

УДК 621.785.012.3:681.5.083

doi: 10.32620/akt.2022.4.08

О. А. ПАВЛЕНКО¹, Є. О. АКСЬОНОВ², О. В. ШИПУЛЬ¹, С. О. ЗАКЛІНСЬКИЙ¹¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна² Харківський національний університет міського господарства
імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

МОДУЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ АВТОМАТИЧНИЙ РЕЄСТРАТОР ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Предметом дослідження є технічні та програмні засоби побудови цифрових близнюків швидкоплинних процесів у замкнутій робочій камері термоімпульсної машини під час фінішного оброблення деталей. **Метою** роботи є розроблення універсального модульного автономного пристрою, який в автономному автоматичному режимі реєструє температуру газів, їхній тиск, швидкість проходження ударних хвиль та інші параметри, що діють безпосередньо на поверхні деталей. **Завдання** дослідження полягають у визначенні форми та розмірів корпусу реєструючого пристрою, призначенні місць розташування на ньому датчиків та розробленні програмно-апаратного комплексу керування процесом вимірювання та реєстрації робочих параметрів із метою їхнього подальшого використання в роботі цифрового близнюка процесу. У **результаті** проведених робіт виявлено, що найпридатнішою формою для реєстратора є восьмигранна призма, яка складається з деталей лише двох типорозмірів – восьмигранних торцевих та призматичних бокових стінок. Деталі реєстратора є взаємозамінними. Форма корпусу дає можливість встановлювати реєстратор у робочій камері вертикально, горизонтально, а також обертати його з фіксованим кроком 15° навколо поздовжньої осі. Залежно від плану експерименту на стінках корпусу реєстратора у визначених місцях встановлюється потрібна кількість датчиків відповідного типу. Оскільки деталі реєстратора взаємозамінні, існує можливість сформувати набори додаткових модулів із датчиками різноманітного призначення, та оперативно змінювати їх упродовж проведення експериментальних досліджень. Також розроблено спеціалізований автономний програмно-апаратний комплекс, який в умовах обмеженого об'єму внутрішнього простору реєстратора забезпечує автоматичний запуск збирання інформації з датчиків, її первинне перетворення, збереження отриманих результатів експериментів у внутрішній постійній пам'ятовуючій пристрій і передавання на персональний комп'ютер для подальшого використання в ланцюзі роботи цифрового близнюка процесу.

Ключові слова: цифровий близнюк процесу; автономний реєстратор параметрів; автоматичні вимірювання; термоімпульсне оброблення.

Вступ

Сутність процесу термоімпульсного оброблення полягає в очищенні деталей машинобудування від задирок, облою, інших дефектів та забруднень, що утворюються на їхніх кромках та поверхнях під час механічного оброблення, литва, штампування тощо шляхом впливу на них потоком високої енергії від згоряння паливної суміші з утворенням ударних хвиль в робочій камері замкнутого об'єму [1 – 4]. Деталі, які оброблюються, розташовуються всередині робочої камери термоімпульсного устаткування, де за рахунок впливу інтенсивного теплового потоку від згоряння паливної суміші відбувається оплавлення задирок, випаровування або зрив із поверхні забруднень ударними хвилями.

Термоімпульсний метод оброблення детонуючими газовими сумішами переважає всі відомі мето-

ди очищення та опорядження [5 – 7]. Він не лише дозволяє проводити опорядження крайок деталей довільної форми з продуктивністю в 5...30 разів вищою, ніж у інших методів оброблення, але й дає можливість поєднання в одному процесі операцій опорядження крайок та очищення поверхонь, у тому числі порожнин складної форми.

Суттєвим недоліком наявного обладнання, що використовує термоенергетичний метод, є необхідність проведення численних експериментів для вибору налаштувань обладнання та розроблення технологічного оснащення. Зважаючи на велику кількість параметрів, що впливають на процеси фінішного оброблення детонуючими газовими сумішами, суто експериментальний підхід для встановлення їх технологічних параметрів не дає змоги забезпечити стабільну та прогнозовану якість оброблення.

З іншого боку, розроблені числові моделі процесів і роботи систем обладнання оброблення детонуючими газовими сумішами потребують додаткового налаштування за результатами експериментальних досліджень. У тому числі на основі експериментальних даних за параметрами на поверхні оброблюваної деталі, зокрема, тиску, швидкості проходження ударної хвилі й температури під час безпосереднього контакту з продуктами згоряння [8 – 10]. Але саме тут виникає питання можливості проведення вимірювання вказаних параметрів. Основну проблему становить не те, що датчики мають різну конструкцію, розміри, приєднувальні розміри, не те, що для проведення різних досліджень їх необхідно встановлювати в різних комбінаціях і в різних місцях деталі, а те, що вони мають бути під'єднані до зовнішніх пристроїв реєстрації. Єдиним місцем, де можна було б так розташувати датчики, є спеціальні отвори в корпусі робочої камери. До того ж кожний новий експеримент може потребувати нових датчиків та нових отворів для них. Через таке міцність стінок камери знижуватиметься. Тому, з огляду на зауважене вище, реалізувати такий підхід неможливо, й актуальним є питання розроблення автономної системи реєстрації експериментальних даних для їх подальшого використання.

У наукових дослідженнях та промисловості, особливо в останні роки, використовуються різноманітні автоматичні реєстратори даних. Особливо широко вони застосовуються в тих місцях, де немає потреби в постійному перебуванні людини або там, де є високий ризик її травмування чи впливу небезпечних чинників довкілля. Здебільшого такі реєстратори живляться від стаціонарної електромережі та передають інформацію через підключення до комп'ютерної мережі підприємства. Іншим різновидом є автономні реєстратори. Вони використовуються для автоматичного запису метрологічної (швидкості / напрямку вітру, температури, повітряного тиску) або гідрографічної (рівня води, її глибини) інформації. Океанографічні буї збирають інформацію під час дрейфу за течією в океані. Радіогідроакустичні буї збирають розвідувальну інформацію для військових потреб. Вони можуть записувати отриману інформацію, як у внутрішньому запам'ятовуючому пристрої, так і передавати її за радіочастотними каналами, із супутниковим зв'язком включно. Характерною особливістю таких реєстраторів є наявність внутрішнього джерела живлення, найчастіше – акумуляторних батарей.

Зважаючи на все це, метою роботи є проектування спеціального пристрою для вивчення параметрів поверхні деталі під час технологічного циклу, який дав би змогу розташувати на собі необхідну кількість різних датчиків у різних конфігураціях,

оперативно змінювати цю кількість і конфігурацію, мав би всередині енергонезалежну систему зчитування, перетворення та зберігання інформації, а також захищав би датчики, електронні компоненти та джерела живлення від впливу високих температур та тиску.

Технічне і програмне забезпечення таких досліджень у поєднанні з наявними числовими моделями робочих процесів термоімпульсного оброблення дасть змогу у подальшому побудувати цифрові блізики і стати основою для повної автоматизації проектування процесів фінішного оброблення детонуючими газовими сумішами з гарантованим рівнем якості деталей.

1. Проектування корпусу модульного автономного автоматичного реєстратора

Визначення геометричних розмірів реєстратора. Геометричні розміри реєстратора залежать від максимальної енергії, яку спроможне розвинути технологічне обладнання та об'єму його робочої камери. Якісне оброблення деталей можливо лише за умов досягнення певних питомих значень енергії на поверхні деталі [11]. Також треба пам'ятати, що після завантаження деталей до робочої камери, об'єм, доступний для заповнення паливної сумішшю, зменшується на відповідну величину. У роботах [12, 13] запропоновано та розвинуто теоретичне обґрунтування методики розрахунку технологічних параметрів термоімпульсного оброблення на базі «еквівалентної» камери й деталі, яка має певний об'єм та площу поверхні з урахуванням коефіцієнту раціонального заповнення робочої камери. Базуючись на цих методиках та знаючи об'єм робочої камери устаткування легко визначити розміри корпусу реєстратора.

Зазвичай, недоліком такого підходу є те, що для різних об'ємів робочих камер слід застосовувати реєстратори різних розмірів. Але цей недолік компенсується тим, що натеper існують термоімпульсні машини лише одного типорозміру.

Розроблення форми й конструкції реєстратора. До корпусу реєстратора висувається низка вимог. Насамперед він має бути достатньо міцним та надійно захищати свій внутрішній простір від впливу високих температур та тиску із зовні. Його внутрішній об'єм має бути достатнім для розміщення датчиків, електронних компонентів та джерел живлення. Конструкція корпусу мусить легко збиратися та розбиратися, забезпечувати швидко та гнучко заміну датчиків. Треба передбачити можливість встановлення реєстратора вертикально, горизонтально, під кутом тощо.

Зважаючи на всі вимоги було проаналізовано різні форми, та обрано найбільш придатну для використання. Першою була розглянута сферична форма (рис. 1, а). Основною її перевагою було те, що вона забезпечує максимальний внутрішній об'єм при мінімальній площі зовнішньої поверхні, має високу міцність. Досить важливим було й те, що така форма дає нескінченну низку варіантів її орієнтації в робочій камері. Але складність виготовлення, можливі проблеми під час встановлення датчиків, необхідність використання спеціального оснащення для позиціонування та фіксації в робочій камері змусили відмовитися від неї.

Альтернативою сферичній формі стала кубічна (рис. 1, б). Ця форма максимально технологічна, дає легкий доступ для встановлення датчиків, їхньої заміни разом зі стінкою в разі потреби в іншому типі чи розташуванні. Оскільки плати електронних пристроїв здебільшого прямокутні, з'являється можливість більш раціонального їх розташування всередині. Однак така конструкція корпусу має знижені міцнісні властивості, особливо по поверхнях сполучень. До того ж внутрішній об'єм залишається недостатнім для розташування в ньому всіх необхідних компонентів системи. Розвитком сферичної та кубічної форми корпусу реєстратора стали циліндрична та паралелепіпедоподібна (рис. 1, в, г). Внутрішній об'єм стає більшим, але всі інші вади початкових форм залишаються.

Приймаючи до уваги всі переваги циліндричної та паралелепіпедоподібної форм, для подолання недоліків було запропоновано використовувати шести- або восьмигранну форму (рис. 1, д, е). Вони майже ідентичні за характеристиками, більш міцні, тому що через трапецієподібний переріз бокові стінки підтримують одна одну, технологічні, бо конструкція складається лише з двох типорозмірів деталей, а внутрішній об'єм є компромісним між циліндром та паралелепіпедом. Єдиною різницею є менший діапазон кутів нахилу досліджуваної стінки при горизонтальному розташуванні шестигранного реєстратора в робочій камері (кут кратний 60°), а також декілька менший внутрішній об'єм.

Отже, спираючись на результати аналізу, було прийнято рішення використовувати восьмигранну форму для корпусу реєстратора (рис 1, е).

Базова конструкція корпусу реєстратора складається з десяти деталей – двох торцевих стінок восьмигранної форми та восьми прямокутних бокових стінок трапецієподібної форми в перерізі.

Під час складання бокові стінки клином проникають між сусідніх, розпирають їх, та утворюють щільний контакт між поверхнями сполучень. Таке взаємне спірання підкріплює стінки, через що міцність конструкції підвищується, а гази високої тем-

ператури та тиску не мають можливості проникнути всередину реєстратора.

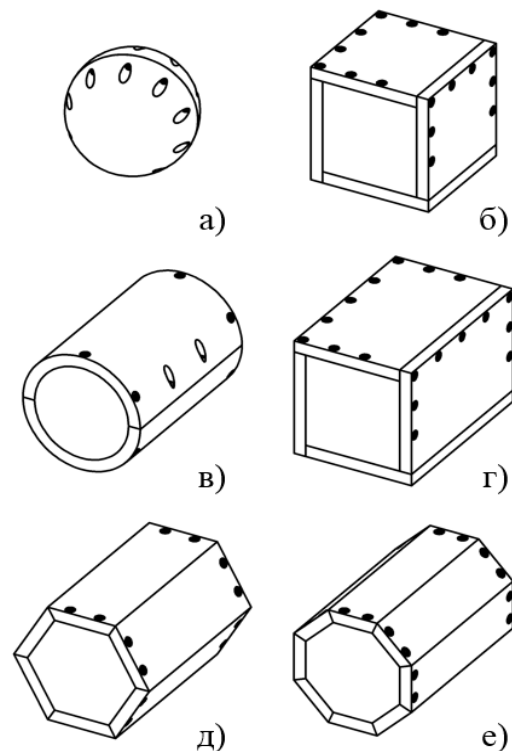


Рис. 1. Можливі форми корпусу реєстратора: а) – кулеподібний; б) – кубічний; в) – циліндричний; г) – паралелепіпед; д) – шестикутна призма; е) – восьмикутна призма

За периметром торцевих та по коротких гранях бокових стінок вибрано чверть. Це спрощує позиціонування деталей під час складання, а також слугує своєрідним лабіринтним ущільненням, яке також запобігає проникненню газів високої температури та тиску всередину реєстратора.

Додаткову герметизацію забезпечено використанням гумових кілець, що встановлюються в канавку за периметром торцевої стінки, а також гумового шнура в канавках вздовж довгої грані бокової стінки. У разі необхідності на стикові поверхні можна нанести будь-який неадгезивний герметик (так звані «рідкі прокладки»).

Можливості розміщення реєстратора в робочій камері. Залежно від завдань дослідження, реєстратор можна розташовувати в робочій камері термоімпульсної машини, як горизонтально, так і вертикально.

Горизонтальне розташування (рис. 2) здебільшого характерно для вивчення параметрів стінок деталі, які орієнтовані під кутом до напрямку розповсюдження фронту горіння чи детонаційних хвиль.

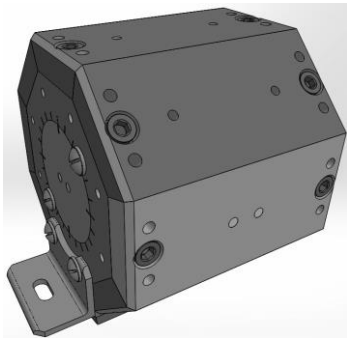


Рис. 2. Горизонтальне розташування реєстратора в робочій камері термоімпульсної машини

Восьмикутна форма корпусу реєстратора дає змогу змінювати кут нахилу грані з датчиками кроком 45° . Але, якщо під реєстратор підкласти ложемент спеціальної форми (рис. 3), крок зміни кута нахилу стінки зменшиться до 15° .

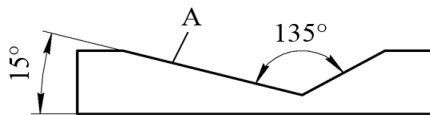


Рис. 3. Профіль ложементу під реєстратор

Кути нахилу, кратні 45° досягаються встановленням реєстратора на відповідні грані безпосередньо на робочий стіл. Кути, кратні 15° регулюються використанням ложемента та відповідною зміною орієнтації поверхні «А» (рис. 3), яка може встановлюватися зліва чи справа (рис. 4).

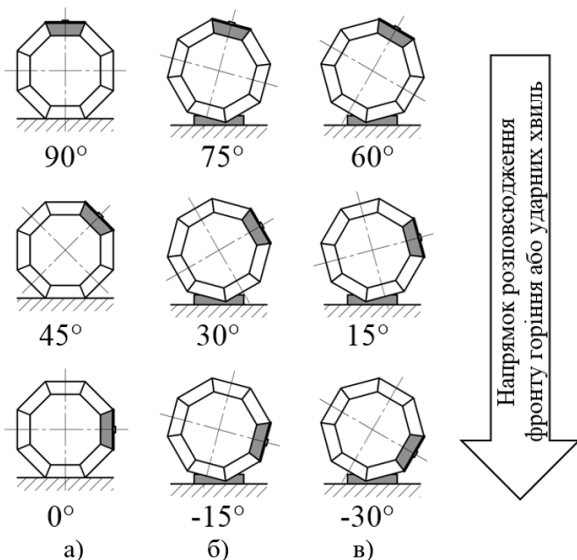


Рис. 4. Регулювання кута нахилу грані, що досліджується (виділена темним) до напрямку розповсюдження фронту горіння або ударних хвиль: а) – без ложементу; б) – ложемент орієнтовано поверхню «А» ліворуч; в) – ложемент орієнтовано поверхню «А» праворуч

Під час проведення експериментальних досліджень може виникнути потреба у вимірюванні швидкості розповсюдження фронту горіння, градієнту затухання температури тощо. Для цього датчики встановлюються вздовж напрямку розповсюдження на відрізок мірної довжини, а корпус реєстратора встановлюється вертикально.

Окремо слід зауважити, що з метою наближення форми реєстратора до реальної деталі на ньому можуть бути закріплені обтічники різноманітної форми (рис. 5), відбивачі, відсікачі, козирки. Також для вивчення поведінки задирок під впливом високих температур передбачено можливість закріплення їх моделей, які виготовляються з фольги відповідних марок матеріалів різної товщини в спеціальних тримачах, розташованих на корпусі реєстратора.

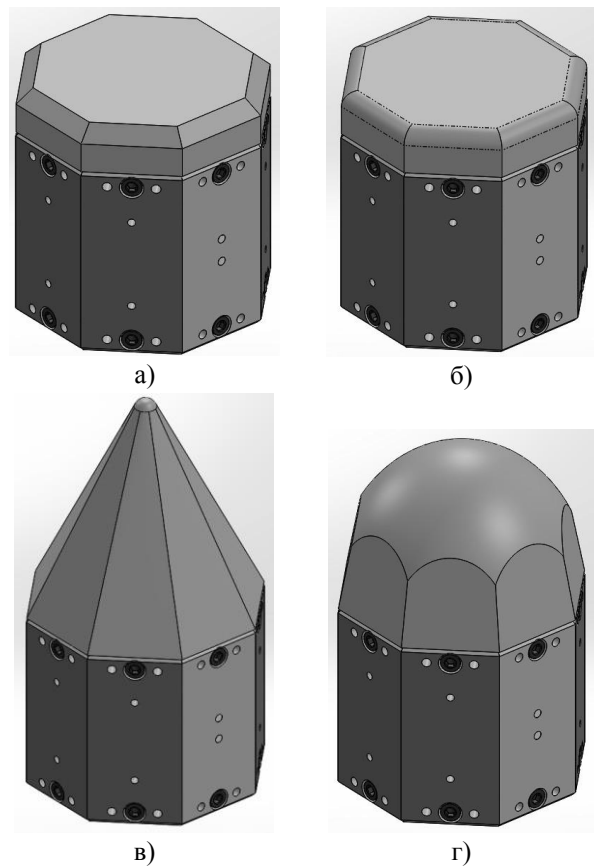


Рис. 5. Різні форми обтічників на вертикально встановленому реєстраторі: а) – зі збільшеною фаскою; б) – зі збільшеним заокругленням; в) – пірамідальної форми; г) – сферичної форми

І в горизонтальному та вертикальному положенні реєстратор закріплюється на столі робочої камери болтами крізь отвори в опорних кронштейнах із кутового профілю.

Розташування датчиків на корпусі реєстратора. Датчики, що плануються використовувати в

реєстраторі мають подібну конструкцію і близькі за розмірами. Характерним є високошвидкісний датчик тиску моделі 113В [14] виробництва компанії PCB Piezotronics Inc., США (рис. 6). Довжина датчика становить 1,48 дюйма (37,4 мм), діаметр чутливої частини – 0,218 дюйма (5,54 мм), розмір нарізи кріплення – 5/16-24 UNF (дюймовий аналог метричної M7×0,75, розмір під ключ – 6 мм.



Рис. 6. Високошвидкісний датчик тиску моделі 113В виробництва компанії PCB Piezotronics Inc., США

Датчики можуть встановлюватися як на торцевих, так і на бокових стінках у будь-якій комбінації та в будь-яких місцях. Це залежить лише від завдань експерименту.

На рис. 7 показано можливий варіант розташування двох датчиків на боковій стінці реєстратора впритул один до одного. У такий спосіб одночасно вимірюють декілька різних показників в околі точки, що цікавить дослідника.

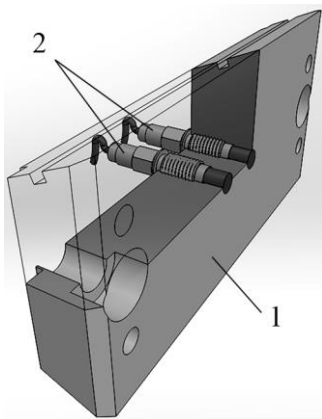


Рис. 7. Варіант розташування двох датчиків впритул на боковій стінці реєстратора:
1 – бокова стінка; 2 – датчики

Базова конструкція реєстратора передбачає використання монолітної торцевої стінки. Якщо на ній

є лише один датчик, розташований у центрі, проблем не виникає. Але якщо використовують два й більше датчиків, тоді під час експерименту, де передбачено обертання реєстратора навколо поздовжньої осі, їхня орієнтація та відстань від джерела тепла буде змінюватися, а це неприпустимо.

З метою виключення такої вади пропонується виготовляти торцеву стінку з двох деталей – власної стінки з центральним отвором та вставки (рис. 8).

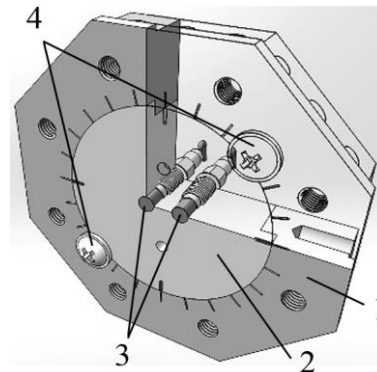


Рис. 8. Варіант розташування двох датчиків на торцевій стінці реєстратора:
1 – торцева стінка 2 – поворотна вставка;
3 – датчики; 4 – гвинти фіксації

Під час встановлення реєстратора в робочій камері вставка вільно обертається в отворі стінки. Далі, орієнтуючись на шкалу, що нанесено на поверхню стінки, вставка повертається на потрібний кут (кратний 15°) та притискається до стінки гвинтами. Гумове кільце, одягнене на вставку герметизує внутрішній об'єм реєстратора.

Приклад розташування датчиків на торцевих та бокових стінках корпусу реєстратора показано на рис. 9.

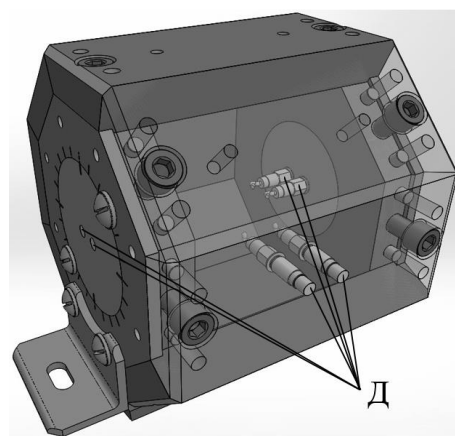


Рис. 9. Приклад розташування датчиків (поз. Д) на стінках корпусу реєстратора (умовно показані прозорими)

2. Програмно-апаратний комплекс реєстрації експериментальних даних

Визначення вимог до комплексу. Для реєстрації результатів експериментів розроблено спеціалізований автономний програмно-апаратний комплекс, що складається з декількох блоків аналого-цифрового перетворення (АЦП) та блоку реєстрації даних. Габаритні розміри апаратної частини комплексу визначаються об'ємом внутрішнього простору корпусу реєстратора. Це накладає певні обмеження на функціональні можливості комплексу. Водночас він має відповідати переліку обов'язкових вимог, що забезпечують виконання поставлених завдань у складі дослідної установки.

До блоків АЦП висунуті такі вимоги.

1. Сумісність вхідного інтерфейсу з датчиками тиску типу РСВ 113В22.

2. Операційний підсилювач із можливістю цифрового керування коефіцієнтом підсилення та зміщенням нуля.

3. Мікросхема АЦП, що забезпечує 16-бітне перетворення сигналу з частотою дискретизації не менше 100 кГц.

4. Мінімальне енергоспоживання для збільшення часу роботи в автономному режимі.

До блоку реєстрації даних висунуті такі вимоги.

1. Автономна робота від акумуляторної батареї.
2. Режими роботи: «Реєстрація даних» та «Очікування». Забезпечення мінімально можливого енергоспоживання в режимі «Очікування».

3. Вибір параметрів конфігурації та перехід у режим «Реєстрація даних» без фізичного контакту з апаратною частиною за допомогою передавача інфрачервоного випромінювання.

4. Реєстрація даних упродовж заданого часу від моменту надходження сигналу запуску з подальшим автоматичним переходом у режим «Очікування». Тривалість роботи в режимі «Реєстрація даних» визначається попередніми налаштуваннями комплексу в діапазоні від 0,1 до 1 с.

5. Запис зареєстрованих даних у постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП). Об'єм ПЗП має забезпечувати можливість реєстрації даних із восьми блоків АЦП загальною тривалістю до 5 хв.

6. Синхронізація результатів експериментів у часі відбувається за моментом надходження команди запуску процесу реєстрації даних.

7. Відмовостійкість та стабільність роботи забезпечується використанням програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС).

8. Відлік часу забезпечується використанням високоточного генератора тактових імпульсів.

9. Зчитування зареєстрованих даних відбувається після проведення експериментів через підключення комплексу до зовнішнього інтерфейсу передачі даних.

З огляду на вказані вимоги, було розроблено програмно-апаратний комплекс реєстрації експериментальних даних, блок-схему якого наведено на рис. 10.

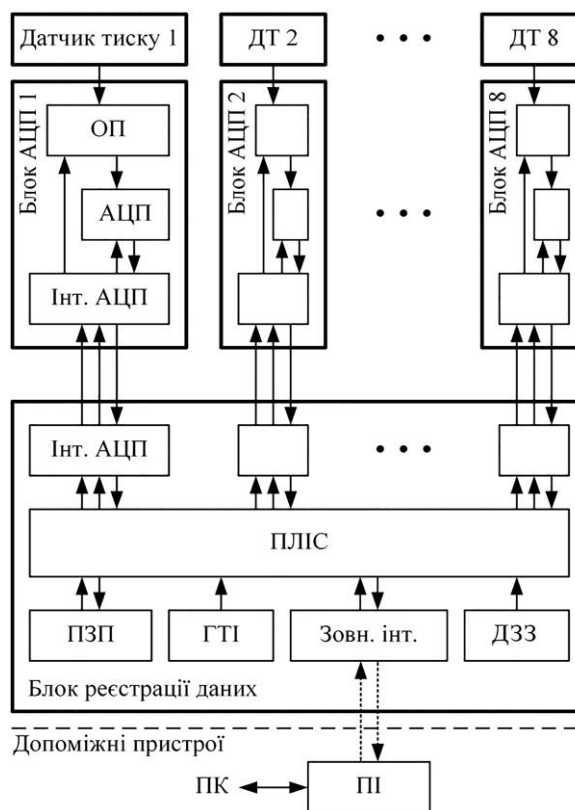


Рис. 10. Блок-схема програмно-апаратного комплексу реєстрації експериментальних даних: ДТ – датчик тиску; ОП – операційний підсилювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; Інт. АЦП – інтерфейс АЦП; ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема; ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій; ГТІ – генератор тактових імпульсів; ДЗЗ – датчик запуску/ зупинки; Зовн. інт. – зовнішній інтерфейс; ПІ – перетворювач інтерфейсів; ПК – персональний комп'ютер

Апаратна частина комплексу. Через обмежені габаритні розміри комплексу, реалізація складних фільтрів аналогового сигналу, що надходить від датчика тиску неможлива. Тому використовуються найпростіші схеми фільтрації, а зниження рівня завад забезпечується завдяки зменшенню довжин ліній передачі аналогових сигналів. З цією метою «Блоки АЦП» виконані у вигляді окремих пристроїв, які розміщуються в безпосередній близькості до датчиків тиску. Налаштування параметрів, зчитування та збереження даних із «Блоків АЦП», пода-

льшу їх передачу до ПК здійснює «Блок реєстрації даних».

Вхідний каскад «Блоку АЦП» виконано на операційному підсилювачі AD8555 [15], що призначений саме для роботи з датчиками тиску. Його особливістю є цифрове керування коефіцієнтом підсилення та зміщенням нульового рівня сигналу. Використання підлаштовуваних резисторів для даного завдання є неприйнятним із погляду гнучкості налаштувань, прецизійності задання коефіцієнтів та порівняно великих габаритних розмірів таких компонентів. Для керування параметрами вказаного ОП використовується спеціалізований однопровідний інтерфейс передачі даних, що також є важливим із погляду мінімізації кількості електронних компонентів та їх загального енергоспоживання. Коефіцієнт підсилення в даному ОП може бути заданий у діапазоні від 70 до 1280, що повністю задовольняє можливим потребам під час роботи в різних діапазонах значень вимірюваного тиску. Цифрове задання параметрів дає змогу зберігати їх значення в енергонезалежній пам'яті й завантажувати після подачі живлення на пристрій. Окрім того, такий підхід дає можливість створювати різні профілі налаштувань та змінювати їх за потребою під час надходження зовнішньої команди без необхідності фізичного контакту з комплексом.

За аналого-цифрове перетворення відповідає мікросхема AD7683 [16], що призначена саме для завдань із використанням батарейного живлення й має мінімальні габаритні розміри. АЦП забезпечує 16-бітне перетворення з частотою дискретизації до 100 кГц. Передавання даних здійснюється з використанням трипровідного інтерфейсу SPI.

Обмін даними між блоками АЦП та блоком реєстрації даних здійснюється з використанням високошвидкісного завадостійкого інтерфейсу, що забезпечує як зчитування поточного значення АЦП, так і передачу налаштувань операційному підсилювачу.

З метою зниження енергоспоживання, живлення тих чи інших інтерфейсів та блоків АЦП активується окремо, залежно від потреб для конкретного експериментального дослідження, що визначається відповідними конфігураційними параметрами.

Запуск процесу реєстрації можна організувати різними шляхами. Розглядалися як контактні, так і безконтактні методи. До контактних належали такі, де для передавання сигналу на запуск використовується провідник. Це міг бути жертвний дріт, який пошкоджується під впливом високої температури, та для кожного експерименту використовується новий. Або командний сигнал передавався б на корпус реєстратора через стіл термоімпульсної машини, що мав би бути електрично ізольований від неї. До

безконтактних належали, наприклад, керування запуском за радіо- або інфрачервоним сигналом. Також розглядався варіант запуску реєстратора за сигналом внутрішнього таймера. Однак, усі ці методи, окрім останнього, тією чи іншою мірою потребували доопрацювання обладнання, що не є доцільним. У решті було вирішено зупинитися на запуску процесу реєстрації та вибору профілів конфігурації комплексу за тиском. Під час наповнення робочої камери машини паливною сумішшю тиск у ній підвищується, а після закінчення робочого циклу знов повертається до атмосферного. Отже, коли датчик запуску, що розташовано всередині реєстратора, реагує на підвищення тиску на певний рівень щодо атмосферного, реєстратор автоматично починає опитування датчиків та запис отриманих значень до запам'ятовуючого пристрою. По завершенні робочого циклу, коли тиск у робочій камері знижується до атмосферного, датчик запуску зупиняє роботу реєстратора.

Програмну частину комплексу побудовано на програмуванні логічній інтегральній схемі (ПЛІС), внутрішню конфігурацію якої наведено на рис. 11. На відміну від мікроконтролерів (МК), що виконують запрограмовані алгоритми послідовно, у ПЛІС програмується логічна схема, що виконує паралельну обробку сигналів.

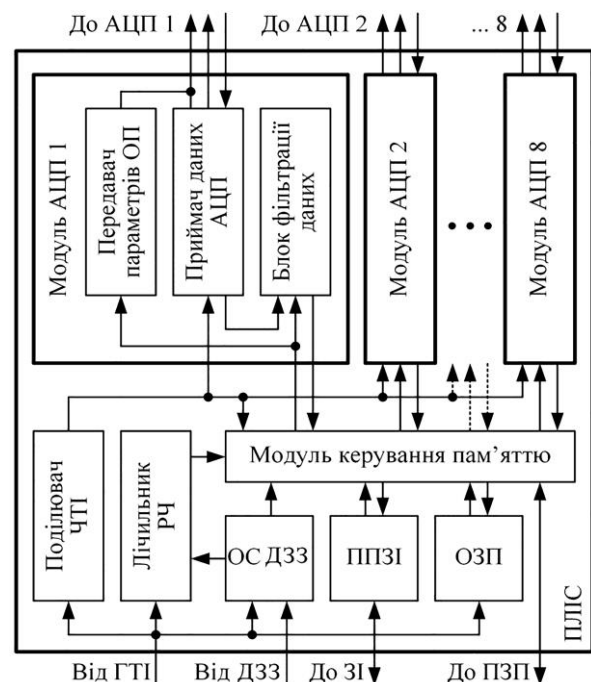


Рис. 11. Структура внутрішньої конфігурації ПЛІС:

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
 ППЗІ – приймач-передавач зовнішнього інтерфейсу;
 ЗІ – зовнішній інтерфейс; РЧ – реальний час;
 ОСДЗЗ – обробник сигналів датчика запуску/
 зупинки; ЧТІ – частота тактових імпульсів

Існують декілька різновидів ПЛІС. Для даного проєкту обрано найбільш функціональний різновид – FPGA. Це забезпечує високу швидкодію, стабільність та відмовостійкість розробленого пристрою.

Для налаштування параметрів та передачі зареєстрованих даних передбачено зовнішній високошвидкісний послідовний інтерфейс. Зв'язок із ПК здійснюється через USB за допомогою додаткового пристрою – перетворювача інтерфейсів.

Тактування системи забезпечує високостабільний генератор тактових імпульсів (ГТІ) частотою 50 МГц. Сигнал від генератора надходить на лічильник реального часу (РЧ). У подібних системах для прив'язування експериментальних даних до часу зазвичай використовують спеціалізовані мікросхеми лічильників РЧ, що мають окреме джерело живлення й забезпечують відлік часу незалежно від наявності основного живлення. Проте для даного проєкту таке рішення є неприпустимим з огляду на обмежені габарити. У розробленому комплексі лічильник РЧ виконано у вигляді внутрішнього модуля ПЛІС. Його налаштування відбувається під час конфігурації комплексу на етапі підготовки до експериментальних досліджень.

Тактування модулів АЦП здійснюється зниженою через «Поділювач ЧПІ» частотою, яка визначається параметрами протоколу передачі даних мікросхеми АЦП.

Синхронізація часу кожного експерименту здійснюється за моментом надходження команди запуску реєстрації даних, що надходить до ПЛІС від ДЗЗ. «Обробник сигналів ДЗЗ» здійснює фільтрацію сигналу та розпізнавання прийнятих команд. У момент надходження команди запуску підключається живлення блоків АЦП і активуються відповідні модулі ПЛІС. «Модуль керування пам'яттю» фіксує значення «Лічильника РЧ».

«Передавач параметрів ОП» за допомогою «Модуля керування пам'яттю» отримує необхідні значення й передає їх блокам АЦП. Протоколом передачі даних ОП визначено, що логічні рівні одиниці та нуля передаються за допомогою імпульсів різної тривалості. Тому загальна тривалість процедури конфігурації ОП визначається кількістю одиниць та нулів у значеннях параметрів і може змінюватись від $T_{\text{конф.мін.}}$ до $T_{\text{конф.макс.}}$. Після отримання нових параметрів протягом часу $T_{\text{стаб.}}$ відбувається перехідний процес та стабілізація рівня вихідного сигналу ОП. Тому реєстрація даних з АЦП розпочинається після фіксованого часу $T_{\text{конф.макс.}} + T_{\text{стаб.}}$, що забезпечує достовірність отримуваних даних.

«Лічильник РЧ» розпочинає відлік часу тривалості проведення експерименту. Тривалість визначається конфігураційними параметрами.

За реєстрацію даних відповідає блок «Приймач даних АЦП». Він виконує процедуру опитування АЦП та передачу отриманих даних «Блоку фільтрації даних». Залежно від налаштувань, «Блок фільтрації даних» може передавати отримані дані безпосередньо «Модулю керування пам'яттю», або виконувати їх попередню фільтрацію. Спосіб та ступінь фільтрації визначаються відповідними конфігураційними параметрами.

«Модуль керування пам'яттю» забезпечує синхронний запис отриманих від АЦП даних в ОЗП та їх подальшу послідовну передачу в ПЗП.

Після досягнення заданого значення лічильником тривалості проведення експерименту «Блок реєстрації даних» автоматично переводиться в режим «Очікування» до надходження нової команди.

Після виконання серії експериментальних досліджень, блок реєстрації даних підключається з використанням перетворювача інтерфейсів до ПК для передавання збережених у ПЗП даних.

Програмне забезпечення системи оброблення даних. Зчитування експериментальних даних та налаштування параметрів комплексу здійснюється за допомогою спеціально розробленої утиліти для ПК. Передбачена можливість збереження поточних налаштувань комплексу у вигляді файлів профілів та їх подальше завантаження.

Аналіз та обробка отриманих даних здійснюється з використанням програмного забезпечення візуалізації та обробки даних системи ЧПК [17, 18]. Це програмне забезпечення має такі особливості.

1. Графічне відображення масивів даних у вигляді синхронізованих за часом графіків.
2. Можливість зручної інтерактивної навігації (масштабування, переміщення) у координатному полі вікна програми.
3. Можливість виконання математичних розрахунків над масивами даних, включаючи функції фільтрації та спектрального аналізу.
4. Автоматичне обчислення та відображення екстремумів графіків та середнього значення на заданому інтервалі.
5. Експорт та імпорт масивів даних.
6. Сортування в переліку масивів та пошук за заданими параметрами.

Використання програмного забезпечення, що розроблено, значно спрощує процес оброблення результатів експериментів.

Отже, розроблений програмно-апаратний комплекс забезпечує автономну реєстрацію результатів експериментів, їх збереження в ПЗП і подальшу передачу на ПК для аналізу та оброблення.

Висновки

У результаті проведених робіт виявлено, що найпридатнішою формою для реєстратора є восьмигранна призма, яка складається з деталей лише двох типорозмірів – восьмигранних торцевих та призматичних бокових стінок. Деталі є взаємозамінними. Форма корпусу дає можливість встановлювати реєстратор у робочій камері вертикально, горизонтально, а також обертати його з фіксованим кроком 15° навколо поздовжньої осі. В залежності від плану експерименту на стінках корпусу реєстратора у визначених місцях встановлюється потрібна кількість датчиків відповідного типу. Оскільки деталі взаємозамінні, існує можливість сформувати набори додаткових модулів із датчиками різноманітного призначення, та оперативно змінювати їх упродовж проведення експериментальних досліджень.

Розроблено спеціалізований автономний програмно-апаратний комплекс, що забезпечує реєстрацію результатів експериментів в умовах обмеженого об'єму внутрішнього простору реєстратора, їх збереження в ПЗП і подальшу передачу на ПК для аналізу та обробки, і для подальшого використання в ланцюзі роботи цифрового близнюка процесу.

Література

1. Benedict, G. F. *Thermal energy method: deburring (TEM) [Text]* / G. F. Benedict. – *Nontraditional Manufacturing Processes*, CRC Press, Boca Raton, 2017. – P. 349–361. DOI: 10.1201/9780203745410-22
2. Burr formation and its treatments – a review [Text] / S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak, et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 107, iss. 5-6. – P. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.
3. Extrude Hone GmbH: T-series thermal deburring machines [Електронний ресурс]. – Режим доступу <https://extrudehone.com/t-series-thermal-deburring-machines>. – 12.03.2022.
4. *Advanced thermal energy method for finishing precision parts [Text]* / Sergiy Plankovskyy, Viktor Popov, Olga Shypul, et al. – *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing*. – 2021. – Chapter 15. – P. 527-575. DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.
5. Bhattacharyya, B. *Advanced finishing processes [Text]* / B. Bhattacharyya, B. Doloi. – Academic Press, London : *Modern Machining Technology*, 2020. – P. 675–743. DOI: 10.1016/B978-0-12-812894-7.00008-6.
6. *Deburring microfeatures using micro-EDM [Text]* / Y. H. Jeong, B. HanYoo, H. U. Lee, et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, iss. 14. – P. 5399–5406. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.021
7. Lee, S. H. *Precision laser deburring [Text]* / S. H. Lee, D. A. Dornfeld // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2001. – Vol. 123, iss. 4. – P. 601–608. DOI: 10.1115/1.1381007.
8. *Determination of detonable gas mixture heat fluxes at thermal deburring [Text]* / S. Plankovskyy, A. Teodorczyk, O. Shypul, et al. // *Acta Polytechnica*. – 2019. – Vol. 59, iss. 2. – P. 162–169. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0162.
9. Zoetewij, M. L. *Particle removal in linear shear flow: model prediction and experimental validation [Text]* / M. L. Zoetewij, J. C. J. Van der Donck, R. Versluis // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2009. – Vol. 23, iss. 6. – P. 899-911. DOI: 10.1163/156856109X411247.
10. *Experimental analysis of thermal energy deburring process by design of experiment [Text]* / A. Fritz, L. Sekol, J. Koroskenyi, et al. // *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition. November 9-15, 2012, Houston, Texas, USA*. – Vol. 3. – P. 2035–2041. DOI: 10.1115/imece2012-88411.
11. *Розроблення автоматизованого комплексу для прецизійного термоімпульсного оброблення детонувальними газовими сумішами: наукові матеріали [Текст] : монографія / за ред. С. І. Планковського. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. – 318 с.*
12. Трифонов, О. В. *Метод назначения режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями в интегрированных CAD/CAE-системах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 : захищена 20.09.2013 ; затв. 6.12.2013 / Трифонов Олег Валерьевич. – Х., 2013. – 152 с.*
13. Палазюк, Є. С. *Метод призначення режимів термоімпульсного оброблення деталей ГТД із жароміцних сплавів за кваліметричним показником кромки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 : захищена 20.05.2019 ; затв. 14.11.2019 / Палазюк Євген Сергійович. – Х., 2019. – 183 с.*
14. Model 113B. High frequency Integrated Circuit Piezoelectric (ICP®) pressure sensor PCB Piezotronics, Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу <https://www.pcb.com/products?m=113b21>. – 12.03.2022.
15. AD8555. Zero-Drift, Digitally Programmable Sensor Signal Amplifier [Електронний ресурс]. – Режим доступу <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8555.pdf>. – 12.03.2022.
16. AD7683. 16-Bit, 100 kSPS, Single-Ended Pulsar ADC [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7683.pdf>. – 12.03.2022.
17. *Investigation of processes in high-speed equipment using CNC capabilities / Y. Aksonov, V. Kombarov, O. Fojtů, et al. // Modern Machinery (MM) Science Journal. – November 2019. – Special*

Issue on HSM2019. – P. 3271–3276. DOI: 10.17973/MMSJ.2019_11_2019081.

18. Visualization and analysis of technological systems experimental operating results [Text] / Y. Aksonov, V. Kombarov, Y. Tsegelnyk, et al. // 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 22-25 Sept. 2021. – Vol. 2. – P. 141–146. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648592.

References

1. Benedict, G. F. Thermal energy method: deburring (TEM). *Nontraditional Manufacturing Processes*, CRC Press Publ., Boca Raton, 2017, pp. 349–361. DOI: 10.1201/9780203745410-22.

2. Jin, S. Y., Pramanik, A., Basak, A. K., Prakash, C., Shankar, S., Debnath, S. Burr formation and its treatments – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, no. 5-6, pp. 2189–2210. DOI: 10.1007/s00170-020-05203-2.

3. Extrude Hone GmbH: T-series thermal deburring machines. Available at: <https://extrudehone.com/t-series-thermal-deburring-machines>. (accessed 12.03.2022).

4. Plankovskyy, S., Popov, V., Shypul, O., Tsegelnyk, Y., Tryfonov, O., Brega, D. Advanced thermal energy method for finishing precision parts. *Advanced Machining and Finishing Handbooks in Advanced Manufacturing*, 2021, Chapter 15, pp. 527-575. DOI: 10.1016/C2018-0-00908-1.

5. Bhattacharyya, B., Doloi, B. Advanced finishing processes. *Modern Machining Technology*, Academic Press Publ., London, 2020, pp. 675–743. DOI: 10.1016/B978-0-12-812894-7.00008-6.

6. Jeong, Y. H., HanYoo, B., Lee, H. U., Min, B. K., Cho, D. W., Lee, S. J. Deburring microfeatures using micro-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 14, pp. 5399–5406. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.021.

7. Lee, S. H., Dornfeld, D. A. Precision laser deburring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, vol. 123, no. 4, pp. 601–608. DOI: 10.1115/1.1381007.

8. Plankovskyy, S., Teodorczyk, A., Shypul, O., Tryfonov, O., Brega, D. Determination of detonable gas mixture heat fluxes at thermal deburring. *Acta Polytechnica*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 162–169. DOI: 10.14311/AP.2019.59.0162.

9. Zoetewij, M. L., Van der Donck, J. C. J., Verluis, R. Particle removal in linear shear flow: model prediction and experimental validation. *Journal of Ad-*

hesion Science and Technology, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 899–911. DOI: 10.1163/156856109X411247.

10. Fritz, A., Sekol, L., Koroskenyi, J., Walch, B., Minear, J., Fernandez, V., Liu, L. Experimental analysis of thermal energy deburring process by design of experiment *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. Houston, Texas, USA, 2012, vol. 3, pp. 2035–2041. DOI: 10.1115/imece2012-88411.

11. Plankovskyy, S. I. (eds.) *Rozroblennya avtomatyzovanoho kompleksu dlya pretsyziynoho termoimpul'snoho obroblennya detonувal'nymy hazovymy sumishamy: naukovi materialy : monohrafiya*. Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t» Publ., 2020. 318 p.

12. Tryfonov, O. V. *Metod naznachenyya rezhymov termoympul'snoy obrabotky detonyruyushchymy hazovymy smesyamy v yntehryrovannykh CAD/CAE-systemakh*. Dys. kand. tekhn. Nauk. Kharkiv, 2013. 152 p.

13. Palazyuk, Ye. S. *Metod pryznachennyya rezhymiv termoimpul'snoho obroblennya detaley HTD iz zharomitsnykh splaviv za kvalimetrychnym pokaznykom kromky*. Dys. Kand. tekhn. nauk [Method for operating conditions assignment of thermal pulse deburring of GTE parts made from heat-resistant alloys by the edge qualimetric parameters. Cand. Tekhn. Nauk. Dys.]. Kharkiv, 2019. 183 p.

14. *Model 113B. High frequency Integrated Circuit Piezoelectric (ICP®) pressure sensor PCB Piezotronics, Inc.* Available at: <https://www.pcb.com/products?m=113b21>. (accessed 12.03.2022).

15. AD8555. *Zero-Drift, Digitally Programmable Sensor Signal Amplifier*. Available at: <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8555.pdf>. (accessed 12.03.2022).

16. AD7683. *16-Bit, 100 kSPS, Single-Ended PulsAR ADC*. Available at: <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7683.pdf>. (accessed 12.03.2022).

17. Aksonov, Y., Kombarov, V., Fojtů, O., Sorokin, V., Kryzhyvets, Y. Investigation of processes in high-speed equipment using CNC capabilities. *Modern Machinery (MM) Science Journal*, sp. iss. on HSM2019, pp. 3271–3276. DOI: 10.17973/MMSJ.2019_11_2019081.

18. Aksonov, Y., Kombarov, V., Tsegelnyk, Y., Plankovskyy, S., Fojtů, O., Piddubna, L. Visualization and analysis of technological systems experimental operating results. *Proc. 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. Lviv, Ukraine, 2021, vol. 2, pp. 141–146. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648592.

MODULAR AUTONOMOUS AUTOMATIC RECORDER OF PARAMETERS OF THERMAL PULSE PROCESSING

Oleksiy Pavlenko, Yevhen Aksonov, Olga Shypul, Sergey Zaklinsky

The subject of the study is the technical and software methods for constructing digital twins of high-speed processes in a closed working chamber of a thermal pulse machine during the finishing of parts. This work develops a universal modular autonomous device that automatically records the temperature of gases, their pressure, the speed of passage of shock waves and other parameters that directly affect the surface of parts. Research objectives: determine the shape and dimensions of the body of the recording device, assign the location of sensors on it, and develop software and hardware complex for controlling the process of measuring and recording operating parameters for their further use in the work of the digital twin of the process. Because of the work carried out, it was found that the most suitable form for the recorder is an octagonal prism, consisting of parts of only two standard sizes - an octagonal end and prismatic side walls. Parts of the same type are interchangeable. The body shape allows the recorder to be installed in the working chamber vertically, horizontally and rotated with a fixed step of 15° around the longitudinal axis. Depending on the plan of the experiment, the necessary number of sensors of the corresponding type is installed on the walls of the recorder housing in certain places. Since the parts are interchangeable, it is possible to form sets of additional modules with sensors for various purposes and quickly change them during experimental studies. Specialized autonomous non-volatile software and hardware complex has also been developed, which, in the conditions of a limited volume of the internal space of the recorder, automatically starts collecting information from sensors, its primary transformation, and saving the results of the experiment. to an internal permanent storage device and transfer them to a personal computer for further use in the chain of work of the digital twin of the process.

Keywords: process digital twin; autonomous recorder of parameters; automatic measurements; thermal pulse processing.

Павленко Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Аксьонов Євген Олександрович – канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна.

Шипуль Ольга Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Заклінський Сергій Олександрович – асист. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksiy Pavlenko – PhD, Assistant Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: pavlenko.aleksey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1628-2239, Scopus Author ID: 57220201408,
ResearcherID: AAE-6098-2019.

Yevhen Aksonov – PhD, Associate Professor of Automation and Computer-Integrated Technologies Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: aksev@i.ua, ORCID: 0000-0002-2615-0598, Scopus Author ID: 36561143800,
ResearcherID: U-2841-2019.

Olga Shypul – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shypul@khai.edu, ORCID: 0000-0002-1356-5831, Scopus Author ID: 57192959380,
Researcher ID: AAD-1985-2020.

Sergey Zaklinsky – Assistant of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.zaklinsky@khai.edu, ORCID: 0000-0003-3287-5795, Scopus Author ID: 57204572302.