.

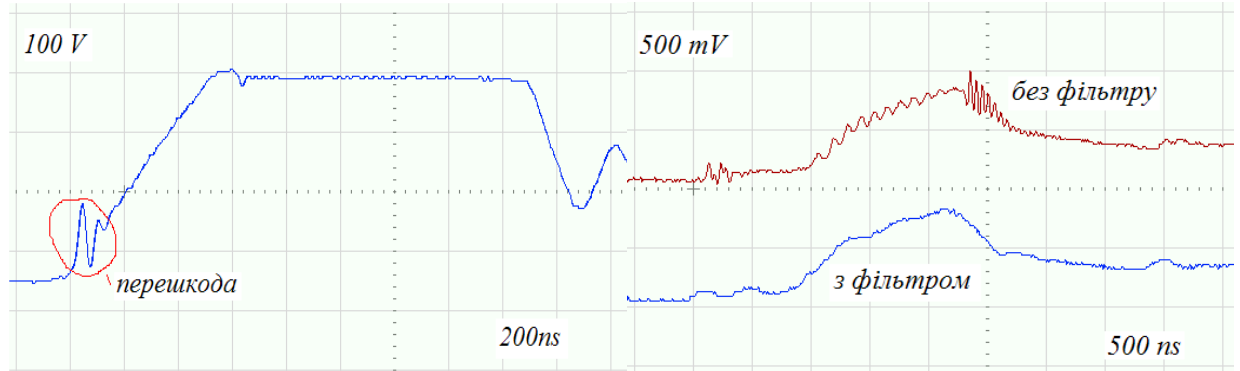


Рис.4. Осцилограми імпульсу напруги: а) на силовому транзисторі генератора струму “Гефест”; б) порівняння сигналів на вході блоку вимірювання напруги

Тому вкрай важливою проблематикою процесу ПС є забезпечення електромагнітної сумісності електрообладнання з потужним джерелом імпульсного струму. У цьому сенсі живлення потенційно вразливої техніки повинно відбуватися через спеціальний клас мережевих фільтрів або у автономному режимі від незалежного джерела. Блок живлення повинен бути екранованим та розташовуватися в безпосередній близькості з перетворювачем сигналу датчика для забезпечення мінімальної довжини лінії живлення. Крім того, живлення плати перетворювача постійним струмом захищає з’єднувальні лінії від збудження електромагнітної перешкоди. Сигнал напруги, що поступає по коаксіальній лінії перед подачею на перетворювальний блок, попередньо пропускається через LC фільтр нижніх частот з частотою зрізу амплітудо-частотної характеристики (АЧХ) біля 2 МГц. Узгоджувальний резистор лінії 50 Ом вбудовано у корпусі фільтра. На рис. 4,б показано суміщені осцилограми імпульсів на вході блоку вимірювання напруги з фільтрацією високочастотної складової та без неї.

Вимірювання проводилось цифровим запам’ятовуючим осцилографом SDS1022, який під’єднувався до мережі через розв’язувальний трансформатор. Для зняття характеристик напруги генератор струму навантажувався на активний опір у вигляді біфілярного шунта $R_{ш}=0,035$ Ом з роз’ємом під коаксіальний кабель. Фільтрування сигналу є обов’язковою процедурою, так як стримує просування високочастотної перешкоди до наступних ланок блока перетворення напруги. Зовнішній вигляд розглянутих блоків представлено на рис. 5.

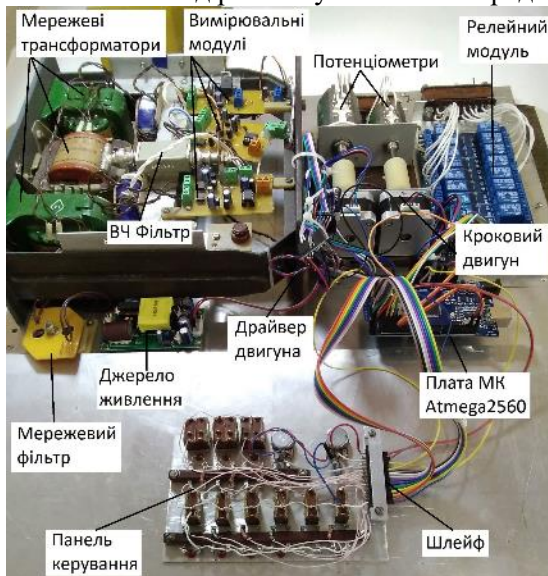


Рис.5. Блоки вимірювання напруги, струму й температури

запускається від діаметрально намагніченого двополюсного магніту, який повинен розміщуватися паралельно торцевій поверхні мікросхеми на висоті від 0,5 мм до 1,8 мм. Матеріал магніту – неодим-залізо-бор у формі таблетки діаметром 6 мм і висотою 2,5 мм. Зусилля, що передається

Кожний блок живиться від свого незалежного мережевого понижуючого трансформатора з багатьма гальванічно роз’єднаними вторинними обмотками. Цей підхід зменшує електромагнітний взаємозв’язок між блоками, тим самим підвищує точність вимірювання сигналів. Усі три блоки разом з трансформаторами закріплено на металевому каркасі, який розміщено у корпусі приладу системи керування та моніторингу ПС.

Модулі виміру сили навантаження та швидкості стиснення порошкового матеріалу (магнітний енкодер)

Силу навантаження порошкової суміші у графітовій матриці та швидкість її стиснення вирішено аналізувати на основі кута повороту відповідного обертового механізму машини Р-0,5. У ролі кутового вимірювача використовується інкрементальний магнітний енкодер на основі ефекту Холла AS5040 [16], що має роздільну здатність з дозволом $0,35^\circ$ або 1024 імпульсів за оборот. Дія датчика

порошкової суміші під дією реверсивного механізму, прямопропорційне куту повороту шестерні силовимірювача, тому для його визначення потрібне знання про абсолютне кутове положення обертового механізму, яке надається за ШІМ сигналом магнітного енкодера. Робочий цикл ШІМ прямопропорційний абсолютному кутовому положенню, яке визначається за формулою:

$$\varphi_{\text{роз}} = \frac{t_{\text{он}} \cdot 1025}{t_{\text{он}} + t_{\text{оф}}} - 1, \quad (3)$$

де $t_{\text{он}}$ – тривалість імпульсу, с;
 $t_{\text{оф}}$ – тривалість паузи, с.

Аналоговий сигнал зручніше вимірювати, ніж тривалість імпульсу, тому перед подачею на МК сигнал ШІМ усереднюється за допомогою RC фільтра нижніх частот. Параметри фільтра задаються такими, щоб не перевантажувати вихід ШІМ та забезпечувати меншу пульсацію. Для таких значень фільтра, як $R_{\text{ф}}=10$ кОм, $C_{\text{ф}}=47$ мкФ постійна часу ланцюга буде становити біля 0,47 с. Збільшення постійної часу RC ланки зменшує пульсації, але водночас зменшує час відповіді системи, який буде помітно відчутним при високих значеннях швидкостях зростання сили стиснення. На відміну від сили навантаження для визначення швидкості стиснення знання абсолютного кутового положення обертового механізму не є обов'язковою умовою, тому для цього більш доцільно використовувати інкрементальний вихід енкодера.

Плата енкодера, як блоку сили навантаження, так й швидкості стиснення, є конструктивно ідентичними, але за призначенням мають відмінні інтерфейси сполучення з МК та місце розташування над обертовим механізмом машини P0,5. Зовнішній вигляд кожного з блоків зображено на рис. 6, а, б.

Несуча панель з платою енкодера блока швидкості стиснення (див. рис. 6, а) кріпиться до верхнього швелеру машини та розміщується над її правим черв'ячним (ходовим) гвинтом. У глухий технологічний отвір черв'ячного гвинта вставлено втулку, що проходить через отвір несучої панелі та виходить над поверхнею енкодера. У сидлі верхнього краю втулки знаходиться двополосний магніт, який виставляється над поверхнею енкодера так, щоб проміжок між їх зовнішніми поверхнями становив не більше, ніж 2 мм. Початкове радіальне положення магніту блока швидкості стиснення може бути виставлено довільно.

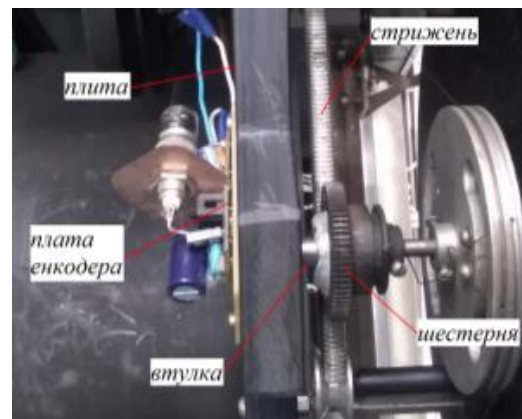


Рис.6. Кріплення магнітних енкодерів до машини:

а) блок швидкості стиснення; б) блок сили навантаження

Панель, що несе плату енкодера блока сили навантаження (див. рис. 6, б) кріпиться до задньої стінки силовимірювача машини та розміщується над осью шестерні стрілки циферблата, яка зчіплюється із зубчатою рейкою, що штовхається важелем маятника. Як й для попереднього принципу кріплення, у технологічний отвір осьової шестерні також вставлено втулку, що несе двополосний магніт. Проміжок між зовнішніми поверхнями енкодера та магніта дорівнює не більше 2 мм. Механічний нуль магніту виставляється радіальним обертанням втулки попередньо до її остаточного склеювання з шестернею.

Експериментальні дослідження показали, що на точність вимірювання абсолютного кутового положення впливають наступні чинники:

- стабільність напруги живлення магнітного енкодера;
- рівень пульсацій на виході RC фільтра;

- в) нелінійність кута через перекося магніту відносно поверхні датчика;
- г) нелінійність кута через граничне відхилення магніту від геометричного центру датчика;
- д) брязкіт заднього фронту імпульсу ШІМ через перевищення граничної відстані магніту до поверхні датчика;
- е) нелінійність аналогово-цифрового перетворювача.

За технічною документацією ємність вхідного та вихідного електролітичних конденсаторів лінійного стабілізатора напруги L7805 [17] повинна становити на рівні 10 мкФ та 1 мкФ відповідно. Але як показує практика, навіть для живлення енкодера AS5040 цієї ємності виявляється недостатньо. Виявлено, що на виході стабілізатора присутня гармонійна складова з повним розмахом амплітуди практично у 15 мВ та частотою 2 МГц. Основним чинником шуму у стабілізаторах є його внутрішнє джерело опорної напруги, тому для його пригнічення потрібно використовувати фільтр нижніх частот або ставити вихідні конденсатори з високим еквівалентним послідовним опором. Вимірювання показали, що збільшення вихідної ємності стабілізатора напруги на порядок призводить до майже трьохкратного зменшення амплітуди власних коливань на його виході. Але подальше нарощення вихідної ємності вже не дає суттєвого пригнічення цього коливання. Крім того, ця гармоніка буде накладатися на пульсації усередненого ШІМ сигналу з виходу RC фільтру. По результатам експериментів, встановлено, що амплітуда пульсації з ростом постійної часу інтегрувальної ланки зменшується, але при цьому сповільнюється відгук системи на різкі стрибки сигналу сили навантаження.

Організації програмної взаємодії мікроконтролера з комп'ютером

У програмі, що заноситься у пам'ять мікроконтролера, відбуваються наступні дії: сканування стану ліній аналогових та цифрових портів; зберігання інформаційних параметрів у тимчасовому масиві; обробка зовнішніх переривань; обробка та виконання завдання на запит, що надходить з комп'ютера або панелі керування.

Структура програми, окрім основної функції «main()», включає функції обробки таких переривань, як від таймерів лічильників T0 та T1; по завершенню перетворення АЦП; по завершенню прийому даних через UART; за появою зовнішнього сигналу від енкодера. Окрім того, є функції визначення координат позиціонування крокового двигуна та інтерфейсу його керування для драйвера DRV8825.

На початку функції «main()» відбувається ініціалізація портів вводу-виводу та апаратної периферії МК. Контактори пульта керування (кнопки і тумблери) одним зі своїх виводів з'єднуються безпосередньо з вхідними лініями МК, які програмно конфігуруються, як високоімпедансні входи з внутрішньою підтяжкою через 100 кОм резистори до його напруги живлення 5 В. Іншим вільним виводом усі контактори панелі під'єднуються до цифрової землі блока живлення МК. Зміна стану кожної лінії з високого до низького рівня відбувається при натисканні контактора.

Лінії порту, що живлять світлодіоди панелі керування налаштовуються, як низькоімпедансні виходи. Кнопки пульта, такі як «стоп», «вгору», «вниз», «прискорено» відповідають за керування електромеханічним пресом. Кнопки вмикання та вимикання струму у навантаженні відповідають за керування генератором струму «Гефест». Програма послідовно сканує стан кожної лінії та у випадку, якщо у конфігураційному регістрі фізичного рівня порту з'являється логічний нуль, то виконується звернення до дешифратора плати релейного блоку. Реле вмикається при наявності за низьким рівнем лінії дешифратора, тому живлення релейного блоку вмикається після початкового запуску МК та ініціалізації портів. Процедура сканування стану контакторів панелі керування виконується у нескінченному циклі кожен раз через 10 мс. Також на панелі керування виводяться ручки змінних резисторів для завдання швидкості стиснення електромеханічного пресу. Змінний резистор послідовно з постійним утворює дільник напруги, з якого напруга подається на вхід АЦП МК та варіюється у діапазоні від 0,68 В до 5 В (відповідно крайнє ліве та крайнє праве положення ручки резистора). Для зменшення флуктуацій напруги паралельно крайнім виводам змінного резистора під'єднується керамічний конденсатор ємністю 0,1 мкФ. Наступним кроком програми є обробка команди, що надходить по послідовному модулю UART з комп'ютера. Спочатку відбувається перевірка прапора, що сигналізує про заповнення трьохбайтового буфера UART команди. У першому байті міститься код команди, а наступні два байти можуть утримувати дані, які необхідні для виконання цієї команди. Наприклад, це може бути кількість кроків двигуна для регулювання швидкості стиснення або граничне значення сили навантаження, при якому виконується автоматична зупинка електромеханічного пресу. Кожна команда кодується латинським символом верхнього регістру. Розпізнавання команди виконується за допомогою

конструкції гілкової інструкції «else if ()». Якщо команду не знайдено, то до комп'ютера відправляється нульовий байт. У програмі маються декілька функцій-обробників як внутрішніх, так і зовнішніх переривань. Запуск модуля АЦП відбувається у тілі функції обробника переривання по переповненню 8-бітного таймера лічильника T0. При частоті тактування таймера в 250 кГц така подія буде виконуватися 976 раз за секунду. Так як сканування каналів виконується послідовно й одразу по п'яти датчикам, то результуюча частота дискретизації по одному каналу буде розділятися кількістю каналів. У тілі функції обробника переривання по завершенню перетворення АЦП зберігається поточне значення у масив збору ШС та здійснюється перехід до наступного каналу АЦП. Після того, як масив заповнено, на наступному етапі відбувається оновлення попередніх даних з урахуванням, що їх уже передано на запит до комп'ютера. Підрахунок кількості імпульсів з інкрементального виходу магнітного енкодера, що відповідає за швидкість стиснення, виконується у тілі функції обробки зовнішнього переривання каналу int0 МК. Функція викликається при наявності на вході int0 сигналу з наростаючим переднім фронтом. Результуюча кількість підраховується за інтервал часу 10 с, потім відправляється до ПК. Для фіксування цього інтервалу використовується 16-бітний таймер-лічильник, частота якого з урахуванням коефіцієнта ділення становить 15625 Гц. Таймер використовується у режимі порівняння. Кожен раз по досягненню рахункового регістра таймера певного значення, яке відповідає значенню регістра порівняння (відносяться до периферійних пристроїв мікроконтролера), відбувається виклик функції обробки цієї події. Значення рахункового регістра кожен раз обнуляється для підготовки до наступної обчислювальної ітерації. Перехід до основного програмного циклу у функції «main()» здійснюється після виходу із підпрограм обробників розглянутих апаратних переривань.

Усі перетворення над двобайтовими числами з урахуванням розмірності (одиниці виміру) кожного параметра виконуються програмою комп'ютера. Цифрові дані таких параметрів, як напруга, струм, температура та тиск спочатку приводяться до значення сигналу напруги відповідно для кожного вимірювального блоку, а потім розраховуються остаточні значення цих параметрів з урахуванням апроксимаційних коефіцієнтів.

Висновки. Експериментально встановлено основні чинники, які впливають на точність вимірювання абсолютного кута повороту з аналогового виходу магнітного енкодера при обертанні шестерні силовимірювача електромеханічного пресу.

Виготовлено модернізований макетний варіант системи керування та моніторингу процесу ШС та виконано її сполучення з електричними вузлами електромеханічного пресу, генератора імпульсного струму «Гефест-10», системами охолодження та вакуумування. Для підвищення стійкості системи до електромагнітних перешкод виконано додаткове екранування її вимірювальних блоків, які розміщено на обертових деталях електромеханічного пресу. Крім того, у мережі живлення вимірювальних блоків встановлено завододавні фільтри для пригнічення високочастотних коливань, що розповсюджуються при перемиканні силових ключів напівпровідникового перетворювача генератора імпульсного струму.

Перевірено роботу комп'ютерного програмного забезпечення на базі мікроконтролерного модуля atmega2560 системи моніторингу процесу спікання, що дозволяє відтворювати та зберігати наступні характеристики процесу ШС: температуру спікання зразка, силу механічного навантаження, середнє значення модульованого імпульсного струму та напруги на зразку, швидкість його стиснення, виділену потужність, та залишковий рівень тиску у вакуумній камері.

Список використаної літератури

1. Сизоненко, О.М., Христо О.І. Інформаційно-вимірювальна система SPS процесу спікання дисперсних матеріалів // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2021, No71, DOI 10.36910/6775.24153966.2021.71.49
2. 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.
3. Сизоненко О.М., Івлієв 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

4. Цурпал І. А. Механіка матеріалів і конструкцій : навч. посібник. – К.: Вища освіта, 2005. – 367 с.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування. Київ: Либідь, 1997.– 544 с.
6. Triangular wave generator [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.circuitstoday.com/triangular-wave-generator>
7. PWM generator circuit. Texas Instruments. [Електронний ресурс]. – <https://www.ti.com/lit/sboa212>.
8. 8-bit Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>
9. 16-Channel Relay Module Board [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.ucronics.com/download/Amazon/U604302_print.pdf
10. DRV8825 Stepper Motor Controller IC [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>
11. Геращенко О.А. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965. 304 с.
12. Micropower, Single- and Dual-Supply, Rail-to-Rail Instrumentation Amplifier [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD627.pdf>
13. Vishay Semiconductors. IL300 Datasheet, Linear Optocoupler. URL: <http://www.vishay.com/docs/83622/il300.pdf>
14. Closed Loop Current Sensors URL: <http://www.farnell.com/datasheets/2602959.pdf>
15. UCx84x Current-Mode PWM Controllers [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uc2845.pdf>.
16. 10Bit 360° Programmable Magnetic Rotary Encoder. URL: https://ams.com/documents/20143/36005/AS5040_DS000374_3-00.pdf
17. μ A7800 Series Positive-Voltage Regulators [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.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., завідувач кафедри матеріалознавства і технологій металів, д.т.н., професор (Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв)