

doi: 10.32620/oikit.2026.108.13

УДК 539.3:629.73

Д. І. Конотоп, Р. Б. Нікітін

Розробка та експериментальна апробація мікроконтролерної тензометричної системи для моніторингу пружно-деформованого стану конструктивних елементів

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

У роботі досліджено можливість застосування доступних мікроконтролерних платформ для побудови тензометричної вимірювальної системи. На базі мікроконтролера ESP32 та 24-бітного аналогово-цифрового перетворювача HX711 реалізовано схему вимірювання деформацій консольної балки з алюмінієвого сплаву АД-31. Розроблено програмне забезпечення для візуалізації результатів вимірювань у реальному часі. Проведено натурне калібрування системи із застосуванням методу лінійної регресії. Отримано коефіцієнти детермінації $R^2 > 0,9997$, що підтверджує високу лінійність відгуку. Досліджено довготривалу стабільність системи протягом одного року: зафіксовано дрейф нульового значення при збереженні чутливості вимірювальних каналів. Проаналізовано можливі причини дрейфу та сформульовано рекомендації щодо підвищення стабільності вимірювань. Опрацьовано концепцію багаторівневої архітектури для застосування системи в умовах експлуатації авіаційних конструкцій.

Ключові слова: тензометричні вимірювання; натурне калібрування; механічна деформація; конструктивний елемент; моніторинг технічного стану.

Вступ

Моніторинг пружно-деформованого стану конструкцій є важливою складовою забезпечення безпеки експлуатації авіаційної техніки. Систематизований огляд сучасних підходів до побудови систем такого моніторингу представлено авторами у роботі [1]. Далі коротко зазначимо основні положення.

Psuj та Szymanik [2] підкреслюють зростаючу роль автоматизованої обробки даних у системах спостереження за технічним станом конструкцій. У монографії [3] детально розглянуто методи вимірювання деформацій в авіаційних конструкціях із застосуванням фольгових тензодатчиків та оптоволоконних сенсорів. Кузьмич [4] запропонувала математичну модель корекції похибок тензометричних вимірювань з урахуванням температурних впливів, шумів та повзучості. Chen та ін. [5] експериментально підтвердили високу точність оптоволоконних сенсорів при порівнянні з класичними тензодатчиками. Silva та ін. [6] реалізували низькобюджетну систему на базі мікроконтролера Arduino та тензодатчика, однак робота обмежилася базовою демонстрацією без аналізу програмної реалізації, калібрування та довготривалої стабільності. Zhao та ін. [7] продемонстрували практичне значення точного калібрування тензодатчиків для визначення польотних навантажень на композитне крило літака.

Існуючі промислові тензометричні системи характеризуються високою вартістю, що обмежує їх широке застосування, зокрема на етапах дослідницької діяльності, прототипування та навчальних досліджень. Наявні спроби створення доступних рішень [6] не містять повноцінного аналізу точності, калібрування та

стабільності вимірювань. У зв'язку з цим актуальним є питання створення доступної вимірювальної системи на базі поширених мікроконтролерних платформ та відкритого програмного забезпечення з детальною експериментальною верифікацією характеристик.

Метою даної роботи є розробка та експериментальна апробація низькобюджетної тензометричної системи на базі мікроконтролера ESP32 та аналогово-цифрового перетворювача HX711, а також оцінка її придатності для задач моніторингу пружно-деформованого стану конструктивних елементів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- оцінка точності та лінійності вимірювань системи шляхом натурального калібрування на консольній балці;
- перевірка повторюваності результатів між незалежними вимірювальними каналами;
- дослідження довготривалої стабільності системи за період одного року;
- визначення факторів, що впливають на стабільність вимірювань, та формулювання рекомендацій щодо їх усунення.

Теоретичні основи тензометрії

Тензометричний датчик призначений для вимірювання деформації матеріалу шляхом реєстрації змін електричного опору. Принцип його роботи базується на зміні геометричних розмірів провідника під дією механічних напружень. У разі розтягування довжина провідника збільшується, а поперечний переріз зменшується, що призводить до зростання електричного опору. При стисканні відбувається зворотний процес — опір зменшується. Ця залежність описується формулою:

$$\Delta R/R = GF \cdot \varepsilon,$$

де $\Delta R/R$ – відносна зміна опору; GF – коефіцієнт тензочутливості (gauge factor); ε – механічна деформація.

Зміна опору є пропорційною прикладеному навантаженню в межах пружної області матеріалу (рис. 1, а).

Для реєстрації незначних змін опору, викликаних деформацією, застосовується електрична схема – міст Вітстона. У початковому стані міст знаходиться в рівновазі, і різниця потенціалів між його діагональними виходами дорівнює нулю. Під дією деформації опір одного або декількох елементів змінюється, що призводить до появи вихідної напруги, пропорційної зміні опору тензодатчика (рис. 1, б).

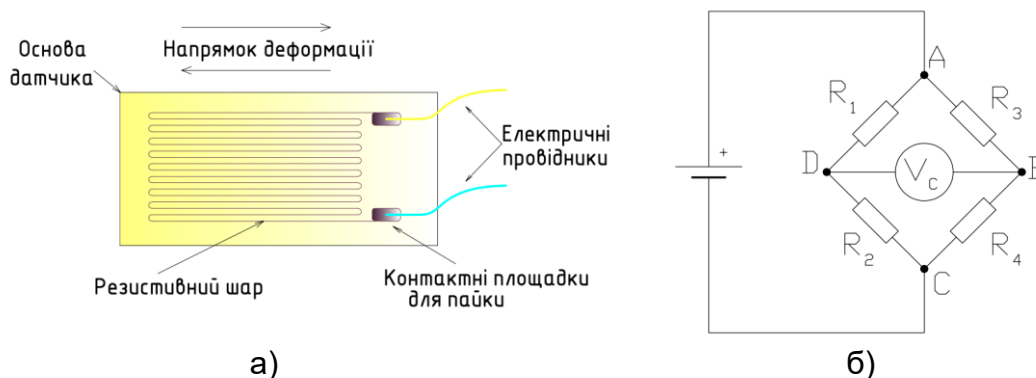


Рис. 1. Схема тензометричного датчика (а) та моста Вітстона (б)

Залежно від кількості активних тензодатчиків у мостовій схемі розрізняють чверть-мостову (один активний датчик), півмостову (два) та повну мостову (чотири) конфігурації. У даній роботі використовуються повномостові тензодатчики, які забезпечують максимальну чутливість вимірювання та ефективну компенсацію температурних впливів.

Слід зазначити, що тензометричні вимірювання є коректними лише в межах пружної області деформації матеріалу, де деформація залишається пропорційною механічному напруженню. Це є необхідною умовою для застосування методів лінійної регресії при калібруванні вимірювальної системи.

Матеріали та обладнання

Для побудови вимірювальної системи було використано мікроконтролер ESP32 – доступну та продуктивну платформу, сумісну із середовищем Arduino IDE [8], що спрощує розробку та налагодження програмного забезпечення. Як аналогово-цифровий перетворювач застосовано модуль HX711 – 24-бітний АЦП, спеціально розроблений для роботи з мостовими тензометричними схемами. Висока розрядність HX711 дозволяє реєструвати незначні зміни напруги на виході моста Вістона з достатньою точністю.

Як чутливі елементи використано повномостові тензодатчики, наклеєні на алюмінієву балку, що слугувала зразком для випробувань (див. рис. 2). Для фіксації тензодатчиків на поверхні балки на даному етапі дослідження було використано звичайний ціаноакрилатний клей (суперклей). Слід зазначити, що такий спосіб кріплення не є оптимальним для довготривалих вимірювань – як буде показано далі, одним із імовірних факторів дрейфу нульового значення може бути недостатня стабільність клейового з'єднання. Подібний вплив типу клею на точність вимірювань та передачу деформації до сенсора відзначено також у роботі [9], де показано, що вибір клейового матеріалу може суттєво впливати на чутливість сенсорної системи та спричиняти додаткові похибки.

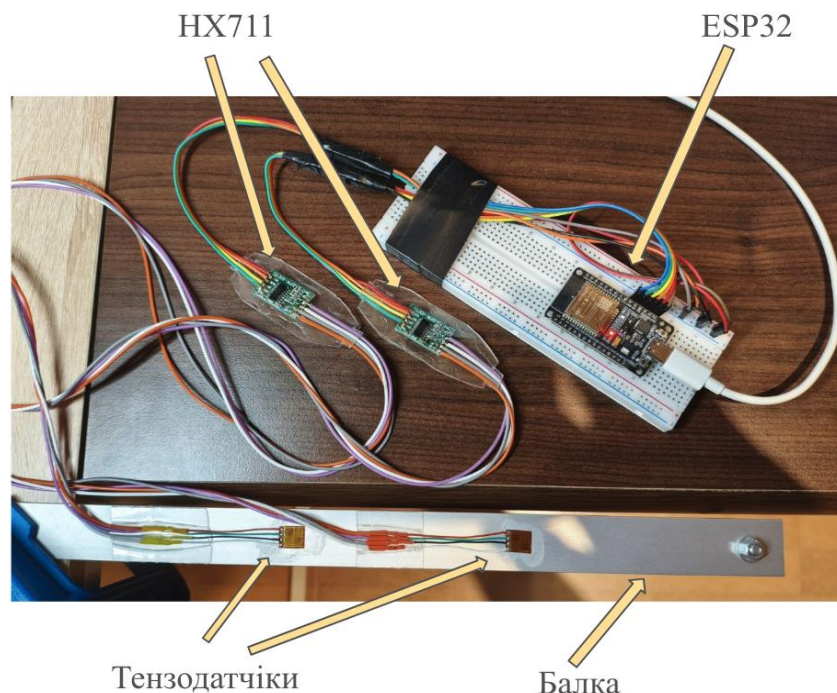


Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізовано з використанням бібліотеки HX711.h для платформи ESP32, яка забезпечує зчитування даних з АЦП та їх первинну обробку. Детальну схему підключення компонентів, зокрема призначення виводів мікроконтролера, можна простежити безпосередньо з вихідного коду прошивки ESP32, наведеного у Додатку А.

Експериментальна частина

Для проведення експериментальних досліджень було побудовано стенд, який включає консольну балку прямокутного перерізу (25×2 мм) з матеріалу АД-31, на якій закріплені повномостові тензометричні датчики. Зчитування деформацій здійснювалося за допомогою двох аналогово-цифрових перетворювачів HX711, підключених до мікроконтролера ESP32. Мікроконтролер виконував первинне збирання та передачу даних на персональний комп'ютер через послідовний порт. Зчитування даних із перетворювачів HX711 здійснювалося відповідно до програмного коду, наведеного у Додатку А. Значення, що зчитуються з HX711 за допомогою обраної бібліотеки, представлені в умовних одиницях (у. о.).

Розрахункова схема консольної балки з епюрою згинальних моментів представлена на рисунку 3.

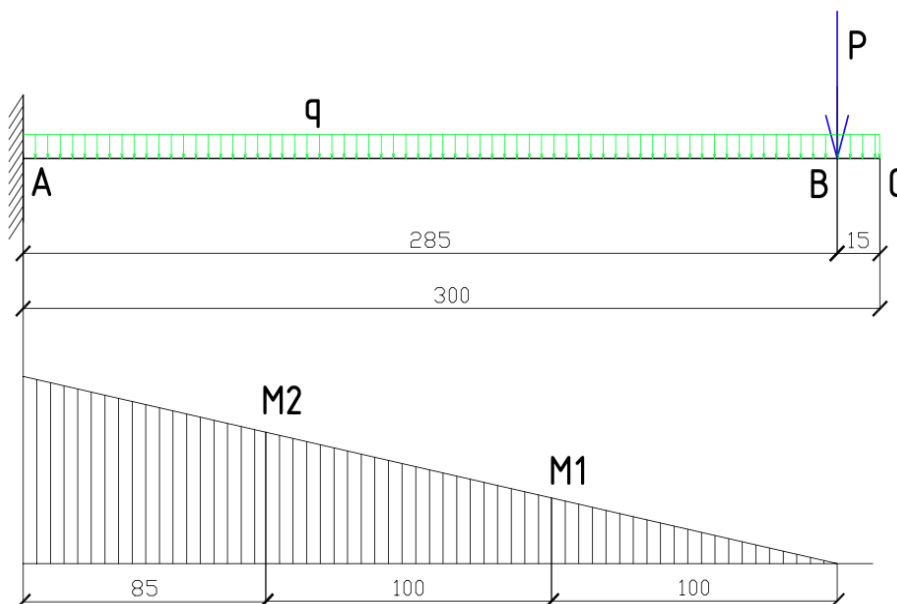


Рис. 3. Розрахункова схема балки

На основі експерименту було отримано таблицю значень у умовних одиницях із обох тензометричних каналів. Для кожного режиму навантаження також були аналітично розраховані нормальні напруження у зонах розташування тензометричних датчиків.

Подальша обробка даних передбачала побудову калібрувальних залежностей між показами датчиків в умовних одиницях і розрахованими нормальними напруженнями. Для цього було застосовано метод лінійної регресії, рівняння якої визначалися окремо для кожного тензометричного каналу.

Таблиця 1

датчик № 1 (плече 10 см)		датчик № 2 (плече 20 см)		q, Н/м	P, грами
σ, МПа	HX711, у.о.	σ, МПа	HX711, у.о.		
0,527	513000	1,843	550000	1,3293	0
1,234	480000	3,256	488000	1,3293	12
3,529	375000	7,847	275000	1,3293	51
5,413	290000	11,614	103000	1,3293	83
7,179	212000	15,146	-55000	1,3293	113
9,651	107000	20,090	-267000	1,3293	155

Датчик № 1:

$$y = -0.000022403 * x + 11.97056$$

Датчик №2:

$$y = -0.000022127 * x + 14.01901$$

Калібрувальні залежності обох датчиків представлені на рисунку 4. Коефіцієнти детермінації першого і другого датчиків становлять, відповідно, $R^2 = 0,99974$ та $R^2 = 0,99972$, що свідчить про високу якість апроксимації. Відносна різниця коефіцієнтів нахилу між двома каналами складає $\Delta k = 1,23 \%$, а різниця вільних членів $\Delta b = 2,05$ МПа. Незначне розходження коефіцієнтів нахилу ($1,23 \%$) підтверджує однорідність характеристик обох вимірювальних каналів: обидва тензодатчики демонструють практично ідентичну чутливість до зміни механічних напружень, незважаючи на різне розташування на балці. Це є важливим показником повторюваності результатів та свідчить про коректність методики вимірювань. Різниця вільних членів ($\Delta b = 2,05$ МПа) пояснюється похибкою монтажу: під час наклеювання тензодатчика на балку невеликого перерізу навіть незначний ручний притиск здатний створити локальні напруження, які фіксуються як початковий зсув. Це спостереження підкреслює необхідність індивідуального натурального калібрування кожного тензодатчика – як видно з отриманих результатів, навіть за однорідних умов монтажу розбіжність початкових значень може бути суттєвою.

Застосування методу лінійної регресії дозволило отримати математичну модель, яка описує залежність між показами тензометричних датчиків в умовних одиницях та нормальними напруженнями у матеріалі. Побудована модель відповідає очікуваній лінійній характеристиці деформації в межах пружної області. Рівняння регресії використовується для перетворення значень у умовних одиницях у відповідні значення нормального напруження, що є основою для подальшої роботи системи моніторингу.

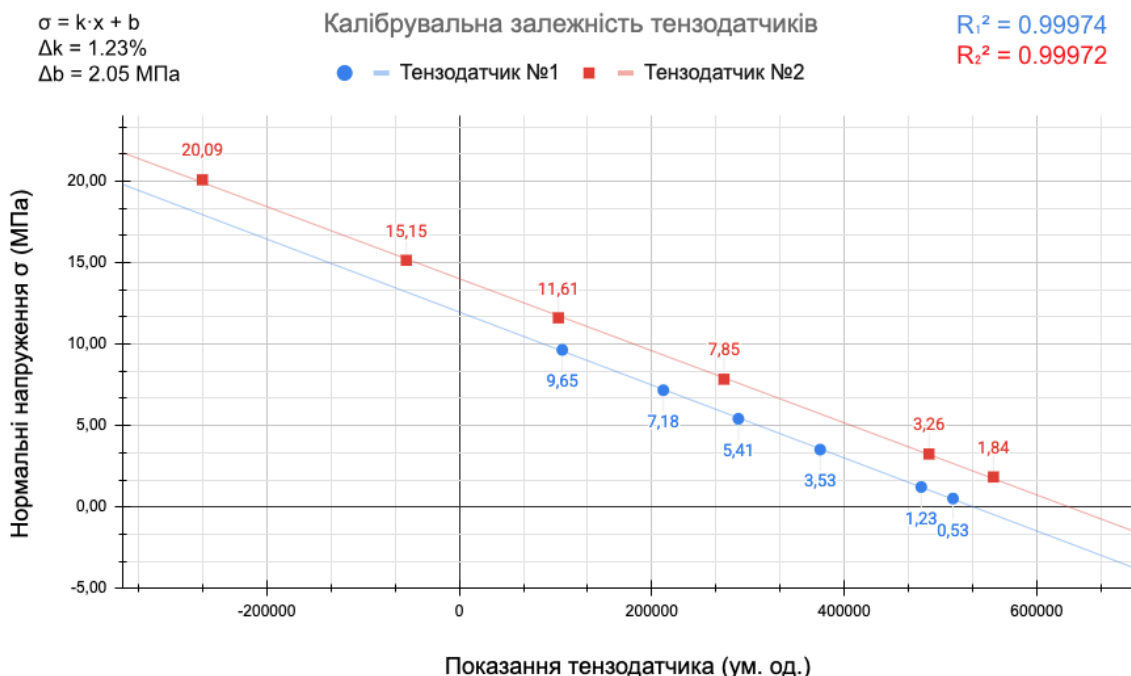


Рис. 4. Калібрувальна залежність тензодатчиків (експериментальні точки та лінійна регресія)

Оцінка довготривалої стабільності системи

Для оцінки довготривалої стабільності вимірювальної системи через рік після первинного калібрування було проведено повторний експеримент за ідентичною методикою. Результати порівняння наведені на рисунку 5.

Аналіз отриманих даних показав, що нахил калібрувальних залежностей залишився практично незмінним для обох каналів, що свідчить про стабільність чутливості вимірювальної системи протягом року експлуатації. Водночас зафіксовано зсув нульового значення (дрейф нуля): для датчика № 1 величина дрейфу становить $\Delta\sigma \approx 0,46 \text{ МПа}$, для датчика № 2 – $\Delta\sigma \approx 1,53 \text{ МПа}$.

Характерним є те, що величина дрейфу нуля суттєво відрізняється між двома датчиками: на датчику № 2, розташованому на більшому плечі консольної балки (20 см), де рівень нормальних напружень є значно вищим, дрейф виявився приблизно втричі більшим, ніж на датчику № 1 (плече 10 см). Така закономірність більш характерна для часткового переходу матеріалу балки в пластичну зону деформації, оскільки при деградації клейового з'єднання слід було б очікувати більш рівномірний дрейф на обох датчиках, незалежно від рівня напружень.

Тобто протягом року експлуатації експериментального стенду могли виникати випадкові навантаження, які призводили до переходу досліджуваних точок балки в пластичну область. Після зняття таких навантажень виникають залишкові пластичні деформації, що проявляються у вигляді дрейфу нульового рівня.

Разом з тим, на даному етапі дослідження повністю виключити вплив нестабільності клейового з'єднання (ціанакрилатний клей) на дрейф нуля не можна. Для однозначного розмежування цих факторів необхідні додаткові дослідження із застосуванням спеціалізованих тензометричних клеїв та з контролем рівня напружень у межах гарантовано пружної області матеріалу.

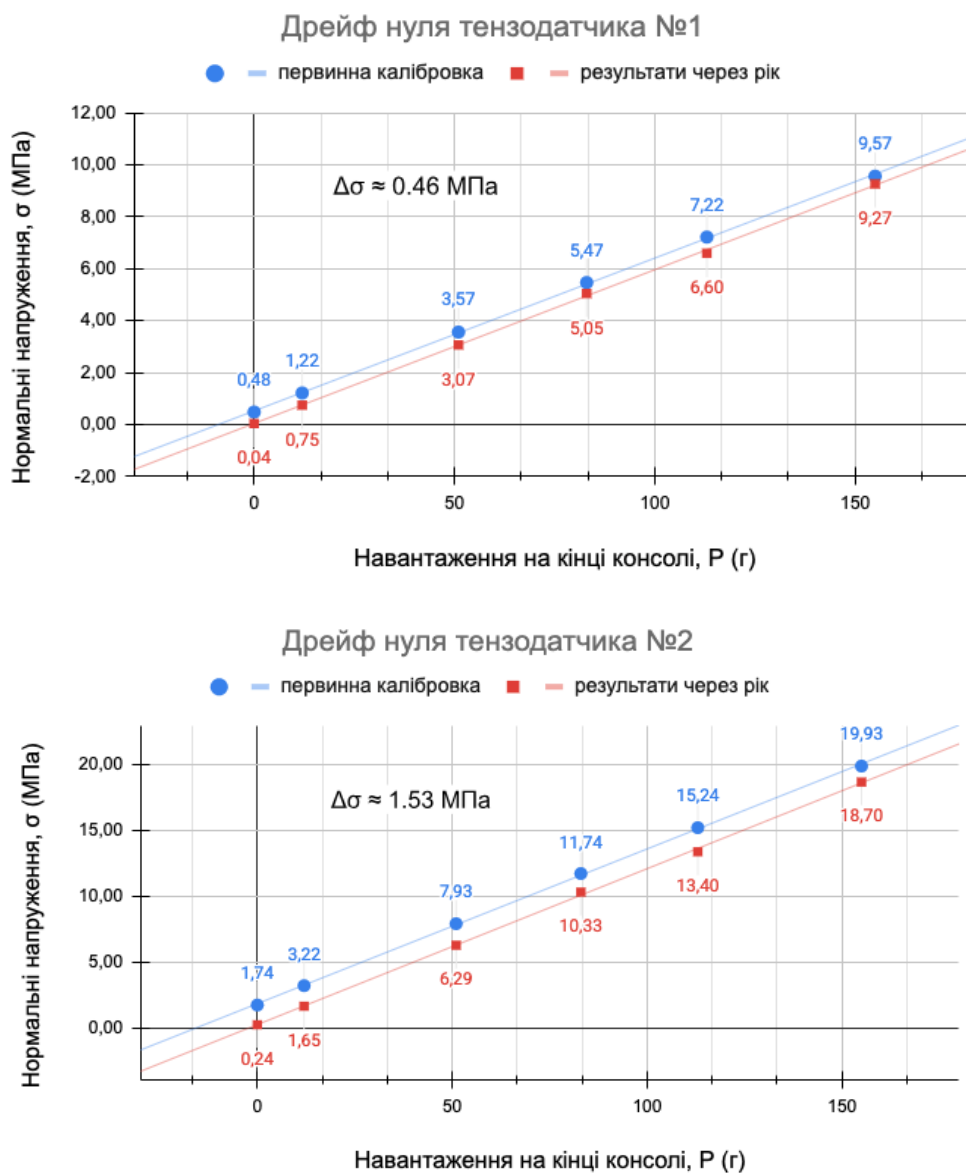


Рис. 5. Дрейф нуля тензодатчиків

Архітектура системи збору та аналізу даних

Окрім апаратної частини вимірювальної системи, у рамках даної роботи було розроблено програмне забезпечення для візуалізації результатів вимірювань у реальному часі. Програма, реалізована у середовищі Processing 4.0 [10] (Додаток Б), зчитує дані з послідовного порту, виконує перетворення показів датчиків у умовних одиницях на значення нормальних напружень за допомогою отриманих калібрувальних залежностей та відображає поточний стан навантаження. Таким чином, реалізована система забезпечує повний цикл від реєстрації деформацій до їх відображення оператору.

З метою подальшого практичного застосування розробленої вимірювальної системи в умовах експлуатації авіаційних конструкцій авторами опрацьовується концепція багаторівневої архітектури автоматизованої системи моніторингу пружно-деформованого стану. Систематизація існуючих архітектурних рішень у галузі структурного моніторингу [11] підтверджує

доцільність багаторівневого підходу, що передбачає розподіл функцій збору, обробки, зберігання та візуалізації даних між окремими компонентами системи. Запропонована архітектура [12] включає чотири основні рівні: вимірювальний, бортовий, серверний та користувацький.

На вимірювальному рівні здійснюється реєстрація деформацій у контрольованих зонах конструкції за допомогою тензометричних датчиків. Сигнали з датчиків надходять до бортового модуля збору даних, який виконує первинну обробку та керує процесом локального зберігання інформації.

На бортовому рівні передбачається фільтрація шумів та подійно-орієнтоване зберігання даних: новий запис формується лише у разі зміни контрольованого параметра понад заданий поріг відносно попереднього зафіксованого значення із збереженням часової мітки. Оброблені дані зберігаються у локальному енергонезалежному сховищі, що дозволяє зберігати інформацію про стан конструкції незалежно від наявності зовнішнього каналу зв'язку. Передача даних на серверну частину здійснюється після завершення польоту.

На серверному рівні здійснюється централізоване зберігання даних з прив'язкою до конкретного повітряного судна, окремих польотів та контрольованих ділянок конструкції, що забезпечує можливість порівняння результатів між польотами, аналізу довготривалих змін та оцінки деградації конструкції з часом.

Користувацький рівень забезпечує доступ інженерів до результатів моніторингу та передбачає можливість подальшого застосування методів інтелектуальної обробки даних, зокрема машинного навчання [13], для виявлення аномальних змін та аналізу довготривалих тенденцій.

Такий підхід забезпечує автономність роботи під час польоту, масштабованість на парк літальних апаратів та можливість розвитку системи без суттєвих змін базової структури. Детальний опис архітектури та результати її апробації є предметом окремого дослідження.

Висновки

У роботі досліджено можливість побудови низькобюджетної тензометричної вимірювальної системи на базі мікроконтролера ESP32 та 24-бітного АЦП HX711. За результатами проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Система на базі ESP32 та HX711 забезпечує достатню точність для реєстрації деформацій у межах пружної області матеріалу. Коефіцієнти детермінації калібрувальних залежностей ($R^2 > 0,9997$) підтверджують високу лінійність відгуку системи.

2. Відносна різниця коефіцієнтів нахилу між двома незалежними вимірювальними каналами становить лише 1,23%, що свідчить про повторюваність результатів та однорідність характеристик системи.

3. Розбіжність початкових зсувів ($\Delta b = 2,05$ МПа) між каналами, зумовлена похибкою монтажу, підтверджує необхідність індивідуального натурального калібрування кожного тензодатчика.

4. Повторний експеримент через рік виявив дрейф нульового значення (0,46 МПа та 1,53 МПа для датчиків на плечах 10 та 20 см відповідно) при збереженні чутливості системи. Характер розподілу дрейфу між датчиками вказує на переважний вплив пластичної деформації матеріалу, хоча вплив нестабільності ціаноакрилатного клею потребує окремого дослідження.

5. Для підвищення довготривалої стабільності подальші дослідження

мають бути спрямовані на застосування спеціалізованих тензометричних клеїв та забезпечення роботи в гарантовано пружній області деформації матеріалу.

6. Опрацьовано концепцію багаторівневої архітектури системи моніторингу, що створює передумови для практичного впровадження розробленої вимірювальної системи в умовах експлуатації авіаційних конструкцій.

Додаток А

Програмний код для мікроконтролера ESP32, призначений для зчитування даних із двох перетворювачів HX711.

```
#include "HX711.h"

const int DOUT_PIN_ONE = 16;
const int SCK_PIN_ONE = 4;

const int DOUT_PIN_TWO = 15;
const int SCK_PIN_TWO = 2;

HX711 sensorOne;
HX711 sensorTwo;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  sensorOne.begin(DOUT_PIN_ONE, SCK_PIN_ONE);
  sensorTwo.begin(DOUT_PIN_TWO, SCK_PIN_TWO);
}

void loop() {
  if (sensorOne.is_ready() && sensorTwo.is_ready()) {
    Serial.print(sensorOne.read());
    Serial.print(";");
    Serial.println(sensorTwo.read());
  } else {
    Serial.println("Sensors not ready.");
  }
  delay(100);
}
```

Примітка. Програмний код забезпечує зчитування даних із двох перетворювачів HX711, кожен із яких підключений до окремого тензометричного датчика. Дані передаються через послідовний порт на персональний комп'ютер для подальшої обробки та візуалізації. Програмне забезпечення для візуалізації наведено у Додатку Б.

Додаток Б

Програмне забезпечення для візуалізації даних у середовищі Processing 4.0 на персональному комп'ютері.

```
import processing.serial.*;
```

```
Serial port;
float scaleFactor;
float sensorOneData = 0.0;
float sensorTwoData = 0.0;

void setup() {
  size(800, 600);
  scaleFactor = -0.005 * height;
  // Serial.list()[3] — індекс порту ESP32
  // визначається індивідуально
  port = new Serial(this, Serial.list()[3], 115200);
}

void draw() {
  background(0);
  stroke(255);
  textSize(20);
  strokeWeight(1);

  line(0, height/2, width, height/2);
  text("+ 69.0 MPa", 10, height/2
    + (69.0 * scaleFactor) - 10);
  line(0, height/2 + (69.0 * scaleFactor),
    width, height/2 + (69.0 * scaleFactor));
  text("- 69.0 MPa", 10, height/2
    - (69.0 * scaleFactor) - 10);
  line(0, height/2 - (69.0 * scaleFactor),
    width, height/2 - (69.0 * scaleFactor));

  while (port.available() > 0) {
    String dataAsString = port.readString();
    if (dataAsString != null
      && dataAsString.indexOf(";") >= 0) {
      float[] dataAsFloatArray =
        float(split(dataAsString, ';'));
      sensorOneData =
-0.000022403 * dataAsFloatArray[0] + 11.97056;
      sensorTwoData =
-0.000022127 * dataAsFloatArray[1] + 14.01901;
    }
  }

  stroke(0, 250, 154);
  strokeWeight(10);
  text(nf(sensorOneData, 1, 2) + " MPa",
    2 * width/3 + 10, height/2 - 10);
  line(2 * width/3, height/2, 2 * width/3,
    height/2 + (sensorOneData * scaleFactor));
```

```
text(nf(sensorTwoData, 1, 2) + " МПа",  
width/3 + 10, height/2 - 10);  
line(width/3, height/2, width/3,  
height/2 + (sensorTwoData * scaleFactor));  
}
```

Примітка. Програмний код, написаний у середовищі Processing 4.0, забезпечує зчитування даних із послідовного порту персонального комп'ютера, обробку отриманих значень та їх візуалізацію в реальному часі.

Список літератури

1. Конотоп, Д. І. Сучасні технології моніторингу напружено-деформованого стану конструкцій / Д. І. Конотоп, Р. Б. Нікітін // *Механіка гіроскопічних систем*, 2025. – № 49. – С. 145–152 DOI: [10.20535/0203-3771492025334120](https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334120).
2. Psuj, G. Structural Health Monitoring: Latest Applications and Data Analysis / Psuj G., Szymanik B. // *Applied Sciences*. – 2023. – vol. 13, no. 13, p. 7617, DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137617>.
3. Vanlanduit, S. Strain Monitoring / S. Vanlanduit, M. Sorgente, A. R. Zadeh, A. Güemes, N. Faisal // in *Structural Health Monitoring: Damage Detection Systems for Aerospace*, M. G. R. Sause and E. Jasiūnienė, Eds. Springer. – 2021, pp. 219-241. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3_8.
4. Kuzmych, L. V. Synthesis of Measurement Method of Stressed – Deformed Condition of Complex Structures / L. V. Kuzmych // *Metrology and Instruments*. – 2019. – no. 3(77). – pp. 2–18. DOI: 10.33955/2307-2180(3)2019.12-18. [Online]. Available: https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scinetific_editions/mp-3-2019.pdf.
5. Chen, B. Strain Measurement Technology and Precision Calibration Experiment Based on Flexible Sensing Fiber / B. Chen, J. Yang, A. Li, M. Zhang, J. Li, Z. Wang // *Sensor*. – 2024. – vol. 24, no. 12, p. 3811, DOI: <https://doi.org/10.3390/s24123811>.
6. Silva, A. L. A Study of Strain and Deformation Measurement Using the Arduino Microcontroller and Strain Gauges Devices / A. L. Silva, M. Varanis, A. G. Me-reles, C. Oliveira, J. M. Balthazar // *Revista Brasileira de Ensino de Física*. – 2019. – vol. 41. – no. 3. – p. e20180206, DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206>.
7. Zhao, X. Investigation on flight load calibration of aircraft composite wing based on strain gauge measurement / X. Zhao, Y. Li, Z. Yun, W. Zhang // *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. – 2024. – vol. 14. – no. 5. – p. 100540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2024.100540>.
8. Arduino. Arduino IDE Documentation. – [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>.
9. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors / *Sensors and Actuators*. – A: Physical. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111833>.
10. Processing Foundation. Processing 4.0 Reference. – [Online]. Available: <https://processing.org/reference/>.
11. López-Castro, B. A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems: Architecture, Data Processing, and Visualization / B. López-Castro, A. G. Haro-Baez, D. Arcos-Aviles, M. Barreno-Riera, B. Landázuri-Avilés // *Sensors*. – 2022. – vol. 22. – no. 23. – p. 9206. – [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9206>.

12. Нікітін, Р. Б., Конотоп, Д. І. Архітектура автоматизованої системи моніторингу пружно-деформованого стану авіаційних конструкцій // Авіа-ракетобудування: перспективи та напрямки розвитку. VII наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених : тези / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2025, с. 21. [Online]. Available: <https://arb.kpi.ua/uk/science>.

13. Farrar, C. R. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. / C. R. Farrar, K. Worden. – Wiley, 2012. – DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118443118>.

References

1. Konotop, D. I. Suchasni tehnologiyi monitoringu napruzhenodeformovanogo stanu konstrukcij / D. I. Konotop, R. B. Nikitin // Mehanika giroskopichnih sistem, 2025. – № 49. – S. 145–152. DOI: [10.20535/0203-3771492025334120](https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334120).

2. Psuj, G. Structural Health Monitoring: Latest Applications and Data Analysis / Psuj G., Szymanik B. // Applied Sciences. – 2023. – vol. 13, no. 13, p. 7617, DOI: [10.3390/app13137617](https://doi.org/10.3390/app13137617).

3. Vanlanduit, S. Strain Monitoring / S. Vanlanduit, M. Sorgente, A. R. Zadeh, A. Guemes, N. Faisal // in Structural Health Monitoring: Damage Detection Systems for Aerospace, M. G. R. Sause and E. Jasiunienė, Eds. Springer. – 2021, pp. 219–241. DOI: [10.1007/978-3-030-72192-3_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3_8).

4. Kuzmych, L. V. Synthesis of Measurement Method of Stressed – Deformed Condition of Complex Structures / L. V. Kuzmych // Metrology and Instruments. – 2019. – no. 3(77). – pp. 2–18. [Online]. Available: [10.33955/2307-2180\(3\)2019.12-18](https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scientific_editions/mp-3-2019.pdf). https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scientific_editions/mp-3-2019.pdf.

5. Chen, B. Strain Measurement Technology and Precision Calibration Experiment Based on Flexible Sensing Fiber / B. Chen, J. Yang, A. Li, M. Zhang, J. Li, Z. Wang // Sensor. – 2024. – vol. 24, no. 12, p. 3811, DOI: [10.3390/s24123811](https://doi.org/10.3390/s24123811).

6. Silva, A. L. A Study of Strain and Deformation Measurement Using the Arduino Microcontroller and Strain Gauges Devices / A. L. Silva, M. Varanis, A. G. Meireles, C. Oliveira, J. M. Balthazar // Revista Brasileira de Ensino de Fisica. – 2019. – vol. 41. – no. 3. – p. e20180206, DOI: [10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206](https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206).

7. Zhao, X. Investigation on flight load calibration of aircraft composite wing based on strain gauge measurement / X. Zhao, Y. Li, Z. Yun, W. Zhang // Theoretical and Applied Mechanics Letters. – 2024. – vol. 14. – no. 5. – p. 100540. DOI: [10.1016/j.taml.2024.100540](https://doi.org/10.1016/j.taml.2024.100540).

8. Arduino. Arduino IDE Documentation. – [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>.

9. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors / Sensors and Actuators. – A: Physical. – 2020. DOI: [10.1016/j.sna.2020.111833](https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111833).

10. Processing Foundation. Processing 4.0 Reference. – [Online]. Available: <https://processing.org/reference/>.

11. Lopez-Castro, B. A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems: Architecture, Data Processing, and Visualization / B. Lopez-Castro, A. G. Haro-Baez, D. Arcos-Aviles, M. Barreno-Riera, B. Landazuri-Aviles // Sensors. – 2022. – vol. 22. – no. 23. – p. 9206. – [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9206>.

12. Nikitin, R. B., Konotop, D. I. Arhitektura avtomatizovanoyi sistemi monitoringu pruzhno-deformovanogo stanu aviacijnih konstrukcij // Avia-

raketobuduvannya: perspektivi ta napryamki rozvitku. VII nauk.-prakt. konf. studentiv ta molodih vchenih : tezi / KPI im. Igorya Sikorskogo. Kiyiv, 2025, s. 21. [Online]. Available: <https://arb.kpi.ua/uk/science>.

13. Farrar, C. R. Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective / C. R. Farrar, K. Worden. – Wiley, 2012. – DOI: [10.1002/9781118443118](https://doi.org/10.1002/9781118443118).

Надійшла до редакції 3.04.2026, розглянута на редколегії 10.04.2026

Development and experimental validation of a microcontroller-based strain gauge system for monitoring the elastic-deformed state of structural elements

The paper investigates the feasibility of using low-cost microcontroller platforms to build a strain-gauge measurement system. A measurement scheme based on the ESP32 microcontroller and the 24-bit HX711 analog-to-digital converter was implemented for measuring deformations of a cantilever beam made of 6063 (AD-31) aluminum alloy. Software for real-time visualization of measurement results was developed. Field calibration of the system was performed using linear regression. Determination coefficients $R^2 > 0.9997$ were obtained, confirming the high linearity of the response. The long-term stability of the system was investigated over a period of one year: a zero-value drift was recorded while the sensitivity of the measurement channels was preserved. Possible causes of drift were analyzed, and recommendations for improving measurement stability were formulated. A concept of a multi-level architecture for the application of the system under operational conditions of aircraft structures was elaborated.

Keywords: strain gauge measurements; field calibration; mechanical deformation; structural element; structural health monitoring.

Відомості про авторів:

Конотоп Дмитро Ігорович – канд. техн. наук, провідний інженер ДП «АНТОНОВ», доцент, кафедра авіа- та ракетобудування, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, пошта: d.konotop@kpi.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6989-5277>.

Нікітін Руслан Борисович – аспірант, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, пошта: r.nikitin@kpi.ua, ORCID: [0009-0007-6454-0005](https://orcid.org/0009-0007-6454-0005).

About the authors:

Dmytro KONOTOP – Ph.D. technical Sciences, Lead Engineer of "ANTONOV" company, Associate professor, NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine. e-mail: d.konotop@kpi.ua, ORCID: [0000-0001-6989-5277](https://orcid.org/0000-0001-6989-5277)

Ruslan NIKITIN – Ph.D. student, NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine. e-mail: r.nikitin@kpi.ua, ORCID: [0009-0007-6454-0005](https://orcid.org/0009-0007-6454-0005)