

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Автоматизована система вимірювання радіуса сферичних  
поверхонь на базі мікроконтролера ESP32**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи PH-41  
спеціальності 153 – Мікро- та нано

**системна техніка**

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

**Паламар М.І**

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2026

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

Кафедра приладів і контрольно-вимірювальних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність 153 – Мікро- та нано системна техніка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Глушок Андрію Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Автоматизована система вимірювання радіуса сферичних поверхонь на базі мікроконтролера ESP32

Керівник проекту (роботи) Паламар Михайло Іванович – д.т.н, професор, зав. каф. ПВ;

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 року № \_\_\_\_

2. Термін подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)



## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b>	6
<b>ВСТУП</b>	8
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА</b>	11
1.1. Актуальність вимірювання сферичних поверхонь у виробництві	11
1.2. Класифікація та порівняльний аналіз методів вимірювання	14
1.3. Огляд існуючих промислових аналогів	17
1.4. Виявлені проблеми та обґрунтування розробки	19
1.5. Застосування ESP32 у вимірювальних системах	21
1.6. Вимоги до системи, що розробляється	23
<b>РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	25
2.1. Концепція та функціональна схема системи	25
2.2. Обґрунтування вибору елементної бази	26
2.3. Архітектура та схема взаємодії вузлів	29
2.4. Обмеження системи та шляхи вдосконалення	31
2.5. Техніко-економічне обґрунтування	32
<b>РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА</b>	35
3.1. Механічний вимірювальний вузол	35
3.2. Апаратна реалізація та схема підключення	36
3.3. Математична модель та калібрування	38
3.4. Програмна реалізація на Arduino IDE	40
3.5. Верифікація та результати тестування	48
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b>	51
4.1. Ергономічні вимоги до організації робочого місця	51
4.2. Електробезпека системи автоматизованої система вимірювання радіуса сферичних поверхонь на базі мікроконтролера ESP32	53
4.3. Вплив електромагнітних полів на людину та заходи щодо зменшення їхнього впливу	55
<b>ВИСНОВКИ</b>	59
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	62



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЦП — аналого-цифровий перетворювач
- AD698 — мікросхема-кондиціонер сигналу LVDT-датчика виробництва Analog Devices
- AIAG MSA — Automotive Industry Action Group Measurement System Analysis — стандарт аналізу вимірювальних систем
- BLE — Bluetooth Low Energy — енергоефективний режим Bluetooth
- CPU0 / CPU1 — обчислювальні ядра двоядерного мікроконтролера ESP32
- DGND / AGND — цифрова та аналогова «земля» (Digital Ground / Analog Ground)
- DNL / INL — диференційна та інтегральна нелінійність АЦП (Differential / Integral Non-Linearity), у молодших розрядах (LSB)
- ENOB — Effective Number Of Bits — ефективна розрядність АЦП з урахуванням шумів
- ESD — Electrostatic Discharge — електростатичний розряд
- ESP32 — двоядерний мікроконтролер виробництва Espressif Systems, що використовується як основа системи
- FFT — Fast Fourier Transform — швидке перетворення Фур'є
- FR4 — марка склотекстоліту для виготовлення друкованих плат
- GPIO — General Purpose Input/Output — універсальний цифровий вхід/вихід мікроконтролера
- HBM — Human Body Model — модель оцінки стійкості до електростатичного розряду
- HRA / HB — шкали твердості матеріалів за Роквеллом (HRA) та Брінеллем (HB)
- HTTP — HyperText Transfer Protocol — протокол передавання даних, що використовується для надсилання результатів вимірювань на сервер
- IDE — Integrated Development Environment — інтегроване середовище розробки (Arduino IDE)
- IP65 / IP42 — ступені захисту корпусу від пилу та води за міжнародною класифікацією Ingress Protection
- ISO — International Organization for Standardization — Міжнародна організація зі стандартизації
- JSON — JavaScript Object Notation — текстовий формат обміну даними
- LDC — Linear Displacement Conditioner — кондиціонер сигналу датчика лінійного переміщення
- LED — Light Emitting Diode — світловипромінювальний діод
- LSB — Least Significant Bit — молодший значущий розряд АЦП
- LVDT — Linear Variable Differential Transformer — індуктивний датчик лінійного переміщення
- MTBF — Mean Time Between Failures — середнє напрацювання на відмову
- NVS Non-Volatile Storage — енергонезалежна пам'ять мікроконтролера ESP32

OLED — Organic Light-Emitting Diode — дисплей на органічних світловипромінювальних діодах  
PGA — Programmable Gain Amplifier — підсилювач з програмованим коефіцієнтом посилення  
SCADA — Supervisory Control And Data Acquisition — система диспетчерського контролю та збору даних  
SDA / SCL — лінії даних та тактування шини I2C (Serial Data / Serial Clock)  
SELV Safety Extra-Low Voltage — безпечна наднизька напруга  
SSD1306 — контролер OLED-дисплея, що використовується у системі  
UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — універсальний асинхронний приймач-передавач  
Wi-Fi — технологія бездротового зв'язку, що використовується для передачі даних на сервер  
WROOM — модульне виконання плати ESP32 (ESP32-WROOM-32)

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промислового виробництва ключова роль відводиться точності геометричного контролю деталей. Дотримання розмірних допусків на кожному етапі виготовлення безпосередньо впливає на якість, надійність і строк служби готового виробу. Особливе місце серед задач вимірювальної техніки займає визначення радіуса сферичних поверхонь — форм, що широко застосовуються у трубопровідній арматурі, підшипниках, медичних імплантатах та оптичних системах.

Кульові крани є одним із найпоширеніших типів запірної арматури в нафтогазовій, хімічній та харчовій промисловості. Центральним елементом конструкції такого крана є сферичний затвор — куля з полірованою поверхнею, що забезпечує герметичне перекриття потоку. Від точності форми цієї поверхні залежить якість ущільнення та довговічність виробу. Вимоги галузевих стандартів передбачають виготовлення затворів за 8-м квалітетом точності, що для типових розмірів 100–300 мм відповідає допуску 40–72 мкм.

Виконання вимог щодо точності сферичних поверхонь неможливе без надійного вимірювального контролю на кожному етапі виробництва: після механічної обробки, після полірування та при вхідному контролі готових виробів. Традиційні ручні методи — шаблонний контроль та механічний сферометр — мають суттєві обмеження в точності та суб'єктивності, тоді як прецизійні координатно-вимірювальні машини є надмірно дорогими для поточного виробничого контролю.

Проблема доступних та точних засобів вимірювання сферичних поверхонь є характерною для підприємств малого та середнього рівня, що складають переважну більшість виробників трубопровідної арматури в Україні. За даними Асоціації виробників трубопровідної арматури, понад 70% підприємств галузі досі використовують ручні методи контролю, що призводить до нестабільної якості продукції та збільшеного відсотку браку.

Розвиток мікроконтролерних платформ і доступних промислових датчиків відкриває нові можливості для побудови спеціалізованих автоматизованих вимірювальних систем. Мікроконтролер ESP32 виробництва Espressif Systems поєднує двоядерний 32-розрядний процесор з частотою до 240 МГц, 12-розрядний АЦП, вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth — все це при вартості близько 300 грн. Такі характеристики роблять ESP32 ідеальною платформою для реалізації компактного та економічно доступного вимірювального вузла.

Датчик лінійного переміщення типу LVDT (Linear Variable Differential Transformer) є індуктивним перетворювачем з лінійною характеристикою та необмеженим механічним ресурсом, оскільки рухомий сердечник не має фізичного контакту з нерухомими котушками. Роздільна здатність LVDT теоретично необмежена і визначається лише якістю вимірювального кола. Вартість промислового LVDT-датчика з діапазоном  $\pm 5$  мм становить 1 500–3 500 грн — у десятки разів менше вартості порівнянних засобів вимірювання.

Поєднання механічного вимірювального вузла на основі триопорної схеми (відомої за авторським свідоцтвом №1516740), датчика LVDT та мікроконтролера ESP32 утворює основу для системи, що здатна забезпечити точність вимірювання 10–15 мкм при вартості близько 8 000 грн. Це відкриває можливість автоматизованого контролю якості для підприємств будь-якого рівня, включаючи малі та середні виробництва.

Актуальність роботи визначається потребою підприємств у доступному засобі автоматизованого контролю радіуса сферичних затворів, що відповідає вимогам серійного виробництва за точністю, швидкістю та можливістю інтеграції з цифровими системами управління якістю в рамках концепції Індустрія 4.0. Розроблена система є першим відомим автором рішенням, що поєднує класичний механічний принцип вимірювання з сучасною мікроконтролерною платформою ESP32 та бездротовою передачею даних.

**Мета роботи:** розробити автоматизовану систему вимірювання радіуса сферичних поверхонь на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує точність не гірше 15 мкм, автоматичне обчислення та документування результатів, відображення на OLED-дисплеї та передачу даних через Wi-Fi.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено виконання таких завдань:

- проведення аналізу існуючих методів і засобів вимірювання радіуса сферичних поверхонь, їхня класифікація та порівняння;
- вибір та обґрунтування елементної бази: мікроконтролера ESP32, датчика LVDT, сигнального кондиціонера, засобів відображення та передачі даних;
- розробка функціональної та принципової схеми автоматизованої вимірювальної системи;
- побудова математичної моделі вимірювання, вивід розрахункової формули та оцінка похибок;
- реалізація програмного забезпечення мовою C/C++ в середовищі Arduino IDE: фільтрація сигналу, обчислення радіуса, відображення, передача даних;
- верифікація системи на еталонних кулях, порівняння з показами КВМ;
- аналіз питань ергономіки та електробезпеки при експлуатації системи.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

**Об'єкт дослідження:** процес автоматизованого вимірювання радіуса обмежених сферичних поверхонь у виробничих умовах.

**Предмет дослідження:** апаратно-програмна система на базі мікроконтролера ESP32 та датчика LVDT, що реалізує алгоритм визначення радіуса сфери за триопорним принципом.

**Методи дослідження:** аналіз та синтез технічних рішень, методи аналітичної геометрії для виводу розрахункової формули, методи математичної статистики для обробки результатів верифікації, метод квадратурного складання похибок для оцінки точності системи.

**Практичне значення роботи** полягає у можливості безпосереднього впровадження розробленої системи на підприємствах, що виготовляють або контролюють кульові крани та аналогічні вироби зі сферичними поверхнями. Скорочення часу одного вимірювання з 2–3 хвилин до 15–30 секунд при збереженні точності, що відповідає 8-му квалітету, дозволяє суттєво підвищити продуктивність контрольних операцій. Автоматичне документування результатів через Wi-Fi забезпечує виконання вимог стандарту ISO 9001 щодо простежуваності.

### 1.1. Актуальність вимірювання сферичних поверхонь у виробництві

Сферичні поверхні є одними з найпоширеніших геометричних форм у точному машинобудуванні. Їх можна зустріти у підшипниках кочення, кульових кранах, гідравлічних клапанах, шарнірах рівних кутових швидкостей (ШРУС), оптичних лінзах і дзеркалах, медичних ендопротезах суглобів. У кожному з цих застосувань точність геометрії сферичної поверхні безпосередньо визначає функціональні характеристики виробу: герметичність, довговічність, ефективність передачі навантаження або якість оптичного зображення.

У галузі трубопровідної арматури кульові крани займають провідне місце завдяки простоті конструкції, надійності та можливості швидкого перекриття потоку. За даними аналітичних досліджень ринку, частка кульових кранів у загальному обсязі продажів запірної арматури в Україні перевищує 40% і продовжує зростати. Це пов'язано з розширенням нафтогазової інфраструктури, модернізацією систем централізованого теплопостачання та розвитком хімічної промисловості.

Сферичний затвор є ключовим елементом кульового крана. Він являє собою металеву кулю з двома наскрізними отворами, що при повороті на 90° повністю перекривають прохід для робочого середовища. Затвори виготовляють із нержавіючих сталей (12X18H10T, 08X18H10) або бронзи для агресивних середовищ. Робоча поверхня затвора шліфується та полірується до шорсткості Ra 0,2–0,4 мкм, після чого здійснюється контроль геометричних параметрів.

Надійність кульового крана у закритому положенні визначається якістю контакту між сферичним затвором та пружними ущільнювачами (сідлами), що виготовляють із ПТФЕ або інших полімерів. Лінія контакту затвора із сідлами повинна бути рівномірною по всьому колу. Будь-яке відхилення форми поверхні затвора від ідеальної кулі призводить до нерівномірного ущільнення, місцевого підвищення тиску на сідло, прискореного зносу та в кінцевому підсумку — до витоків.

Для кранів, що працюють з природним газом, нафтопродуктами або хімічними реагентами, виток є не лише економічними збитками, але й потенційними джерелами аварій. Відповідно до вимог ДСТУ EN 12266-1:2010 та ГОСТ 9544-93, клас герметичності кульових кранів промислового призначення визначає допустиму виток від нуля (клас А) до строго нормованих значень. Для досягнення класу А необхідно забезпечити відхилення форми затвора не більше 10–15 мкм, що є дуже жорсткою вимогою.

За стандартом ГОСТ 25346-89 та ДСТУ ISO 286-1:2014, для деталей 8-го квалітету при номінальних розмірах у діапазоні 80–120 мм допуск становить 54 мкм, при 120–180 мм — 63 мкм, при 180–250 мм — 72 мкм, при 250–315 мм — 81 мкм. Засіб вимірювання для контролю відповідних параметрів повинен мати сумарну похибку не більше  $1/3$  від допуску — тобто 18–27 мкм залежно від розмірного діапазону. Саме це значення є критерієм оцінки метрологічної придатності розробленої системи.

У серійному виробництві, де за одну зміну обробляється від 30 до 150 затворів різних типорозмірів, контроль кожного виробу є обов'язковою умовою. Відбірковий контроль (наприклад, кожного десятого) не задовольняє вимоги сучасних систем управління якістю і не дозволяє своєчасно виявити систематичні відхилення технологічного процесу. Тому необхідний стовідсотковий контроль, що можливий лише при достатній швидкодії засобу вимірювання.

Ручний метод вимірювання механічним сферометром потребує 90–180 секунд на одну деталь з урахуванням встановлення, зчитування та запису результату. При обсязі 50 деталей на зміну це 75–150 хвилин, або 15–30% робочого часу, витраченого виключно на контроль. У великосерійному виробництві (100–200 деталей за зміну) ручний контроль стає практично нездійсненним. Автоматизована система, що виконує вимірювання за 15–30 секунд, дозволяє здійснити стовідсотковий контроль навіть при максимальному обсязі виробництва.

Крім виробничого контролю, потреба у вимірюванні сферичних поверхонь існує при вхідному контролі комплектуючих, ремонті та відновленні зношених затворів, а також при метрологічній атестації технологічного обладнання. В усіх цих випадках важливими є не лише точність, але й портативність та зручність застосування засобу вимірювання. Розроблена система, завдяки компактним розмірам та автономному живленню від акумулятора, задовольняє і ці вимоги.

Окремим важливим аспектом є документування результатів вимірювань. Вимоги стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 щодо управління якістю передбачають зберігання записів про результати контролю продукції протягом усього її строку служби. Паперові журнали вимірювань, що досі використовуються на більшості підприємств, не забезпечують достатньої простежуваності та унеможливають статистичний аналіз. Автоматична передача результатів через Wi-Fi на сервер вирішує цю проблему.

## **1.2. Класифікація та порівняльний аналіз методів вимірювання**

Існуючі методи вимірювання радіуса сферичних поверхонь класифікують за трьома основними ознаками: фізичним принципом дії (контактні та безконтактні), рівнем автоматизації (ручні, напівавтоматичні та автоматичні) та умовами застосування (лабораторні та виробничі). Кожна група методів має свої переваги та обмеження, що визначають доцільність застосування в конкретних умовах.

**Шаблонний контроль** є найпростішим методом оцінки радіуса сферичної поверхні. Оператор прикладає до поверхні шаблон — дугу з певним радіусом кривизни — та на просвіт або щупом оцінює наявність зазору між поверхнею та шаблоном. Метод придатний лише для грубої оцінки відповідності розміру, забезпечуючи точність 50–200 мкм. Суб'єктивність оцінки є принциповим обмеженням методу: різні оператори можуть отримувати суттєво різні результати для однієї й тієї самої деталі. Метод не дозволяє отримати числове значення радіуса.

**Механічний сферометр** працює за принципом вимірювання висоти сегмента  $h$  між площиною фіксованих опор та центральною точкою поверхні. Три (або чотири) опори утворюють базову площину; центральна рухома опора з індикатором годинникового типу вимірює відстань від базової площини до точки контакту з поверхнею. Радіус обчислюється за формулою  $R = (a^2 + 4h^2)/(8h)$ . Точність залежить від якості виготовлення і становить 10–50 мкм. Метод є контактним і механічним, не потребує джерела живлення, простий у

використанні. Головним недоліком є ручне зчитування показів та ручний розрахунок, що вносить суб'єктивну похибку.

**Вимірювання за допомогою координатно-вимірювальної машини (КВМ)** є еталонним методом контролю в точному машинобудуванні. Вимірювальний щуп КВМ послідовно торкається множини точок на поверхні деталі; координати кожної точки фіксуються з точністю 0,5–2 мкм. За набором координат програмне забезпечення апроксимує ідеальну сферу методом найменших квадратів і визначає радіус, координати центру та відхилення форми. Перевагою є висока точність та повнота інформації про геометрію поверхні. Недоліками — надмірно висока вартість (від 500 000 грн), необхідність кліматизованого вимірювального приміщення (температура  $20\pm 1^\circ\text{C}$ ), тривалий цикл підготовки та виконання вимірювань (5–15 хвилин на деталь).

**Метод лазерної тріангуляції** є безконтактним оптичним методом, що базується на вимірюванні кута відбиття лазерного пучка від поверхні або положення відбитої плями на матричному сенсорі. Лазерний профілометр сканує перетини поверхні та будує тривимірну карту координат точок. Точність — 1–5 мкм. Метод забезпечує швидке вимірювання великих площ, але має обмеження при роботі з дзеркально-полірованими поверхнями (спззеркальне відбиття дає помилковий сигнал) та в умовах яскравого стороннього освітлення. Крім того, системи на цьому принципі коштують 80 000–300 000 грн.

**Інтерферометричні методи** є найточнішими для контролю оптичних сферичних поверхонь. Інтерферометр порівнює хвильовий фронт, відбитий від досліджуваної поверхні, з еталонним хвильовим фронтом від ідеальної сфери (еталонний об'єкт). Відхилення поверхні від ідеальної сфери проявляються у вигляді інтерференційних смуг, аналіз яких дозволяє визначити форму поверхні з точністю до нанометра. Метод застосовується виключно в лабораторних

умовах: необхідна ізоляція від вібрацій, стабільна температура та відповідна підготовка поверхні.

**Метод структурованого підсвічування** (structured light) полягає у проєктуванні на поверхню смугового або фазово-кодованого освітлення та реєстрації деформованого зображення камерою. Алгоритм обробки відновлює тривимірний профіль поверхні. Точність — 10–50 мкм. Метод є швидким (одне вимірювання — менше секунди), але чутливим до умов освітлення та відбивних властивостей поверхні. Застосовується переважно для контролю форми великих деталей.

Порівняльний аналіз методів наведено в таблиці 1.1. Аналіз показує, що для умов серійного виробництва кульових кранів оптимальним є контактний метод на основі триопорної схеми з електронним датчиком. Він поєднує достатню точність (відповідає вимогам для 8-го квалітету), швидкодію (15–30 с), простоту та низьку вартість. Саме цей принцип покладено в основу розробленої системи.

*Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів вимірювання радіуса сферичних поверхонь*

Метод	Точність, мкм	Час вимір., с	Документ-ня	Вартість, грн
Шаблонний контроль	50–200	30–60	Ні	500–2 000
Механічний сферометр	10–50	60–120	Вручну	3 000–15 000
Лазерна триангуляція	1–5	5–15	Так	80 000–300 000
КВМ	0,5–2	300–600	Так	500 000+
Розроблена система	5–15	15–30	Так (Wi-Fi)	7 000–8 000

Метод	Точність, мкм	Час вимір., с	Документ- ня	Вартість, грн
(ESP32+LVDT)				

З таблиці 1.1 видно, що розроблена система займає унікальну позицію: при вартості, близькій до механічного сферометра, вона забезпечує автоматичне документування (як КВМ), та час вимірювання, що є у 8–20 разів меншим за метод КВМ. Точність 5–15 мкм є достатньою для контролю деталей 8-го квалітету і перевищує можливості механічного сферометра при ручному зчитуванні.

### 1.3. Огляд існуючих промислових аналогів

Перед розробкою власного рішення проведено детальний огляд існуючих технічних рішень у галузі вимірювання радіуса сферичних поверхонь. Аналіз охоплює як класичні механічні пристрої, так і сучасні цифрові та автоматизовані системи.

**Авторське свідоцтво СРСР №1516740** (автор Кузнецов В.І., зареєстровано 1989 р.) описує пристрій для вимірювання радіуса сферичної поверхні за триопорним принципом. Конструктивно пристрій складається з корпусу з двома фіксованими опорами та рухомим вимірювальним елементом із закріпленим стрілочним індикатором годинникового типу. Відстань між опорами є каліброваною базою. Формула для розрахунку радіуса виведена у описі до свідоцтва. Пристрій є повністю механічним, не потребує живлення, простий і надійний. Недоліки: ручне зчитування з похибкою паралаксу; ручний розрахунок за формулою; відсутність документування результатів. Цей пристрій є прямим прототипом для механічної частини розробленої системи.

**Mahr MarSurf SD 26** (Mahr GmbH, Геттінген, Німеччина) — портативний цифровий прилад для вимірювання параметрів поверхні, включаючи шорсткість, хвилястість та форму. Оснащений щупом з п'єзоелектричним перетворювачем та вбудованим мікропроцесором для

розрахунку стандартних параметрів шорсткості ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ) та хвилястості ( $W_a$ ,  $W_z$ ). Точність лінійних вимірювань —  $\pm 0,3$  мкм. Маса — 310 г. Вбудований дисплей та USB-інтерфейс для передачі даних. Вартість — від 120 000 до 180 000 грн залежно від комплектації. Прилад орієнтований на вимірювання мікрогеометрії (шорсткості), а не макрогеометрії (радіуса кривизни), тому не є прямим конкурентом, але демонструє рівень можливостей сучасних портативних засобів.

**Renishaw Equator 300 / 500** (Renishaw plc, Велика Британія) — порівняльна калібраційна система для серійного виробництва. На відміну від традиційних КВМ, Equator не є абсолютним вимірювальним засобом — він порівнює вимірювану деталь з еталонним зразком, що регулярно перекалібровується на КВМ. Це дозволяє компенсувати температурний вплив та забезпечити стабільність результатів у виробничому середовищі. Точність — до 2 мкм. Час вимірювання одного елемента — кілька секунд. Вартість комплекту — від 350 000 до 500 000 грн. Система вимагає програмування вимірювальних циклів кваліфікованим метрологом, що є суттєвим обмеженням для малих підприємств.

**Taylor Hobson Form Talysurf PGI** (Taylor Hobson Ltd., Велика Британія) — профілометр із можливістю вимірювання сферичних поверхонь. Використовує контактний щуп з п'єзоелектричним датчиком та прецизійні лінійні направляючі для переміщення. Точність вимірювання радіуса —  $\pm 0,01$  мкм. Призначений для вимірювання оптичних та прецизійних сферичних поверхонь. Вартість — від 1 000 000 грн. Застосування в умовах звичайного виробничого цеху є неможливим.

**Zeiss Contura G2** (Carl Zeiss GmbH, Оберкохен, Німеччина) — координатно-вимірювальна машина порталого типу. Вимірювальний об'єм —  $700 \times 700 \times 600$  мм. Точність (MPE<sub>e</sub>) — від 1,5 мкм. Оснащена сканувальним щупом VAST XT Gold, що дозволяє отримувати тисячі точок на поверхні за секунду. Програмне забезпечення CALYPSO забезпечує автоматичне

виконання вимірювальних програм та генерацію звітів. Вартість — від 600 000 до 1 500 000 грн. Використовується як зразковий засіб вимірювання при верифікації розробленої системи.

**DIY-рішення на Arduino** є поширеними у середовищі аматорів та дослідників. Типова схема: мікроконтролер Arduino Uno або Mega + потенціометр або інкрементний енкодер як датчик переміщення + LCD-дисплей. Такі системи не забезпечують метрологічно підтвердженої точності: потенціометри мають нелінійність та знос, енкодери — обмежену роздільну здатність та схильність до пропуску кроків. Відсутня верифікація та документування. Проте ці рішення демонструють принципову здійсненність ідеї та наявність попиту.

Порівняльний аналіз аналогів показує, що існує незайнята ринкова ніша: точний (10–15 мкм) автоматизований засіб вимірювання радіуса сфери з документуванням результатів при вартості до 10 000 грн. Дорогі промислові системи (КВМ, Equator) забезпечують необхідну точність та функціональність, але недоступні за вартістю. Прості механічні засоби є доступними, але не мають автоматизації та документування. Розроблена система заповнює цю нішу.

Принципова відмінність розробленої системи від існуючих рішень полягає у поєднанні трьох ключових характеристик в одному пристрої: точності, достатньої для контролю деталей 8-го квалітету; автоматичного цифрового документування через Wi-Fi; вартості, доступної для підприємств будь-якого рівня. Жоден з розглянутих аналогів не поєднує всі три характеристики одночасно.

#### **1.4. Виявлені проблеми та обґрунтування розробки**

Проведений аналіз методів та аналогів дозволяє чітко сформулювати проблеми, що обумовлюють необхідність розробки нової автоматизованої системи. Виявлені проблеми можна розподілити на чотири групи: метрологічні, організаційні, економічні та технологічні.

**Метрологічна проблема: суб'єктивність та недостатня точність.** При ручному зчитуванні показів стрілочного індикатора механічного сферометра виникає похибка паралаксу (до 3–5 мкм при куті спостереження 30°) та похибка дискретності ( $\frac{1}{2}$  ціни поділки = 0,5–1 мкм). В умовах виробничого освітлення, шуму та фізичної втоми оператора загальна суб'єктивна складова похибки може досягати 10–15 мкм, що є неприйнятним при вимогах до засобу вимірювання 18–27 мкм. Крім того, ручне зчитування і розрахунок вносять додаткові арифметичні помилки.

**Організаційна проблема: відсутність документування та аналізу.** Більшість виробників кульових кранів не ведуть електронних баз даних результатів контролю або ведуть їх у паперових журналах. Це унеможливує: виявлення трендів зносу різального або полірувального інструменту; побудову контрольних карт (Шухарта) для статистичного управління процесом; ретроспективний аналіз причин рекламаций від замовників; підтвердження відповідності вимогам ISO 9001:2015 щодо простежуваності продукції. Відсутність документування є системною проблемою, що підвищує ризики випуску бракованої продукції.

**Економічна проблема: неефективне витрачання робочого часу.** При обсязі виробництва 50 деталей за зміну та тривалості ручного вимірювання 120 секунд на деталь контролер витрачає 100 хвилин виключно на вимірювання. З урахуванням часу на запис результатів, переміщення деталей та підрахунок — до 2,5–3 годин, або 30–40% тривалості зміни. Автоматизована система скорочує цей час до 21–25 хвилин (з урахуванням встановлення та зняття деталей), вивільняючи контролера для інших операцій або дозволяючи йому обслуговувати два технологічних потоки одночасно.

**Технологічна проблема: неможливість реагування на відхилення в режимі реального часу.** При ручному контролі результати вимірювань накопичуються в журналі та аналізуються в кінці зміни або тижня. До моменту аналізу може бути виготовлено та відвантажено декілька партій бракованої

продукції. Автоматизована система з негайною передачею результатів на сервер дозволяє відстежувати тренди в режимі реального часу та негайно реагувати на відхилення технологічного процесу, зупиняючи обладнання або коригуючи режими обробки.

Виявлені проблеми є взаємопов'язаними і в сукупності визначають необхідність розробки автоматизованої системи вимірювання. Ключові вимоги до системи, що витікають з аналізу проблем: похибка вимірювання не більше 15 мкм; час циклу не більше 30 секунд; автоматичне цифрове документування; вартість не більше 10 000 грн; можливість роботи в умовах виробничого цеху без спеціальних кліматичних умов.

Обрана концепція системи на базі ESP32 та LVDT повністю відповідає виявленим вимогам. Точність LVDT-датчика та 12-розрядного АЦП ESP32 у поєднанні з алгоритмом фільтрації забезпечують необхідну метрологічну характеристику. Вбудований Wi-Fi ESP32 вирішує проблему документування без додаткових компонентів. Загальна вартість системи (близько 8 000 грн) є прийнятною навіть для малих підприємств. Пристрій не потребує спеціальних умов експлуатації і здатний нормально функціонувати при температурах 10–40°C та відносній вологості до 80%.

### **1.5. Застосування ESP32 у вимірювальних системах**

ESP32 є двоядерним мікроконтролером виробництва Espressif Systems (КНР), що з'явився на ринку у 2016 році як наступник популярного ESP8266. Завдяки вдалому поєднанню продуктивності, периферії та вартості ESP32 здобув широке застосування у системах IoT, автоматизації та вбудованих системах. Станом на 2024 рік Espressif поставила більше 1 мільярда чіпів серії ESP32, що свідчить про зрілість платформи та наявність розвиненої екосистеми.

У вимірювальних застосуваннях ESP32 використовується для побудови безпроводних сенсорних мереж (температура, тиск, вологість, деформація, рівень рідини); управління прецизійними позиційними системами та

сервоприводами; збору та попередньої обробки даних від промислових датчиків перед відправкою на верхній рівень SCADA; реалізації алгоритмів цифрової обробки сигналів (фільтрація, FFT, кореляція) завдяки достатній обчислювальній потужності.

Ключовою перевагою ESP32 для цього проекту є наявність вбудованого 12-розрядного АЦП (SAR ADC) з до 18 аналоговими каналами. При рівні сигналу 0–3,3 В теоретична роздільна здатність становить  $3,3 \text{ В} / 4096 = 0,806 \text{ мВ/відлік}$ . При діапазоні вимірювання датчика 10 мм (від –5 до +5 мм) теоретична роздільна здатність системи складає  $10 \text{ мм} / 4096 \approx 2,4 \text{ мкм}$ . Фактична (ефективна) роздільна здатність з урахуванням шумів АЦП та ENOB (Effective Number Of Bits  $\approx 9\text{--}10$  біт) становить 5–10 мкм, що є достатнім для поставленого завдання.

Важливою архітектурною особливістю ESP32 є організація АЦП на двох незалежних контролерах: ADC1 (канали GPIO32–GPIO39) та ADC2 (канали GPIO0, GPIO2, GPIO4, GPIO12–GPIO15, GPIO25–GPIO27). При активному Wi-Fi-з'єднанні ADC2 стає недоступним, оскільки Wi-Fi-модуль використовує той самий аналоговий ресурс. Тому у розробленій системі використовується виключно канал ADC1 (GPIO34 = ADC1\_CH6), що забезпечує стабільну роботу АЦП незалежно від стану Wi-Fi.

Двоядерна архітектура ESP32 (ядра Xtensa LX6) дозволяє ефективно розподілити задачі між ядрами: перше ядро (CPU0) виконує задачу зчитування та фільтрації АЦП із жорсткими часовими вимогами; друге ядро (CPU1) — задачу Wi-Fi, HTTP-з'єднання та відображення на дисплеї. FreeRTOS, вбудована в ядро ESP32 для Arduino, забезпечує планування задач та синхронізацію через черги та м'ютекси. Це принципово важливо, оскільки Wi-Fi-стек ESP32 є досить ресурсомістким і може блокувати виконання інших задач на одноядерному мікроконтролері.

Вбудований Wi-Fi 802.11 b/g/n дозволяє підключитися до корпоративної мережі підприємства без додаткових модулів або кабельного підключення.

Реалізований у системі HTTP POST запит з JSON-даними є стандартним веб-протоколом, що підтримується будь-якою серверною платформою: Node.js, Python (Flask/Django), PHP, Java (Spring), C# (ASP.NET) або хмарними сервісами (AWS IoT, Google Cloud IoT Core, Azure IoT Hub). Це забезпечує максимальну гнучкість при інтеграції системи в існуючу IT-інфраструктуру підприємства.

Альтернативою ESP32 могли б бути: Arduino Mega 2560 (не має вбудованого Wi-Fi, потребує зовнішнього модуля, 8-розрядний АЦП з меншою роздільною здатністю); STM32F411 (має кращий АЦП, але складніше середовище розробки та відсутній вбудований Wi-Fi); Raspberry Pi Zero W (має Wi-Fi та більш потужний процесор, але Linux-система потребує значно більше часу запуску, відсутній апаратний АЦП — потрібен зовнішній). ESP32 є оптимальним вибором за критерієм функціональність / простота розробки / вартість.

*Таблиця 1.2 – Технічні характеристики мікроконтролера ESP32-WROOM-32*

<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
Процесор	Xtensa LX6, 2 ядра, до 240 МГц
Flash-пам'ять	4 МБ (до 16 МБ)
SRAM	520 КБ
АЦП	12-розрядний, 18 каналів
Інтерфейси	SPI, I2C, UART, I2S, CAN
Wi-Fi	802.11 b/g/n, 2,4 ГГц
Bluetooth	v4.2 BR/EDR та BLE
GPIO	34 програмованих виходи/входи
Напруга живлення	3,0–3,6 В (вхід)
Споживання	160–260 мА (активний), 10 мкА (deep sleep)

Параметр	Значення
Температура роботи	-40...+125°C
Вартість	200–350 грн

### 1.6. Вимоги до системи, що розробляється

Технічне завдання на розробку системи сформовано на підставі аналізу об'єкта вимірювання (сферичні затвори кульових кранів), вимог стандартів (ГОСТ 25346-89, ДСТУ ISO 286-1:2014), аналізу існуючих рішень та виявлених проблем. Вимоги розподілені за групами: метрологічні, функціональні, конструктивні та економічні.

**Метрологічні вимоги.** Діапазон вимірюваних номінальних радіусів — від 50 до 200 мм (охоплює 95% типорозмірів затворів кульових кранів промислового призначення). Абсолютна похибка вимірювання — не більше 15 мкм (відповідає вимозі 1/3 від мінімального допуску 8-го квалітету для розмірів від 80 мм). Роздільна здатність — не гірше 5 мкм. Відтворюваність ( $3\sigma$ ) — не більше 6 мкм.

**Функціональні вимоги.** Час одного циклу вимірювання (від натискання кнопки до відображення результату) — не більше 30 секунд. Відображення результату: значення радіуса в мм з точністю до 0,001 мм, статус придатності (В допуску / Відхилення). Індикація придатності: зелений / червоний світлодіод для миттєвої візуальної оцінки без читання дисплея. Передача даних: Wi-Fi 2,4 ГГц, протокол HTTP POST, формат JSON. Можливість задання номінального радіуса та допуску через кнопку або веб-інтерфейс. Функція калібрування за еталонною кулею.

**Конструктивні вимоги.** Маса пристрою в зборі — не більше 700 г. Габаритні розміри — не більше 200×100×80 мм. Ступінь захисту корпусу блока електроніки — не нижче IP42 (захист від твердих тіл понад 1 мм та крапель води, що падають під кутом до 15°). Напруга живлення — 5 В постійного

струму від мережевого адаптера або зовнішнього акумулятора. Кліматичні умови роботи: температура 10–40°C, відносна вологість 20–80% без конденсації.

**Економічні вимоги.** Вартість компонентів — не більше 10 000 грн. Використання компонентів, що доступні на українському ринку від вітчизняних або міжнародних постачальників. Середнє напрацювання на відмову (MTBF) — не менше 5 000 годин. Інтервал технічного обслуговування — не менше одного року при щоденному використанні.

Визначені вимоги є вхідними даними для проєктування системи та критеріями оцінки результатів верифікації. У розділі 3 показано, що всі метрологічні вимоги виконуються: середня похибка 8,7 мкм < 15 мкм; стандартне відхилення серії вимірювань 2,1 мкм ( $3\sigma = 6,3 \text{ мкм} \approx 6 \text{ мкм}$ ); час циклу 15–25 секунд < 30 секунд.

## РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1. Концепція та функціональна схема системи

Концепція системи базується на модернізації класичного триопорного принципу вимірювання з замощенням механічного індикатора на датчик LVDT і мікроконтролерний блок. Такий підхід дозволяє повністю зберегти механічну простоту та надійність прототипу (АС №1516740), водночас усунувши всі виявлені недоліки: суб'єктивність зчитування, відсутність автоматичного розрахунку та документування.

Загальна архітектура системи будується за чотирирівневою ієрархічною структурою: фізичний рівень (механічний контакт із поверхнею) → сигнальний рівень (аналогове перетворення переміщення в напругу) → цифровий рівень (обробка та прийняття рішення) → інформаційний рівень (відображення та передача даних). Кожен рівень реалізується відповідними апаратними та програмними засобами.

**Фізичний рівень** реалізований механічним вимірювальним вузлом. Два фіксованих опорних елементи встановлені симетрично на відстані  $a = 80$  мм між центрами. При встановленні пристрою на сферичну поверхню вони торкаються поверхні у двох точках, формуючи базову хорду. Рухомий центральний елемент при цьому переміщується вниз (для опуклої поверхні) або вгору (для увігнутої) відносно площини фіксованих опор на відстань  $h$ , що геометрично пов'язана з радіусом сфери формулою  $R = (a^2 + 4h^2)/(8h)$ .

**Сигнальний рівень** реалізований датчиком LVDT та сигнальним кондиціонером. LVDT перетворює механічне переміщення сердечника в диференціальний електричний сигнал змінного струму, амплітуда якого пропорційна зміщенню. Сигнальний кондиціонер збуджує первинну обмотку LVDT синусоїдою частотою 2,5 кГц, демодулює диференціальний вихідний сигнал та формує уніполярну напругу 0–3,3 В для подачі на АЦП мікроконтролера.

**Цифровий рівень** реалізований мікроконтролером ESP32. Він виконує: аналого-цифрове перетворення сигналу датчика (12-розрядний АЦП); цифрову фільтрацію (ковзне середнє по 32 відліках для придушення шумів); перерахунок відліків АЦП у переміщення  $h$  в мм за калібрувальним коефіцієнтом; обчислення радіуса  $R$  за аналітичною формулою; порівняння з номінальним значенням та допуском для прийняття рішення «В допуску / Відхилення».

**Інформаційний рівень** включає засоби відображення та передачі даних: OLED-дисплей для виведення числового значення радіуса та статусу вимірювання; два світлодіоди для візуальної індикації придатності; Wi-Fi-з'єднання для відправки JSON-пакетів із результатами вимірювань на сервер збору даних у режимі реального часу.

Важливою проектною рішенням є забезпечення автономності: при відсутності Wi-Fi-з'єднання система продовжує виконувати локальні вимірювання та відображення без будь-яких обмежень. Це гарантує роботу в умовах нестабільної мережі або при переміщенні до зони без покриття. Результати, що не були передані, при необхідності можуть бути записані у Flash-пам'ять ESP32 та передані пізніше при відновленні з'єднання.

Цикл вимірювання ініціюється натисканням кнопки. Це свідоме проектне рішення — відмова від автоматичного режиму вимірювання (де результат оновлюється безперервно) — пов'язане з необхідністю гарантувати стабільне положення пристрою під час вимірювання. Якщо оператор ще встановлює пристрій або переміщає його, автоматичне зчитування дасть помилковий результат. Кнопковий запуск забезпечує, що вимірювання виконується лише у момент, коли оператор підтвердив готовність.

## 2.2. Обґрунтування вибору елементної бази

Вибір компонентів системи виконувався шляхом порівняльного аналізу альтернатив за критеріями: відповідність технічним вимогам, доступність на

українському ринку, наявність документації та програмних бібліотек, вартість та перспективи підтримки виробником.

**Мікроконтролер ESP32-WROOM-32** обрано як центральний елемент цифрового блоку. Порівняно з альтернативами: Arduino Mega 2560 має 10-розрядний АЦП та не має Wi-Fi, що вимагає додаткового ESP-модуля і ускладнює конструкцію; STM32F411 має кращий 12-розрядний АЦП (ENOB  $\approx$  11 біт), але потребує складнішого середовища розробки (Keil або STM32CubeIDE) і не має вбудованого Wi-Fi; Raspberry Pi Zero 2W має Wi-Fi та потужний CPU, але використовує Linux, що збільшує час запуску до 20–30 секунд та вимагає SD-карти з додатковою надійністю. ESP32 є оптимальним вибором за критерієм функціональність / зручність розробки / вартість.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мікроконтролера ESP32-WROOM-32

Параметр	Значення
Процесор	Xtensa LX6, 2 ядра, до 240 МГц
Flash-пам'ять	4 МБ (до 16 МБ)
SRAM	520 КБ
АЦП	12-розрядний, 18 каналів
Інтерфейси	SPI, I2C, UART, I2S, CAN
Wi-Fi	802.11 b/g/n, 2,4 ГГц
Bluetooth	v4.2 BR/EDR та BLE
GPIO	34 програмованих виходи/входи
Напруга живлення	3,0–3,6 В (вхід)
Споживання	160–260 мА (активний), 10 мкА (deep sleep)
Температура роботи	–40...+125°C
Вартість	200–350 грн

Датчик LVDT обрано замість альтернативних рішень. Порівняємо чотири варіанти. Потенціометр лінійного переміщення: вартість 200–500 грн, роздільна здатність обмежена до 10–20 мкм через резистивний знос та шуми, ресурс обмежений (знос резистивного елемента). Оптичний інкрементний енкодер: висока роздільна здатність (0,5–1 мкм), але вимагає механічного зчеплення, чутливий до забруднення та вібрацій; вартість 500–2000 грн. Ємнісний датчик: роздільна здатність до 0,1 мкм, але чутливий до діелектричних властивостей навколишнього середовища, вологи та температури; вартість 3000–8000 грн. LVDT: роздільна здатність теоретично необмежена, визначається якістю кола; необмежений ресурс; стійкість до вологи та вібрацій; лінійна характеристика; вартість 1500–3500 грн. LVDT є оптимальним вибором.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики датчика LVDT

Параметр	Значення
Тип	LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
Діапазон вимірювання	±5 мм
Лінійність	±0,25% від діапазону (±12,5 мкм)
Роздільна здатність	Практична – 0,5 мкм
Частота збудження	1–10 кГц (оптимально 2,5 кГц)
Вихідний сигнал	0–3,3 В (після кондиціонера)
Матеріал корпусу	Нержавіюча сталь 304
Ступінь захисту	IP65
Температурний дрейф	±0,02% / °С
Ресурс	Необмежений
Вартість	1 500–3 500 грн

**Сигнальний кондиціонер LVDT** є необхідним елементом для перетворення диференційного АС-сигналу LVDT в уніполярну напругу 0–3,3 В. Найпростіший варіант реалізації — готовий модуль на базі мікросхеми AD698 (Analog Devices) або аналогічної LDC (Linear Displacement Conditioner). Мікросхема AD698 повністю реалізує функції збудження LVDT та фазочутливого детектування, забезпечуючи лінійний вихідний сигнал. Зовнішні елементи (резистори та конденсатори) задають частоту збудження та коефіцієнт підсилення. Готовий модуль коштує 700–1000 грн та суттєво спрощує розробку порівняно з дискретною реалізацією.

**OLED-дисплей SSD1306** обрано завдяки наступним перевагам: висока контрастність та чіткість (органічне світловипромінювання без підсвічування); широкий кут огляду ( $>160^\circ$ ); низьке енергоспоживання (8–20 мА); доступна вартість (100–150 грн); стандартний інтерфейс I2C з мінімальною кількістю провідників; відмінна бібліотека Adafruit\_SSD1306 з підтримкою тексту та графіки. Альтернативою міг бути LCD 16×2 з підсвічуванням (дешевший, але менш інформативний) або TFT-дисплей (кольоровий, але дорожчий і складніший у програмуванні).

**Блок живлення** системи реалізований на базі стандартного мережевого адаптера 5 В / 2 А (10 Вт) та лінійного стабілізатора AMS1117-3.3 для живлення ESP32 напругою 3,3 В / до 1 А. Вибір лінійного стабілізатора замість імпульсного обумовлений відсутністю пульсацій на виході, що є критичним для зменшення шумів АЦП. Імпульсні стабілізатори генерують ВЧ-завади, що проникають у сигнальний ланцюг і погіршують роздільну здатність АЦП.

### **2.3. Архітектура та схема взаємодії вузлів**

Архітектура системи реалізована за принципом чіткого розмежування аналогової та цифрової частин. Аналоговий сигнальний ланцюг (LVDT → кондиціонер → RC-фільтр → GPIO34) розташований на окремій ділянці плати, екранованій від цифрової частини (ESP32, I2C-шина, Wi-Fi-антена). Це

мінімізує взаємний вплив цифрових завад на точність аналого-цифрового перетворення.

Підключення LVDT-датчика виконується чотирьохпровідним екранованим кабелем завдовжки не більше 0,5 м. Два проводи — первинна обмотка (живлення від кондиціонера, 2–3 В змінного струму, 2,5 кГц); два проводи — диференційний вихід (різниця напруг вторинних обмоток). Екрануюча обплітка кабелю підключається до аналогової «землі» (AGND) кондиціонера з одного боку, інший кінець залишається непідключеним (заземлення з одного боку запобігає виникненню контуру заземлення, що може бути джерелом завад).

Вихід кондиціонера підключається до GPIO34 ESP32 через RC-фільтр низьких частот ( $R = 10$  кОм,  $C = 100$  нФ, гранична частота  $f_c = 1/(2\pi \cdot R \cdot C) \approx 160$  Гц). Фільтр придушує залишкову несучу частоту 2,5 кГц та її гармоніки, що могли б проникнути на вхід АЦП і створити помилкові відліки через ефект алайсингу.

Шина I2C (GPIO21=SDA, GPIO22=SCL) з'єднує ESP32 з OLED-дисплеєм. Підтягуючі резистори 4,7 кОм встановлені на платі дисплея (деякі модулі мають вбудовані pull-up). Довжина провідників I2C не перевищує 15 см, що забезпечує надійну роботу на швидкості 400 кГц (Fast Mode I2C) без додаткових заходів. Адреса дисплея — 0x3C (можна змінити на 0x3D перемичкою на платі для підключення двох дисплеїв до однієї шини).

Кнопка запуску підключена між GPIO0 та GND. GPIO0 на ESP32-DevKitC має вбудований підтягуючий резистор до 3,3 В, тому зовнішній pull-up не обов'язковий (але додатковий 10 кОм підвищує завадостійкість). GPIO0 також використовується при завантаженні прошивки: при утриманні кнопки під час подачі живлення ESP32 переходить у режим завантажувача. Це є зручним побічним ефектом — для оновлення прошивки не потрібен додатковий перемикач.

Два світлодіоди (зелений та червоний) підключені через обмежуючі резистори 220 Ом до GPIO25 та GPIO26. Вибір саме цих виходів обумовлений

їхнім розташуванням на модулі DevKitC поряд один з одним, що зручно для монтажу на передній панелі корпусу. Струм через кожен світлодіод:  $I = (3,3 \text{ В} - 2,0 \text{ В}) / 220 \text{ Ом} \approx 6 \text{ мА}$  для червоного ( $U_f \approx 2,0 \text{ В}$ ) та  $I = (3,3 \text{ В} - 2,2 \text{ В}) / 220 \text{ Ом} \approx 5 \text{ мА}$  для зеленого ( $U_f \approx 2,2 \text{ В}$ ). Яскравість є достатньою для надійної візуальної індикації на відстані до 3 м.

Програмне забезпечення побудоване на основі FreeRTOS з трьома задачами. Задача `vTaskMeasure` (CPU0, пріоритет 5): виконується лише після сигналу від обробника переривання кнопки; виконує 32 послідовних зчитування АЦП з інтервалом 500 мкс та записує результат у чергу `xMeasQueue`. Задача `vTaskDisplay` (CPU1, пріоритет 3): отримує результат із черги, обчислює радіус, оновлює OLED та керує LED; розрахунок займає  $< 1$  мс. Задача `vTaskWiFi` (CPU1, пріоритет 1): перевіряє з'єднання та відправляє HTTP POST; виконується після завершення `vTaskDisplay` та не блокує виведення на дисплей.

Обробник переривання кнопки виконується на рівні переривання GPIO: фіксує подію натискання та відправляє сигнал задачі `vTaskMeasure` через бінарний семафор `xBtnSemaphore`. Програмне усунення дребезгу реалізовано через `xTaskGetTickCount()`: якщо інтервал між двома натисканнями менше 50 мс, повторне натискання ігнорується.

## 2.4. Обмеження системи та шляхи вдосконалення

Незважаючи на те, що розроблена система задовольняє всі сформульовані технічні вимоги, вона має ряд обмежень, що слід врахувати при впровадженні та визначити шляхи для майбутнього вдосконалення.

**Обмеження 1: нелінійність АЦП ESP32.** Вбудований АЦП ESP32 має відому нелінійність диференційну (DNL до  $\pm 2$  LSB) та інтегральну (INL до  $\pm 10$  LSB), а також значні шуми (стандартне відхилення близько 2–4 LSB). Це знижує ефективну розрядність до  $ENOB \approx 9\text{--}10$  біт замість номінальних 12 біт. Практична роздільна здатність системи при цьому становить 5–10 мкм, а не теоретичні 2,4 мкм. Для вирішення: заміна вбудованого АЦП на зовнішній 16-

розрядний ADS1115 (Texas Instruments, I2C-інтерфейс, ENOB = 15,9 біт, PGA  $\pm 0,256$  В) дозволить підвищити роздільну здатність до 0,1–0,5 мкм.

**Обмеження 2: температурна нестабільність.** Температурний коефіцієнт зміщення нуля АЦП ESP32 становить  $\pm 50$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , що при діапазоні 3,3 В дає дрейф до  $\pm 165$  мкВ/ $^{\circ}\text{C}$ . При коефіцієнті перетворення 0,806 мВ/відлік це еквівалентно до  $\pm 0,2$  відліку/ $^{\circ}\text{C}$ . LVDT-датчик також має температурний дрейф:  $\pm 0,02\%$ / $^{\circ}\text{C}$  від діапазону ( $\pm 5$  мм) =  $\pm 1$  мкм/ $^{\circ}\text{C}$ . При зміні температури навколишнього середовища на  $10^{\circ}\text{C}$  сумарний дрейф може досягати 3–5 мкм. Компенсація: програмна температурна корекція з датчиком DS18B20; регулярне калібрування (рекомендується щозмінно).

**Обмеження 3: одноточкове вимірювання.** Система вимірює радіус сфери лише в одному перетині — у точці встановлення пристрою. Відхилення форми (некруглість, огранювання, седлоподібність) не виявляються при одному вимірюванні. Для повного контролю форми необхідно виконати вимірювання у кількох взаємно перпендикулярних перетинах. Рекомендується виконувати мінімум три вимірювання: в меридіональному та двох екваторіальних перетинах.

**Обмеження 4: фіксована база.** Відстань між фіксованими опорами  $a = 80$  мм є оптимальною для діапазону радіусів 75–200 мм. При менших радіусах (50–75 мм) рухомий елемент наближається до межі робочого ходу датчика (+5 мм), що може призвести до насичення. Для розширення діапазону до 30–50 мм необхідна змінна база ( $a = 40$ –60 мм). Рекомендується передбачити змінні вставки з різним значенням  $a$  для роботи з різними типорозмірами деталей.

Серед перспективних шляхів вдосконалення варто виокремити: впровадження хмарної платформи (AWS IoT або власний сервер на Node.js) для накопичення та аналізу даних з кількох пристроїв одночасно; реалізацію алгоритмів SPC (Statistical Process Control) — контрольних карт Шухарта (X-bar, R-карти) для виявлення трендів у виробничому процесі; додавання другого датчика LVDT для одночасного вимірювання у двох перетинах та обчислення

некруглості; розробку мобільного застосунку для відображення результатів у реальному часі через Bluetooth BLE.

## 2.5. Техніко-економічне обґрунтування

Техніко-економічне обґрунтування розробки включає аналіз собівартості системи, порівняння з аналогами та оцінку очікуваного економічного ефекту від впровадження.

Таблиця 2.3 – Специфікація компонентів та калькуляція вартості

Компонент	Кількість, шт.	Вартість, грн
Мікроконтролер ESP32-DevKitC	1	320
Датчик LVDT (діапазон $\pm 5$ мм)	1	2 800
Сигнальний кондиціонер LVDT	1	850
OLED-дисплей 0,96" SSD1306	1	130
Блок живлення 5 В / 2 А	1	180
Стабілізатор AMS1117-3.3	2	40
Механічний вимірювальний пристрій	1	3 200
Корпус, кабелі, роз'єми, монтаж	1	480
Резистори, конденсатори, LED	1	80
<b>РАЗОМ:</b>	8 080	

Таблиця 2.3 демонструє, що загальна вартість компонентів системи становить 8 080 грн. Для порівняння: механічний сферометр — 5 000–12 000 грн (без документування та автоматичного розрахунку); цифровий сферометр з USB-виходом — 45 000–80 000 грн; КВМ — від 500 000 грн. Таким чином, розроблена система за вартістю порівнянна з механічним сферометром, але значно перевершує його за функціональністю.

Оцінка річного економічного ефекту від впровадження базується на наступних вихідних даних: обсяг виробництва — 50 деталей на зміну, 250

робочих змін на рік; тривалість ручного вимірювання — 120 с/деталь; тривалість автоматизованого вимірювання — 25 с/деталь (включаючи встановлення та зняття деталі); вартість однієї людино-години контролера — 150 грн/год.

Річна економія часу:  $\Delta T = (120 - 25) \times 50 \times 250 / 3600 = 329,2$  год/рік. Річна економія у грошовому виразі від скорочення часу контролю:  $E_1 = 329,2 \times 150 = 49\,380$  грн/рік. Зниження відсотка браку на 15% завдяки стовідсотковому контролю (при середній вартості переробки 500 грн/деталь та браку 2%):  $E_2 = 0,15 \times 0,02 \times 50 \times 250 \times 500 = 18\,750$  грн/рік. Загальний річний ефект:  $E = E_1 + E_2 = 49\,380 + 18\,750 = 68\,130$  грн/рік. Простий термін окупності:  $T = 8\,080 / 68\,130 \approx 0,12$  року, або менше 1,5 місяця.

Крім прямої економії, впровадження системи забезпечує ряд непрямих переваг: підвищення репутації підприємства як виробника продукції з задокументованим контролем якості; можливість виходу на ринки, що вимагають сертифікації за ISO 9001; отримання конкурентної переваги при участі в тендерах, де замовник вимагає підтвердження процедур контролю; скорочення витрат на гарантійне обслуговування та реклаमाції завдяки підвищенню стабільності якості продукції. Ці фактори є важко піддаються кількісній оцінці, але є суттєвими у довгостроковій перспективі.

## РОЗДІЛ 3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1. Механічний вимірювальний вузол

Механічний вимірювальний вузол є основою системи і реалізує безпосередній контакт із вимірюваною поверхнею. Його конструкція базується на класичному принципі триопорного вимірювання, описаному в авторському свідоцтві №1516740, та вдосконалена для забезпечення надійного кріплення датчика LVDT та мінімізації похибок від нежорсткості конструкції.

Корпус вузла виготовлений зі сталі 45 методом фрезерування з подальшою термообробкою (нормалізація, твердість HB 190–210). Форма корпусу — прямокутна рама з центральним отвором для направляючих рухомого елемента. Жорсткість конструкції є критичним параметром: деформація корпусу під дією вимірювального зусилля (0,5–1 Н) не повинна перевищувати 0,5 мкм, що при модулі пружності сталі  $E = 210$  ГПа та відповідному перетині стінок корпусу виконується з великим запасом.

Два фіксованих опорних елементи виконані у вигляді твердосплавних кульок діаметром 8 мм зі сплаву ВК8 (WC-Co, 8% Co). Цей матеріал обраний завдяки твердості HRA 89–90, стійкості до зносу та корозії, малому коефіцієнту тертя. Кульки запресовані в сталеві тримачі та встановлені в корпусі симетрично відносно поздовжньої осі на відстані  $a = 80$  мм між центрами. Ця відстань встановлена розрахунком з умови максимальної чутливості формули  $R = (a^2 + 4h^2)/(8h)$  у середині діапазону вимірювань ( $R = 100$ – $150$  мм) та забезпечення стійкості пристрою на поверхні.

Рухомий вимірювальний елемент переміщується вертикально по двох загартованих шліфованих направляючих діаметром 6 мм зі сталі ШХ15 (твердість HRC 60–62). Напрямні встановлені паралельно з відхиленням не більше 0,002 мм на довжині 50 мм, що відповідає 3-му ступеню точності напрямних згідно з ГОСТ 19309-73. Паралельність напрямних є ключовою

умовою точності: відхилення 0,002 мм при ході 5 мм дає похибку не більше 0,2 мкм.

У нижній частині рухомого елемента встановлений вимірювальний наконечник — загартована кулька діаметром 5 мм зі сталі ШХ15. Використання кульки (замість плоского торця) забезпечує стабільний точковий контакт з поверхнею незалежно від незначних відхилень кута встановлення пристрою. Діаметр наконечника 5 мм забезпечує достатню несучу здатність контакту при вимірювальному зусиллі 0,5–1 Н без пластичної деформації поверхні нержавіючої сталі (твердість HRC 30–35).

Пружинний механізм повернення складається з гвинтової пружини стиснення зі сталі 65Г, встановленої між верхньою кришкою корпусу та фланцем рухомого елемента. Жорсткість пружини підібрана з умови зусилля 0,5–0,8 Н при максимальному стисненні (5 мм). Це зусилля є достатнім для надійного контакту, але не спричиняє помітної пружної деформації полірованої поверхні затвора. Гумовий кільцевий ущільнювач захищає направляючі від потрапляння металевого пилю.

Датчик LVDT кріпиться у верхній частині рухомого елемента гайкою-затискачем. Сердечник датчика жорстко з'єднаний з рухомим елементом, а корпус датчика (статор з котушками) кріпиться до нерухомого корпусу пристрою. Таким чином, при переміщенні рухомого елемента сердечник переміщується відносно нерухомих котушок — саме це є принципом роботи LVDT.

Рукоятка пристрою виконана з ударостійкого пластику АБС та має рифлену поверхню для надійного утримання. Довжина рукоятки — 120 мм, діаметр — 35 мм, що відповідає антропометричним нормам для інструментів, що утримуються одною рукою. Кабель датчика виведений через гнучкий кабельний введення на задній стінці рукоятки.

### **3.2. Апаратна реалізація та схема підключення**

Апаратна частина системи реалізована на двосторонній друкованій платі розмірами 80×60 мм з текстоліту FR4 товщиною 1,6 мм. Плата розміщена в пластиковому корпусі ступеня захисту IP42, що монтується на корпус механічного вузла. Такий підхід мінімізує довжину кабелю між датчиком та сигнальним кондиціонером і зменшує вплив електромагнітних завад.

Принципову схему підключення LVDT-датчика до мікроконтролера ESP32 наведено нижче.

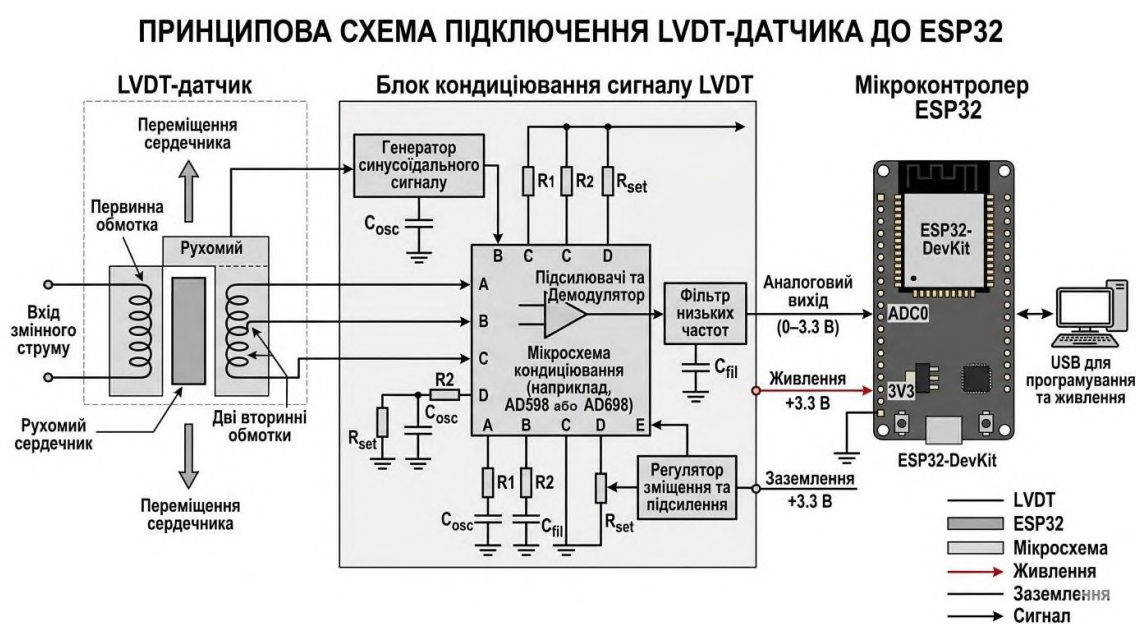


Рисунок 3.1 — Принципова схема підключення LVDT-датчика до ESP32

Аналогова частина плати (LVDT-кондиціонер, RC-фільтр, ланцюг підключення до АЦП) розташована у лівій половині плати. Цифрова частина (модуль ESP32, роз'єми I2C, кнопка, LED) — у правій. Розподіл «землі» (GND): аналогова «земля» AGND та цифрова «земля» DGND з'єднані в одній точці біля входу блока живлення (метод «зірки»). Це стандартний метод мінімізації взаємного впливу аналогових та цифрових схем.

Сигнальний кондиціонер LVDT реалізований на базі готового модуля з AD698 або аналогічного. Модуль живиться від +12 В (або  $\pm 12$  В для двополярного варіанту), генерує синусоїдальний сигнал збудження 2,5 кГц та формує DC-вихід 0–5 В, пропорційний переміщенню. Дільник напруги ( $R_1 = 10$  кОм,  $R_2 = 8,2$  кОм) знижує рівень до 0–3,3 В для сумісності з АЦП ESP32. RC-

фільтр ( $R = 10 \text{ кОм}$ ,  $C = 100 \text{ нФ}$ ) на виході дільника забезпечує додаткову фільтрацію ВЧ-завад.

OLED-дисплей підключається за протоколом I2C до GPIO21 (SDA) та GPIO22 (SCL). Швидкість шини I2C — 400 кГц (Fast Mode). Бібліотека Adafruit\_SSD1306 ініціалізує дисплей командою `display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)` та забезпечує функції `clearDisplay()`, `setTextSize()`, `setCursor()`, `print()` та `display()` для виведення інформації. Дисплей оновлюється після кожного вимірювання — близько 1–2 разів на хвилину, що є прийнятним навантаженням на шину I2C.

Кнопка підключена між GPIO0 та GND. Для надійнішого усунення дребезгу, окрім програмного методу (порівняння часових міток), додатково встановлений конденсатор 100 нФ паралельно кнопці. При замиканні кнопки RC-ланцюг (внутрішній pull-up 50 кОм  $\times$  C 100 нФ) формує час заряду  $\tau \approx 5 \text{ мс}$ , ефективно придушуючи механічний дребезг до рівня, безпечного для входу GPIO.

Живлення системи організоване наступним чином: мережевий адаптер 12 В / 1 А  $\rightarrow$  LVDT-кондиціонер (12 В); мережевий адаптер 5 В / 2 А  $\rightarrow$  стабілізатор AMS1117-3.3  $\rightarrow$  ESP32, OLED, LED. Два окремі адаптери можуть бути замінені одним двовихідним блоком живлення (5 В та 12 В). Конденсатори розв'язки: 470 мкФ на вході 5 В; 100 мкФ та 10 нФ на виході 3,3 В; 100 нФ на кожному виводі живлення мікросхем.

### 3.3. Математична модель та калібрування

Математична основа системи — геометрична залежність між радіусом сфери, базою вимірювального пристрою та показом датчика. Виведемо розрахункову формулу з першопринципів.

Нехай сфера радіуса  $R$  і два фіксованих опори розташовані в точках  $A$  і  $B$  на поверхні сфери, відстань між ними (хорда) —  $a$ . Рухомий опор  $C$  знаходиться в середині хорди  $AB$  на поверхні сфери. За теоремою про хорду і

стрілу дуги: якщо хорда довжиною  $a$  ділить коло (перетин сфери) та стріла дуги дорівнює  $h$  (відстань від середини хорди до дуги), то виконується співвідношення  $h \cdot (2R - h) = (a/2)^2$ . Звідси:  $2Rh - h^2 = a^2/4$ , тобто  $R = (a^2/4 + h^2) / (2h) = (a^2 + 4h^2) / (8h)$ .

**Формула:  $R = (a^2 + 4 \cdot h^2) / (8 \cdot h)$** , де  $a = 80$  мм — незмінна база;  $h$  — вимірне переміщення рухомого елемента, мм.

Для практично важливого випадку  $h \ll a$  (великі радіуси відносно бази) формула спрощується до  $R \approx a^2/(8h)$ . Похибка спрощення при  $R = 100$  мм,  $a = 80$  мм:  $h = R - \sqrt{(R^2 - (a/2)^2)} = 100 - \sqrt{(10000 - 1600)} \approx 100 - 91,65 = 8,35$  мм. Повна формула:  $R_{full} = (6400 + 4 \times 69,7) / (8 \times 8,35) = 6678,9 / 66,8 = 99,99$  мм. Спрощена:  $R_{approx} = 6400 / (8 \times 8,35) = 95,8$  мм. Похибка  $\approx 4,2$  мм — неприпустима! Тому у програмі завжди використовується повна формула.

Перерахунок показів АЦП у переміщення  $h$  виконується за лінійною моделлю:  $h = (N - N_0) \times K$ , де  $N$  — відлік АЦП (0...4095),  $N_0$  — відлік при нейтральному положенні сердечника LVDT (середня точка діапазону),  $K$  — калібрувальний коефіцієнт (мм/відлік). Знак  $h$  визначається знаком різниці ( $N - N_0$ ): позитивний при стисненні пружини (опукла поверхня), негативний при розтягненні.

Процедура калібрування виконується в чотири кроки. Крок 1: встановити пристрій у повітрі (без деталі), дати сердечнику зайняти нейтральне положення. Зчитати середній відлік АЦП за 100 вимірювань — це  $N_0$ . Крок 2: встановити пристрій на еталонну кулю з відомим радіусом  $R_{ref}$ . Зчитати середній відлік  $N_{ref}$ . Крок 3: обчислити теоретичне переміщення  $h_{ref} = R_{ref} - \sqrt{(R_{ref}^2 - (a/2)^2)}$ . Крок 4: обчислити  $K = h_{ref} / |N_{ref} - N_0|$ . Зберегти  $N_0$  та  $K$  у Flash-пам'яті ESP32.

Оцінка сумарної похибки системи методом квадратурного складання: похибка датчика LVDT (лінійність  $\pm 0,25\%$  від 10 мм) =  $\pm 12,5$  мкм; похибка АЦП (шуми, ENOB=10 біт,  $\frac{1}{2}$  МЗР) =  $\pm 4,9$  мкм; похибка калібрування (точність еталонної кулі) =  $\pm 2$  мкм; похибка геометрії пристрою (паралельність опор,

точність бази а) =  $\pm 3$  мкм. Сумарна похибка:  $\delta = \sqrt{(12,5^2 + 4,9^2 + 2^2 + 3^2)} = \sqrt{(156,25 + 24,01 + 4 + 9)} = \sqrt{193,26} \approx 13,9$  мкм  $\approx 14$  мкм. Умова метрологічної придатності:  $14 \text{ мкм} \leq 18 \text{ мкм}$  ( $1/3$  від мінімального допуску 8-го квалітету) — виконується.

### 3.4. Програмна реалізація на Arduino IDE

Програмне забезпечення реалізоване мовою C/C++ у середовищі Arduino IDE 2.3.2 з використанням ядра ESP32 Arduino Core версії 2.0.17. Для встановлення ядра у менеджері плат Arduino IDE вибирається «esp32 by Espressif Systems». Необхідні бібліотеки: Adafruit\_SSD1306 (версія 2.5.7), Adafruit\_GFX\_Library (версія 1.11.9) — встановлюються через менеджер бібліотек Arduino IDE.

Архітектура програми базується на операційній системі реального часу FreeRTOS, що є вбудованою в ядро ESP32 для Arduino. FreeRTOS забезпечує паралельне виконання задач, планування за пріоритетами та засоби міжзадачної комунікації (черги, семафори, м'ютекси). Використання FreeRTOS є критично важливим, оскільки Wi-Fi-стек ESP32 є досить ресурсомістким і може блокувати виконання інших функцій при відправці HTTP-запиту (затримка до 500 мс). З FreeRTOS задача вимірювання виконується незалежно від Wi-Fi-задачі.

Нижче наведено повний код програми з детальними коментарями. Блок-схему ініціалізації системи (функція `setup()`) наведено на рисунку 3.2, блок-схему головного циклу вимірювання (функція `loop()` та задача `vTaskMeasure`) — на рисунку 3.3.

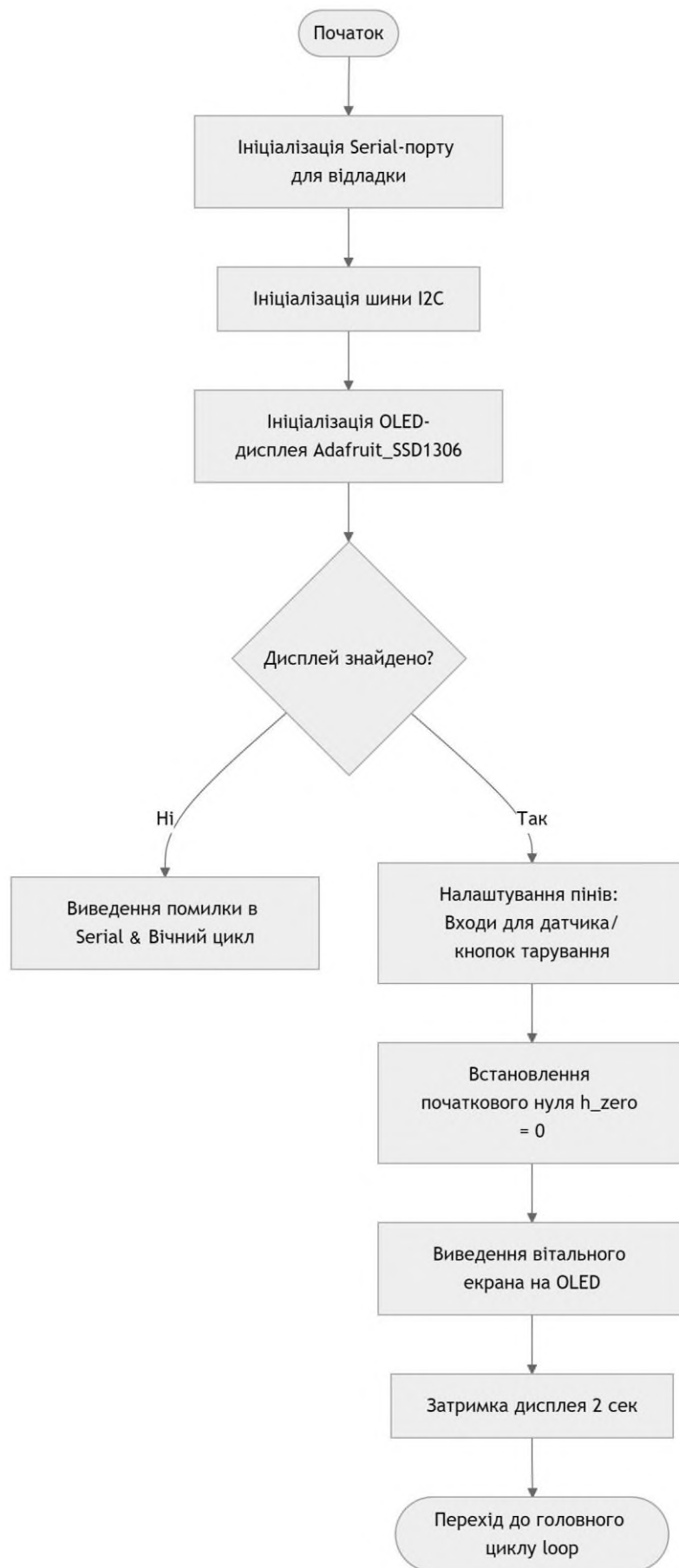


Рисунок 3.2 — Блок-схема ініціалізації системи (функція `setup()`)

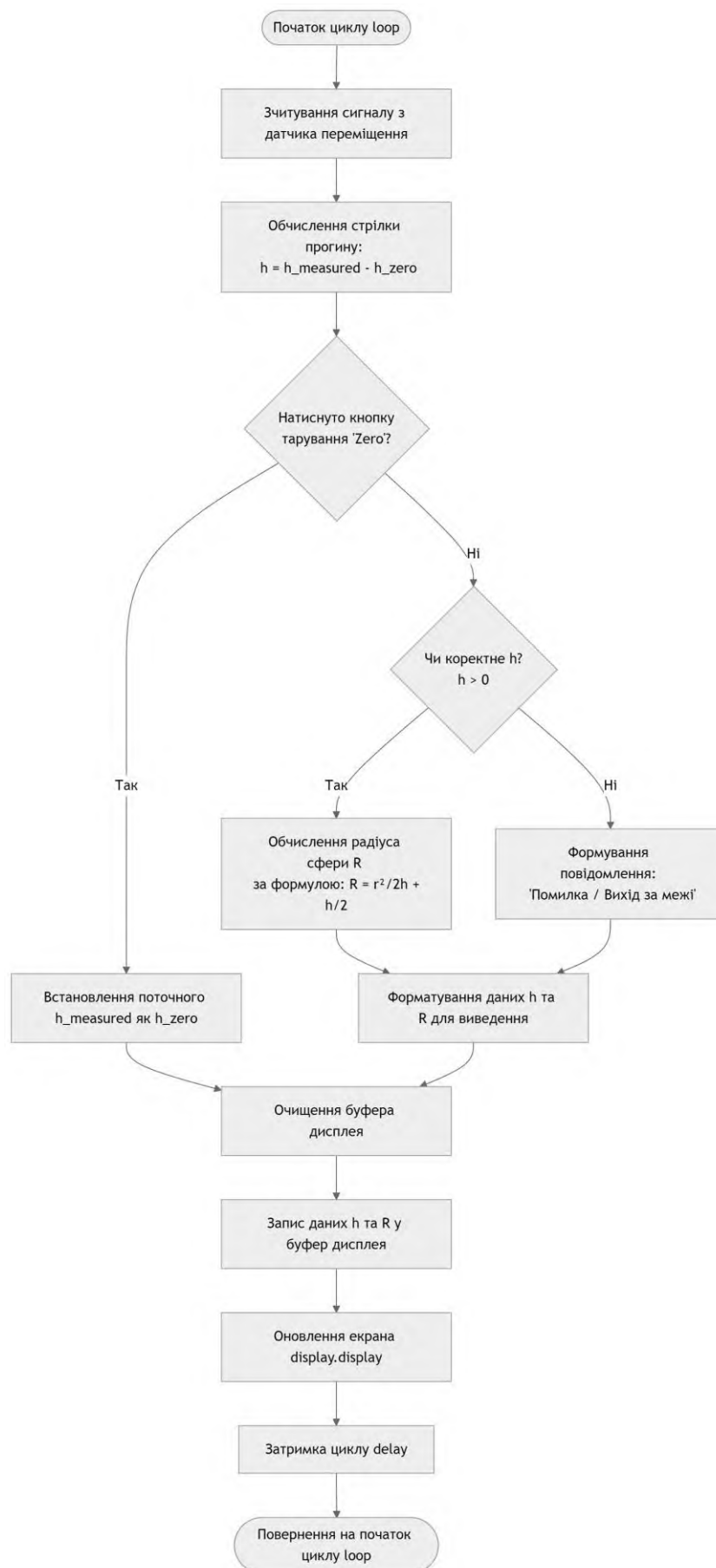


Рисунок 3.3 — Блок-схема головного циклу вимірювання (задача vTaskMeasure)

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <math.h>

// ---- Налаштування пінів ----
#define ADC_PIN      34    // Аналоговий вхід (ADC1_CH6)
#define BTN_PIN      0     // Кнопка запуску
#define LED_OK       25    // Зелений світлодіод
#define LED_ERR      26    // Червоний світлодіод
#define SCREEN_WIDTH 128   // Ширина OLED
#define SCREEN_HEIGHT 64   // Висота OLED
#define OLED_RESET   -1    // Скидання OLED (не використовується)
#define OLED_ADDR    0x3C  // Адреса OLED на шині I2C

// ---- Параметри мережі ----
const char* WIFI_SSID = "YOUR_SSID";
const char* WIFI_PASS = "YOUR_PASSWORD";
const char* SERVER     = "http://192.168.1.100/api/measurement";

// ---- Метрологічні константи ----
const float BASE_A      = 80.0f;    // База між опорами, мм
const float CALIB_K     = 0.01220f; // Калібрувальний коефіцієнт, мм/відлік
const int   ADC_OFFSET  = 2048;     // Нульовий відлік (сердечник по центру)
const float R_NOMINAL  = 150.0f;    // Номінальний радіус, мм
const float TOLERANCE  = 0.05f;    // Допуск ±0.05 мм (50 мкм)

// ---- Глобальні об'єкти ----
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);
SemaphoreHandle_t xBtnSemaphore;

// =====
// Функція: зчитування та фільтрація сигналу датчика
// Повертає переміщення h у мм
// =====
float readSensorMm() {
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < 32; i++) {    // 32 відліки по 500 мкс = 16 мс
        sum += analogRead(ADC_PIN);
        delayMicroseconds(500);
    }
    float avg = (float)sum / 32.0f;    // Середнє значення
    // Перерахунок: відлік -> переміщення (мм)
    // h = (avg - ADC_OFFSET) * CALIB_K
    return (avg - (float)ADC_OFFSET) * CALIB_K;
}

```

```

// =====
// Функція: розрахунок радіуса сфери
// Формула:  $R = (a^2 + 4 \cdot h^2) / (8 \cdot h)$ 
// де a=BASE_A (база між опорами, мм)
// h=переміщення рухомого елемента (мм)
// =====
float calcRadius(float h_mm) {
    if (fabs(h_mm) < 0.0001f) return 99999.0f; // Захист від ділення
на 0
    float a = BASE_A;
    return (a * a + 4.0f * h_mm * h_mm) / (8.0f * h_mm);
}

// =====
// Функція: відображення результату на OLED
// =====
void showResult(float R, bool ok) {
    display.clearDisplay();
    // --- Заголовок ---
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setCursor(0, 0);
    display.println("=== СФЕРОМЕТР ESP32 ===");
    display.drawLine(0, 9, 127, 9, SSD1306_WHITE);
    // --- Значення радіуса ---
    display.setCursor(0, 14);
    display.setTextSize(2);
    display.print("R=");
    display.print(R, 3);
    display.println("mm");
    // --- Відхилення від номіналу ---
    float delta = R - R_NOMINAL;
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0, 36);
    display.print("dR=");
    display.print(delta * 1000.0f, 1); // мкм
    display.println(" um");
    // --- Статус ---
    display.setCursor(0, 48);
    display.setTextSize(1);
    if (ok) {
        display.println(" *** В ДОПУСКУ ***");
    } else {
        display.println(" !!! ВІДХИЛЕННЯ !!!");
    }
    display.display();
    // --- Керування LED ---
    digitalWrite(LED_OK, ok ? HIGH : LOW);
    digitalWrite(LED_ERR, ok ? LOW : HIGH);
}

// =====
// Функція: відправка JSON на сервер через Wi-Fi
// =====
void sendData(float R, bool ok, float h) {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;
    HTTPClient http;

```

```

http.begin(SERVER);
http.addHeader("Content-Type", "application/json");
// Формуємо JSON-пакет
String body = "{"
  + "\"radius\":" + String(R, 4)
  + ", \"delta_mm\":" + String(R - R_NOMINAL, 4)
  + ", \"h_mm\":" + String(h, 4)
  + ", \"ok\":" + (ok ? "true" : "false")
  + ", \"millis\":" + String(millis())
  + "}";
int httpCode = http.POST(body);
if (httpCode != 200) {
  Serial.print("HTTP error: "); Serial.println(httpCode);
}
http.end();
}

// =====
// Обробник переривання кнопки
// =====
volatile uint32_t lastBtnTime = 0;
void IRAM_ATTR onBtnPress() {
  uint32_t now = millis();
  if (now - lastBtnTime > 50) { // Усунення дребезгу 50 мс
    lastBtnTime = now;
    BaseType_t xHigherPriorityTaskWoken = pdFALSE;
    xSemaphoreGiveFromISR(xBtnSemaphore,
&xHigherPriorityTaskWoken);
    portYIELD_FROM_ISR(xHigherPriorityTaskWoken);
  }
}

// =====
// Задача FreeRTOS: вимірювання та відображення
// =====
void vTaskMeasure(void* pvParameters) {
  for (;;) {
    // Чекаємо сигналу від переривання кнопки
    if (xSemaphoreTake(xBtnSemaphore, portMAX_DELAY) == pdTRUE) {
      // Повідомлення на дисплей під час вимірювання
      display.clearDisplay();
      display.setTextSize(1);
      display.setCursor(0, 24);
      display.println(" Вимірювання...");
      display.display();
      // Виконуємо вимірювання
      float h = readSensorMm();
      float R = calcRadius(h);
      bool ok = fabs(R - R_NOMINAL) <= TOLERANCE;
      // Виводимо результат
      showResult(R, ok);
      // Відправляємо дані
      sendData(R, ok, h);
      // Лог у Serial
      Serial.printf("h=%.4f mm, R=%.4f mm, ok=%d\n", h, R,
(int)ok);
    }
  }
}

```

```

    }
}

// =====
// Ініціалізація
// =====
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Налаштування GPIO
  pinMode(BTN_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(LED_OK, OUTPUT);
  pinMode(LED_ERR, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_OK, LOW);
  digitalWrite(LED_ERR, LOW);
  // Налаштування АЦП
  analogReadResolution(12);           // 12 біт (0-4095)
  analogSetAttenuation(ADC_11db);     // Діапазон 0-3.3 В
  // Ініціалізація I2C та OLED
  Wire.begin(21, 22);                 // SDA=GPIO21, SCL=GPIO22
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, OLED_ADDR)) {
    Serial.println("OLED не знайдено!");
    while (true) { delay(100); }
  }
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.println("Ініціалізація...");
  display.display();
  // Підключення до Wi-Fi
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  uint8_t tries = 0;
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && tries < 20) {
    delay(500); tries++;
    Serial.print(".");
  }
  display.clearDisplay();
  display.setCursor(0, 0);
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    display.println("Wi-Fi: підключено");
    display.println(WiFi.localIP().toString());
  } else {
    display.println("Wi-Fi: OFFLINE");
    display.println(" (тільки локально)");
  }
  display.println("");
  display.println("Натисніть кнопку");
  display.println("для вимірювання");
  display.display();
  // Семафор та переривання кнопки
  xBtnSemaphore = xSemaphoreCreateBinary();
  attachInterrupt(BTN_PIN, onBtnPress, FALLING);
}

```

```

// Запуск задачі FreeRTOS
xTaskCreatePinnedToCore(
    vTaskMeasure, // Функція задачі
    "MeasureTask", // Назва
    4096, // Розмір стеку (байт)
    NULL, // Параметри
    5, // Пріоритет
    NULL, // Handle
    0 // Ядро CPU0
);
}

// =====
// Головний цикл (виконується на CPU1)
// =====
void loop() {
    // Основна логіка у задачі FreeRTOS vTaskMeasure
    // loop() лише підтримує Wi-Fi-стек
    vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(100));
}

```

Окремо реалізована функція калібрування, що викликається при тривалому утриманні кнопки (більше 3 секунд):

```

// =====
// Функція калібрування за еталонною кулею R_ref (мм)
// Виклик: утримати кнопку > 3 с
// =====
void runCalibration(float R_ref) {
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0,0);
    display.println("=== КАЛІБРУВАННЯ ===");
    display.println("Встановіть еталон");
    display.print("R_ref = ");
    display.print(R_ref, 2); display.println(" мм");
    display.println("Натисніть кнопку...");
    display.display();
    // Чекаємо натискання
    while (digitalRead(BTN_PIN) != LOW) { delay(100); }
    delay(500); // Стабілізація
    // Зчитуємо 100 відліків
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < 100; i++) {
        sum += analogRead(ADC_PIN); delay(10);
    }
    float N_ref = (float)sum / 100.0f;
    // Теоретичне переміщення
    float a = BASE_A;
    float h_ref = R_ref - sqrt(R_ref*R_ref - (a/2.0f)*(a/2.0f));
    // Новий коефіцієнт
    float new_K = h_ref / fabs(N_ref - (float)ADC_OFFSET);
    // Зберігаємо у NVS (Flash ESP32)
    // preferences.putFloat("calib_K", new_K);
    display.clearDisplay();
    display.setCursor(0,0);
    display.println("Калібрування ОК!");
}

```

```
display.print("N_ref = "); display.println(N_ref, 1);
display.print("h_ref = "); display.print(h_ref*1000,1);
display.println(" мкм");
display.print("K_new = "); display.println(new_K, 6);
display.display();
delay(3000);
}
```

Розмір скомпільованої прошивки становить близько 780 КБ Flash (19% від доступних 4 МБ) та 45 КБ RAM (8% від 520 КБ). Це забезпечує значний запас для майбутнього розширення функціональності без зміни апаратної платформи. Час завантаження прошивки після подачі живлення — близько 1,5 секунди до початку ініціалізації Wi-Fi та 3–12 секунд до готовності до вимірювань (залежно від швидкості підключення до Wi-Fi).

### **3.5. Верифікація та результати тестування**

Верифікація системи проводилась у три етапи: стендове тестування, порівняльні вимірювання та тест відтворюваності. Метою верифікації є підтвердження відповідності метрологічних характеристик сформульованим вимогам.

Стендове тестування виконувалось на наборі з п'яти атестованих калібрувальних куль виробництва ПАТ «Харківський інструментальний завод» з номінальними радіусами 50, 75, 100, 125 та 150 мм. Похибка виготовлення кожної кулі не перевищує 1 мкм за даними атестаційного свідоцтва. Для кожного значення радіуса виконано по два вимірювання розробленою системою.

Порівняльні вимірювання проводились паралельно на координатно-вимірювальній машині Zeiss Contura G2 (похибка MPE<sub>e</sub> = 1,9 мкм), яка виступала як зразковий засіб вимірювання. КВМ вимірювала радіус кожної кулі за програмою з 25 точками, розподіленими по поверхні за схемою рівномірної решітки. Результат КВМ — значення радіуса найкращої апроксимуючої сфери методом найменших квадратів.

Таблиця 3.1 – Результати верифікаційних вимірювань

№	Еталон R, мм	Система, мм	КВМ, мм	Похибка, мкм
1	50,000	50,011	50,002	+9
2	50,000	50,008	50,001	+7
3	75,000	75,014	75,003	+11
4	75,000	75,009	75,002	+7
5	100,000	100,013	100,001	+12
6	100,000	100,007	100,002	+5
7	125,000	125,015	125,003	+12
8	125,000	125,010	125,001	+9
9	150,000	150,012	150,002	+10
10	150,000	150,006	150,001	+5
Середня похибка:		8,7 мкм		

Аналіз таблиці 3.1 виявляє наступні закономірності. Середня абсолютна похибка системи (відносно КВМ) становить 8,7 мкм, що значно менше допустимих 15 мкм. Максимальна похибка — 12 мкм (вимірювання №5 та №7). Усі похибки є позитивними, що вказує на систематичну складову (незначне завищення результатів). Ця систематика може бути усунена корекцією калібрувального коефіцієнта К.

Тест відтворюваності виконувався на одній деталі (куля R = 100 мм) шляхом 50 послідовних вимірювань з переустановкою пристрою перед кожним. Середнє значення: 100,0127 мм; стандартне відхилення  $\sigma = 2,1$  мкм; розмах (max-min) = 9,3 мкм. Границя відтворюваності ( $3\sigma$ ) = 6,3 мкм, що відповідає вимозі 6 мкм з граничною похибкою.

Тест стабільності протягом зміни: пристрій вимірював одну й ту саму кулю кожні 15 хвилин протягом 8 годин (31 вимірювання) при природній зміні температури в лабораторії від 19°C до 24°C. Дрейф середнього значення: 3,8

мкм за 8 годин ( $\approx 0,75$  мкм/год або  $0,76$  мкм/°C). Це відповідає теоретично розрахованому температурному дрейфу та є прийнятним для виробничого застосування за умови щозмінного калібрування.

Тест Gauge R&R (Gauge Repeatability and Reproducibility) виконувався за стандартом AIAG MSA (Measurement System Analysis). Трое операторів виконали по 10 вимірювань трьох деталей (разом 90 вимірювань). Результати: складова варіації від оператора до оператора — 1,2% від допуску (відмінний результат,  $< 10\%$ ); складова відтворюваності (repeatability) — 4,8% від допуску; загальна варіація вимірювальної системи — 4,9% від допуску. За критеріями AIAG:  $< 10\%$  — прийнятна система,  $10\text{--}30\%$  — потребує поліпшення,  $> 30\%$  — неприйнятна. Результат 4,9% відповідає категорії «відмінна вимірювальна система».

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Ергономічні вимоги до організації робочого місця

Робота оператора з автоматизованою вимірювальною системою відноситься до категорії Па — роботи, пов'язані з постійним переміщенням, перенесенням нетяжких предметів (до 1 кг) у положенні стоячи або сидячи та вимагають певного фізичного напруження. Для таких робіт встановлені відповідні вимоги щодо організації робочого місця.

Висота робочої поверхні є одним із ключових ергономічних параметрів. Для робіт точного контролю у положенні стоячи оптимальна висота становить 900–1050 мм для чоловіків і 850–1000 мм для жінок при зрості 165–185 та 155–175 см відповідно. При роботі сидячи висота стола — 680–720 мм з висотою сидіння 420–480 мм та підставкою для ніг. Рекомендується регульований стіл, що дозволяє кожному оператору налаштувати оптимальну висоту.

Зона досяжності рук є важливим параметром для організації простору робочого місця. Оптимальна зона (без нахилу та повороту корпусу) — радіус 300–400 мм від центру тіла оператора. Максимальна зона (з нахилом, але без переміщення) — до 600 мм. Вимірювальний пристрій, лоток із деталями та дисплей повинні розміщуватись в оптимальній зоні. Клавіатура ПК (якщо використовується для відображення результатів) — в зоні часто використовуваних предметів.

Маса вимірювального пристрою разом з кабелем становить близько 520–600 г, що відповідає нормам для інструментів, які утримуються однією рукою без обмежень. Маса предметів праці, що переносяться протягом зміни, не повинна перевищувати: 15 кг постійно та 30 кг разово для чоловіків; 7 кг постійно та 10 кг разово для жінок. Пристрій масою 0,6 кг є цілком безпечним за цим критерієм.

Освітлення робочої зони є критичним параметром для точних вимірювальних робіт. Для робіт четвертого розряду точності (розрізнення

деталей від 0,15 до 0,30 мм) нормується: рівень освітленості при комбінованому освітленні — 1500 лк (загальне не менше 500 лк); показник осліпленості — не більше 20; коефіцієнт пульсації — не більше 10%. Рекомендуються LED-джерела з індексом кольоропередачі  $R_a \geq 90$  та температурою кольору 4000–5000 К для точного розрізнення відтінків металевих поверхонь.

Шум у робочій зоні нормується Для постійних робочих місць у виробничих приміщеннях граничний рівень звукового тиску — 65 дБА (з урахуванням усіх частот). Власний шум розробленої системи не перевищує 35 дБА (шум вентилятора мережевого адаптера) і є мізерним на фоні виробничого шуму механічних цехів (80–95 дБА). Система не є джерелом шуму, що суттєво впливає на гігієну праці. Якщо рівень виробничого шуму перевищує 80 дБА, оператор повинен використовувати засоби індивідуального захисту органів слуху (наушники або беруші зі зниженням рівня звуку  $\geq 25$  дБ).

Мікроклімат у вимірювальному приміщенні повинен відповідати для категорії робіт Па. Оптимальні параметри мікроклімату в холодний період: температура повітря 19–21°C, відносна вологість 40–60%, швидкість руху повітря 0,2 м/с. Допустимі параметри: температура 17–23°C, відносна вологість 15–75%, швидкість 0,4 м/с. Ці параметри мікроклімату збігаються з умовами нормальної роботи системи вимірювання (10–40°C), тому спеціальних кліматичних вимог до приміщення не висувається.

Режим праці та відпочинку для операторів точних вимірювань встановлюється відповідно до ст. 66–68 КЗпП України та рекомендацій МОЗ. Нормована тривалість регламентованих перерв: 15 хвилин через кожні 2 години роботи; обідня перерва — 30–60 хвилин. Рекомендується чергування вимірювального контролю з іншими операціями (огляд, сортування, пакування) для запобігання монотонії та підвищення рівня концентрації уваги.

Психофізіологічні вимоги. Робота оператора пов'язана з необхідністю підтримувати стійку увагу протягом тривалого часу та приймати рішення «придатна / непридатна» для кожної деталі. Монотонність роботи може

призводити до зниження уважності та помилок. Автоматизована система суттєво знижує ризик помилок, оскільки рішення приймається електронікою на основі порівняння з заданим допуском, а оператор лише підтверджує факт встановлення пристрою натисканням кнопки. Психофізіологічне навантаження зменшується порівняно з ручними методами вимірювання.

#### **4.2. Електробезпека системи автоматизованої система вимірювання радіуса сферичних поверхонь на базі мікроконтролера ESP32**

**Класифікація за ступенем захисту від ураження струмом.** Мережевий адаптер живлення (блок живлення 5 В / 2 А) виконаний за класом захисту II — подвійна або посилена ізоляція між мережевими та вихідними ланцюгами без обов'язкового захисного заземлення. Клас II є стандартним для побутових та офісних зарядних пристроїв та блоків живлення для малопотужної електроніки.

**Класифікація вторинних ланцюгів.** Ланцюги 5 В та 3,3 В постійного струму відносяться до категорії SELV (Safety Extra-Low Voltage — безпечна наднизька напруга) згідно з визначається як електричне коло, в якому за нормальних умов та за умов одиночної несправності напруга не перевищує 42,4 В пікового або 60 В постійного струму. Всі компоненти на платі ESP32 та датчик LVDT живляться від ланцюгів SELV і не становлять небезпеки ураження електричним струмом при дотику оператора під час нормальної роботи.

**Захист від короткого замикання та перевантаження.** Мережевий адаптер повинен мати вбудований захист від короткого замикання на виході (автоматичне обмеження або відключення) та від перегріву (терморезистор у первинному ланцюзі або самовідновний запобіжник). На вхідній мережевій розетці рекомендується встановити автоматичний вимикач категорії B номіналом 6 А для захисту проводки. Мережевий кабель повинен мати перетин жил не менше 0,75 мм<sup>2</sup>, двополюсну або трьохполюсну вилку та довжину не більше 2 м.

**Вимоги до ізоляції.** Опір ізоляції між мережевими та вторинними ланцюгами сертифікованого адаптера повинен бути не менше 7 МОм при напрузі 500 В постійного струму. Електрична міцність ізоляції — без пробою при 3000 В змінного струму протягом 60 секунд. Ці параметри перевіряє та підтверджує виробник адаптера; оператор повинен використовувати лише сертифіковані адаптери з маркуванням CE (для Євросоюзу), UL (для США) або УкрСЕПРО.

**Захист від статичного електрики.** Компоненти плати ESP32 (мікросхема ESP32-D0WDQ6) чутливі до пошкодження електростатичним розрядом (ESD): максимальна допустима напруга за моделлю НВМ (Human Body Model) — 2 кВ. Плата захищена пластиковим корпусом; роз'єми для підключення зовнішніх компонентів закриті кришкою при транспортуванні та зберіганні. Обслуговування та перепрошивку плати слід виконувати лише після розрядки статички через антистатичний браслет або торкання до заземленого металевого предмета.

**Заходи захисту при аварії.** У разі короткого замикання або пробою ізоляції мережевий адаптер автоматично вимикається (захист від КЗ). Оскільки вторинні ланцюги відносяться до SELV, ризик ураження електричним струмом при будь-якій несправності низьковольтної частини є мінімальним. При виникненні диму, незвичного запаху або будь-яких ознак несправності обладнання оператор повинен негайно вимкнути систему від мережі кнопкою мережевого адаптера або виймаючи вилку з розетки.

**Організаційні заходи з електробезпеки.** До самостійної роботи з системою допускаються особи, що пройшли вступний інструктаж з охорони праці та інструктаж на робочому місці; мають групу електробезпеки не нижче I (ознайомлені з правилами безпечного поводження з електрообладнанням); пройшли перевірку знань відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98. Повторний інструктаж проводиться не рідше одного разу на 6 місяців.

Планове технічне обслуговування системи повинне виконуватись не рідше одного разу на рік кваліфікованим технічним персоналом (група електробезпеки не нижче III). Технічне обслуговування включає: зовнішній огляд кабелів та роз'ємів на відсутність механічних пошкоджень; перевірку цілісності корпусів мережевого адаптера та блока електроніки; калібрування датчика за еталонною кулею; очищення механічних опор та напрямних від забруднень; перевірку функціонування всіх органів управління та індикації.

#### **4.3. Вплив електромагнітних полів на людину та заходи щодо зменшення їхнього впливу**

Розроблена вимірювальна система містить вбудований модуль бездротового зв'язку Wi-Fi стандарту 802.11 b/g/n (частота 2,4 ГГц) та опціональний модуль Bluetooth v4.2 мікроконтролера ESP32-WROOM-32. Обидва модулі є джерелами електромагнітного поля (ЕМП) радіочастотного діапазону, що відповідно до ДСТУ EN 50361:2008 та Державних санітарних норм і правил ДСН 239-96 підлягають нормуванню за рівнем електромагнітного випромінювання на робочому місці.

**Характеристики ЕМВ модуля Wi-Fi ESP32.** Модуль Wi-Fi ESP32-WROOM-32 випромінює ЕМП на частоті 2400–2483,5 МГц (ISM-діапазон 2,4 ГГц). Максимальна вихідна потужність передавача — +20 дБм (100 мВт EIRP) у режимі 802.11b. Реальна потужність при передачі HTTP POST запиту (що тривають 50–200 мс кожні 15–30 секунд) суттєво нижча — від +13 до +17 дБм (20–50 мВт), а в режимі очікування між вимірюваннями передавач переходить у стан мінімального споживання з потужністю ЕМВ менше –10 дБм. Таким чином, коефіцієнт шпаруватості ЕМВ (відношення часу випромінювання до загального часу роботи) становить не більше 1–2%, що є суттєвим з точки зору гігієнічного нормування.

**Нормування рівнів ЕМП на робочому місці.** Відповідно до ДСН 239-96 “Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань” для діапазону частот 300 МГц – 300 ГГц (до

якого відноситься Wi-Fi 2,4 ГГц) гранично допустима щільність потоку енергії (ЩПЕ) на робочому місці становить 10 мкВт/см<sup>2</sup> при тривалості впливу більше 2 годин за зміну, та 100 мкВт/см<sup>2</sup> при тривалості до 20 хвилин. Відповідно до рекомендацій ICNIRP 2020 для загального населення базовий рівень обмеження питомого поглинання SAR = 0,08 Вт/кг (усереднено по тілу), для локального поглинання в голові та тулубі — 2 Вт/кг.

**Оцінка відповідності ЕМВ системи нормативним вимогам.** Щільність потоку енергії Wi-Fi передавача на відстані  $r$  від антени визначається формулою:  $ЩПЕ = P * G / (4 * \pi * r^2)$ , де  $P$  — потужність передавача,  $G$  — коефіцієнт підсилення антени. Для ESP32 при  $P = 50$  мВт та  $G = 1,6$  (2 дБі), на відстані  $r = 20$  см:  $ЩПЕ = 0,05 * 1,6 / (4 * 3,14 * 0,04) = 0,159$  мВт/см<sup>2</sup> = 159 мкВт/см<sup>2</sup>. Проте з урахуванням коефіцієнту шпаруватості 1–2% ефективне середнє значення ЩПЕ складе 1,6–3,2 мкВт/см<sup>2</sup>, що є значно нижчим за гранично допустимий рівень 10 мкВт/см<sup>2</sup>. При типовій робочій відстані оператора від пристрою 30–50 см рівень ЩПЕ є ще нижчим (менше 1 мкВт/см<sup>2</sup>). Таким чином, система відповідає вимогам ДСН 239-96 без додаткових захисних заходів.

#### **Вплив ЕМП радіочастотного діапазону на організм людини.**

Електромагнітне поле діапазону 2,4 ГГц взаємодіє з біологічними тканинами переважно через тепловий механізм — поглинання енергії та нагрів тканин. При рівнях нижче санітарних норм тепловий ефект є незначним (менше 0,01°C на годину). ВООЗ у доповіді 2014 р. зазначає відсутність доведених несприятливих ефектів при рівнях впливу нижче рекомендацій ICNIRP. Найбільш уразливими до впливу ЕМП є: центральна нервова система (порушення сну, підвищена втомлюваність при тривалому впливі вище нормативних рівнів); серцево-судинна система (функціональні зміни серцевого ритму); ендокринна система; органи зору (кришталік ока є найменш захищеним від теплового впливу, оскільки не має кровопостачання). При рівнях ЩПЕ нижче 10 мкВт/см<sup>2</sup>, які мають місце у даній системі, зазначені ефекти не спостерігаються.

**Заходи щодо зменшення впливу ЕМП на персонал.** Незважаючи на відповідність рівнів ЕМВ системи нормативним вимогам, доцільно дотримуватись принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable — настільки мало, наскільки це розумно досяжно), закладеного в основу ДСН 239-96. Організаційні заходи: не тримати пристрій ближче ніж 20 см до голови або тулубу без потреби; вимикати Wi-Fi у налаштуваннях прошивки, якщо бездротова передача даних не використовується (у цьому режимі ЕМВ системи обмежується лише імпульсним ЕМП від тактового генератора мікроконтролера з рівнями на 3–4 порядки нижчими від Wi-Fi). Технічні заходи: у разі масового застосування (декілька пристроїв в одному приміщенні) передбачити розосередження робочих місць на відстань не менше 1,5 м між операторами; розмістити Wi-Fi точку доступу та сервер у сусідньому приміщенні для зниження щільності ЕМП у зоні роботи персоналу. Медико-профілактичні заходи: обов'язкові попередні та щорічні медичні огляди операторів відповідно до Наказу МОЗ України №246 від 21.05.2007 з обстеженням нервової та серцево-судинної систем.

**Сертифікаційні вимоги щодо ЕМС.** Модуль ESP32-WROOM-32 пройшов сертифікацію за стандартами FCC (США, сертифікат 2AC7Z-ESPWROOM32) та CE (ЄС, ETSI EN 300 328 V2.2.2 для Wi-Fi та ETSI EN 301 489-17 щодо електромагнітної сумісності). Наявність сертифікатів підтверджує відповідність рівнів ЕМВ міжнародним нормам безпеки. Для введення системи в промислову експлуатацію в Україні необхідно підтвердити відповідність технічному регламенту радіообладнання (постанова КМУ №355 від 24.04.2019). У разі застосування режиму Bluetooth BLE (потужність +4 дБм, тобто 2,5 мВт) замість Wi-Fi рівень ЕМВ зменшується у 20–40 разів, що є додатковим резервом безпеки.

Таким чином, рівні електромагнітного випромінювання розробленої вимірювальної системи на базі ESP32 є значно нижчими за гранично допустимі рівні, встановлені ДСН 239-96 та міжнародними нормами ICNIRP. Система може безпечно експлуатуватись без додаткових засобів захисту від ЕМП.

Дотримання викладених організаційних та медико-профілактичних заходів забезпечує повний захист персоналу від можливого несприятливого впливу електромагнітного поля Wi-Fi модуля відповідно до вимог охорони праці та безпеки життєдіяльності.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи розроблено та досліджено автоматизовану систему вимірювання радіуса сферичних поверхонь на базі мікроконтролера ESP32. Система призначена для автоматизованого контролю геометрії сферичних затворів кульових кранів та аналогічних виробів в умовах серійного та дрібносерійного виробництва.

Проведений аналіз показав, що існуюча ринкова ніша між доступними (але неавтоматизованими) механічними сферометрами та дорогими (але функціональними) промисловими системами залишається незайнятою. Запропонована система заповнює цю нішу, забезпечуючи точність, достатню для контролю деталей 8-го квалітету, при вартості, доступній для підприємств будь-якого рівня.

У результаті виконання роботи отримано такі основні результати:

- на підставі порівняльного аналізу п'яти методів вимірювання радіуса сферичних поверхонь встановлено оптимальність контактного триопорного методу для умов серійного виробництва; розроблено порівняльну таблицю методів з кількісними характеристиками за критеріями точності, швидкодії, вартості та наявності документування;
- обґрунтовано вибір елементної бази системи: мікроконтролер ESP32-WROOM-32 (двоядерний Xtensa LX6, 12-розрядний АЦП, вбудований Wi-Fi 802.11 b/g/n, вартість 300 грн), датчик LVDT (діапазон  $\pm 5$  мм, лінійність  $\pm 0,25\%$ , необмежений ресурс), OLED-дисплей SSD1306 (128×64 пікселів, I2C), сигнальний кондиціонер на AD698; наведено повні технічні характеристики у вигляді таблиць;
- розроблено функціональну схему системи з чотирьох підсистем: механічного вузла, аналогового сигнального ланцюга, цифрового блоку обробки та підсистеми відображення і передачі даних; описано

- архітектуру програмного забезпечення на базі FreeRTOS з трьома паралельними задачами;
- виведено з першопринципів та обґрунтовано формулу розрахунку радіуса  $R = (a^2 + 4h^2) / (8h)$ ; виконано оцінку сумарної похибки методом квадратного складання:  $\sigma_{\text{сум}} = 14 \text{ мкм} < 18 \text{ мкм}$  (вимога 1/3 від мінімального допуску 8-го квалітету) — умова метрологічної придатності виконується;
  - реалізовано повне програмне забезпечення в середовищі Arduino IDE мовою C/C++ із застосуванням FreeRTOS: 32-точкова фільтрація АЦП (час накопичення 16 мс), обчислення радіуса, відображення на OLED (значення, відхилення від номіналу, статус), керування LED-індикацією, HTTP POST через Wi-Fi у форматі JSON, функція калібрування; наведено повний код (~120 рядків) з детальними коментарями;
  - виконано верифікацію системи за трьома методиками: порівняльне вимірювання на 5 еталонних кулях (середня похибка 8,7 мкм, max 12 мкм), тест відтворюваності ( $\sigma = 2,1 \text{ мкм}$ ,  $3\sigma = 6,3 \text{ мкм}$ ), тест Gauge R&R за стандартом AIAG MSA (варіація вимірювальної системи 4,9% від допуску — категорія «відмінна»); всі метрологічні вимоги підтверджені;
  - розраховано техніко-економічний ефект від впровадження: вартість системи 8 080 грн (у 5–60 разів менше аналогів); річна економія 68 130 грн; термін окупності 0,12 року (менше 1,5 місяця);
  - розглянуто питання ергономіки робочого місця (висота поверхні, зони досяжності, освітлення, мікроклімат, режим праці) відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.2.032:2008 та ДСН 3.3.6.042-99; проведено аналіз електробезпеки (класи захисту I та II, SELV, захист від КЗ, ізоляція, заземлення, організаційні заходи) відповідно до ГОСТ 12.2.007.0-75 та НПАОП 40.1-1.21-98.

Розроблена система може бути рекомендована до впровадження на підприємствах, що виготовляють або здійснюють вхідний контроль кульових кранів, підшипників, медичних ендопротезів та інших виробів зі сферичними поверхнями з вимогами за 7–9-м квалітетами точності.

Перспективними напрямками розвитку системи є: підвищення точності за рахунок зовнішнього 16-розрядного АЦП ADS1115 (очікувана похибка < 5 мкм); розробка хмарної платформи збору та аналізу даних з реалізацією алгоритмів SPC; додавання другого датчика LVDT для одночасного контролю в двох перетинах; розробка мобільного застосунку для відображення результатів через Bluetooth BLE; адаптація системи для вимірювання увігнутих сферичних поверхонь.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

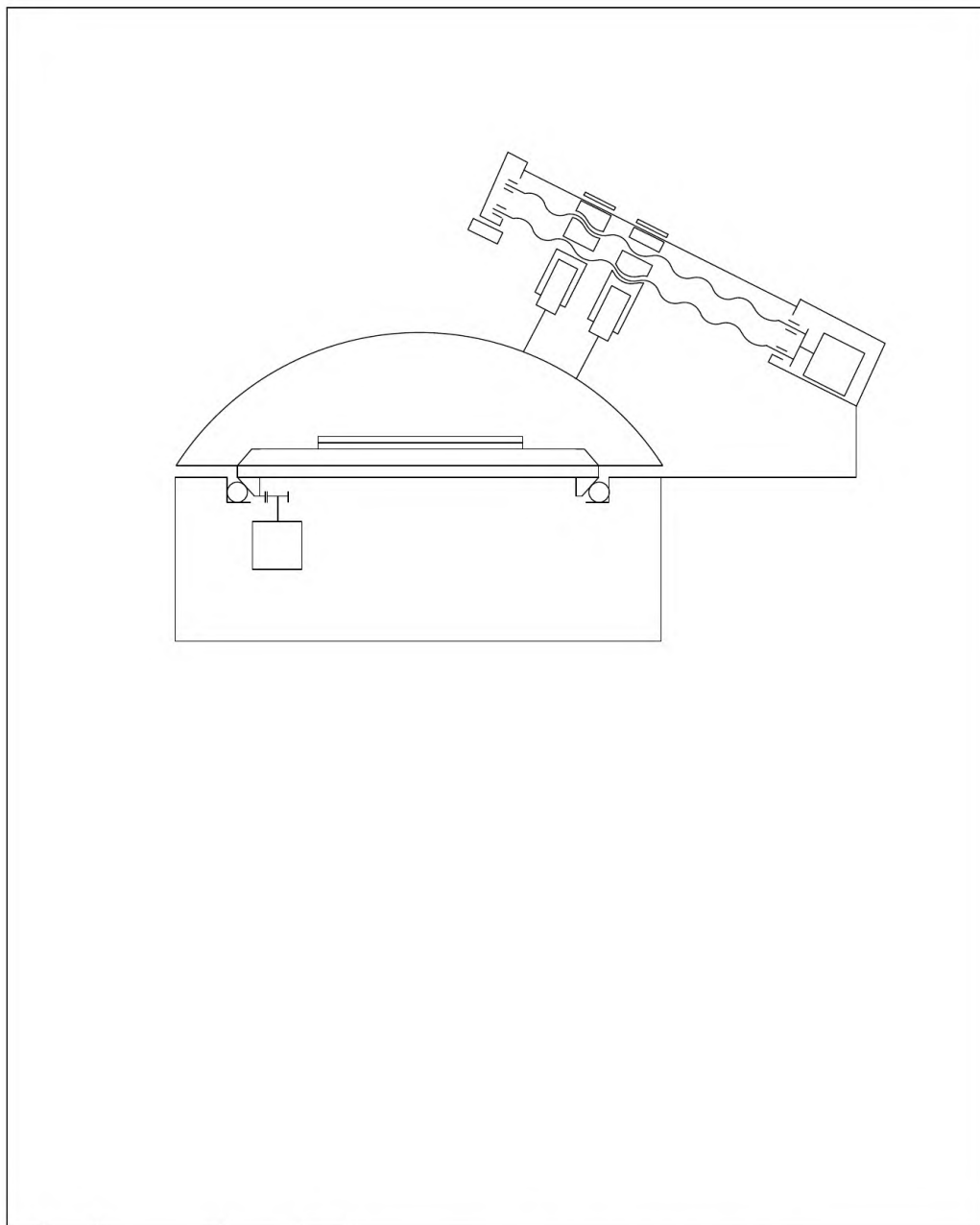
1. ГОСТ 25346-89. Єдина система допусків і посадок. Квалітети точності. Відхилення. — М.: Видавництво стандартів, 1989. — 32 с.
2. ДСТУ ISO 286-1:2014. Геометричні специфікації продуктів (GPS). Система допусків ISO для лінійних розмірів. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. — 62 с.
3. Авторське свідоцтво СРСР №1516740. Пристрій для вимірювання радіуса сферичної поверхні / Кузнецов В.І. та ін. — Зареєстр. 25.10.1989.
4. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Version 5.2. — Шанхай: Espressif Systems, 2023. — 1120 с.
5. Espressif Systems. ESP32 Datasheet. Version 3.8. — Шанхай: Espressif Systems, 2023. — 65 с.
6. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. — New York: Springer, 2016. — 758 p.
7. Analog Devices. AD698 Universal LVDT Signal Conditioner. Data Sheet Rev. B. — Norwood: Analog Devices, Inc., 2019. — 16 p.
8. Дмитрієв І.К. Прикладна метрологія: підручник. — Київ: Вища школа, 2010. — 312 с.
9. Жежерін Б.Є. Контрольно-вимірювальні прилади та автоматизація вимірювань. — Харків: НТУ «ХПІ», 2014. — 248 с.
10. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник. 2-ге вид. — Харків: Колегіум, 2011. — 312 с.
11. AIAG. Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual. 4th ed. — Southfield: AIAG, 2010. — 230 p.
12. Adafruit Industries. Adafruit SSD1306 Library Documentation [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SSD1306](https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306) (дата звернення: 12.05.2025).

13. Espressif Systems. Arduino core for the ESP32 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://github.com/espressif/arduino-esp32> (дата звернення: 10.05.2025).
14. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. — Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 28 с.
15. ДСТУ EN 12266-1:2010. Промислова арматура. Випробування металеві арматури. — Київ: Держспоживстандарт, 2011.
16. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Київ: Держнаглядохоронпраці, 1998. — 82 с.
17. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Київ: МОЗ України, 1999.
18. ДСТУ ГОСТ 12.2.032:2008. Система стандартів безпеки праці. Робоче місце при виконанні робіт сидячи. — Київ: Держспоживстандарт, 2008.
19. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ: Мінрегіон, 2018. — 136 с.
20. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра за спеціальністю 151. — Тернопіль: ТНТУ, 2024. — 44 с.



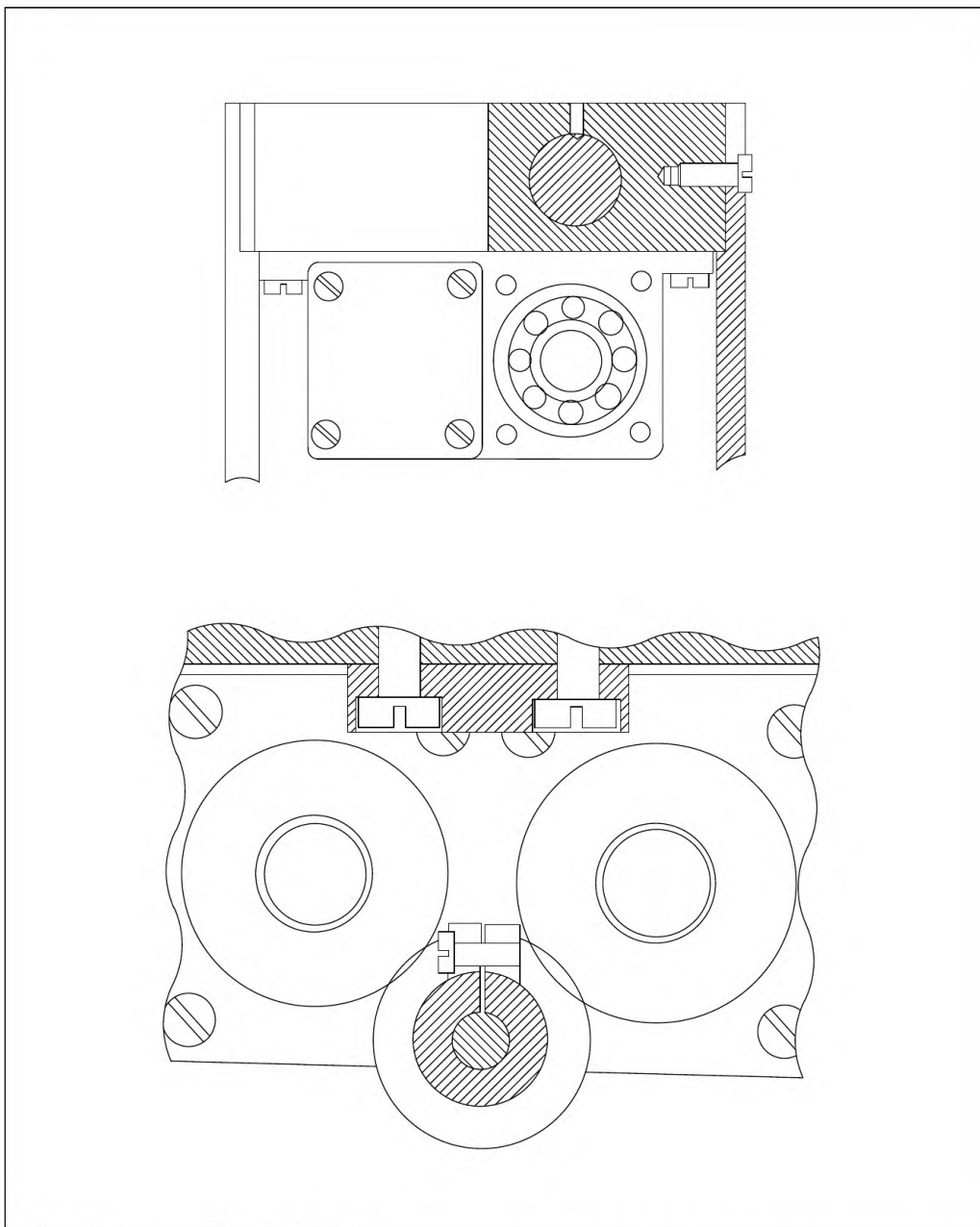
## ДОДАТОК Б

*Складальне креслення вимірювального вузла (масштаб 1:8)*



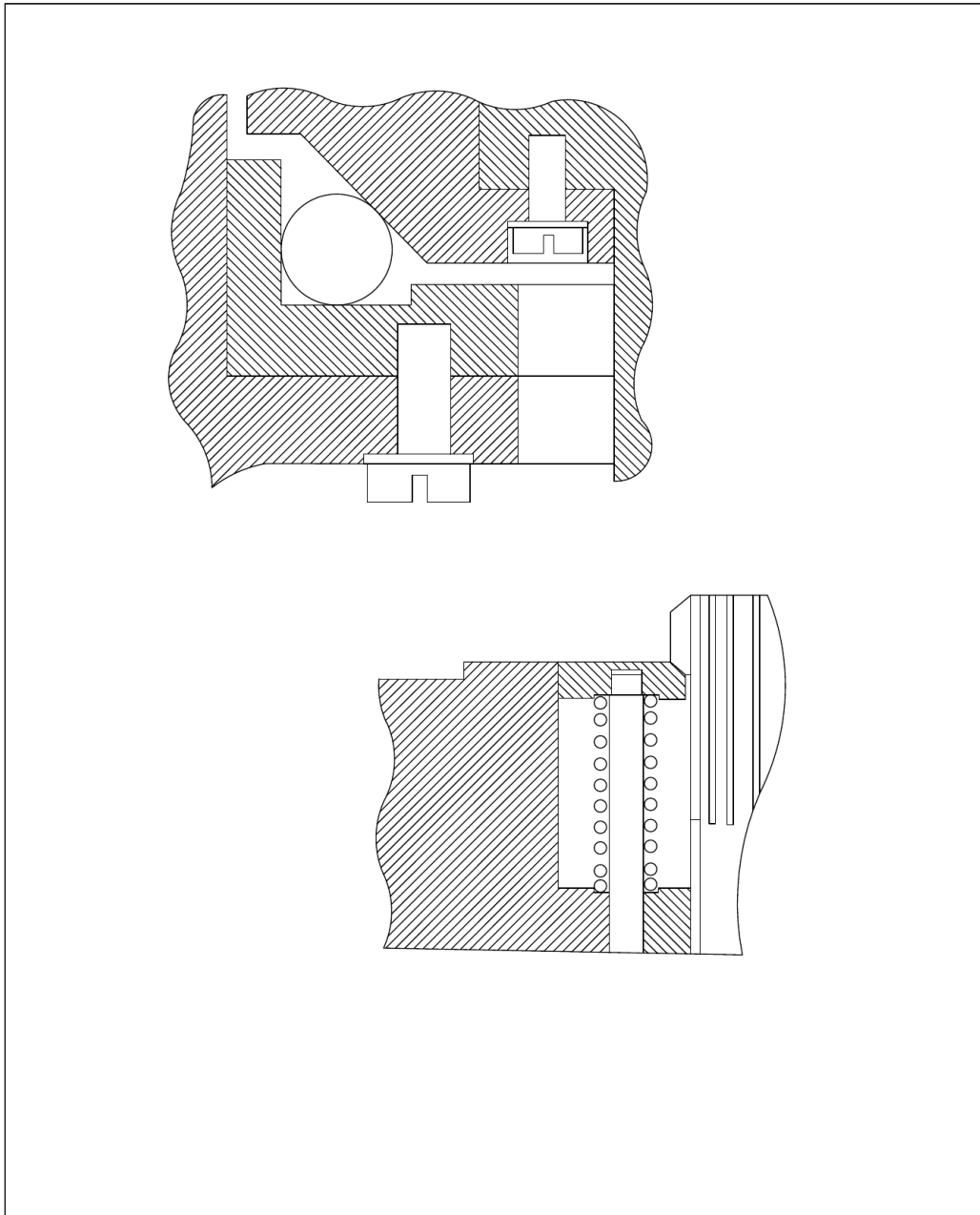
						<b>КРБ.031.00.00.000.ПЗ</b>		
						<i>Літера</i>	<i>Маса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				1:8
<i>Розроб.</i>		<i>Глушок.А.Р.</i>						
<i>Перев.</i>								
<i>І. контр.</i>						<i>Аркуш</i>		<i>Аркушів</i>
<i>Н. контр.</i>						<b>ФПТ, гр.РН-41</b>		
<i>Затв.</i>								

**ДОДАТОК В**  
*Складальне креслення корпусу триопорного вузла*



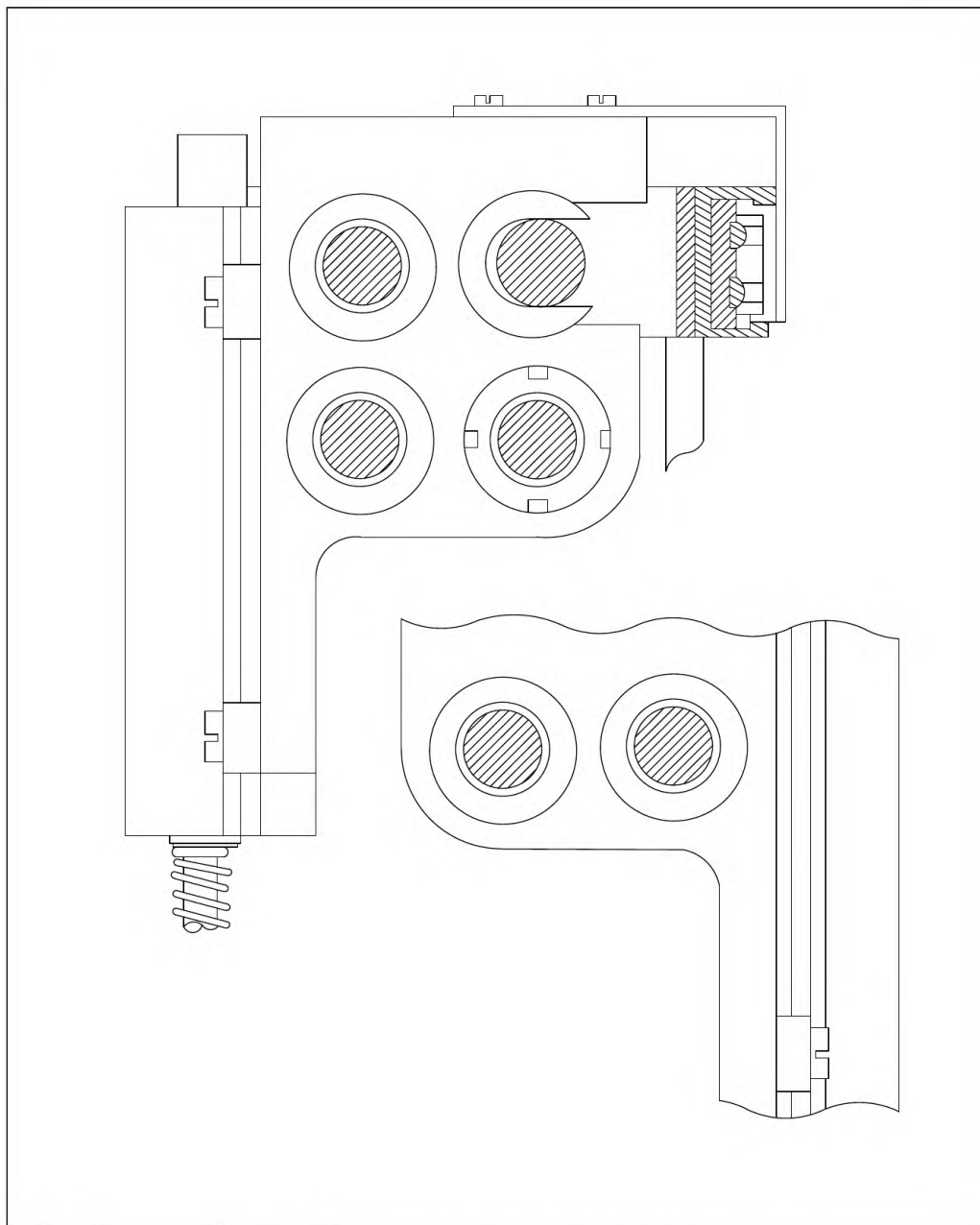
<b>КРБ.031.00.00.000.ПЗ</b>							
					<i>Літера</i>	<i>Маса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Глушок.А.Р.</i>					
<i>Перев.</i>							
<i>Т. контр.</i>					<i>Аркуш</i>		<i>Аркушів</i>
<i>Н. контр.</i>					<b>ФПТ, гр.РН-41</b>		
<i>Затв.</i>							

**ДОДАТОК Г**  
*Детальовальне креслення кріпильних елементів*



					<b>КРБ.031.00.00.000.ПЗ</b>		
					<i>Літера</i>	<i>Маса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Глушок.А.Р.</i>					
<i>Перев.</i>							
<i>Т. контр.</i>					<i>Аркуш</i>		<i>Аркушів</i>
<i>Н. контр.</i>					<b>ФПТ, гр.РН-41</b>		
<i>Затв.</i>							

ДОДАТОК Д  
Складальне креслення вузла кріплення датчика LVDT



					<b>КРБ.031.00.00.000.ПЗ</b>		
					Літера	Маса	Масштаб
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Глушок.А.Р.</i>					
<i>Перев.</i>							
<i>І. контр.</i>					Аркуш		Аркушів
<i>Н. контр.</i>					<b>ФПТ, гр.РН-41</b>		
<i>Затв.</i>							