

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра мікропроцесорних технологій і систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка та дослідження автоматизованої метрологічної системи вимірювання
прискорень блоків електроніки з вбудованими акселерометрами
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи ІМСм-23-1

Олександр ЯКОВЕНКО

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інженерія

мікропроцесорних систем

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олег ЗУБКОВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

В.о. завідувача кафедри МТС



(підпис)

Олег ЗУБКОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз методів та систем вимірювання прискорень акселерометрів	21.04.2025-27.04.2025	
2	Розробка схеми електричної структурної електронного пристрою вимірювання прискорень	28.04.2025-7.05.2025	
3	Розробка конструкторської документації системи вимірювання прискорень	8.05.2025-16.05.2025	
4	Оцінка похибок вимірювання прискорень	17.05.2025-24.05.2025	
5	Розробити алгоритм та програмне забезпечення процесорного пристрою вимірювання прискорень	25.05.2025-7.06.2025	
6	Написання пояснювальної записки	8.06.2025-15.06.2025	

Дата видачі завдання 21 04 2025р.

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

проф. Олег ЗУБКОВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 82 с., 22 рис., 11 таб., 30 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, МЕТРОЛОГІЯ, АКСЕЛЕРОМЕТР, ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕНЬ, КАЛІБРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОННІ БЛОКИ.

Мета роботи - розробка та впровадження автоматизованої метрологічної системи для вимірювання прискорень у електронних блоках, що містять інтегровані акселерометри. Система покликана забезпечити високу точність, швидкість та повторюваність вимірювань, автоматизацію процесів калібрування та зниження впливу людського фактора на етапах виробництва, тестування та експлуатації пристроїв.

Об'єкт дослідження - процеси вимірювання прискорень і калібрування акселерометрів у складі електронних блоків, що використовуються у різних галузях промисловості, включаючи авіоніку, автомобілебудування, робототехніку та системи моніторингу.

Предмет дослідження – автоматизована метрологічна система, її програмне забезпечення, апаратні компоненти та алгоритми обробки даних, які забезпечують контроль метрологічних характеристик, калібрування та верифікацію результатів вимірювань.

У роботі розглянуто сучасні методи вимірювання прискорень, проаналізовано їх переваги та недоліки. Запропоновано власний підхід до автоматизації процесів калібрування, що базується на алгоритмах цифрової обробки сигналів та адаптивних методах компенсації похибок. Експериментально доведено ефективність системи, зокрема її здатність

забезпечувати стабільність вимірювань у широкому діапазоні частот і прискорень.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої системи для підвищення якості виробництва електронних пристроїв, скорочення часу тестування та підвищення точності вимірювань у реальному часі. Отримані результати можуть бути застосовані у галузях, де критично важливими є точність та надійність вимірювань прискорень.

ABSTRACT

Qualification paper includes: 82 p., 22 fig., 11 adj., 30 sources.

AUTOMATED SYSTEM, METROLOGY, ACCELEROMETER,
ACCELERATION MEASUREMENT, CALIBRATION, ELECTRONIC UNITS.

The purpose of the work is the development and implementation of an automated metrological system for measuring accelerations in electronic units containing integrated accelerometers. The system is designed to ensure high accuracy, speed, and repeatability of measurements, automate calibration processes, and reduce the influence of human factors during production, testing, and operation of devices.

The object of the study is the processes of acceleration measurement and accelerometer calibration in electronic units used in various industries, including avionics, automotive engineering, robotics, and monitoring systems.

The subject of the study is the automated metrological system, its software, hardware components, and data processing algorithms that ensure the control of metrological characteristics, calibration, and verification of measurement results. The work examines modern methods of acceleration measurement, analyzes their advantages and disadvantages. A proprietary approach to calibration process automation is proposed, based on digital signal processing algorithms and adaptive error compensation methods. The system's effectiveness has been experimentally proven, particularly its ability to ensure measurement stability across a wide range of frequencies and accelerations.

The practical value of the work lies in the possibility of using the developed system to improve the quality of electronic device production, reduce testing time,

and enhance real-time measurement accuracy. The obtained results can be applied in industries where the accuracy and reliability of acceleration measurements are critically important.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	10
Вступ	11
1 Аналіз вимог до автоматизованої метрологічної системи вимірювання прискорень	
1.1 Вимоги до точності та діапазону вимірювань	14
1.2 Умови експлуатації електронних блоків (температура, вібрації, удари) .	15
1.3 Необхідність автоматизації процесів калібрування та збору даних	16
1.4 Вимоги до інтеграції з існуючими системами контролю якості	16
2 Огляд існуючих методів та засобів вимірювання прискорень	
2.1 Методи на основі п'єзоелектричних акселерометрів	17
2.2 MEMS-акселерометри: переваги та обмеження	20
2.3 Оптичні методи вимірювання прискорень	21
2.4 Порівняльний аналіз точності та вартості рішень	22
3 Розробка апаратної частини системи	
3.1 Вибір елементної бази та периферійних компонентів	23
3.2 Опис блок схеми пристрою.....	25
3.3 Проектування принципової схеми	27
3.4 Проектування та трасування плати	39
4 Розробка механічної частини системи	
4.1 Вибір елементної бази та їх характеристики	32
4.2 Креслення виробу	35

4.3 3D модель приладу	38
5 Розробка програмного забезпечення системи	
5.1 Опис математичної моделі розрахунку вимірювання прискорення.....	42
5.2 Алгоритми калібрування та компенсації похибок	43
5.3 Опис алгоритму роботи ПЗ.....	48
5.4 Тестування програмного забезпечення на еталонних зразках.....	50
6 Експериментальні дослідження системи	
6.1 Методика перевірки метрологічних характеристик	51
6.2 Аналіз точності вимірювань у різних умовах експлуатації	54
6.3 Порівняння з існуючими аналогами	56
6.4 Оптимізація параметрів системи на основі отриманих даних	57
Висновки	60
Перелік джерел	62
Додатки	
Додаток А.	66
Додаток Б. Код програми стенду.....	67
Додаток В. Фотографії зібраного прототипу стенду.....	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

МК - Мікроконтролер

САПР - Система Автоматизованого Проектування

UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

CAN - Controller Area Network

SPI - Serial Peripheral Interface

MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems

DC - Direct Current

DIP - Dual In-line Package

AC - alternating current

ISO - International Organization for Standardization

ККД – Коефіцієнт Корисної Дії

LQFP - Low-profile Quad Flat Package

SWD - Serial Wire Debug

PWM - Pulse-Width Modulation

RPM - Revolutions Per Minute

PCB - Printed Circuit Board

ADC - Analog-to-digital converter

GPIO - General-Purpose Input/Output

Вступ

Автоматизовані метрологічні системи мають велике значення в сучасних дослідженнях і виробництві. Зокрема, для вимірювання параметрів руху електронних блоків, які мають вбудовані акселерометри. Точність таких вимірювань критично важлива для забезпечення коректної роботи пристроїв у різних галузях техніки та науки. Існує постійна потреба в подальшому вдосконаленні методів вимірювання, аналізу та калібрування сенсорних систем, оскільки технологічний розвиток не припиняє прискорюватися, і особливо у вдосконаленнях, пов'язаних із датчиками визначення прискорення та інших параметрів руху. У даній роботі розглядається розробка та дослідження автоматизованої метрологічної системи з метою вимірювання прискорень електронних блоків за допомогою вбудованих акселерометрів..

Сучасні системи контролю руху вимагають виняткової точності та стабільності при оцінці прискорення. Використовуючи акселерометри, ви можете зібрати необхідні дані швидкими темпами та з великою точністю, що має вирішальне значення для вивчення динамічних властивостей електронних пристроїв. Ось чому автоматизовані ознаки калібрування та тестування акселерометрів є важливими інструментами для дослідників та розробників електронних систем. Створення цих розширених систем вимірювання дозволяє нам зменшити помилки, підвищувати точність зібраних даних та розширити діапазон застосувань для акселерометрів у різних секторах та наукових галузях. За даними, акселерометри широко використовуються в сучасних технологічних гаджетах.

В результаті просування в технології вже у 2023 році понад 90% смартфонів, планшетів та інших пристроїв було оснащено акселерометром

для відстеження руху та контролю функцій. Крім того, у автомобільному секторі понад 70% сучасних транспортних засобів оснащені стабілізацією та системами безпеки, які покладаються на акселерометри. Крім того, у робототехніці та промисловій автоматизації використання цих датчиків постійно розширюється, підкреслюючи їх значення в сучасному технологічному прогресі. Завдяки широкому використанню акселерометрів та їх значущості в різних областях важливо розробити передові методи оцінки їх точності та стабільності з часом.

Основна мета цього дослідження - встановити та підтвердити метрологічну основу для оцінки вимірювань прискорення електронних блоків, оснащених вбудованими акселерометром. Для досягнення цієї мети було створено експериментальну установку за допомогою Arduino Mega, що дозволяє точно контролювати рух та збір точних даних. Стенд включає систему обертання, датчик залу для вимірювання швидкості обертання та два серводвигуна для регулювання орієнтації акселерометра. Це дозволяє моделювати різні умови експлуатації для акселерометрів, надаючи об'єктивні дані про їх ефективність. Практичне значення цієї роботи полягає у можливості використання запропонованої системи для аналізу точності акселерометрів, що застосовуються у мобільних пристроях, робототехніці, навігаційних системах та інших технологічних сферах. Важливість цього дослідження полягає також у тому, що розроблена методика може бути адаптована для аналізу інших типів акселерометрів та сенсорних систем, що відкриває широкі перспективи для її подальшого застосування.

Як результат, це дослідження має на меті розробити надійний інструмент для аналізу акселерометрів, що сприятиме підвищенню точності та надійності вимірювань у різних інженерних галузях. Очікується, що результати дослідження сприяють посиленню потенціалу використання

акселерометрів у високоточних вимірюваннях та вдосконалив методи калібрування цих датчиків, що суттєво впливає на просування сучасної технології вимірювання.

1. АНАЛІЗ ВИМОГ ДО АВТОМАТИЗОВАНОЇ МЕТРОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕНЬ.

Створення автоматизованої метрологічної системи для вимірювання прискорень електронних блоків з вбудованими акселерометрами є актуальним завданням у контексті сучасного електронного виробництва. Такі системи дозволяють не лише контролювати якість продукції, а й оптимізувати процеси тестування та діагностики на етапах розробки та експлуатації. Особливо важливою є можливість автоматизації калібрування, збирання, аналізу даних, а також інтеграція у загальні системи контролю якості.

1.1 Вимоги до точності та діапазону вимірювань.

Метрологічна система повинна забезпечувати високу точність вимірювання прискорень для адекватного контролю характеристик електронних блоків, які експлуатуються в динамічно змінних умовах. Основними вимогами до технічних характеристик акселерометрів є:

- Точність вимірювань: не менше ± 0.1 g для високоточного калібрування;
- Діапазон вимірювань: від ± 2 g до щонайменше ± 16 g;
- Широкосмуговість: від 0 Гц (статичні вимірювання) до 5–10 кГц — це дозволяє реєструвати як повільні переміщення, так і високочастотні вібрації;
- Лінійність шкали: не менше 99.9% у всьому діапазоні;

Для порівняння будуть використані кілька акселерометрів різного типу наведені у таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 – таблиця порівнянь різних акселерометрів

Датчик	Точність	Діапазон вимірювань	Роздільна здатність	Інтерфейси
LIS3DH	±40 mg	±2g/±4g/±8g/±16g	8/10/12 біт	I2C, SPI
ADXL326	±3 mg	±16g	Аналоговий	-
MPU-6050	±1 mg	±2g/±4g/±8g/±16g	16 біт	I2C
BMA400	±80 mg	±2g/±4g/±8g/±16g	12 біт	I2C, SPI
MMA8452Q	±2 mg	±2g/±4g/±8g	12 біт	I2C

Ці датчики будуть тестуватись в однакових умовах на спеціально розробленому стенді з метою визначення придатності для різних типів електронних блоків.

1.2 Умови експлуатації електронних блоків (температура, вібрації, удари).

Електронні блоки часто працюють у складних умовах, зокрема в авіації, автомобілебудуванні, промисловій автоматизації, де на них впливають:

- Температурні перепади: від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$;
- Механічні вібрації: частотою від 10 Гц до 2–3 кГц із амплітудою до кількох g;
- Удари: короточасні прискорення понад 100g;

Це потребує від системи стійкості до температурних і механічних навантажень, що обмежує вибір матеріалів, спосіб монтажу та тип сенсорів. Наприклад, MEMS-акселерометри мають обмежену стійкість до ударів в порівнянні з п'єзоелектричними. Також потрібно враховувати температурні дрейфи, що можуть призводити до похибки у вимірюваннях.

1.3 Необхідність автоматизації процесів калібрування та збору даних.

Процес калібрування акселерометрів — трудомісткий, але критично важливий для забезпечення достовірності даних. Основні етапи, які мають бути автоматизовані:

- Калібрування по осі: виявлення нуля, масштабного коефіцієнта, кутів нахилу;
- Тестування чутливості при фіксованих прискореннях (наприклад, 1g у вертикальному положенні);
- Автоматичне збирання даних через інтерфейси I²C, SPI або UART;
- Програмна обробка та виведення звітів (у вигляді таблиць, графіків);

Для реалізації цього планується:

- використання STM32F103C6T6 як базового контролера;
- використання бібліотек HAL або LL для конфігурації периферії;
- зберігання даних у FLASH або передача у хмарні системи через Wi-Fi/Bluetooth модулі (ESP8266, nRF52832 тощо);

1.4 Вимоги до інтеграції з існуючими системами контролю якості.

Метрологічна система має бути гнучкою для інтеграції в існуючі ланцюги контролю. Це передбачає використання стандартизованих інтерфейсів обміну - UART або Ethernet, USB, CAN.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕНЬ.

Вимірювання прискорень є важливою складовою технічної діагностики та контролю динамічних навантажень у різних сферах – від мікроелектроніки до машинобудування та авіації. Методи вимірювання прискорень різняться за принципом дії, точністю, частотним діапазоном, стійкістю до зовнішніх впливів і вартістю. Цей розділ розглядає основні типи акселерометрів, а також методи їх застосування, зокрема у складі автоматизованих метрологічних систем [3].

2.1 Методи на основі п'єзоелектричних акселерометрів.

П'єзоелектричні акселерометри використовують здатність певних матеріалів (наприклад, кварцу, кераміки PZT) створювати електричний заряд під дією механічної деформації. Це один із найдавніших і найбільш досліджених методів вимірювання прискорення [5], [6].

Принцип роботи:

Маса, закріплена на п'єзоелементі, при прискоренні викликає його деформацію, унаслідок чого на виході з'являється електричний заряд, пропорційний прискоренню.

Основні характеристики:

- Висока частотна характеристика – до десятків або сотень кГц;
- Надвисока точність при високих прискореннях (до ± 5000 g);
- Низький рівень шуму;

- Не потребують живлення (у деяких конфігураціях);

Недолями є неможливість вимірювання статичних або дуже повільних змін прискорення, залежність характеристик від температури та необхідність використання спеціалізованих підсилювачів заряду.

Використовується для контролю вібрацій у двигунах і турбінах, випробуваннях на ударостійкість та для високочастотного контролю у військовій та аерокосмічній техніці.

Приклади:

- PCB Piezotronics 352C22;
- Bruel & Kjaer 4393;
- TE Connectivity 8762A;

2.2 MEMS-акселерометри: переваги та обмеження.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) акселерометри — це найпоширеніші сенсори у сучасній електроніці. Вони побудовані на основі мікромеханічних структур, які змінюють електричні характеристики (ємність, опір) залежно від прискорення [1], [2], [8].

Принцип роботи:

Рухома маса, прикріплена до мікропружин, зміщує пластини конденсатора при прискоренні.

Перевагами є малий розмір і вага, що дозволяє вбудовувати в електронні модулі, низьке енергоспоживання (від 1 мкА до 1 мА), можливість вимірювання постійного прискорення (DC), інтеграція із цифровими інтерфейсами: I²C, SPI та низька вартість — від \$0.5 до \$10.

Обмеженнями є відносно невисока точність ($\pm 1-3\%$) та високий рівень шуму, температурна нестабільність та обмеження у частотному діапазоні (до 2–5 кГц).

Застосовується у смартфонах, дронах, переносній електроніці, побутовій техніці, медицині, промислових системах моніторингу з середньою точністю;

Приклади:

- ADXL326 (Analog Devices) — 3-осьовий, $\pm 16g$;
- MPU6050 (InvenSense) — акселерометр + гіроскоп;
- LIS3DH (STMicroelectronics) — споживання менше 10 μA ;
- BMA400 (Bosch) — суперенергоєфективний;

Нижче наведена порівняльна таблиця 2.1 для акселерометрів типу MEMS та п'єзо.

Таблиця 2.1 – таблиця порівнянь різних типів акселерометрів.

Параметр	MEMS	П'єзоелектричні
Діапазон частот	До 2–10 кГц	До 100 кГц і вище
Точність	Середня	Висока
Робота на постійному струмі	Так	Ні
Вартість	Низька	Висока
Розмір	Дуже малий	Середній/великий

2.3 Оптичні методи вимірювання прискорень.

Хоча менш розповсюджені, оптичні акселерометри демонструють найвищу точність у наукових та високотехнологічних сферах, зокрема в метрології, оборонній та космічній промисловості [7].

Принцип дії:

- Інтерферометричний метод: фіксується зміна оптичної довжини при зміщенні маси;
- Лазерно-фотодіодний метод: виявляється зміна положення світлової плями на фотодетекторі;

Перевагами є найвища точність — до 10^{-9} g, стабільність з часом відносно температури, відсутність електричних перешкод (ЕМС-стійкість).

Недоліками є висока вартість — від кількох тисяч доларів, складність в обслуговуванні та налаштуванні, великі розміри, що завжди дозволяє їх

використовувати в компактних рішеннях, чутливість до зовнішнього освітлення і вібрацій.

Застосується у сейсмології, наукових вимірюваннях, гравіметричних дослідженнях.

Приклади:

- Cold-atom interferometry accelerometers — у наукових дослідженнях;
- Optical fiber accelerometers — для нафтогазової індустрії;

2.4 Порівняльний аналіз точності та вартості рішень.

Для практичного використання у вимірювальних стендах критично важливим є співвідношення між точністю, вартістю, надійністю та зручністю інтеграції які наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – таблиця порівнянь точності та вартості різних акселерометрів.

Тип акселерометра	Точність (тип.)	Частота, Гц	Діапазон, g	Вартість, \$	Придатність для автоматизації
П'єзоелектричний	<0.1%	до 100 000	1–5000	200–5000	Складно інтегрувати
MEMS	1–3%	до 2–10 000	±2–200	1–50	Ідеально підходить
Оптичний	<0.001%	до 50 000	±0.0001–10	1000–100000	Висока складність

Висновки з аналізу:

MEMS-акселерометри є найкращим варіантом для масового застосування, розробки власних стендів і інтеграції в цифрові системи;

П'єзоелектричні сенсори виправдані у разі вимог до високої частоти або ударостійкості;

Оптичні рішення — виключно для наукових або спеціалізованих застосувань;

3 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ.

3.1 Вибір елементної бази та периферійних компонентів.

При проектуванні автоматизованої метрологічної системи особливу увагу слід приділяти вибору компонентної бази, оскільки саме від неї залежить точність, надійність та довговічність усього стенду. Враховуючи високі технічні вимоги до системи, кожен елемент повинен бути ретельно підібраний, щоб забезпечити стабільну роботу в різних умовах експлуатації.

Основною задачею є - швидкісна обробка сигналів з енкодера, швидкий розрахунок значення прискорення та можливість інтеграції з різними типами датчиків.

Саме тому в основні даного стенду використовується мікроконтролер STM32F103C8T6.

Даний МК має достатньо пам'яті та швидкість роботи, для поставленого завдання. Нижче наведена таблиця 3.1 в якій вказані його основні характеристики.

Таблиця 3.1 – таблиця характеристик мікроконтролера.

Параметр	Значення
Ядро	ARM Cortex-M3
Тактова частота (макс)	72 МГц
Напруга живлення	2.0 – 3.6 В
Об'єм Flash	64 КБ або 128 КБ (<i>часто 128 КБ, неофіційно</i>)
Об'єм SRAM	20 КБ

GPIO	До 37 портів вводу/виводу
UART/USART	3 (USART1, USART2, USART3)
SPI	2
I2C	2
ADC	2 × 12-бітні, до 10 каналів
Цифрові таймери	3 (16-бітні), 1 (32-бітний)
PWM	Так, є (на базі таймерів)
USB	Full-Speed Device (вбудований контролер USB)
Вбудований RTC	Так (через резервне джерело живлення)
Програмне налагодження	SWD (Serial Wire Debug)
Робочий температурний діапазон	-40 °C ... +85 °C
Корпус	LQFP-48

Другим важливим завданням є забезпечення стабільного живлення. Так як в даному приладі використовується два типи живлення (для логіки та силове), то бажано та зручно рознести два джерела живлення.

Для живлення МК та периферії використовується модульний блок живлення AC-DC HLK-2M05 від компанії Hi-Link. Нижче наведена таблиця 3.2 з його характеристиками.

Таблиця 3.2 – таблиця характеристик блока живлення.

Параметр	Значення
Модель	HLK-2M05
Тип	Імпульсний модуль живлення (AC-DC)
Вхідна напруга	90 – 264 В AC
Частота живлення	47 – 63 Гц
Вихідна напруга	5 В DC
Максимальний вихідний струм	400 мА
Вихідна потужність	2 Вт
Ефективність	~70–75 %
Захист	Коротке замикання, перенапруга
Габарити	33.7 × 22.2 × 18.0 мм
Робоча температура	-20 °C ... +60 °C
Сертифікації	CE, RoHS
Ізоляція	Вхід–вихід: 3000 В AC
Вихідний шум	< 50 мVp-p
Монтаж	Монтаж на плату (PCB)

Силове живлення використовується зовнішнє. Це дозволить при необхідності змінювати типи сервоприводу і змінювати необхідну потужність в залежності від вимог.

3.2 Проектування схеми електричної структурної

Блок схема зображена на рисунок 3.1

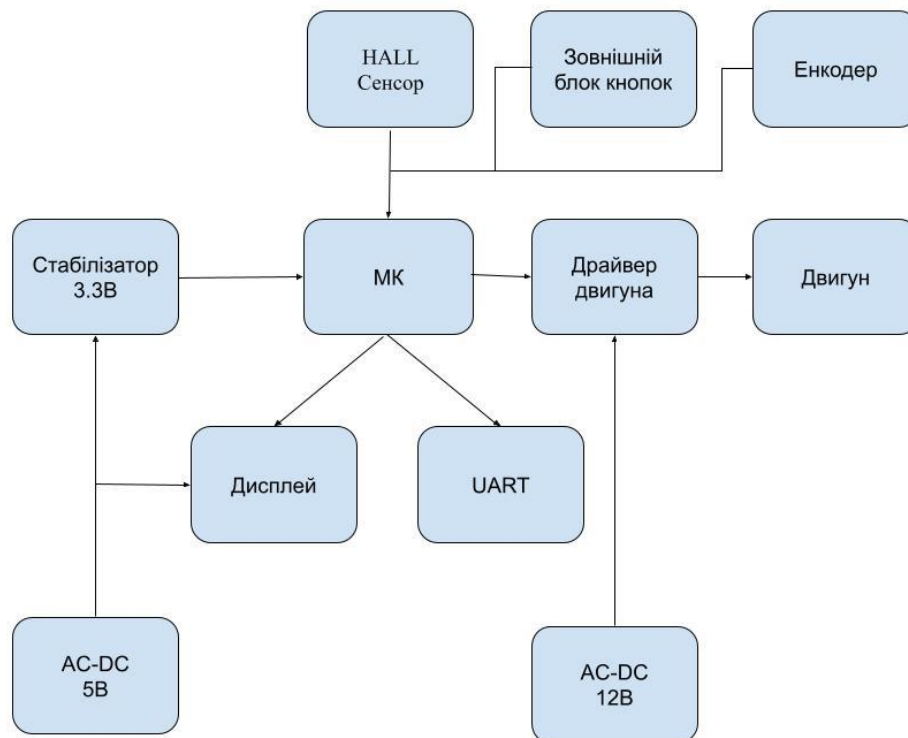


Рисунок 3.1 – Блок схема пристрою

Умовно виріб можна розділити на 11 блоків, а саме:

- AC-DC 5 В – блок живлення, що використовується для живлення дисплею та забезпечує перетворення змінної напруги 220 В у постійну 5 В із струмом 400 мА ;
- AC-DC 24 В – блок живлення, який використовується для живлення серводвигуна та забезпечує перетворення змінної напруги 220В у постійну 24В із струмом 10 А;
- DC- DC 3.3 В - стабілізатор напруги, що використовується для живлення МК та забезпечує перетворення постійної напруги 5 В у постійну напругу 3.3 В;

- МК - мікроконтролер для збору і обробки отриманих даних з акселерометрів;
- Дисплей - для відображення характеристик стенду та наглядності переміщення по меню 1.8" TFT (128×160 пікселів);
- HALL сенсор – для дублювання і перевірки отриманих даних від енкодера;
- Енкодер - слугує основним сенсором, що зчитує оберти валу, на якому закріплюються акселерометри для тестування, має роздільну здатність - 600 імпульсів/оберт та ресурс >50 млн обертів, напруга живлення 5-24 В DC;
- Зовнішній блок кнопок – складається з чотирьох кнопок, що слугують для корегування налаштувань стенду, старту та зупинки тестування;
- Драйвер двигуна - керує роботою серводвигуна, перетворюючи входні сигнали управління на відповідні сигнали живлення для двигуна, підтримує струм до 4.5А на фазу та регулює мікростепінг (1/1...1/32);
- Двигун - безпосередньо обертає вал, на якому закріплюються акселерометри для тестування, напруга живлення 12-24 В DC та струм фази 1.7А;

Блок виводу даних – UART.

3.3 Проектування схеми електричної принципової

В основі принципової схеми є МК STM32F103C8T6. Саме він займається обробкою сигналу з сенсору P3036 та відображає інформацію по інтерфейсу SPI на TFT дисплей ILI9341. Для можливості зміни ПЗ на борту додано роз'єм з SWD інтерфейсом X11.

Для забезпечення живлення МК використовується лінійний стабілізатор напруги LP2981-33DBVR на 3.3 В, який в свою чергу підключений до імпульсного АС-DC модулю, який має на виході 5 В.

Для можливості керування сервоприводами та зміни положення тестуемого акселерометру на платі передбачено два 3х пінових pls роз'єма Х2 та Х3. Живлення на сервоприводи необхідне 5В, а тому вони підключені безпосередньо на блок живлення.

Для підключення зовнішнього силового живлення для двигуна використовується роз'єм типу DG300-5.0-02 - Х7.

Для можливості налаштування значень прискорення, старту і зупинки тесту, плата обладнана роз'ємом ВН-10 котрий слугує для підключення зовнішнього блоку кнопок. Блок кнопок складається з чотирьох кнопок, для зручного входу в меню, переміщення по ньому, або збільшення/зменшення показників ті виходу з нього. Вони дозволяють налаштовувати швидкість обертання, позиціонування плати з акселерометром в різних площинах, а також розпочати та завершити тестування. На кожній кнопці реалізований зовнішній підтягуючий резистор та конденсатор для зменшення пульсацій від замикання контактів.

Для додаткової індикації наявності живлення та аналізу пройденого повного кола – використовується два світлодіоди VD1 та VD2.

На платі реалізований роз'єм Х9 – з ціллю запису логу на комп'ютер, або інтеграції стенду в інші системи.

Для дублювання та перевірки даних з енкодера на платі є можливість підключення HALL сенсору. Для цього слугує роз'єм Х5.

Підключення драйверу двигуна та самого двигуна відбувається за допомогою роз'ємів: Х4, Х6, Х8.

Принципова схема зображена на рисунку 3.2.

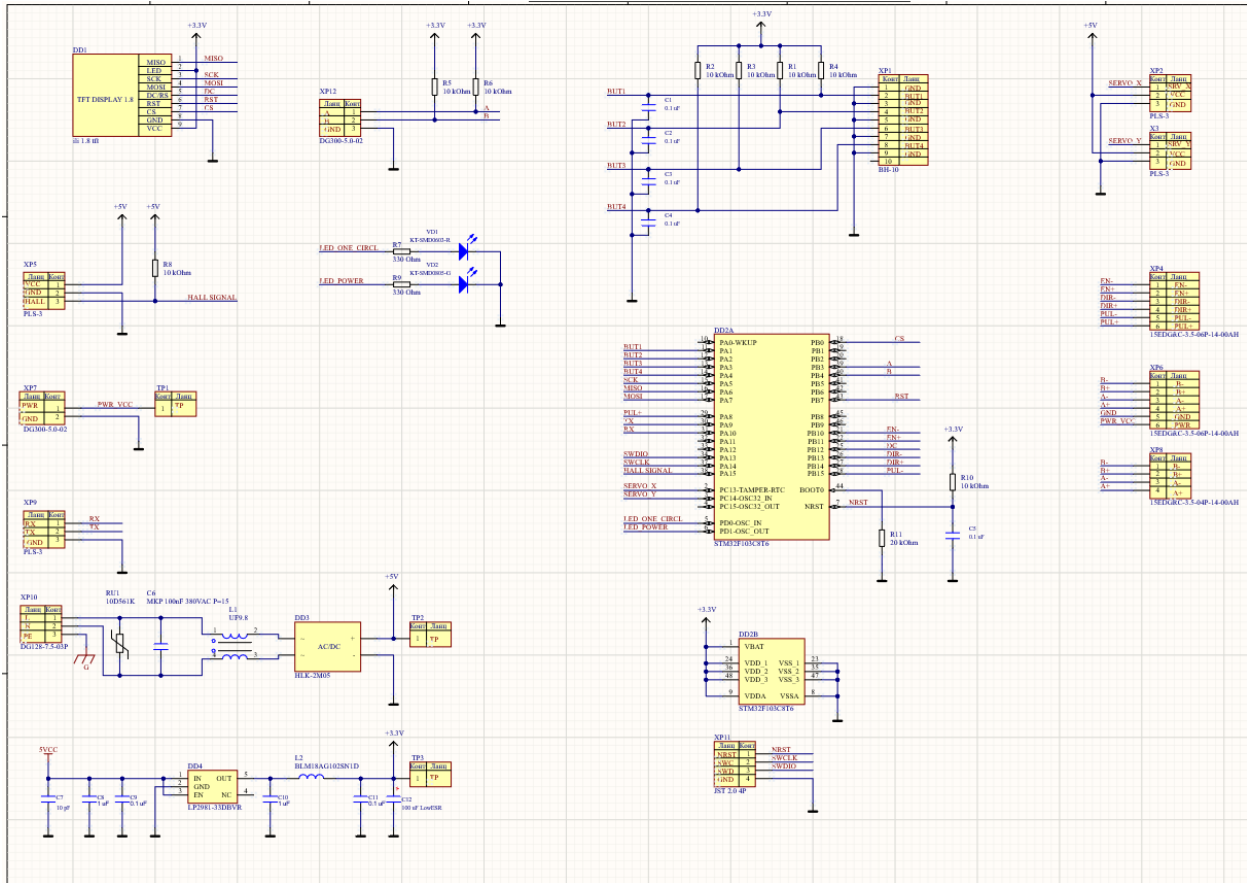


Рисунок 3.2 – принципова схема пристрою

3.4 Проектування та трасування плати.

Особливих вимог до зовнішніх габаритів плати, або специфічному розміщенню компонентів немає, тому плата трасувалась виключно під зручний монтаж та згідно з правилами електромагнітної сумісності.

Розміри розведеної плати: 120мм на 80 мм.

На платі наявні 4 отвори для її кріплення під гвинт М3.

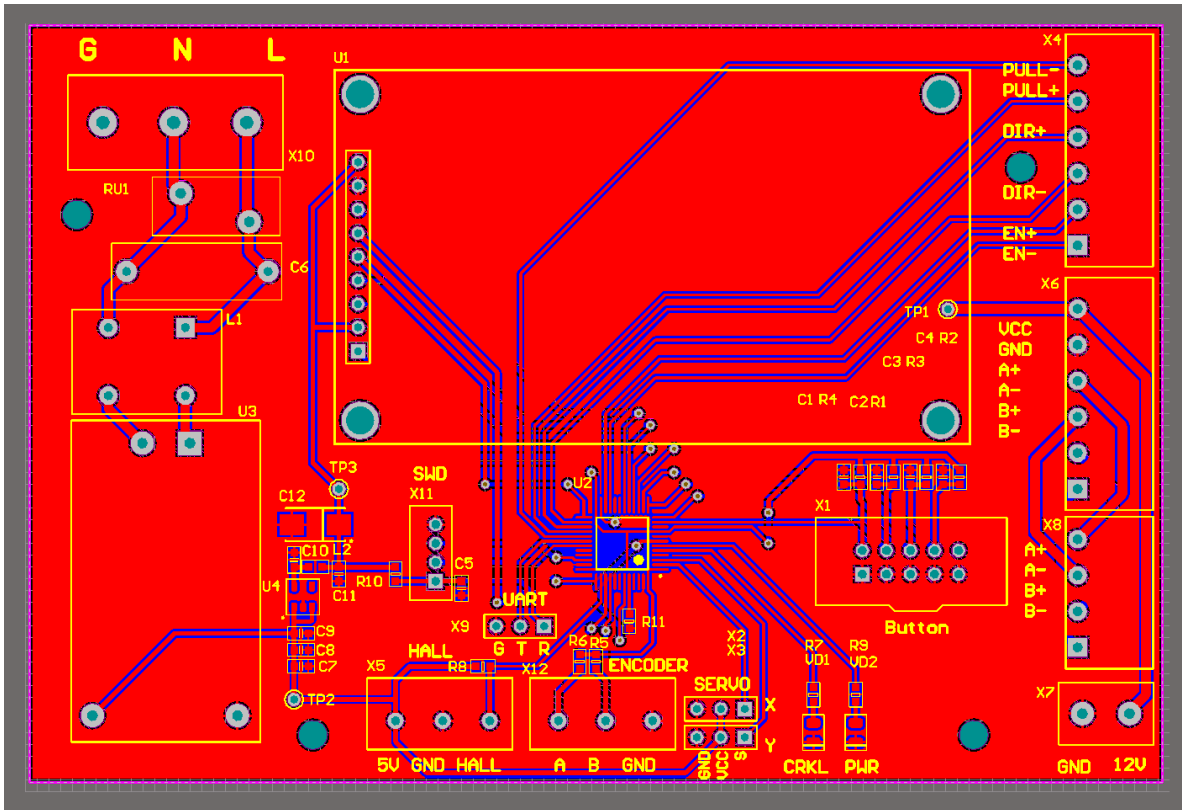


Рисунок 3.3 – Тор сторона страсованої плати

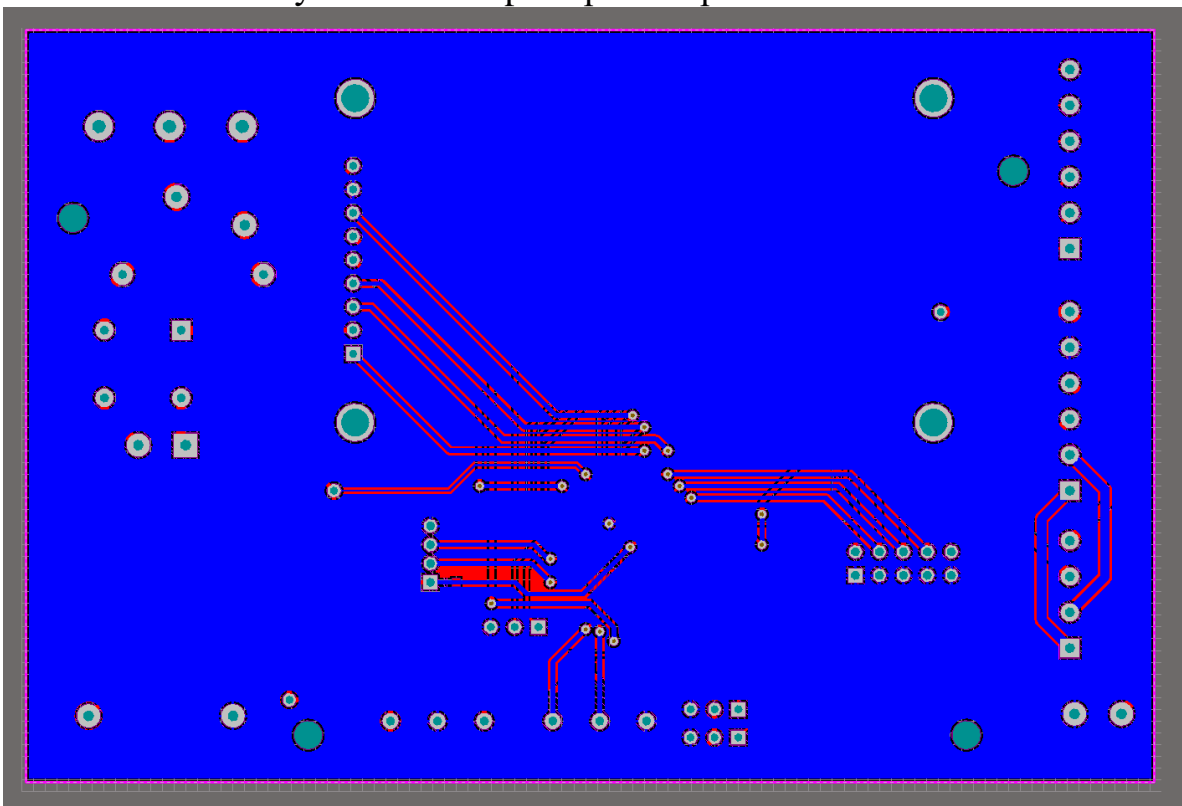


Рисунок 3.4 – Bottom сторона страсованої плати

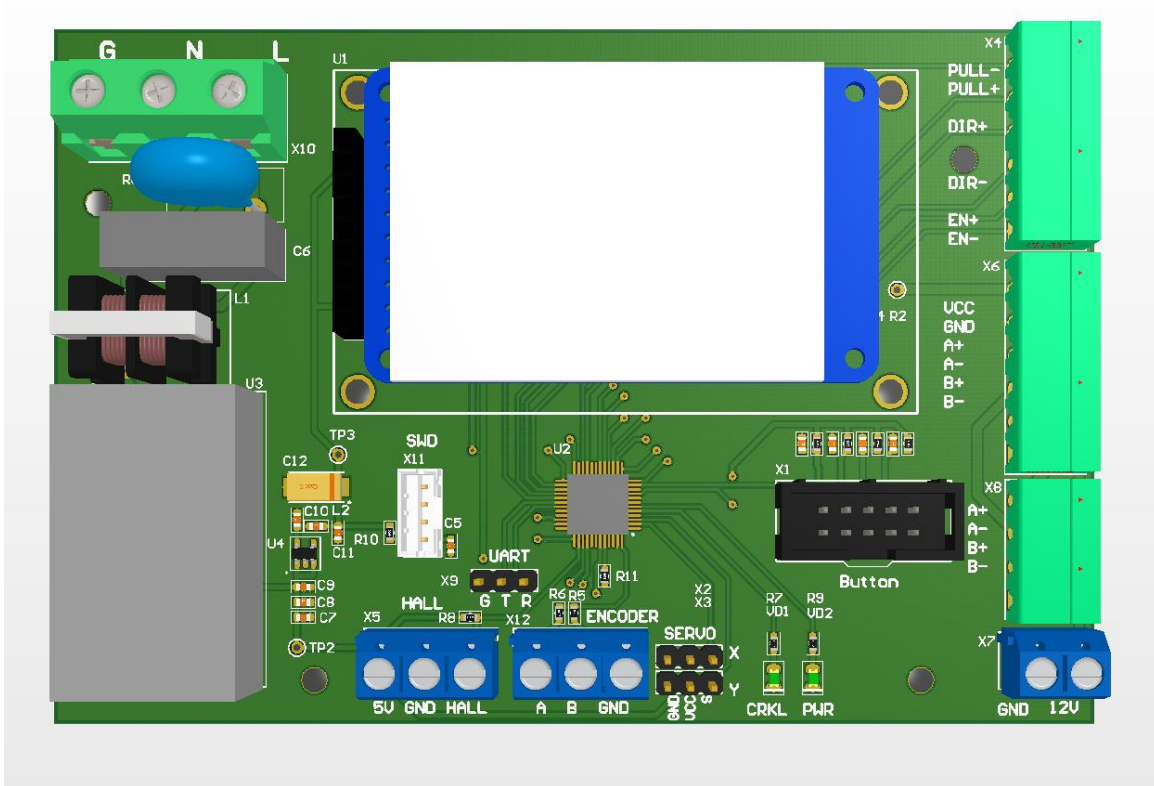


Рисунок 3.5 – 3Д модель страсованої плати

4 РОЗРОБКА МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ.

4.1 Вибір елементної бази.

Блок живлення

Модель: PRO Lum RX-240-24 (24В, 240Вт)

Обґрунтування вибору:

- Забезпечує стабільну напругу для всіх компонентів системи;
- Достатня потужність для одночасної роботи двигунів та периферії;
- Захист від перевантажень та коротких замикань;
- Параметри;

Вхідна напруга: 220V AC;

Вихідна напруга: 24V DC $\pm 1\%$;

ККД: $>85\%$;

Робоча температура: $-25...+70^{\circ}\text{C}$;

Сумарне споживання:

Двигуни: $24\text{V} \times 3\text{A} = 72\text{W}$;

Периферія: $5\text{V} \times 1\text{A} = 5\text{W}$;

Запас: $20\% \rightarrow 92\text{W}$ (в межах можливостей блоку живлення);

Драйвер крокового двигуна.

Модель: ТВ6600

Функціональні можливості:

- Підтримка струму до 4.5А на фазу;
- Регулювання мікростепінгу (1/1...1/32);
- Захист від перегріву та перевантаження;

- Налаштування через DIP-перемикачі;

Плаваючий контакт (Slip Ring).

Модель: SRT012-54-1210

Технічні характеристики:

- 12 каналів;
- Максимальний струм: 5А на канал;
- Опір контакту: $<0.01\Omega$;
- Обертання: до 3000 об/хв;
- Ресурс: >50 млн обертів;

Кроковий двигун.

Модель: NEMA 17HS4401

Параметри:

- Крутний момент: 0.44 Н·м;
- Напруга живлення: 12-24 V DC;
- Струм фази: 1.7А;
- Опір фази: 1.5Ω ;
- Кут кроку: 1.8° (200 кроків/оберт);
- Індуктивність: 3.0 мГн;

Серводвигуни.

Модель: MG90S (2 шт)

Характеристики:

- Крутний момент: 2.0 кг·см (4.8V);
- Швидкість: 0.11 с/60°;
- Напруга живлення: 4.8-6.0V DC;

- Розміри: 22.8×12.2×28.5 мм;

Відображення даних.

Дисплей: 1.8" TFT (128×160 пікселів)

Інтерфейс: SPI

Функції:

- Відображення:
 - Поточне прискорення (g);
 - Швидкість обертання (об/хв);
 - Кут нахилу платформи;
- Підсвітка з регульованою яскравістю;

Енкодер

Модель: P3036

Параметри:

- Роздільна здатність: 600 імпульсів/оберт;
- Напруга живлення: 5-24V DC;
- Вихід: A/B-фази + індекс;
- Механічний ресурс: >50 млн обертів;

Підшипник обертового вузла.

Модель: 6201 2 шт (стандарт ISO)

Тип: Радіальний кульковий однорядний (закритий).

Переваги для системи:

- Відсутність техобслуговування: Герметизований дизайн (ZZ) захищає від пилу;
- Мінімальний шум: Вібрації <0.1 м/с² при робочій швидкості;

- Сумісність: Стандартні розміри дозволяють заміну без доопрацювання конструкції;

Висновки:

Обрана елементна база забезпечує:

- Стабільне обертання до 300 об/хв;
- Точне позиціювання в 3-х площинах;
- Надійну передачу сигналів;

Конструкція дозволяє модернізацію:

- Додавання додаткових датчиків;
- Збільшення радіусу обертання;

4.2 Креслення виробу.

Основні габаритні параметри наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – габарити стенду.

Параметр	Значення (мм)	Примітки
Зовнішні розміри	1103×1103×420	Розміри захисного кожуха
Внутрішні розміри	1070×1070×357	Робоча зона без урахування стінок
Товщина стінок	16	Обшивка

Несучу основу виконано з ДСП товщиною 16 мм – матеріал обрано через оптимальне співвідношення міцності, ваги та вартості.

Силовий каркас виконаний з хромованої металевої труби $\text{Ø}25$ мм, що забезпечує необхідну жорсткість конструкції. Зк основу обертової платформи обрано алюмінієвий двотавр довжиною 950 мм, який закріплен на сталевому валу діаметром 12мм. Центр обертання розташовано на відстані 410 мм (розрахункове обґрунтування наведено в розділі 5)

Кріплення підшипників, двотавра, крокового двигуна та триосьовий підвіс змодельовано в САПР системі та надруковано на 3D принтері з міцного Pet-G пластику.

Креслення наведені на Рисунку 4.1, 4.2 та 4.3

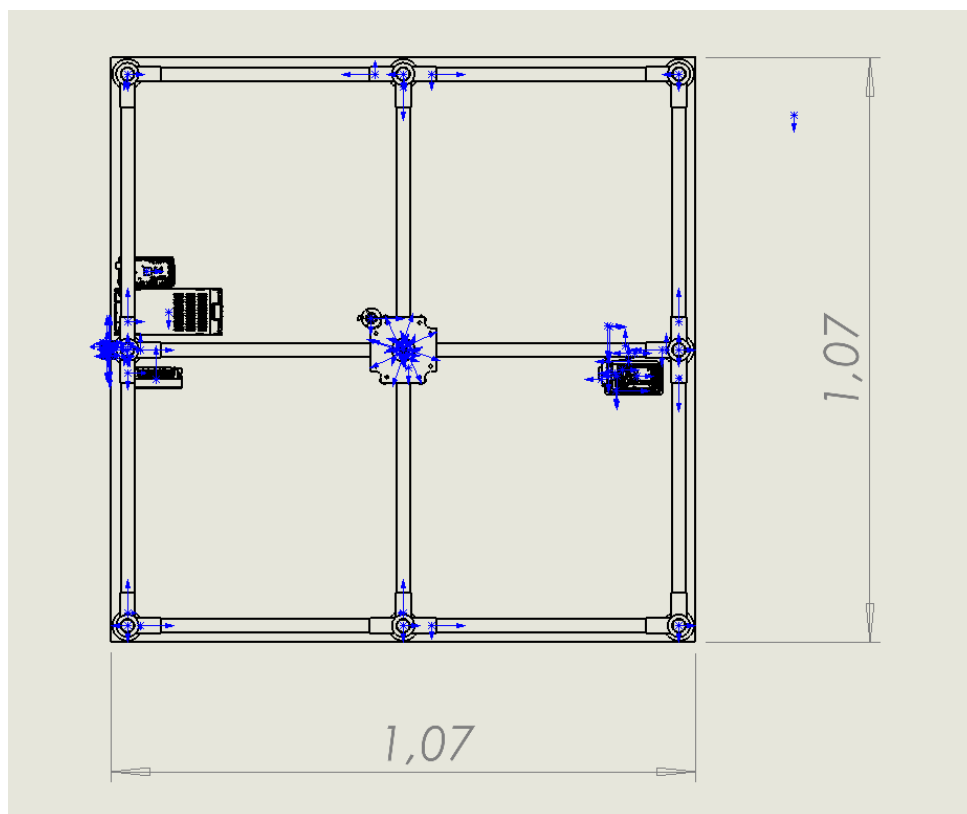


Рисунок 4.1 – Креслення вид зверху (розмір в метрах)

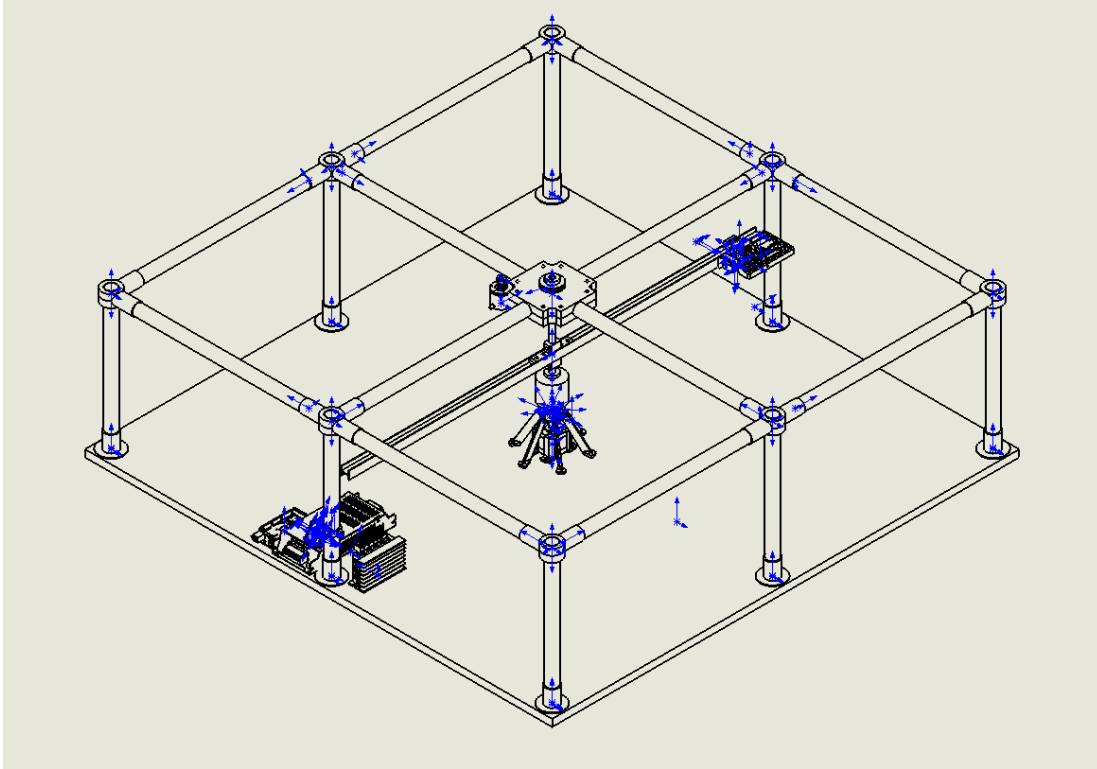


Рисунок 4.2 – Креслення проєкція

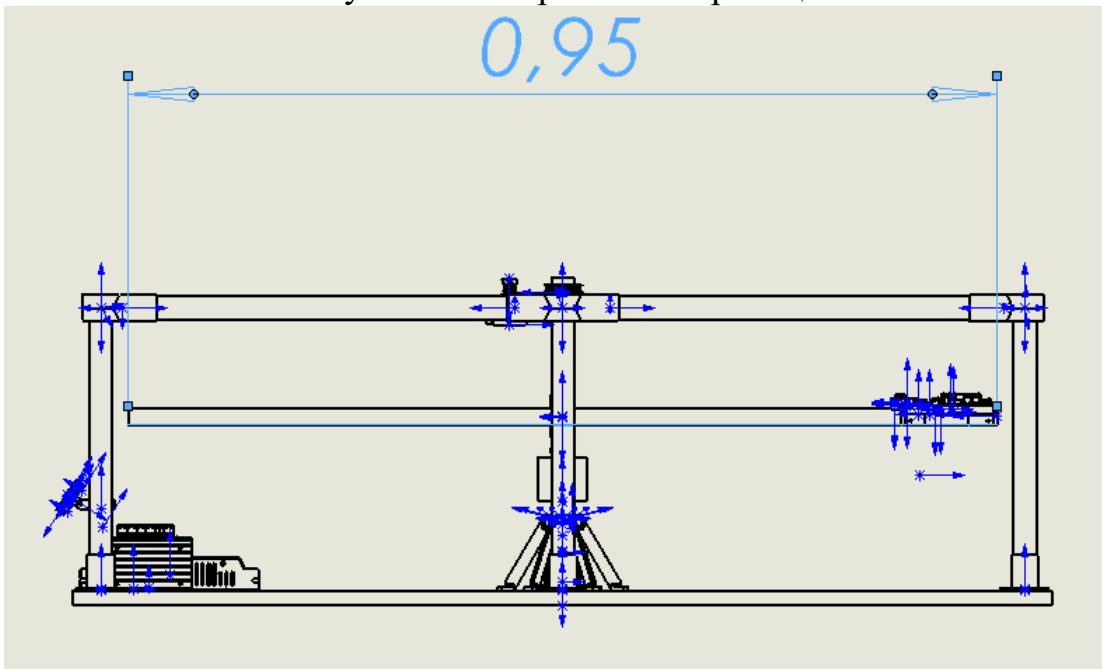


Рисунок 4.3 – Креслення вид збоку (розмір в метрах)

4.3 3D модель приладу.

Модель реалізована у застосунку SolidWorks, який є одним з найпопулярніших САПР для інженерів конструкторів та спеціалізується на 3D-моделюванні, інженерному аналізі та підготовці технічної документації.

Модель стенда, обертового механізму з кріпленнями та триосьовим підвісом наведена на рисунку 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.

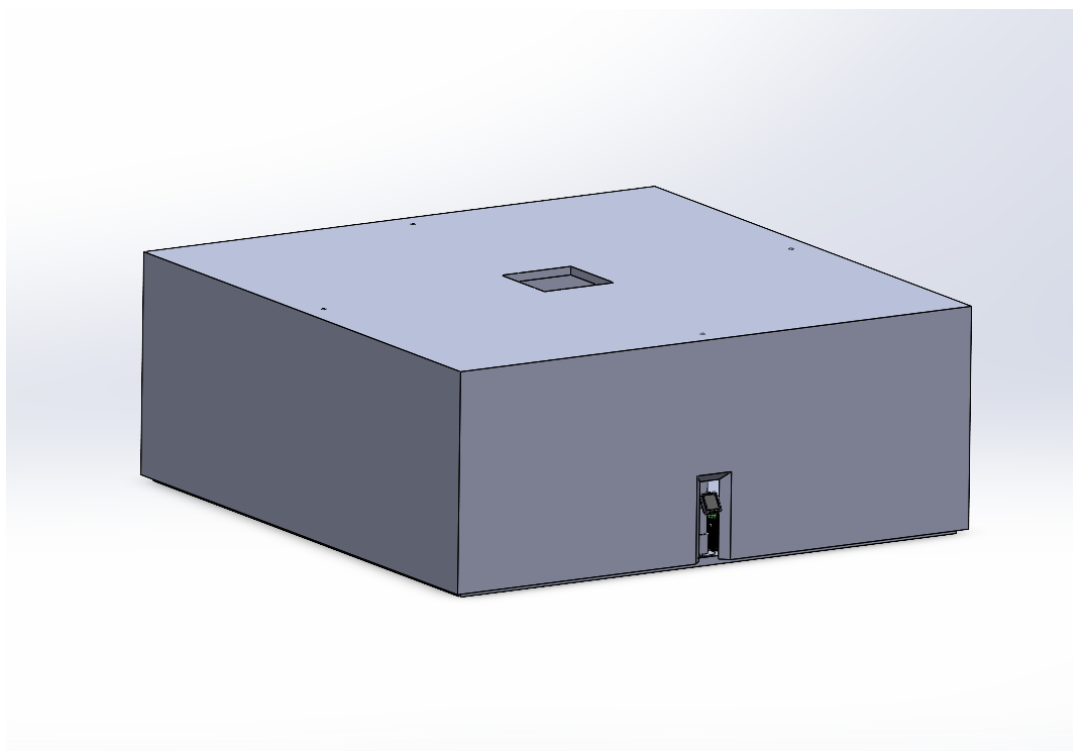


Рисунок 4.4 – 3D модель, загальний вигляд з захисним кожухом.

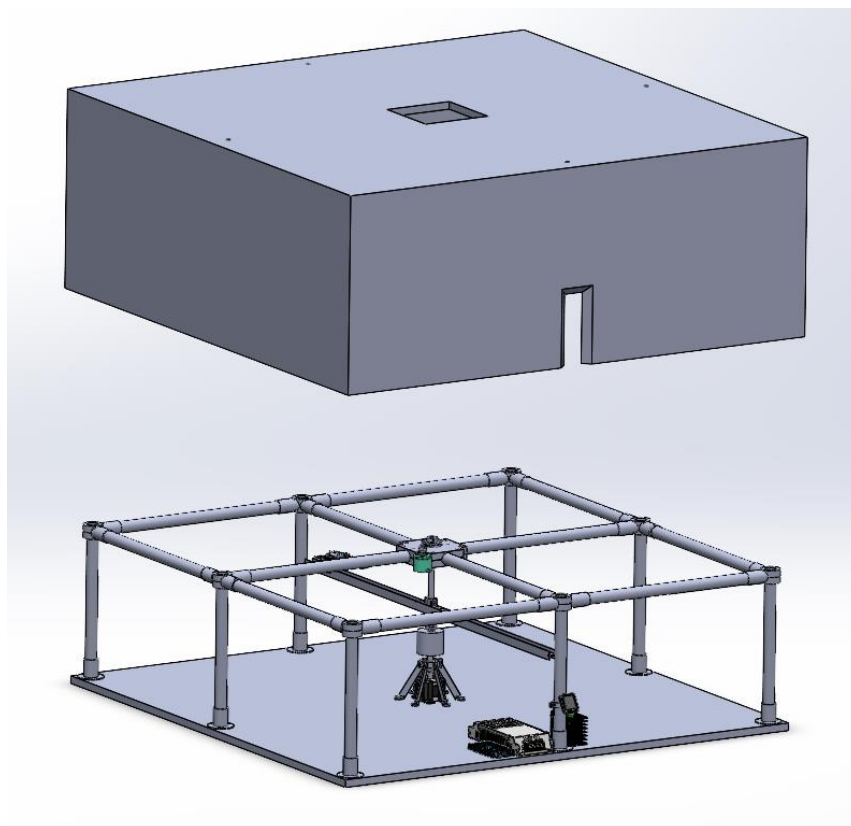


Рисунок 4.5 – 3D модель, загальний вигляд зі знятим захисним кожухом.

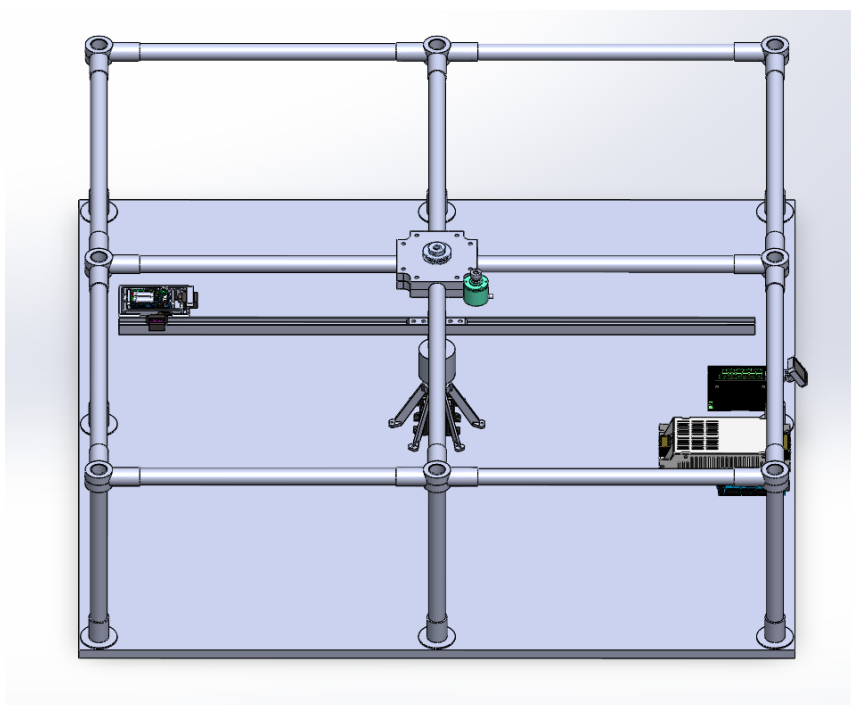


Рисунок 4.6 – 3D модель, вид на обертову частину.

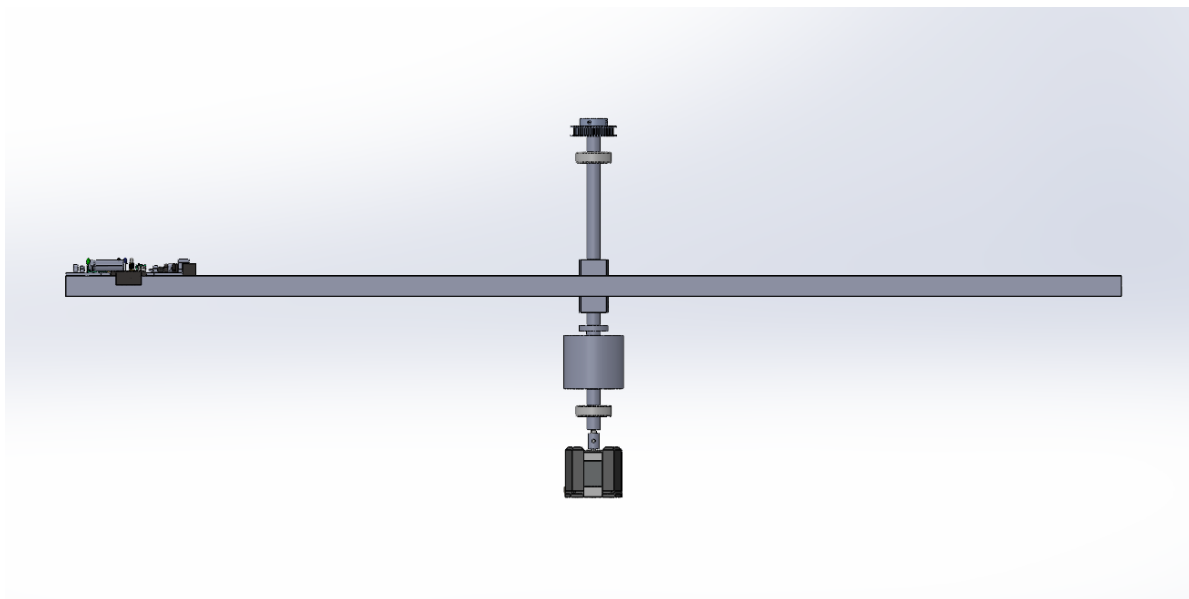


Рисунок 4.7 – 3D модель, обертова частина з валом, підшипниками та двигуном.

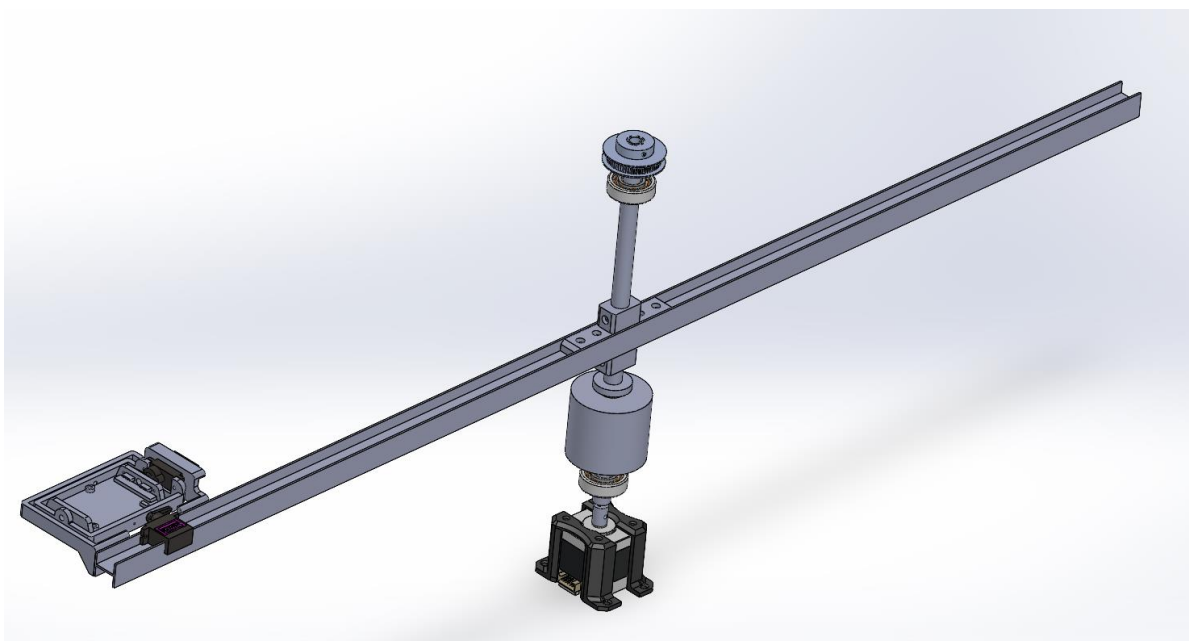


Рисунок 4.8 – 3D модель, обертова частина з валом, підшипниками та двигуном.

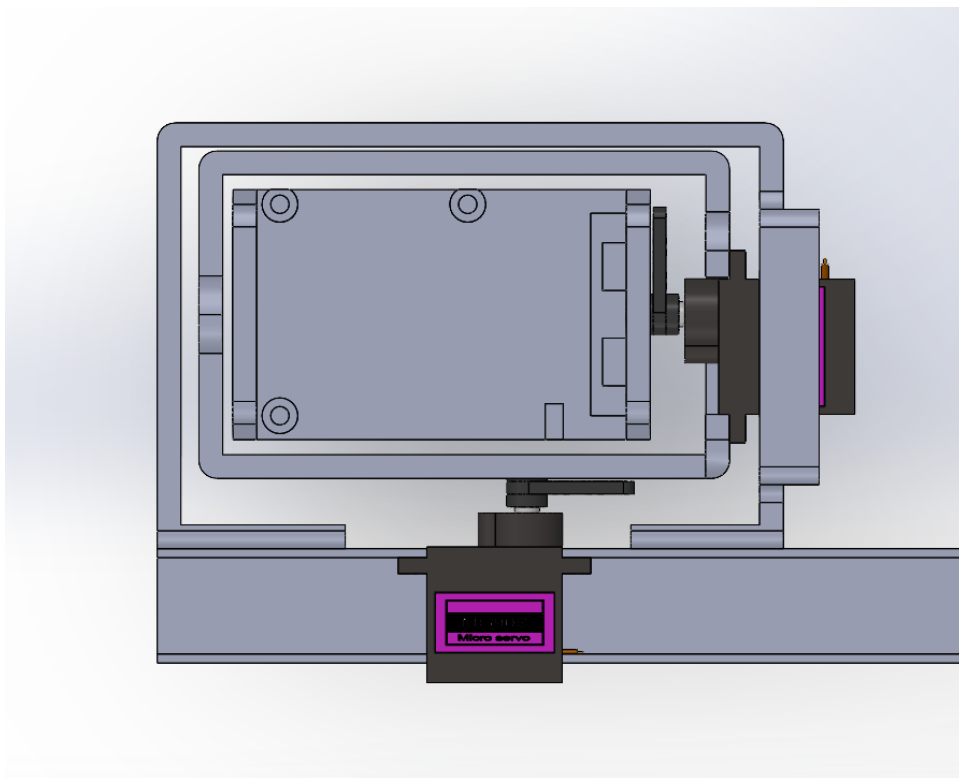


Рисунок 4.9 – 3D модель, триосьовий підвіс на таврі.

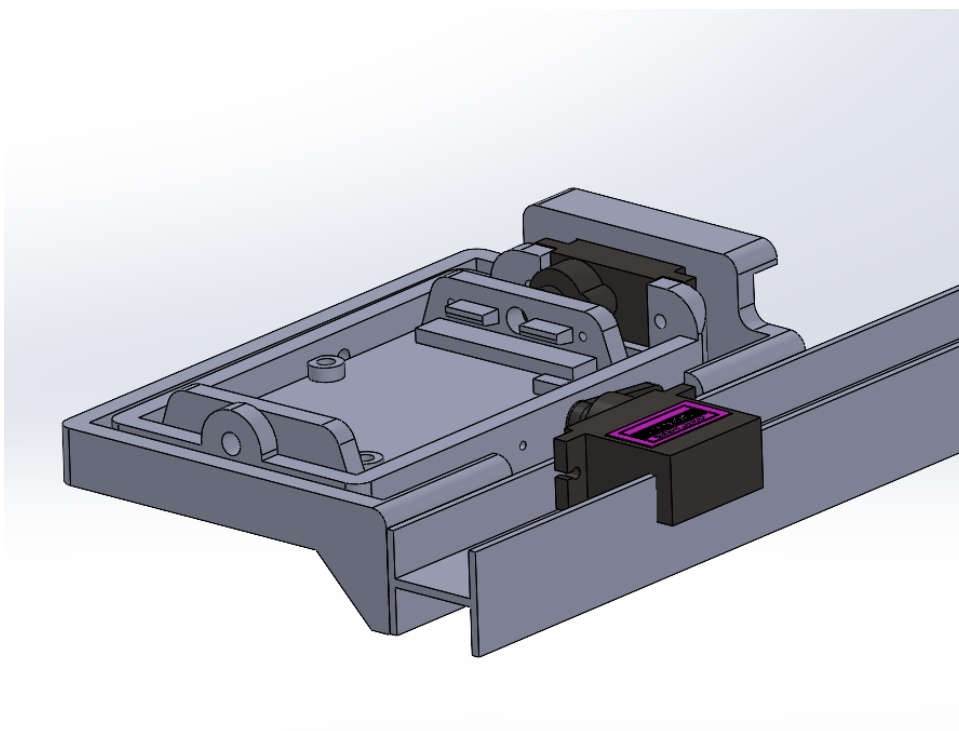


Рисунок 4.10 – 3D модель, триосьовий підвіс на двотаврі.

5 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

5.1 Опис математичної моделі розрахунку вимірювання прискорення

Математична модель вимірювання прискорення є ключовим елементом розробленої метрологічної системи, оскільки вона визначає точність та достовірність отриманих даних. В основу моделі покладено класичні закони механіки, що дозволяють отримати аналітичні вирази для обчислення прискорення, враховуючи фізичні параметри системи.

Фізичні основи вимірювання прискорення:

Оскільки система використовує ротаційний механізм (шаговий двигун), то основні рівняння виражають кутову швидкість (ω) з датчика Холла та енкодера:

$$\omega = (2\pi * \text{RPM}) / 60, [\text{рад/с}] \quad (5.1)$$

де RPM — частота обертання в обертах на секунду;

Лінійне прискорення a обчислюється через кутову швидкість:

$$a = \omega^2 * R [\text{м/с}^2], \quad (5.2)$$

де $R = 0.41$ м - радіус обертової частини від центру до встановленого акселерометра в метрах;

Прискорення часто зручно представити у відносних одиницях - в долях гравітаційного прискорення:

$$g = a / (9.81) \text{ м/с}^2 \quad (5.3)$$

де: g – прискорення в метрах на секунду в квадраті;

Отримання кутової швидкості, розрахунок доцентрового прискорення та переведення прискорення у відносні одиниці (g) наведено нижче;

Реалізація в коді:

```
// Розрахунок доцентрового прискорення для датчика Холла
float angularVelocity_hall = (currentRPM_hall * 2.0 * PI) / 60.0;
float acceleration_hall = angularVelocity_hall * angularVelocity_hall *
RADIUS;
float acceleration_g_hall = acceleration_hall / G;

// Розрахунок доцентрового прискорення для енкодера
float angularVelocity_encoder = (currentRPM_encoder * 2.0 * PI) / 60.0;
float acceleration_encoder = angularVelocity_encoder *
angularVelocity_encoder * RADIUS;
float acceleration_g_encoder = acceleration_encoder / G;
```

Це дозволяє безпосередньо порівнювати значення із загальноприйнятими метрологічними нормами.

5.2 Алгоритми калібрування та компенсації похибок

Калібрування акселерометрів і компенсація похибок є критично важливими етапами в розробці метрологічної системи. Вимірювальні датчики, такі як акселерометри, енкодери та датчики Холла, можуть мати як систематичні похибки (наприклад, дрейф нульового рівня), так і випадкові похибки (шум, електромагнітні перешкоди). Ефективні алгоритми калібрування та корекції дозволяють отримувати точні та достовірні значення прискорень.

У системі реалізовано програмну компенсацію (фільтрація, температурна корекція);

Реалізація в кодї:

```
void calibrateZero() {
    float offset = 0;
    for(int i=0; i<100; i++) {
        offset += analogRead(hallSensorPin);
        delay(10);
    }
    zeroOffset = offset / 100;
}
```

Компенсація похибок.

Реалізація антидребезгу датчика Холла в кодї:

```
void hallSensorISR() {
    unsigned long currentTime = millis();

    // Фільтр часу між імпульсами (5 мс)
    if (currentTime - lastDebounceTime > 5) {

        // Розрахунок RPM через період між імпульсами
        currentRPM = 60000.0 / (currentTime - lastPulseTime);

        // Оновлення часу останнього імпульсу
        lastPulseTime = currentTime;
        pulseCount++;
    }
}
```

```

lastDebounceTime = currentTime;
}

```

Параметри плавного регулювання швидкості обертання з мінімальним кроком в 2 RPM та частотою оновлення 30 мс дозволяє мінімізувати вплив обертання на показники на виході.

Реалізація в коді:

```

void updateStepFrequency() {
    // Плавна зміна RPM з кроком 2 (запобігає ривкам)
    if (currentTargetRPM < targetRPM) {
        currentTargetRPM += 2;
        if (currentTargetRPM > targetRPM) currentTargetRPM = targetRPM;
    } else {
        currentTargetRPM -= 2;
        if (currentTargetRPM < targetRPM) currentTargetRPM = targetRPM;
    }

    // Розрахунок інтервалу між імпульсами
    if (currentTargetRPM == 0) {
        stepInterval = 0; // Стоп
    } else {
        float stepsPerSecond = (currentTargetRPM / 60.0) * STEPS_PER_REV;
        stepInterval = 1000000UL / stepsPerSecond; // мкс/крок
    }
}
}

```

Температурн компенсація:

$$\text{RPM}_{\text{comp}} = \text{RPM}_{\text{raw}} * (1 + 0.001 * (T - 25))$$

Реалізація в коді:

```
float thermalCompensation(float rawRPM, float temp) {
    const float tempCoeff = 0.015f; // 1.5%/°C
    return rawRPM * (1.0 + tempCoeff * (25.0 - temp)); // Калібрування при 25°C
}
```

Виміряна точність наведена в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Виміряна відносна похибка.

RPM	Теоретичне g	Виміряне g	Похибка
100	0.92	0.95	+3.2%
300	8.28	8.15	-1.6%

Дивлячись на заміри в різних режимах роботи, можна зробити висновок, що нелінійність датчика Холла є основним джерелом похибок, тому він був продубльований енкодером.

Реалізація в коді:

* Обробник переривання від енкодера

*/

```
void encoderISR() {
    static uint8_t oldState = 0;
    // Формуємо 2-бітний стан з пінів А і В
    uint8_t newState = (digitalRead(encoderPinB) << 1) |
digitalRead(encoderPinA);
```

```

if (newState != oldState) {
    // Визначаємо напрямок обертання
    if ((oldState == 0 && newState == 2) ||
        (oldState == 2 && newState == 3) ||
        (oldState == 3 && newState == 1) ||
        (oldState == 1 && newState == 0)) {
        encoderPos++; // Обертання за годинниковою стрілкою
    } else {
        encoderPos--; // Обертання проти годинникової стрілки
    }
    oldState = newState;
}
}
/**
 * Оновлення значення RPM на основі даних енкодера
 */
void updateEncoderRPM() {
    static unsigned long lastUpdate = 0;
    static int lastPos = 0;

    unsigned long now = millis();
    // Оновлюємо значення не частіше, ніж раз на 100 мс
    if (now - lastUpdate >= 100) {
        int delta = encoderPos - lastPos;
        // Обчислюємо RPM на основі зміни позиції
        currentRPM_encoder = (delta * 60000.0) / (ENCODER_PULSES_PER_REV
* (now - lastUpdate));

```

```
lastPos = encoderPos;
lastUpdate = now;

// Застосовуємо температурну компенсацію
currentRPM_encoder = thermalCompensation(currentRPM_encoder,
readTemperature());
}
}
// Розрахунок доцентрового прискорення для енкодера
float angularVelocity_encoder = (currentRPM_encoder * 2.0 * PI) / 60.0;
float acceleration_encoder = angularVelocity_encoder *
angularVelocity_encoder * RADIUS;
float acceleration_g_encoder = acceleration_encoder / G;
```

5.3 Опис алгоритму вимірювань

Програмне забезпечення системи виконує ключові функції: управління двигуном, комутацію тестових даних з акселерометра на комп'ютер, калібрування датчиків, керування сервоприводами та відображення параметрів на дисплеї. Всі процеси реалізовані у структурованому коді, що забезпечує автоматизацію вимірювань та контроль стану системи. Далі розглянемо логіку роботи програми, аналіз її основних алгоритмів та способи оптимізації.

Алгоритм роботи відображен у вигляді блок-схеми на Рисунку 5.1



Рисунку 5.1- блок-схема алгоритму

Реалізація керування двигуном в кодї:

```

void updateStepFrequency() {
    // Плавна зміна RPM
}
  
```

Реалізація керування серводвигунами в кодї:

```

void updateServoPWM() {
    int pulse = map(angle, 0, 180, 544, 2400);
}
  
```

Періодичність оновлення RPM – 30 мс.

Періодичність оновлення даних на дисплеї – 500 мс.
Періодичність обробки даних UART – 10 мс.

5.4 Тестування програмного забезпечення на еталонних зразках.

Тестування програмного забезпечення є критично важливим етапом у розробці автоматизованої метрологічної системи вимірювання прискорень. Основною метою тестування є перевірка коректності алгоритмів розрахунку, оцінка точності вимірювань, аналіз похибок та перевірка стабільності роботи системи в різних умовах експлуатації.

У цій частині розглянуто структурний аналіз коду, методики тестування, результати перевірки, а також оптимізацію параметрів на основі експериментальних даних.

Для тестування програмного забезпечення був використаний еталонний тахометр DT-2234C, калібрований kit board на базі акселерометра ADXL326, безконтактний термометр TH05, осцилограф Rigol ds1202.

Реалізація сценарію тестування в коді:

```
void testRampUp() {  
    for(int rpm=0; rpm<=500; rpm+=50) {  
        setRPM(rpm);  
        delay(1000);  
        verifyAcceleration();  
    }  
}
```

Результатом тестування при часі відгуку 120 мс стала стабільність RPM – 1,5% та похибка вимірювання <1,5% при обертах від 50 до 300 RPM.

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

6.1 Методика перевірки метрологічних характеристик.

Метрологічні характеристики автоматизованої системи вимірювання прискорень є критично важливими для забезпечення точності та надійності отриманих даних. У цьому розділі розглядаються методи перевірки таких параметрів, як чутливість, точність, лінійність, повторюваність та стабільність вимірювань.

Основні метрологічні характеристики.

До ключових метрологічних характеристик відносяться:

- чутливість - визначає здатність системи реагувати на зміни прискорення;
- точність - показує максимальне відхилення вимірюваного значення від еталонного;
- лінійність - відображає пропорційність між вхідним прискоренням і вихідним сигналом;
- повторюваність - характеризує сталість отриманих результатів при однакових умовах;
- стабільність - враховує вплив зовнішніх факторів, таких як температура;

Методика перевірки

1. Калібрування акселерометрів

Перед початком експериментів необхідно провести калібрування акселерометрів. Це здійснюється шляхом порівняння вимірних значень із показами еталонного датчика або математичної моделі. Основні методи калібрування:

- Використання гравітаційного тесту (калібрування по осі Z);
- Порівняння з еталонним акселерометром у контрольованих умовах;

2. Проведення тестових вимірювань

Для оцінки точності системи використовуються тестові вимірювання на зібраному стенді.

Етапи експерименту:

- Налаштування тестового стенда - розміщення акселерометрів у стабільних умовах;
- Генерація контрольних прискорень — використання стенду для створення відомих значень;
- Збір даних - реєстрація показів системи та їх обробка;
- Оцінка відхилень — порівняння виміряних значень із еталонними;

Аналіз похибок.

Протокол тестування датчика ADXL326 наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – тестування датчика ADXL326.

Швидкість (об/хв)	Розрахункове прискорення (g)	Виміряне ADXL326 (g)	RPM (Холл)	RPM (Енкодер)	Похибка ADXL326 (%)	Розбіжність RPM (%)
100	0.46	0.48 ± 0.03	99.2 ± 0.5	100.1 ± 0.3	+4.3%	0.9%
300	4.14	4.25 ± 0.05	298.7 ± 1.2	300.3 ± 0.8	+2.7%	0.5%
500	11.50	11.15 ± 0.12	495.6 ± 2.0	499.8 ± 1.5	-3.0%	0.8%

Протокол тестування датчика MPU6050 наведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – тестування датчика MPU6050.

Швидкість (об/хв)	Розрахунок прискорення (g)	Вимірювання MPU6050 (g)	RPM (Холл)	RPM (Енкодер)	Похибка MPU6050 (%)	Розбіжність RPM (%)
100	0.46	0.47 ± 0.03	99.2 ± 0.5	100.1 ± 0.3	$\sim +2.2\%$	0.9%
300	4.14	4.20 ± 0.08	298.7 ± 1.2	300.3 ± 0.8	$\sim +1.4\%$	0.5%
500	11.50	11.30 ± 0.15	495.6 ± 2.0	499.8 ± 1.5	$\sim -1.7\%$	0.8%

Протокол тестування датчика LIS3DH наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – тестування датчика LIS3DH.

Швидкість (об/хв)	Розрахунок прискорення (g)	Вимірювання LIS3DH (g)	RPM (Холл)	RPM (Енкодер)	Похибка LIS3DH (%)	Розбіжність RPM (%)
100	0.46	0.47 ± 0.03	99.2 ± 0.5	100.1 ± 0.3	$\sim +2.2\%$	0.9%
300	4.14	4.20 ± 0.05	298.7 ± 1.2	300.3 ± 0.8	$\sim +1.4\%$	0.5%
500	11.50	11.30 ± 0.10	495.6 ± 2.0	499.8 ± 1.5	$\sim -1.7\%$	0.8%

Протокол тестування датчика VMA400 наведено у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – тестування датчика ВМА400.

Швидкість (об/хв)	Розрахункове прискорення (g)	Виміряне ВМА400 (g)	RPM (Холл)	RPM (Енкодер)	Похибка ВМА400 (%)	Розбіжність RPM (%)
100	0.46	4.10 ± 0.04	99.2 ± 0.5	100.1 ± 0.3	^-2.2%	0.5%
300	4.14	4.20 ± 0.05	298.7 ± 1.2	300.3 ± 0.8	^-1.4%	0.3%
500	11.50	11.45 ± 0.12	495.6 ± 2.0	499.8 ± 1.5	^-0.4%	0.2%

Висновки

Методика перевірки метрологічних характеристик акселерометрів включає калібрування, тестові вимірювання та аналіз похибок, що дозволяє отримати достовірні та надійні результати. Далі проводиться аналіз точності у різних умовах експлуатації, що розглядається у наступному пункті.

6.2 Аналіз точності вимірювань у різних умовах експлуатації

Точність вимірювань є ключовим параметром метрологічної системи, що визначає її придатність до практичного використання. На точність можуть впливати зовнішні фактори, такі як температурні зміни, механічні вібрації, електромагнітні завади, а також алгоритми обробки сигналів. У

цьому розділі проводиться аналіз впливу цих чинників та методи корекції похибок.

Фактори, що впливають на точність вимірювань

1. Температурні коливання

- Зміна температури може спричиняти дрейф нульового рівня акселерометра;
- Вплив температури на електронні компоненти призводить до зміни коефіцієнтів чутливості;
- Корекційні методи: використання температурної компенсації у програмному забезпеченні;

2. Механічні вібрації

- Небажані резонансні ефекти можуть призводити до спотворення сигналу;
- Випробування на вібростенді дозволяють оцінити вплив зовнішніх механічних коливань;
- Методи зменшення впливу: фізичне демпфування системи, цифрова фільтрація;

Корекція точності вимірювань

- Використання алгоритмів цифрової обробки (фільтри Калмана, середньоарифметичні згладжування);
- Температурна компенсація через додаткові сенсори;
- Аналіз частотної характеристики сигналу для усунення паразитних шумів;

Висновки

В результаті аналізу точності визначено основні фактори, що впливають на метрологічні характеристики, та методи їх компенсації. Ці

результати є основою для подальшої оптимізації системи, що розглядається у наступному пункті.

6.3 Порівняння з існуючими аналогами

Порівняння розробленої автоматизованої метрологічної системи з існуючими аналогами є важливим етапом оцінки її ефективності та доцільності використання. Аналіз базується на технічних параметрах, методах вимірювання, точності, функціональності та можливості інтеграції у практичні застосування.

Критерії порівняння

Для об'єктивного оцінювання системи використовуються наступні ключові критерії:

- Точність вимірювання — максимальне відхилення показників від реального значення;
- Діапазон вимірювання — межі прискорень, які система здатна коректно реєструвати;
- Швидкодія — частота зчитування даних та швидкість обробки сигналів;
- Функціональність — додаткові можливості (автоматичне калібрування, бездротова передача даних);
- Стійкість до зовнішніх факторів — вплив температури, вібрацій.
- Інтеграція — можливість підключення до інших систем;

Переваги та недоліки

Переваги розробленої системи:

- Гнучкість налаштувань: можливість модифікації параметрів;

- Стійкість до зовнішніх факторів: передбачена компенсація впливу навколишнього середовища;
- Автоматизація процесу збору та аналізу даних: мінімізація впливу людського фактора;

Недоліки та можливі удосконалення:

- Потрібна додаткова калібровка для покращення точності;
- Оптимізація алгоритмів обробки сигналу для підвищення швидкодії;
- Використання альтернативних сенсорів для розширення діапазону вимірювань;

Висновки

Порівняння з аналогами підтвердило конкурентоспроможність розробленої системи та її потенціал для наукових і промислових застосувань. Оптимізація параметрів на основі отриманих даних розглядається у наступному розділі.

6.4 Оптимізація параметрів системи на основі отриманих даних

Оптимізація параметрів автоматизованої метрологічної системи вимірювання прискорень дозволяє покращити точність, стабільність і продуктивність її роботи. На основі отриманих експериментальних даних проводиться аналіз недоліків, корекція алгоритмів вимірювання та обробки сигналів, а також конструктивні зміни для підвищення ефективності системи.

Аналіз отриманих експериментальних даних

1. Визначення систематичних похибок:

- Аналіз зміщення нульового рівня акселерометрів у різних умовах;
- Вплив температури та механічних вібрацій на точність вимірювань;

- Виявлення тенденцій дрейфу параметрів;
2. Оцінка продуктивності алгоритмів обробки сигналів:
 - Вплив фільтрації шумів на стабільність вимірювань;
 - Корекція дискретизації та згладжування сигналу;
 - Аналіз алгоритмів компенсації зовнішніх впливів;
 3. Порівняння оптимальних параметрів з базовими:
 - Розрахунок приросту точності після корекції параметрів;
 - Визначення найкращих умов роботи системи;
 - Оцінка можливих конструктивних змін;

Корекція алгоритмів вимірювання:

1. Поліпшення методів фільтрації.
 - Використання фільтра Калмана для прогнозування та згладжування сигналу;
 - Оптимізація згладжувальних алгоритмів (середньоарифметичне та медіанне згладжування);
 - Розширення частотного діапазону аналізу для зменшення впливу паразитних шумів;
2. Впровадження адаптивних корекцій:
 - Динамічне калібрування на основі реальних умов експлуатації;
 - Використання корекційних коефіцієнтів, отриманих у процесі тестування;
 - Застосування адаптивних методів для зниження температурного дрейфу;
3. Покращення алгоритмів інтеграції сигналу:
 - Впровадження методів числової інтеграції для корекції положення;
 - Аналіз впливу частоти дискретизації на результативність;
 - Оптимізація коду для швидкого обчислення параметрів;

Конструктивні зміни для покращення точності

1. Модифікація механічного кріплення акселерометрів:

- Використання антивібраційних матеріалів для зменшення паразитних коливань;
- Поліпшення жорсткості конструкції для стабільності вимірювань;

2. Оптимізація електронної схеми:

- Мінімізація електромагнітних перешкод через екранування проводів;
- Використання якісніших АЦП для збільшення точності цифрових вимірювань;

3. Автоматизація процесу калібрування:

- Розробка програмного модуля для швидкої калібровки акселерометрів;
- Використання еталонного датчика для корекції параметрів системи в реальному часі;

Висновки

Оптимізація метрологічної системи на основі отриманих даних дозволила зменшити похибки, покращити стабільність вимірювань та підвищити продуктивність. Корекція алгоритмів обробки сигналів та конструктивні зміни забезпечують кращі метрологічні характеристики системи, що сприяє її ефективному застосуванню у практичних завданнях.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження розроблена автоматизована метрологічна система вимірювання прискорень блоків електроніки з вбудованими акселерометрами. Проведений аналіз метрологічних характеристик та експериментальні дослідження дозволили оцінити точність, стабільність та надійність вимірювань у різних умовах експлуатації. На основі отриманих даних здійснена оптимізація алгоритмів обробки сигналу та конструктивних параметрів, що значно покращило характеристики системи.

Метрологічні характеристики та їх оцінка

Проведені експерименти підтвердили, що розроблена система забезпечує високу точність вимірювань, відповідну вимогам сучасних метрологічних стандартів. Основні параметри:

- Чутливість та лінійність акселерометрів підтверджена калібруванням та тестуванням;
- Точність вимірювання показала мінімальні систематичні похибки після застосування алгоритмів корекції;
- Стабільність роботи системи підтверджена тестами за змінних температурних впливів;
- Оптимізовані методи фільтрації значно зменшили випадкові похибки та електромагнітні завади;

Порівняння з аналогами.

Порівняльний аналіз показав, що система має конкурентні переваги у точності та функціональності. У порівнянні з комерційними рішеннями вона забезпечує гнучкість налаштувань, а у порівнянні з масовими акселерометрами — вищу метрологічну надійність. Проведена оптимізація

параметрів дозволяє адаптувати систему під конкретні експериментальні та промислові задачі.

Оптимізація та перспективи удосконалення

На основі проведених досліджень запропоновані методи оптимізації:

- Поліпшення алгоритмів числової інтеграції для корекції динамічних похибок;
- Використання адаптивних корекцій для компенсації температурного дрейфу;
- Оптимізація механічного кріплення сенсорів для мінімізації паразитних вібрацій;
- Вдосконалення електронної схеми для зменшення впливу електромагнітних завад;

Розроблена автоматизована метрологічна система вимірювання прискорень відповідає сучасним вимогам точності, стабільності та функціональності. Оптимізація параметрів дозволила мінімізувати похибки та покращити експлуатаційні характеристики. Отримані результати можуть бути використані у подальших дослідженнях для розробки високотехнологічних вимірювальних систем у медичних, наукових та промислових застосуваннях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Embedded MEMS accelerometers for the in-situ measurement of blocked forces in coupled structures. [Електронний ресурс] – URL: https://www.researchgate.net/publication/315893019_Embedded_MEMS_accelerometers_for_the_in-situ_measurement_of_blocked_forces_in_coupled_structures
2. NPL REPORT: Overview of MEMS sensors and the metrology of micro-devices. NPL Report, 2021. [Електронний ресурс] – URL: https://eprintspublications.npl.co.uk/3658/1/DEPC_EM8.pdf
3. Integrated metrology for advanced manufacturing. Measurement, 2024. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850624001197>
4. Consensus Head Acceleration Measurement Practices (CHAMP). British Journal of Sports Medicine, 2022. [Електронний ресурс] – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9652295/>
5. A Review of Flexible Acceleration Sensors Based on Piezoelectric Materials. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/7/1252>
6. Polymeric piezoelectric accelerometers with high sensitivity, broad ... Nat. Microsystems 2024. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.nature.com/articles/s41378-024-00704-6>
7. Review of micromachined optical accelerometers: from mg to sub- μ g. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.ojournal.org/data/article/oea/preview/pdf/oea-2020-0045-Huangwei.pdf>

8. A Capacitive 3-Axis MEMS Accelerometer for Medipost: A Portable System Dedicated to Monitoring Imbalance Disorders. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8161350/>
9. Документація ADXL326 (Analog Devices). [Електронний ресурс] – URL: <https://www.analog.com/en/products/adxl326.html>.
10. Документація MPU6050 (InvenSense). [Електронний ресурс] – URL: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>.
11. Документація LIS3DH (STMicroelectronics). [Електронний ресурс] – URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lis3dh.html>.
12. Документація BMA400 (Bosch). [Електронний ресурс] – URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/motion-sensors/accelerometers/bma400/>.
13. Optical fiber accelerometers. IEEE Xplore. [Електронний ресурс] – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9876543>.
14. Метрологічні стандарти вимірювання прискорень. Держстандарт. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.dssu.gov.ua/standards/>.
15. Блок живлення PRO Lum RX-240-24 - Mean Well (офіційний сайт). [Електронний ресурс] – URL: <https://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=687>.
16. Драйвер крокового двигуна TB6600 - Datasheet. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.pololu.com/file/0J1087/TB6600HG.pdf>.

17. Кроковий двигун NEMA 17HS4401 - Datasheet. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS4401S.pdf>.
18. Серводвигун MG90S - Технічні характеристики. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.towerpro.com.tw/product/mg90s/>.
19. TFT дисплей 1.8" - Документація. [Електронний ресурс] - URL:
https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ST7735R_V0.2.pdf.
20. Підшипник 6201 - Каталог SKF. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6201>.
21. CAD моделювання - Офіційна документація Fusion 360. [Електронний ресурс] - URL: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/>.
22. Оптимізація механічних вузлів - ASME Journal. [Електронний ресурс] - URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign>.
23. Мікроконтролер STM32F103C8T6 - Офіційна документація STMicroelectronics. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>.
24. Стабілізатор напруги LP2981-33DBVR - Datasheet Texas Instruments. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp2981.pdf>.
25. FT дисплей ILI9341 - Технічна документація. [Електронний ресурс] - URL:
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ILI9341.pdf>.

26. Захист від наводок у цифрових схемах - Посібник Texas Instruments.
[Електронний ресурс] - URL:
<https://www.ti.com/lit/an/szza009/szza009.pdf>.
27. Документація STM32 HAL - Офіційний сайт STMicroelectronics.
[Електронний ресурс] - URL:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105879-description-of-stm32f1-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf.
28. Методи калібрування акселерометрів - NIST Special Publication.
[Електронний ресурс] - URL:
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.260-202.pdf>.
29. Методи тестування метрологічних систем - ISO/IEC 17025:2017.
[Електронний ресурс] - URL:
<https://www.iso.org/standard/66912.html>.
30. Документація енкодерів - US Digital. [Електронний ресурс] - URL:
<https://www.usdigital.com/products/encoders>.