

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Комп'ютерних наук та інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій та роботехніки

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС

Виконав: студент 4 курсу, групи 4-МІТт-23
напряму підготовки (спеціальності)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва напряму підготовки (професійна спрямованість), спеціальності)

Татарчук Є.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник Чернецький Є.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Фурса О.О.

(прізвище та ініціали)

Дніпро – 2026

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет, відділення КН та І, денне

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Освітній рівень бакалавр

Напрямок підготовки

(шифр і назва)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Левчук І.Л.

" ____ " _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

ТАТАРЧУК Євген Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС»

керівник роботи Євгеній ЧЕРНЕЦЬКИЙ, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 02.03. 2026 р. № 77- к

2. Строк подання студентом роботи 01.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, нормативна та довідкова література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): вступ; загальна частина; спеціальна частина; дослідна частина; економічний розділ; охорона праці; висновок; перелік літератури.

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	к.т.н. Чернецький Є.В.		
Охорона праці	к.т.н. Чернецький Є.В.		

7. Дата видачі завдання 02.03.2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна частина	15.03.2026	
2	Постановка задачі на дослідження	20.03.2026	
3	Дослідна частина	15.04.2026	
4	Економічний розділ	20.05.2026	
5	Охорона праці	30.05.2026	

Студент

_____ Татарчук Є.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Чернецький Є. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат.

Робота містить:

Листів: 138.

Таблиць: 18.

Рисунків: 20.

Листів графічної частини: 11 (презентація).

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, метрологічні характеристики, дистанційний контроль, калібрування, дрейф, контрольні карти Шухарта, самокалібрування, Industry 4.0, Internet of Things, метрологічна просліджуваність, невизначеність вимірювання, Raspberry Pi, машинне навчання, варіаційний автоенкодер.

Мета: розробка комплексної автоматизованої системи дистанційного контролю метрологічних характеристик IBC, яка забезпечує моніторинг, оцінку та прогнозування метрологічного стану вимірювальних каналів у режимі реального часу з можливістю віддаленого доступу.

					А 26.04.IBT.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Татарчук Є.М.			Розробка системи дистанційного контролю метрологічних характеристик IBC		
Перевір.		Чернецький Є.В.					
Реценз.		Фурса О.О.					
Н. Контр.							
Затверд.		Левчук І.Л.					
					Літ.	Арк.	Акрушив
						2	
					ННІ УДХТУ KIT та P, Гр. 4-MITm-23		

ЗМІСТ

Розділ	Стор.
ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Стан та перспективи розвитку ІВС у сучасному виробництві	10
1.1.1 Загальна характеристика ІВС та їх роль у сучасній промисловості	10
1.1.2 Еволюція архітектури ІВС	12
1.1.3 Класифікація ІВС за сферами застосування	14
1.2 Метрологічні характеристики ІВС та вимоги до їх контролю	15
1.2.1 Поняття метрологічних характеристик та їх значення для ІВС	15
1.2.2 Нормативна база та стандарти	16
1.2.3 Вимоги до контролю метрологічних характеристик ІВС	19
1.2.4 Проблеми традиційних підходів до контролю метрологічних характеристик ІВС	20
1.3 Існуючі методи та засоби контролю метрологічних характеристик ІВС	22
1.3.1 Загальна характеристика методів калібрування та повірки	22
1.3.2 Автоматизовані системи метрологічного контролю	23
1.3.3 Технології дистанційного моніторингу та калібрування	24
1.3.4 Порівняльний аналіз існуючих підходів	32
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ	37

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									3

Розділ**Стор.**

2.1 Математичні моделі метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС

37

2.1.1 Загальна математична модель вимірювального каналу

37

2.1.2 Моделі статичних похибок вимірювальних каналів

39

2.1.3 Моделі динамічних похибок вимірювальних каналів

40

2.1.4 Моделі дрейфу метрологічних характеристик у часі

43

2.2 Методи оцінювання метрологічної придатності ІВС

45

2.2.1 Статистичні методи контролю стабільності

46

2.3 Архітектурні підходи до побудови систем дистанційного контролю

50

2.3.1 Клієнт-серверна архітектура

50

2.3.2 Порівняльний аналіз та вибір архітектурного підходу

53

2.3.3 Вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик

55

2.4 Вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик

59

2.4.1 Загальні положення

59

2.4.2 Функціональні вимоги

59

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

64

3.1 Формування технічного завдання та визначення функціональної структури системи

64

3.1.1 Вимоги до системи дистанційного контролю

64

3.1.2 Визначення функціональної структури системи

66

3.2 Розробка структурної схеми системи

68

тап. и дата

Инв. №дубл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Инв. №подл.

Ізм

Лист

№ докум.

Підпис

Дата

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Лист

4

Розділ**Стор.**

6.1 Аналіз умов праці

123

6.1.1 Організація робочого місця

123

6.1.2 Мікроклімат виробничих приміщень

124

6.1.3 Освітлення робочих місць

125

6.1.4 Небезпека ураження електричним струмом

126

6.1.5 Шум та електромагнітні випромінювання

127

ВИСНОВКИ

129

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

135

тап. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				
Лист				
7				

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується широким впровадженням інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) у виробничі, енергетичні, металургійні, хімічні та інші технологічні процеси. ІВС є невід’ємною складовою систем автоматизації та управління якістю, оскільки саме вони забезпечують отримання об’єктивної інформації про значення контрольованих фізичних величин у реальному часі. Відповідно до вимог міжнародних стандартів серії ISO 9000, ISO 10012, ISO/IEC 17025 та національних стандартів ДСТУ ISO, метрологічна достовірність вимірювальної інформації є однією з ключових передумов забезпечення якості продукції, процесів і систем.

Проте в умовах сучасного виробництва, коли ІВС часто розташовані на значній відстані від метрологічних служб, традиційні підходи до періодичного калібрування та перевірки засобів вимірювань стикаються з низкою проблем: тривалістю простоїв обладнання, високими витратами на транспортування, неможливістю оперативного контролю метрологічного стану вимірювальних каналів у міжкалібрувальний інтервал, а також відсутністю централізованого моніторингу деградації метрологічних характеристик у часі. Особливо гостро ці проблеми проявляються на великих промислових підприємствах, де ІВС налічують сотні й тисячі вимірювальних каналів, розосереджених по значній території.

У цьому контексті розробка систем дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС набуває особливої актуальності. Застосування сучасних інформаційних технологій, протоколів передачі даних (MQTT, Modbus TCP, OPC UA), хмарних сервісів та методів інтелектуального аналізу даних дозволяє створити інструментарій для безперервного моніторингу метрологічного

тап. и дата						
Инв. №дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. №подл.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						8

стану вимірювальних систем, оперативного виявлення відхилень, прогнозування виходу характеристик за допустимі межі та формування обґрунтованих рішень щодо термінів калібрування. Це сприяє переходу від календарного принципу метрологічного обслуговування до принципу, що базується на фактичному стані засобів вимірювань, що відповідає концепції Industry 4.0 та цифрової трансформації промисловості.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				
Лист				
9				

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Стан та перспективи розвитку інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) у сучасному виробництві

1.1.1. Загальна характеристика ІВС та їх роль у сучасній промисловості

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) являють собою сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших технічних засобів, програмного забезпечення та відповідної метрологічної інфраструктури, призначених для отримання, перетворення, обробки, зберігання та подання інформації про значення вимірюваних фізичних величин. Згідно з ДСТУ 2681-94 та Міжнародним словником метрології VIM (JCGM 200:2012), ІВС є ключовим елементом системи забезпечення якості продукції, процесів та послуг, оскільки саме вони формують об'єктивну основу для прийняття управлінських рішень.

У сучасному виробництві ІВС виконують низку критично важливих функцій: контроль технологічних параметрів (температури, тиску, витрати, рівня, складу середовища), моніторинг стану обладнання (вібрація, знос, температура підшипників), забезпечення безпеки (виявлення витоків, перевищення допустимих концентрацій), а також збір даних для оптимізації виробничих процесів і реалізації концепцій цифрового виробництва.

За даними аналітичних агентств, світовий ринок промислових сенсорів у 2024 році оцінювався в 25,9 млрд USD і, за прогнозами, зросте до 57,1 млрд USD до 2035 року при середньорічному темпі зростання (CAGR) 7,45%.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Інв. № дубл.	тап. и дата	Інформації про значення вимірюваних фізичних величин. Згідно з ДСТУ 2081-94	
					та Міжнародним словником метрології VIM (JCGM 200:2012), ІВС є ключовим	
					елементом системи забезпечення якості продукції, процесів та послуг, оскільки	
					саме вони формують об'єктивну основу для прийняття управлінських рішень.	
Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Інв. № дубл.	тап. и дата	У сучасному виробництві ІВС виконують низку критично важливих	
					функцій: контроль технологічних параметрів (температури, тиску, витрати, рівня,	
					складу середовища), моніторинг стану обладнання (вібрація, знос, температура	
					підшипників), забезпечення безпеки (виявлення витоків, перевищення	
Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Інв. № дубл.	тап. и дата	допустимих концентрацій), а також збір даних для оптимізації виробничих	
					процесів і реалізації концепцій цифрового виробництва.	
					За даними аналітичних агентств, світовий ринок промислових сенсорів у	
					2024 році оцінювався в 25,9 млрд USD і, за прогнозами, зросте до 57,1 млрд USD	
Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Інв. № дубл.	тап. и дата	до 2035 року при середньорічному темпі зростання (CAGR) 7,45%.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Ли
						10

Це свідчить про стійкий попит на вимірювальне обладнання та його невід’ємну роль у промисловій інфраструктурі.

Ринок Industrial Internet of Things (IIoT) демонструє ще більш вражаючі темпи зростання: з 147,2 млрд USD у 2023 році до прогнозованих 391,8 млрд USD у 2028 році при CAGR 21,6%.

Це безпосередньо пов’язано з масовим впровадженням інтелектуальних сенсорів, бездротових технологій передачі даних та хмарних платформ аналітики у виробниче середовище.

Ринок технологій Industry 4.0, який охоплює весь спектр цифрової трансформації промисловості, включно з IBC, у 2025 році оцінювався в 190,6 млрд USD і, за прогнозами, досягне 1009,1 млрд USD до 2035 року при CAGR 18,13%.

Північна Америка займає найбільшу частку ринку (37%), проте Азійсько-Тихоокеанський регіон демонструє найвищі темпи зростання завдяки масштабним програмам цифровізації виробництва в Китаї, Індії та Південно-Східній Азії.

Регіональний розподіл ринку промислових сенсорів (рис. 1.1) свідчить про домінування Північної Америки (33,87%) та Азійсько-Тихоокеанського регіону (33,0%), тоді як частка Європи становить близько 22,0%. Це відображає концентрацію високотехнологічного виробництва та інвестицій у автоматизацію в цих регіонах.

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист
										11

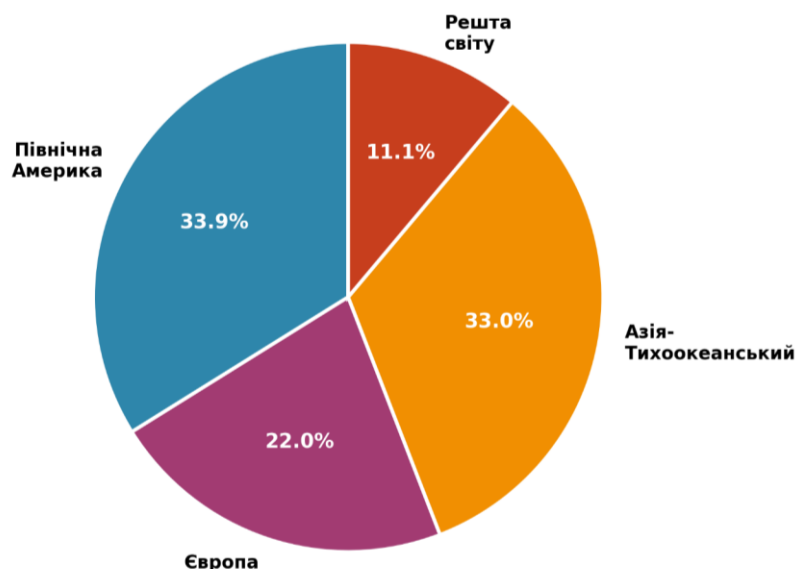


Рисунок 1.1 – Регіональний розподіл світового ринку промислових сенсорів

Кількість підключених IoT-пристроїв у світі продовжує стрімко зростати: з 11,3 млрд у 2020 році до 16,6 млрд у 2023 році та прогнозованих 18,8 млрд до кінця 2024 року.

При цьому 51% підприємств, що впроваджують IoT, планують збільшити свої бюджети на ці технології у 2024 році, незважаючи на макроекономічні виклики.

Ринок розумних фабрик (Smart Factory), який є ключовим елементом Industry 4.0, у 2025 році оцінювався в 132,08 млрд USD і, за прогнозами, досягне 272,0 млрд USD до 2032 року при CAGR 10,87%.

У 2024 році технології розумних фабрик досягли рівня проникнення понад 58% серед великих виробничих підприємств, особливо в автомобільній, електронній та промисловому обладнанні секторах.

1.1.2. Еволюція архітектури IBC

Розвиток IBC можна умовно поділити на три основні етапи (рис. 1.2).

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	кінця 2024 року.					
					При цьому 51% підприємств, що впроваджують IoT, планують збільшити свої бюджети на ці технології у 2024 році, незважаючи на макроекономічні виклики.					
					Ринок розумних фабрик (Smart Factory), який є ключовим елементом Industry 4.0, у 2025 році оцінювався в 132,08 млрд USD і, за прогнозами, досягне 272,0 млрд USD до 2032 року при CAGR 10,87%.					
					У 2024 році технології розумних фабрик досягли рівня проникнення понад 58% серед великих виробничих підприємств, особливо в автомобільній, електронній та промисловому обладнанні секторах.					
					1.1.2. Еволюція архітектури IBC					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Розвиток IBC можна умовно поділити на три основні етапи (рис. 1.2).					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист
										12

аналітики великих даних. Сучасні ІВС є складовою частиною кіберфізичних систем (CPS), інтегрованих у єдиний цифровий контур підприємства. Це дозволяє реалізувати концепції предиктивного обслуговування, цифрових двійників та автономного управління виробництвом.

1.1.3. Класифікація ІВС за сферами застосування

ІВС знайшли широке застосування практично у всіх галузях промисловості. Найбільш значущими сферами у промисловості є. Металургія. ІВС забезпечують контроль температурних режимів у доменних печах, складу металу, товщини прокату, параметрів прокатних станів. На металургійних підприємствах України (ПАТ “ЄВРАЗ Дніпровський металургійний завод”, ПАТ ІНТЕРПАЙП) ІВС є критично важливими для забезпечення якості продукції та енергоефективності.

Енергетика. Контроль параметрів турбін, генераторів, трансформаторів, параметрів електромереж (напруга, струм, частота, коефіцієнт потужності). Сучасні системи Smart Grid базуються на масовому розгортанні інтелектуальних вимірювальних приладів.

Хімія та нафтопереробка. Моніторинг складу реакційних сумішей, тиску в реакторах, температури, рівня рідин у резервуарах, витрати сировини та продуктів. Вимоги до безпеки та екологічності роблять ІВС невід’ємними в цій галузі.

Фармацевтика. Контроль параметрів чистих приміщень (температура, вологість, рівень часток), параметрів технологічних процесів виробництва ліків, відповідність вимогам GMP (Good Manufacturing Practice).

Автомобілебудування. Вимірювальні системи для контролю геометричних параметрів деталей, складу матеріалів, параметрів двигунів, систем допомоги водієві (ADAS).

Харчова промисловість. Контроль температурних режимів, рН, вологості, складу продуктів, відповідність стандартам HACCP.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 14
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку ІВС дозволяє зробити такі висновки:

Ринок ІВС та пов'язаних з ними технологій (IIoT, Industry 4.0, Smart Factory) демонструє стійке зростання з високими темпами (CAGR 7-21%), що свідчить про зростаючий попит на вимірювальні рішення у промисловості;

Сучасні ІВС еволюціонували від автономних аналогових приладів до інтелектуальних мережесистем, інтегрованих у єдиний цифровий контур підприємства;

Ключовими тенденціями розвитку є: мініатюризація, бездротовість, інтелектуалізація обробки даних, інтеграція з хмарними платформами, використання AI/ML та цифрових двійників;

Разом із розширенням можливостей ІВС зростає складність їх метрологічного забезпечення: збільшується кількість вимірювальних каналів, розширюється географія їх розміщення, ускладнюється архітектура систем, що створює виклики для традиційних підходів до калібрування та контролю метрологічних характеристик;

Це обумовлює актуальність розробки систем дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, які дозволять оперативно моніторити метрологічний стан великої кількості розосереджених вимірювальних каналів у режимі реального часу.

1.2. Метрологічні характеристики ІВС та вимоги до їх контролю

1.2.1. Поняття метрологічних характеристик та їх значення для ІВС

Метрологічні характеристики (МХ) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є технічними характеристиками, що впливають на результати та похибки вимірювань. Згідно з ISO 10012:2003, метрологічна характеристика (metrological characteristic) визначається як “відмінна риса, яка може впливати на результати

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	метрологічних характеристик;				
					Це обумовлює актуальність розробки систем дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, які дозволять оперативно моніторити метрологічний стан великої кількості розосереджених вимірювальних каналів у режимі реального часу.				
					1.2. Метрологічні характеристики ІВС та вимоги до їх контролю				
					1.2.1. Поняття метрологічних характеристик та їх значення для ІВС				
					Метрологічні характеристики (МХ) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є технічними характеристиками, що впливають на результати та похибки вимірювань. Згідно з ISO 10012:2003, метрологічна характеристика (metrological characteristic) визначається як “відмінна риса, яка може впливати на результати				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									15

вимірювання”. Засіб вимірювань зазвичай має кілька метрологічних характеристик, і саме ці характеристики можуть бути предметом калібрування.

Для інформаційно-вимірювальних систем метрологічні характеристики мають особливе значення, оскільки ІВС є складними багатокomпонентними системами, що включають первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори), аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), канали передачі даних, програмне забезпечення обробки та візуалізації. Кожен з цих компонентів вносить свій внесок у загальну похибку системи, і контроль метрологічних характеристик повинен охоплювати весь ланцюг вимірювання - від первинного перетворювача до кінцевого відображення результату.

За даними MoreSteam та NIST, система вимірювань може бути охарактеризована п'ятьма основними параметрами: стабільністю (stability), зсувом (bias/accuracy), лінійністю (linearity), повторюваністю (repeatability) та відтворюваністю (reproducibility). Ці характеристики поділяються на дві групи: ті, що впливають на середнє значення розподілу похибок (зсув, лінійність, стабільність), та ті, що впливають на стандартне відхилення (повторюваність, відтворюваність, роздільна здатність).

1.2.2. Нормативна база та стандарти

1.2.2.1. ISO 10012:2003 - Системи управління засобами вимірювань

ISO 10012:2003 “Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment” є ключовим міжнародним стандартом, що визначає вимоги до систем управління засобами вимірювань та процесами вимірювань. Стандарт призначений для використання організаціями як частини загальної системи управління якістю відповідно до вимог ISO 9001.

Метрологічне підтвердження (Metrological confirmation) - сукупність операцій, необхідних для забезпечення відповідності засобів вимірювань вимогам до їх призначеного використання. Метрологічне підтвердження зазвичай включає калібрування та верифікацію, будь-яке необхідне регулювання або ремонт,

Инов. №подл. Підп. і дата Взам. инв. № Инв. №дубл. тадп. и дата						Лист 16
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

подальше перекалібрування, порівняння з метрологічними вимогами до призначеного використання обладнання, а також будь-яке необхідне опломбування та маркування (рис. 1.3).

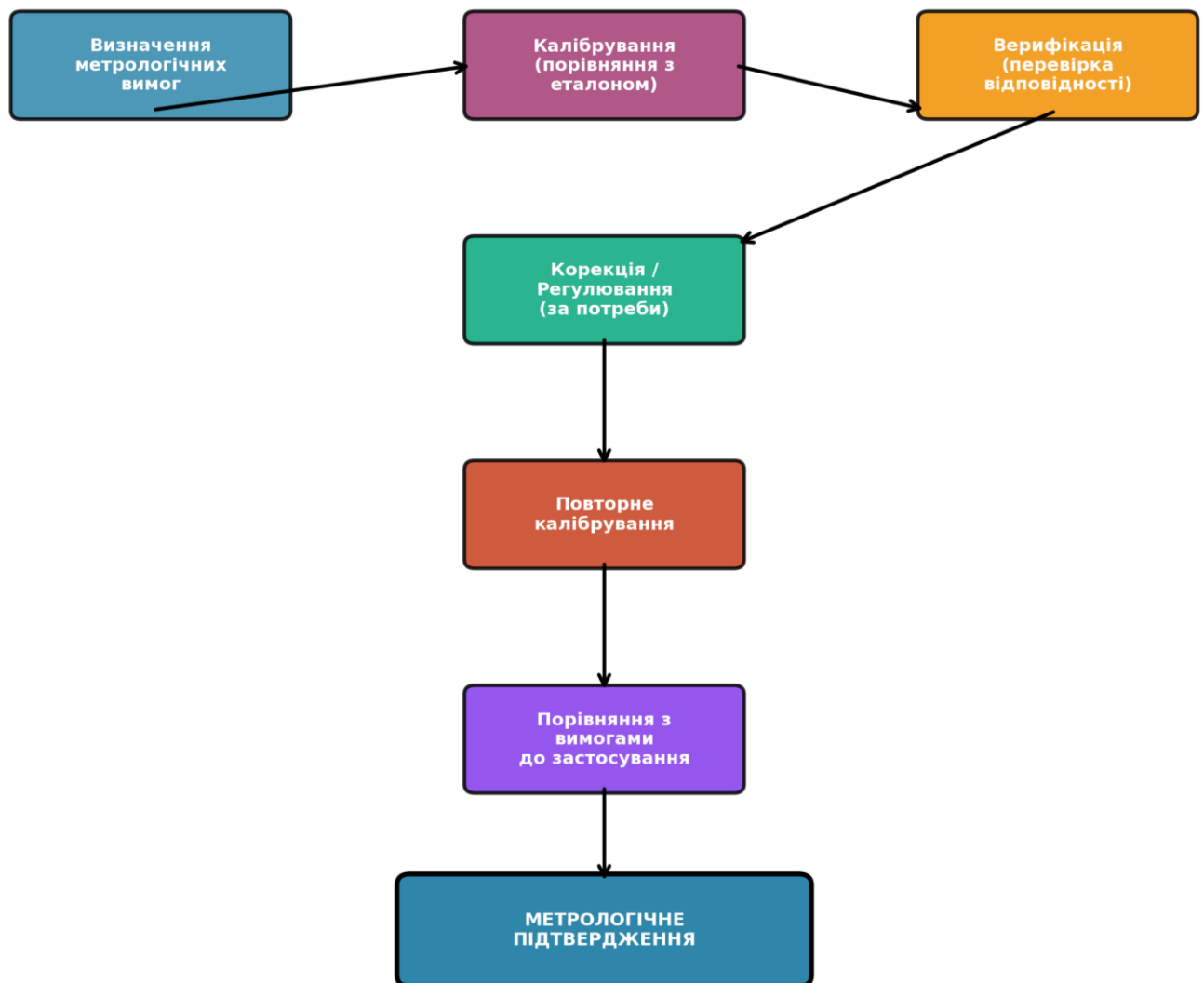


Рисунок 1.3 – Процес метрологічного підтвердження

Метрологічне підтвердження вважається завершеним лише тоді, коли придатність засобу вимірювань для призначеного використання буде продемонстрована та задокументована.

Метрологічні характеристики, які повинні бути придатними для призначеного використання, включають: - діапазон (range); - зсув (bias); - повторюваність (repeatability); - стабільність (stability); - гістерезис (hysteresis); - дрейф (drift); - вплив величин, що впливають (effects of influencing quantities); -

Инд. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.IBT.00. ПЗ				Лист 17

роздільна здатність (resolution); - розпізнання (discrimination/threshold); - похибка (error); - мертва зона (dead band).

Метрологічні характеристики засобів вимірювань є факторами, що сприяють невизначеності вимірювання, і дозволяють безпосереднє порівняння з метрологічними вимогами для встановлення метрологічного підтвердження.

Інтервали метрологічного підтвердження повинні бути задокументовані та переглядатися та коригуватися за необхідності.

Невідповідне обладнання - будь-який засіб вимірювань, що підозрюється або відомо, що він: був пошкоджений; був перевантажений; функціонує таким чином, що може зробити недійсним його призначене використання; дає неправильні результати вимірювань; перевищив встановлений інтервал метрологічного підтвердження; був неправильно оброблений; має пошкоджену або зламану пломбу; був підданий впливу величин, що можуть несприятливо вплинути на його призначене використання (наприклад, електромагнітне поле, пил), повинен бути вилучений з експлуатації шляхом ізоляції або позначений помітним маркуванням.

1.2.2.2. JCGM 100:2008 (GUM) - Керівництво з оцінювання невизначеності вимірювань

JCGM 100:2008 “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement” (скорочено GUM) є фундаментальним документом, підготовленим спільною робочою групою експертів від BIPM, IEC, ISO, IUPAC, IUPAP, IFCC та OIML. GUM встановлює загальні правила для оцінювання та вираження невизначеності вимірювань.

1.2.2.3. ISO/IEC 17025:2017 - Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

ISO/IEC 17025:2017 визначає загальні вимоги до компетентності, неупередженості та сталої діяльності лабораторій. Стандарт застосовується до всіх організацій, що проводять випробування, калібрування та відбір проб. Для ІВС цей стандарт є важливим, оскільки він регламентує вимоги до:

Инов. № подл. Підп. і дата Взам. инв. № Инв. № дубл. тап. и дата						Лист 18
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

компетентності персоналу; умов навколишнього середовища; методів вимірювань та їх валідації; метрологічної просліджуваності; оцінки невизначеності вимірювань; забезпечення якості результатів.

1.2.2.4. ДСТУ ISO 9001:2015 - Системи управління якістю

ДСТУ ISO 9001:2015 вимагає від організацій забезпечення придатності засобів моніторингу та вимірювань для цілей моніторингу та вимірювання, а також збереження документованої інформації як доказів придатності. Організації повинні: - визначити та впровадити процеси, необхідні для вимірювання та моніторингу; - забезпечити, щоб вимірювання були здійснені відповідно до вимірювальних вимог; - забезпечити, щоб вимірювальні прилади були калібровані або верифіковані за встановленими інтервалами або до їх використання.

1.2.3. Вимоги до контролю метрологічних характеристик ІВС

1.2.3.1. Загальні вимоги

Контроль метрологічних характеристик ІВС повинен забезпечувати:

Достовірність вимірювальної інформації - результати вимірювань повинні бути наближеними до істинних значень з відомою невизначеністю;

Метрологічну просліджуваність - результати вимірювань повинні бути просліджуваними до національних або міжнародних еталонів через безперервний ланцюг порівнянь;

Своєчасне виявлення відхилень - система контролю повинна дозволяти виявляти вихід метрологічних характеристик за допустимі межі до того, як це призведе до некоректних рішень;

Документованість - всі результати контролю, калібрування та верифікації повинні бути задокументовані та доступні для аналізу.

1.2.3.2. Вимоги до періодичності контролю

Періодичність контролю метрологічних характеристик ІВС визначається на основі: вимог нормативних документів та стандартів; рекомендацій виробника обладнання; аналізу історичних даних про стабільність характеристик;

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 19
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

виробництві можуть суттєво відрізнятися (температура, вібрація, електромагнітні перешкоди);

Втрата інформації про стан системи між калібруваннями - у міжкалібрувальний інтервал метрологічний стан ІВС може погіршитися (дрейф, пошкодження), але це залишається невиявленим до наступного калібрування;

Високі витрати на транспортування - демонтаж, транспортування та повторний монтаж обладнання для калібрування в лабораторії потребують значних витрат часу та ресурсів;

Простої обладнання - вилучення ІВС з виробничого процесу для калібрування призводить до простоїв та втрат виробництва;

Відсутність централізованого моніторингу - на великих підприємствах з сотнями вимірювальних каналів неможливо ефективно контролювати метрологічний стан кожного каналу традиційними методами;

Недостатність статичних інтервалів калібрування - фіксовані календарні інтервали не враховують фактичний стан обладнання та можуть бути або надмірно частими (зайві витрати), або недостатньо частими (ризик недостовірних вимірювань).

Ці проблеми обумовлюють необхідність розробки систем дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, які дозволяють: моніторити метрологічний стан у режимі реального часу; виявляти відхилення негайно після їх виникнення; зменшувати витрати на калібрування шляхом оптимізації інтервалів; забезпечувати централізований контроль великої кількості каналів; накопичувати дані для аналізу тенденцій та прогнозування деградації.

Відповідно до проведеного аналізу було отримано наступні висновки:

Метрологічні характеристики ІВС є комплексом параметрів (точність, правильність, лінійність, стабільність, дрейф, чутливість, роздільна здатність, повторюваність, відтворюваність, гістерезис), що визначають якість вимірювальної інформації;

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 21
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Контроль метрологічних характеристик регламентується міжнародними стандартами ISO 10012, ISO/IEC 17025, GUM (JCGM 100) та національними стандартами ДСТУ ISO;

Традиційні підходи до контролю, що базуються на періодичному лабораторному калібруванні, мають суттєві недоліки у контексті сучасних розподілених ІВС: неможливість контролю в реальних умовах, втрата інформації між калібруваннями, високі витрати, простої обладнання;

Це створює передумови для розробки автоматизованих систем дистанційного контролю метрологічних характеристик, які дозволять оперативно моніторити стан ІВС, виявляти відхилення у реальному часі та оптимізувати процеси метрологічного забезпечення.

1.3. Існуючі методи та засоби контролю метрологічних характеристик ІВС

1.3.1. Загальна характеристика методів калібрування та повірки

Контроль метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем здійснюється переважно шляхом калібрування або повірки. Згідно з ДМКН (Державний метрологічний контроль та нагляд), повірка - це встановлення органом державної метрологічної служби (або іншим офіційно уповноваженим органом, організацією) придатності засобів вимірювальної техніки до застосування, на підставі експериментально визначених метрологічних характеристик та підтвердження їх відповідності встановленим обов'язковим вимогам. Калібрування - сукупність операцій, що встановлюють співвідношення між значенням величини, отриманої за допомогою даного засобу вимірювань, і відповідним значенням величини, заданої за допомогою еталона, з метою визначення дійсних метрологічних характеристик цього ЗВТ.

Результати калібрування дозволяють визначати поправки та інші метрологічні характеристики ЗВТ. Незважаючи на поділ понять «повірка» та

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
A 26.04.IBT.00. ПЗ				
Лист 22				

«калібрування» (основним є законодавчий аспект), зміст робіт з калібрування дещо відрізняється від змісту робіт з повірки. Повірці підлягають ЗВТ, що регламентуються ДМКН, тоді як калібруванню можуть підлягати будь-які ЗВТ, включаючи ті, що не підпадають під сферу розповсюдження ДМКН.

Існуючі методи калібрування та повірки можна класифікувати за кількома ознаками: за місцем проведення (лабораторні та польові), за ступенем автоматизації (ручні, напівавтоматичні, автоматичні), за способом порівняння (метод зразкових приладів, метод зразкових мір, метод зразкових сигналів, метод порівняння), за охопленням компонентів (поелементна та комплектна повірка).

1.3.2. Автоматизовані системи метрологічного контролю

1.3.2.1. Загальна характеристика

Автоматизовані системи метрологічного контролю (АСМК) представляють собою програмно-апаратні комплекси, призначені для автоматизації процесів калібрування, повірки та контролю метрологічних характеристик ЗВТ. Розробка, стандартизація та апробація автоматизованих методів проведення процедур випробувань, поточного контролю та калібрування інформаційних вимірювальних систем є однією з ключових прикладних проблем метрологічного забезпечення ІВС.

Застосування засобів із програмним керуванням у процедурах випробувань метрологічних характеристик ІВС дозволяє: - підвищити продуктивність калібрувальних робіт; - зменшити вплив людського фактору; - забезпечити більш високу відтворюваність результатів; - автоматично документувати результати; - інтегрувати процес калібрування з системами управління якістю.

1.3.2.2. Програмне забезпечення для управління калібруванням

Сучасний ринок пропонує широкий спектр програмного забезпечення для управління калібруванням (Calibration Management Software):

GAGetrak - одне з найбільш відомих рішень, що використовується понад 35 років. Дозволяє управляти засобами вимірювань, моніторити заплановані та

тап. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. № подл.					
калібрування, повірки та контролю метрологічних характеристик ЗВІ. Розробка, стандартизація та апробація автоматизованих методів проведення процедур випробувань, поточного контролю та калібрування інформаційних вимірювальних систем є однією з ключових прикладних проблем метрологічного забезпечення ІВС. Застосування засобів із програмним керуванням у процедурах випробувань метрологічних характеристик ІВС дозволяє: - підвищити продуктивність калібрувальних робіт; - зменшити вплив людського фактору; - забезпечити більш високу відтворюваність результатів; - автоматично документувати результати; - інтегрувати процес калібрування з системами управління якістю. 1.3.2.2. Програмне забезпечення для управління калібруванням Сучасний ринок пропонує широкий спектр програмного забезпечення для управління калібруванням (Calibration Management Software): GAGetrak - одне з найбільш відомих рішень, що використовується понад 35 років. Дозволяє управляти засобами вимірювань, моніторити заплановані та									
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									23
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

позапланові калібрування, генерувати калібрувальні сертифікати та штрих-кодові етикетки, проводити аналіз Gage R&R (MSA 4-го видання). Має можливості IIoT та REST API для інтеграції з іншими системами.

MET/CAL (Fluke) - використовується Національними метрологічними інститутами та іншими відомими організаціями. Пропонує автоматизоване управління калібруванням, документацію та звітність.

Beamex CMX - хмарне рішення «все-в-одному» для управління калібруванням, що включає управління інструментами, керований процес калібрування, генерацію сертифікатів та аналіз.

ProCalV5 - комплексна система калібрування, що допомагає компаніям відповідати суворим стандартам та нормативам через автоматизоване калібрування та ефективний перехід до безпаперових робочих процесів.

SafetyCulture - мобільна платформа для інспекцій, що може використовуватися як програмне забезпечення для калібрування. Дозволяє збирати точні дані про активи в режимі реального часу, планувати калібрування обладнання, делегувати завдання персоналу.

Загальні переваги програмного забезпечення для управління калібруванням: - автоматичне планування та нагадування про калібрування; - цифрова документація та сертифікати; - аналітика та звітність; - відстеження історії обладнання; - інтеграція з ERP/MES системами.

Проте більшість існуючих рішень орієнтовані на традиційне лабораторне калібрування та не забезпечують дистанційний моніторинг метрологічних характеристик ІВС у реальному часі.

1.3.3. Технології дистанційного моніторингу та калібрування

1.3.3.1. Дистанційне калібрування з Edge Intelligence

Одним з перспективних напрямів є дистанційне калібрування з використанням Edge Intelligence. Традиційне калібрування потребує присутності експерта на місці та транспортування стандартного калібрувального обладнання

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата					
збирати точні дані про активи в режимі реального часу, планувати калібрування обладнання, делегувати завдання персоналу. Загальні переваги програмного забезпечення для управління калібруванням: - автоматичне планування та нагадування про калібрування; - цифрова документація та сертифікати; - аналітика та звітність; - відстеження історії обладнання; - інтеграція з ERP/MES системами. Проте більшість існуючих рішень орієнтовані на традиційне лабораторне калібрування та не забезпечують дистанційний моніторинг метрологічних характеристик IBC у реальному часі. 1.3.3. Технології дистанційного моніторингу та калібрування 1.3.3.1. Дистанційне калібрування з Edge Intelligence Одним з перспективних напрямів є дистанційне калібрування з використанням Edge Intelligence. Традиційне калібрування потребує присутності експерта на місці та транспортування стандартного калібрувального обладнання									
					А 26.04.IBT.00. ПЗ				Лист
									24
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

до об'єкта, що є неефективним та дорогим. Сучасні цифрові прилади та віртуальні інструменти мають комунікаційні інтерфейси, що дозволяє формувати системи дистанційного калібрування на основі реального обладнання та комп'ютерних блоків з можливістю мережевого з'єднання.

Архітектура системи дистанційного калібрування з Edge Intelligence (рис. 1.4) включає:

- рівень поля (Прилади, датчики): портативний еталон для калібрування; смарт-сенсори з функцією самокалібрування; вимірювальні прилади з комунікаційними інтерфейсами;
- edge рівень (Шлюз, обробка): бездротовий serial port модуль; Bluetooth комунікаційний модуль; модуль відеозйомки; модуль розпізнавання тексту (OCR на базі EAST + CRNN); модуль передачі повідомлень;
- мережевий рівень (Wi-Fi, 5G, LoRaWAN): протоколи XMPP, MQTT, REST API; шифрування даних; забезпечення надійності передачі;
- хмарний рівень (Сервер, БД, AI): база даних калібрувань; AI розпізнавання показань приладів; аналітика дрейфу та тенденцій; цифрові сертифікати калібрування;
- клієнтський рівень (Веб, мобільний додаток): Android клієнт для моніторингу; перегляд відеопотоку з лабораторії; управління процесом калібрування; сповіщення та звіти.

тап. и дата	
Инв. №дубл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата



Рисунок 1.4 – Архітектура системи дистанційного калібрування

Особливістю такої системи є використання штучного інтелекту для розпізнавання показань приладів, які не повертають дані через мережу. Міні-камера захоплює зображення приладів, потім застосовується детекція тексту на базі EAST та розпізнавання тексту на базі CRNN. Розпізнані дані передаються до бази даних центральної лабораторії в реальному часі через XMPP. Для забезпечення більш ефективного дистанційного калібрування використовуються камери для моніторингу калібрувальної лабораторії, а відео та зображення панелей приладів передаються на Android клієнт центральної лабораторії для перевірки правильності калібрування.

1.3.3.2. Самокалібрування та самодіагностика смарт-сенсорів

Смарт-сенсори (інтелектуальні датчики) оснащені вбудованими мікропроцесорами, що дозволяє їм виконувати функції самокалібрування та самодіагностики (рис. 1.5).

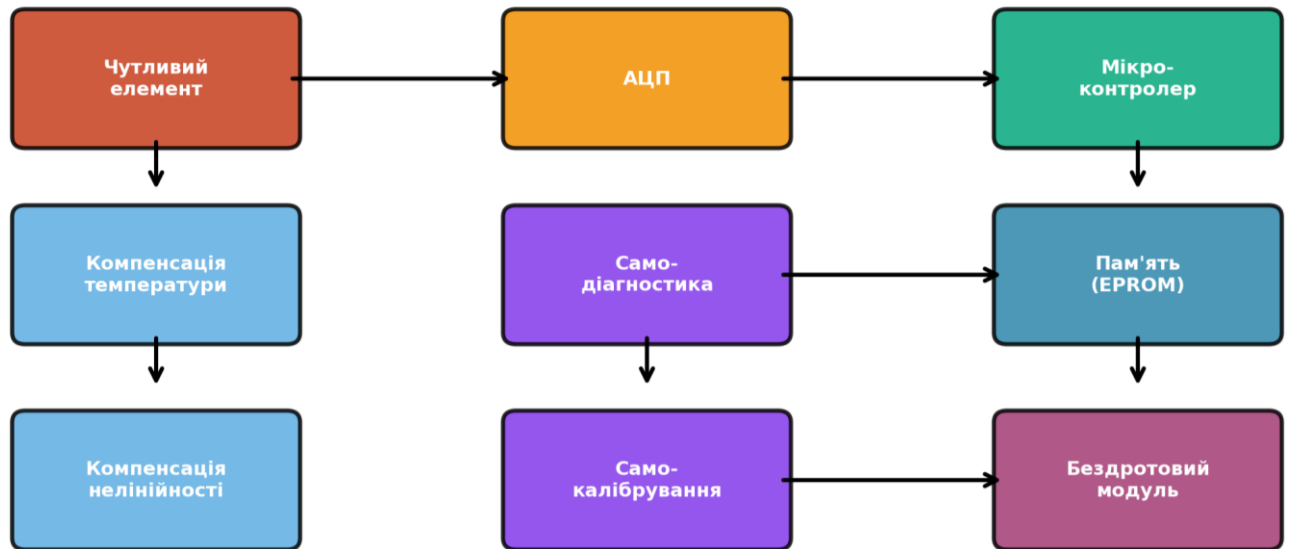


Рисунок 1.5 – Функціональна схема смарт-сенсора з самокалібруванням та самодіагностикою

Самокалібрування (Self-calibration) - налаштування параметрів сенсора, пов'язаних з виробництвом, таких як підсилення (gain), зсув (offset) або обидва. Самокалібрування може бути початковим налаштуванням підсилення або використовуватися для корекції відхилення вихідного сигналу сенсора від бажаного значення, коли вхід знаходиться на найнижчому рівні. Оскільки ці налаштування часто змінюються з часом, потрібне калібрування, що зазвичай потребує зняття та перекалібрування пристрою. Ці проблеми вирішує вбудований мікропроцесор смарт-сенсора, який має необхідні функції корекції, збережені в його пам'яті.

Самодіагностика (Self-diagnosis) - смарт-сенсори виконують самодіагностику, шукаючи ознаки помилок у внутрішніх сигналах. Для деяких сенсорів важко відрізнити типові відхилення вимірювань від помилок сенсора. Ця проблема вирішується шляхом обчислення мінімальних та максимальних значень

тап. и дата					
Инв. №дубл.					
Взам. инв. №					
Підп. і дата					
Инв. № подл.					
самодіагностикою					
Самокалібрування (Self-calibration) - налаштування параметрів сенсора, пов'язаних з виробництвом, таких як підсилення (gain), зсув (offset) або обидва. Самокалібрування може бути початковим налаштуванням підсилення або використовуватися для корекції відхилення вихідного сигналу сенсора від бажаного значення, коли вхід знаходиться на найнижчому рівні. Оскільки ці налаштування часто змінюються з часом, потрібне калібрування, що зазвичай потребує зняття та перекалібрування пристрою. Ці проблеми вирішує вбудований мікропроцесор смарт-сенсора, який має необхідні функції корекції, збережені в його пам'яті. Самодіагностика (Self-diagnosis) - смарт-сенсори виконують самодіагностику, шукаючи ознаки помилок у внутрішніх сигналах. Для деяких сенсорів важко відрізнити типові відхилення вимірювань від помилок сенсора. Ця проблема вирішується шляхом обчислення мінімальних та максимальних значень					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ
					Лист
					27

для вимірюваної величини та зберігання кількох вимірених значень поблизу точки налаштування. Вплив помилки сенсора на вимірювану величину оцінюється за допомогою методів невизначеності.

Компенсація впливу навколишнього середовища - обчислювальні можливості смарт-сенсора дозволяють компенсувати зміни навколишнього середовища, такі як температура, а також коригувати зміни зсуву та підсилення. Смарт-сенсор може обчислювати середнє, дисперсію та стандартне відхилення вимірювань.

Приклади самокалібрування MEMS: Дослідження показують, що упаковані та розгорнуті MEMS-пристрої з гребінчастими приводами можуть точно вимірювати власну масу, демпфування, жорсткість, зміщення та силу без необхідності заводського калібрування або зовнішніх еталонів. Метод точний, відтворюваний та надійний. Після точного калібрування MEMS-пристрій стає точним сенсором для калібрування інших пристроїв, таких як кантилевери для атомно-силової мікроскопії (AFM), біосенсорів, масових сенсорів, інерційних вимірювальних блоків (IMU) тощо.

Переваги самокалібрування для IoT: зниження вартості MEMS-пристроїв, оскільки дорогі витрати на заводське калібрування можуть бути зменшені або усунуті; значне розширення корисності сенсорів, оскільки пристрої зможуть перекалібровуватися після тривалого простою або після різких змін навколишнього середовища; покращення якості даних, що аналізуються, з точки зору підвищеної точності та зменшеної невизначеності; звуження розриву між експериментом та симуляцією для побудови експериментально точних прогнозних комп'ютерних моделей IoT-сенсорів.

1.3.3.3. Самодіагностика та самовідновлення (SDSH)

Національний метрологічний центр Сінгапуру (NMC) розробив підхід Self-Diagnosis and Self-Healing (SDSH) - дано-орієнтований підхід для забезпечення якості даних сенсорів у мережах IoT/IIoT.

Self-Diagnosis - автономний та вбудований моніторинг та діагностика стану сенсора за допомогою метрологічної лінійки, тобто невизначеності вимірювань сенсора.

Self-Healing - подальша автоматична компенсація помилкових показань, виявлених на основі метрологічних принципів.

SDSH мінімізує лабораторне калібрування, яке є трудомістким, переривчастим для операцій, дорогим та непридатним для застосувань IoT/IIoT через кількість задіяних сенсорів. Також підвищується стійкість IoT/IIoT, оскільки мінімізуються ресурси, необхідні для підтримки якості даних сенсорів та забезпечення довгострокової надійності даних.

Приклади застосування SDSH: розумні будівлі - контроль якості повітря в приміщенні, температури та вологості, енергометрів; моніторинг стану споруд - сенсори деформації, вібрації та акустичні сенсори для офшорних конструкцій, що працюють у суворих морських умовах; автономні транспортні засоби - діагностика та компенсація дрейфу сенсорів; сенсори якості води - моніторинг параметрів води в реальному часі.

1.3.3.4. Використання штучного інтелекту для виявлення дрейфу та калібрування

Штучний інтелект відкриває нові перспективи для автоматизації та підвищення ефективності процесів калібрування. Зокрема, запропоновано програмно-керовану систему виявлення дрейфу та калібрування на основі варіаційних автоенкодерів (VAE).

Метод використовує латентний розподіл генеративної моделі з вибірових спостережувальних даних, зібраних під час фази калібрування розгорнутих сенсорів. Варіаційний висновок у VAE використовується для апроксимації справжнього апостеріорного розподілу для виявлення дрейфу сенсорів, включаючи метрики, такі як дивергенція Кульбака-Лейблера (KL divergence). Додатково використовується втрата реконструкції для калібрування сенсорів.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 29
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ					

Експериментальні результати демонструють значне покращення порівняно з існуючими методами виявлення дрейфу та калібрування. Порівняння різних методів показує, що VAE-based soft calibration (VAE-SC) має найвищий коефіцієнт відновлення (recovery rate = 0,92) та найнижчу середньоквадратичну похибку (MSE = 0,11) порівняно з методами SVR-KF, SSP-KF, Dynamic Residual, Projection Blind Drift-DL та Self-Calibration.

Переваги використання нейронних мереж у калібруванні: здатність з високою точністю моделювати складні нелінійні залежності між показаннями приладів та еталонними значеннями; втоматизація процедур порівняння показань з еталонами та коригування похибок; можливість застосування в системах дистанційного моніторингу метрологічних характеристик обладнання; віддалене калібрування та контроль стану приладів.

1.3.3.5. Метрологія для IoT: рекомендації та найкращі практики

Данське агентство з вищої освіти та науки підтримало розробку рекомендацій щодо застосування метрології в IoT. Запропонований «інструментарій» охоплює різні сценарії використання та потреби і застосовний на різних етапах життєвого циклу IoT-продукту - від етапу проектування до експлуатації.

Основні інструменти та методи:

1. Просліджуване калібрування (Traceable Calibrations). Найбільш очевидний та надійний спосіб впровадження метрології в IoT-пристрої - застосування принципу метрологічної просліджуваності. Всі сенсорні пристрої калібруються перед відправкою клієнтам у процесі, що пов'язує їх вимірювання з заявленим еталоном (зазвичай національним або міжнародним стандартом) через безперервний ланцюг порівнянь із зазначеними невизначеностями.

Альтернативні моделі: IoT-постачальник може отримати акредитацію для власної внутрішньої лабораторії та співробітників і калібрувати власні пристрої внутрішньо; можна застосовувати практики, типові для промисловості з контрольно-вимірювальними приладами: лише кілька приладів періодично

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 30
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ					

відправляються до акредитованої лабораторії для калібрування, а потім використовуються як робочі еталони для калібрування інших приладів на виробничому майданчику.

2. Цифрові калібрувальні сертифікати (Digital Calibration Certificates).
Перехід від паперових до цифрових калібрувальних сертифікатів дозволяє автоматизувати обробку даних калібрування, інтегрувати їх у системи управління якістю та забезпечувати швидкий доступ до історії калібрувань.

3. Польове / in-situ калібрування (Field or In-Situ Calibration). Калібрування безпосередньо на місці експлуатації дозволяє враховувати реальні умови використання сенсорів. Це особливо важливо для IoT-пристроїв, оскільки умови в полі можуть суттєво відрізнятися від лабораторних.

4. Безперервна самовалідація (Continuous Self-Validation). Одним зі способів реалізації цієї стратегії є застосування надмірності (redundancy). Пристрій може мати два (або більше) сенсори однакової або різної технології, що вимірюють одну й ту ж величину. Пристрій може моніторити різницю між показаннями двох сенсорів та виявляти, коли показання розходяться більше ніж на нормальний діапазон.

Ця стратегія може бути розширена до рівня сенсорної мережі, де можуть застосовуватися концепції програмних сенсорних моделей або віртуальних сенсорів. Дані вимірювань кількох надмірних та корельованих сенсорів можуть використовуватися для розробки моделей, які можуть визначати, коли сенсор у цій мережі дрейфує надмірно за межі бажаного діапазону.

5. Моніторинг умов експлуатації (Monitoring of Operating Conditions). Збір вторинних даних від сенсора (інформація про умови навколишнього середовища під час роботи сенсора, власна температура сенсора або ефект самонагріву, споживання енергії сенсора) може допомогти власникам пристроїв зрозуміти, чи є ознаки того, що сенсор може розвинути високий дрейф.

6. Цифрові двійники та симуляції (Digital Twins and Simulations). Технологія цифрових двійників може використовуватися для прогнозування

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата						Лист 31
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.IBT.00. ПЗ					

поведінки пристрою за різних зовнішніх умов. Цифровий двійник може бути підданий різним відомим джерелам помилок та шуму, і тоді можна спостерігати, наскільки змінюється точність сенсора за цих умов. Таким чином, політика калібрування може змінитися від запланованої до умовно-орієнтованої або навіть предиктивної.

7. Ризик-орієнтовані стратегії калібрування (Risk-Based Calibration Strategies). Розробка методів та процесів, що використовують реальні дані, зібрані від сенсорів, для визначення оптимальних інтервалів калібрування на основі кількох параметрів, таких як ризик та економіка. Такі стратегії можуть бути реалізовані шляхом збору вторинних даних від сенсора та аналізу цих даних для розуміння, чи є ознаки потенційного високого дрейфу.

1.3.4. Порівняльний аналіз існуючих підходів

1.3.4.1. Традиційні vs сучасні підходи

На рис. 1.6 наведено порівняння традиційних та сучасних підходів до метрологічного контролю ІВС.

тап. и дата	
Инв. №дубл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

- ризик-орієнтовані інтервали;
- автоматичний збір даних;
- цифрові сертифікати та бази даних;
- централізований моніторинг;
- in-situ / дистанційне калібрування;
- мінімальні або відсутні прості;
- постійний моніторинг у реальному часі.

Ключові відмінності:

- реактивний підхід -> проактивний підхід;
- календарне планування -> умовно-орієнтоване планування;
- локальні дані -> централізовані хмарні дані;
- обмежена аналітика -> AI/ML аналітика та прогнозування.

1.3.4.2. SWOT-аналіз існуючих підходів

SWOT-аналіз (рис. 1.7) дозволяє систематизувати сильні та слабкі сторони, можливості та загрози існуючих підходів до метрологічного контролю ІВС.

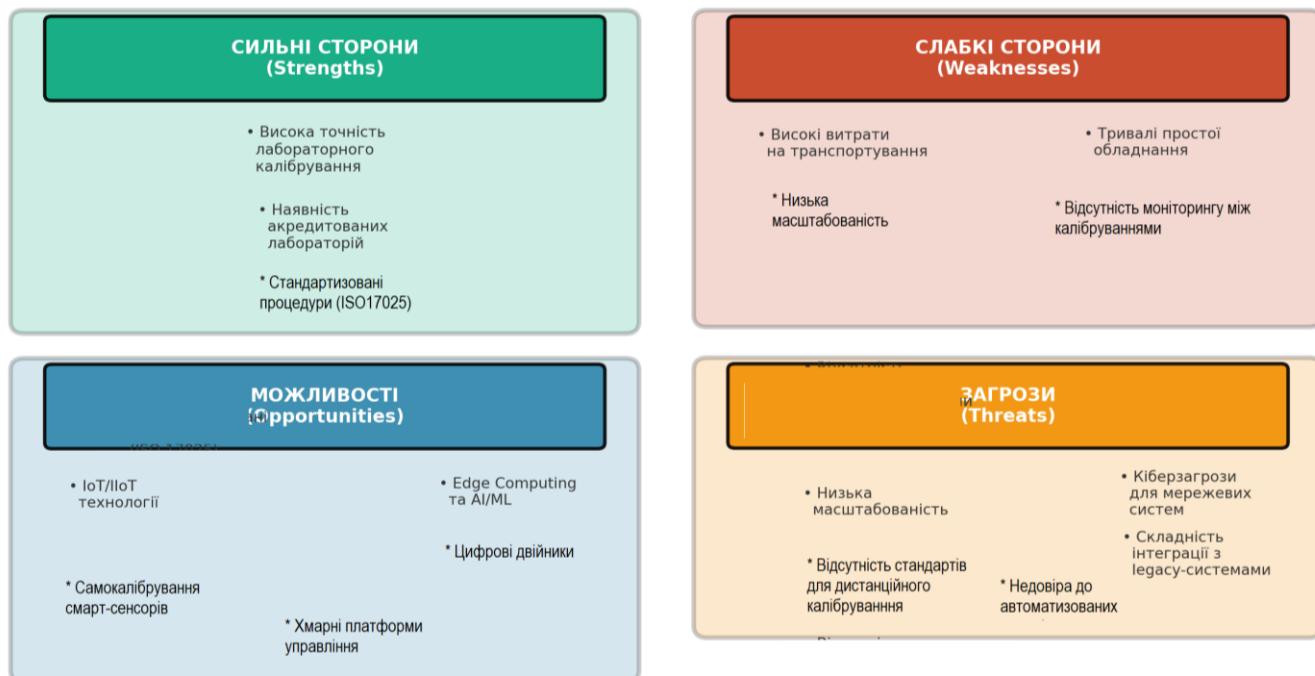


Рисунок 1.7 – SWOT-аналіз існуючих підходів до метрологічного контролю ІВС

тап. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. № подл.	можливості та загрози існуючих підходів до метрологічного контролю ІВС.				
					СИЛЬНІ СТОРОНИ (Strengths) - Висока точність лабораторного калібрування - Наявність акредитованих лабораторій - Стандартизовані процедури (ISO17025) СЛАБКІ СТОРОНИ (Weaknesses) - Високі витрати на транспортування - Низька масштабованість - Тривалі простої обладнання - Відсутність моніторингу між калібруваннями МОЖЛИВОСТІ (Opportunities) - IoT/IIoT технології - Edge Computing та AI/ML - Цифрові двійники - Хмарні платформи управління - Самокалібрування смарт-сенсорів ЗАГРОЗИ (Threats) - Низька масштабованість - Відсутність стандартів для дистанційного калібрування - Киберзагрози для мережевих систем - Складність інтеграції з legacy-системами - Недовіра до автоматизованих				
					Рисунок 1.7 – SWOT-аналіз існуючих підходів до метрологічного контролю ІВС				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист 34

Сильні сторони (Strengths): висока точність лабораторного калібрування; наявність акредитованих лабораторій з міжнародним визнанням; стандартизовані процедури (ISO 17025, ISO 10012); довга історія використання та накопичений досвід.

Слабкі сторони (Weaknesses): високі витрати на транспортування обладнання; тривалі прості обладнання; відсутність моніторингу метрологічного стану між калібруваннями; низька масштабованість для великих розподілених систем; залежність від людського фактору.

Можливості (Opportunities): розвиток IoT/IIoT технологій; Edge Computing та AI/ML; цифрові двійники для моделювання та прогнозування; самокалібрування смарт-сенсорів; хмарні платформи управління калібруванням; цифрові калібрувальні сертифікати; ризик-орієнтовані стратегії калібрування.

Загрози (Threats): кіберзагрози для мережевих систем калібрування; складність інтеграції з legacy-системами; відсутність міжнародних стандартів для дистанційного калібрування; недовіра до автоматизованих методів серед традиційних метрологів; високі початкові витрати на впровадження нових технологій.

В результаті аналізу було отримано наступні висновки:

Існуючі методи контролю метрологічних характеристик ІВС включають лабораторні методи (метод зразкових приладів, метод зразкових мір, метод зразкових сигналів), польові методи (in-situ калібрування, портативні еталони), а також спеціалізовані методи для ВК ІВС («наскрізний», розрахунково-експериментальний, поелементний, комплектний);

Автоматизовані системи метрологічного контролю (GAGetrak, MET/CAL, Beatech CMX, ProCalV5) підвищують ефективність калібрувальних процесів, але переважно орієнтовані на традиційне лабораторне калібрування та не забезпечують дистанційний моніторинг у реальному часі;

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист 35

Сучасні технології дистанційного моніторингу та калібрування (Edge Intelligence, самокалібрування смарт-сенсорів, SDSH, AI/ML для виявлення дрейфу, цифрові двійники, ризик-орієнтовані стратегії) відкривають нові можливості для метрологічного контролю ІВС, проте ще не набули широкого поширення в промисловості;

SWOT-аналіз показує, що основними слабкостями існуючих підходів є високі витрати, прості обладнання, відсутність моніторингу між калібруваннями та низька масштабованість, тоді як ключовими можливостями є розвиток IoT, Edge Computing, AI/ML та цифрових двійників;

Це створює передумови для розробки інтегрованої системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, яка поєднувала б переваги традиційних методів (висока точність, просліджуваність) з можливостями сучасних технологій (автоматизація, дистанційний доступ, аналітика, прогнозування).

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						36

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

2.1 Математичні моделі метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС

Вимірювальний канал інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) є складною динамічною системою, яка піддається впливу багатьох факторів, що призводять до відхилень вихідного сигналу від істинного значення вимірюваної величини. Для ефективного дистанційного контролю метрологічних характеристик необхідно мати адекватні математичні моделі, які дозволяють описувати, аналізувати та прогнозувати поведінку вимірювальних каналів у різних умовах експлуатації.

Метрологічні характеристики вимірювальних каналів ІВС поділяються на статичні та динамічні. Статичні характеристики описують зв'язок між вхідною та вихідною величинами в установленому режимі роботи, тоді як динамічні характеристики відображають поведінку системи при зміні вхідного сигналу в часі. Додатково, важливим аспектом є моделювання дрейфу метрологічних характеристик у часі, що обумовлено процесами старіння компонентів, впливом навколишнього середовища та іншими факторами.

2.1.1 Загальна математична модель вимірювального каналу

Вимірювальний канал ІВС можна представити як послідовне з'єднання функціональних елементів: вимірювального перетворювача (сенсора), підсилювача та нормалізатора сигналу, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та блоку цифрової обробки даних. Кожен з цих елементів вносить власну складову похибки в результуючий вимірювальний сигнал.

Загальна математична модель вимірювального каналу може бути записана у вигляді:

$$Y(t) = K \cdot X(t) + \sum \Delta_i(t) + \varepsilon(t) + D(t)$$

де $Y(t)$ - вихідний сигнал вимірювального каналу; $X(t)$ - вхідна вимірювана величина; K - коефіцієнт передачі каналу; $\Delta_i(t)$ - систематичні похибки i -го елемента каналу; $\varepsilon(t)$ - випадкова похибка; $D(t)$ - дрейф метрологічних характеристик у часі.

На рисунку 2.1 наведено блок-схему загальної математичної моделі вимірювального каналу ІВС, яка відображає основні функціональні елементи та джерела похибок.

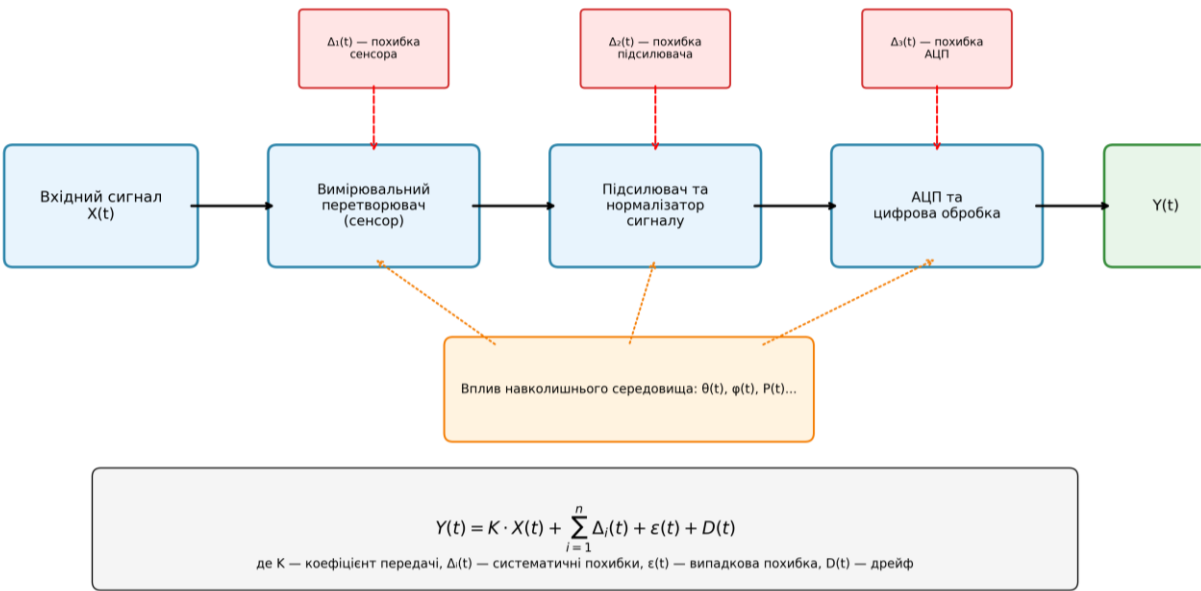


Рисунок 2.1 – Загальна математична модель каналу ІВС

Як видно з представленої блок-схеми, вимірювальний канал складається з чотирьох основних рівнів: рівня вимірювальних пристроїв (сенсорів), рівня первинної обробки сигналу (підсилювач та нормалізатор), рівня оцифрування (АЦП та цифрова обробка) та рівня вихідного сигналу. Кожен рівень піддається впливу власних систематичних похибок $\Delta_1(t)$, $\Delta_2(t)$, $\Delta_3(t)$, а також зовнішніх факторів навколишнього середовища: температури $\theta(t)$, вологості $\phi(t)$, тиску $P(t)$ тощо.

2.1.2 Моделі статичних похибок вимірювальних каналів

Статичні похибки визначаються як відхилення результатів вимірювання від істинного значення вимірюваної величини в установленому (статичному) режимі роботи. Вони не залежать від швидкості зміни вхідного сигналу і характеризують точність вимірювального каналу в стаціонарних умовах.

Математична модель статичних похибок вимірювального каналу в загальному вигляді записується як:

$$Y = (K_0 + \Delta K) \cdot X + \Delta_0 + f_{nl}(X) + h(X, dX/dt)$$

де K_0 - номінальний коефіцієнт передачі; ΔK - відхилення коефіцієнта передачі (мультиплікативна похибка); Δ_0 - адитивна похибка (зсув нуля); $f_{nl}(X)$ - функція нелінійності; $h(X, dX/dt)$ - функція гістерезису.

У лінеаризованій формі модель статичних похибок спрощується до вигляду:

$$Y = K_0 \cdot X + \Delta K \cdot X + \Delta_0 + \varepsilon$$

де ε - сукупна похибка нелінійності та гістерезису.

На рисунку 2.2 представлено блок-схему моделі статичних похибок вимірювального каналу, яка демонструє взаємозв'язок між різними типами похибок та їх вплив на вихідний сигнал.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист 39

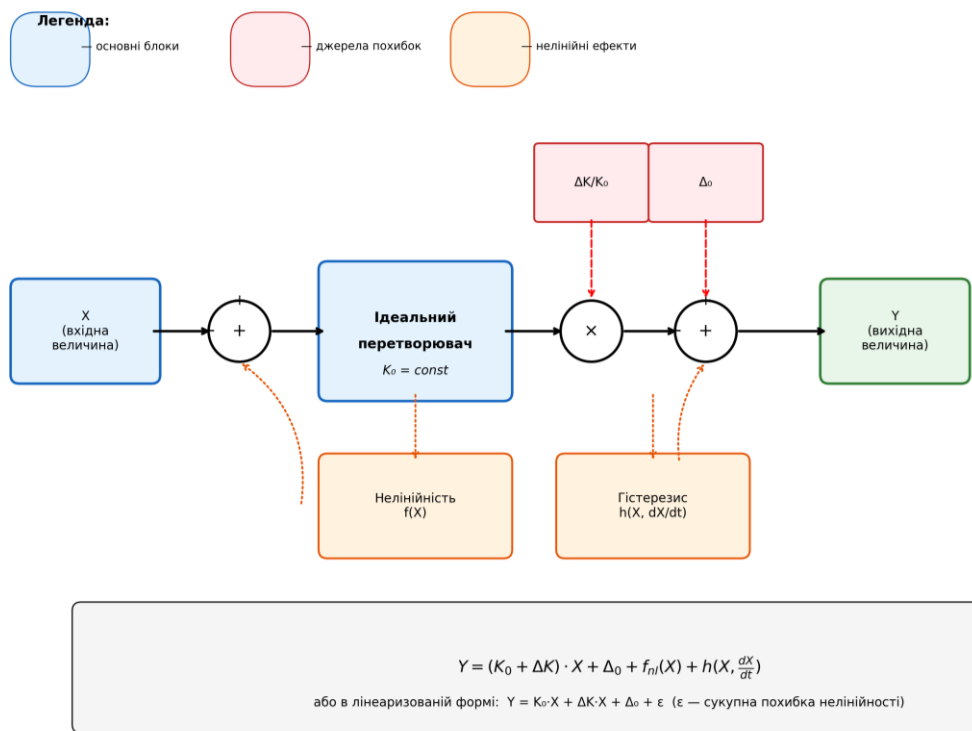


Рисунок 2.2 – Блок-схема моделі статичних похибок вимірювального каналу

Блок-схема (рис. 2.2) ілюструє, що вхідна величина X спочатку проходить через ідеальний перетворювач з номінальним коефіцієнтом передачі $K_0 = \text{const}$. Далі до сигналу додаються мультиплікативна похибка $\Delta K/K_0$ (впливає на коефіцієнт передачі) та адитивна похибка Δ_0 (додається до вихідного сигналу). Додатково враховуються нелінійні ефекти: нелінійність $f(X)$ та гістерезис $h(X, dX/dt)$, які залежать від поточного значення вхідної величини та напрямку її зміни.

2.1.3 Моделі динамічних похибок вимірювальних каналів

Динамічні похибки виникають при вимірюванні швидкозмінних процесів і обумовлені інерційністю вимірювального каналу. Вони характеризують здатність каналу відтворювати зміни вхідної величини в часі та визначаються різницею між реальною та ідеальною динамічною характеристиками системи.

тап. и дата	
Взам. инв. №	Инв. №дубл.
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Для аналізу динамічних похибок використовуються методи теорії автоматичного керування, зокрема перетворення Лапласа та передавальні функції. Передавальна функція вимірювального каналу визначається як відношення зображення вихідного сигналу до зображення вхідного сигналу в операторній області комплексної змінної $s = \sigma + j\omega$:

$$W(s) = Y(s) / X(s)$$

Для більшості вимірювальних каналів ІВС динамічні властивості можуть бути описані з достатньою точністю аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією:

$$W_0(s) = K_0 / (\tau s + 1)$$

де τ - постійна часу каналу, яка характеризує його інерційність.

Для каналів з коливальними властивостями використовується модель коливальної ланки другого порядку:

$$W(s) = K_0 \omega_0^2 / (s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2)$$

де ω_0 - власна частота коливань; ξ - коефіцієнт затухання (при $\xi < 1$ система має коливальний характер перехідного процесу, при $\xi \geq 1$ - аперіодичний).

Динамічна похибка визначається як різниця між реальним та ідеальним вихідними сигналами:

$$\delta_d(t) = L^{-1}\{[W(s) - W_0(s)] \cdot X(s)\} = L^{-1}\{\Delta W(s) \cdot X(s)\}$$

де L^{-1} - оператор оберненого перетворення Лапласа; $\Delta W(s) = W(s) - W_0(s)$ - передавальна функція динамічної похибки.

На рисунку 2.3 наведено блок-схему моделі динамічних похибок вимірювального каналу.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата						Лист 41
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

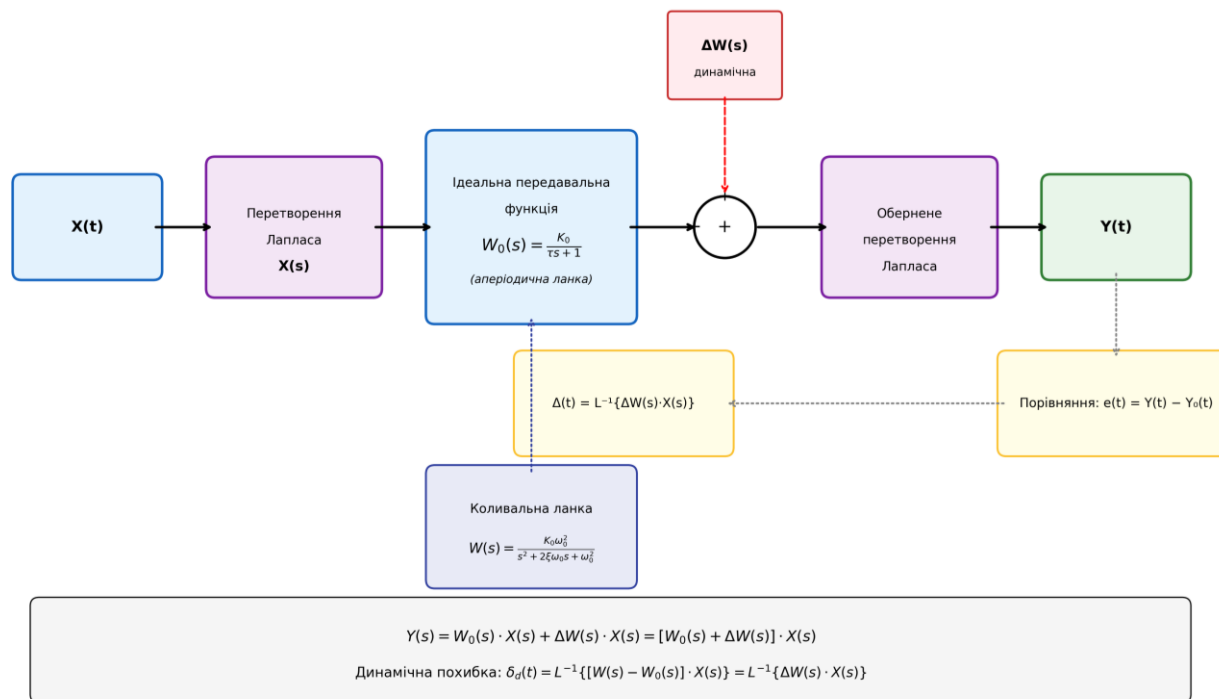


Рисунок 2.3 – Блок-схема динамічних похибок вимірювального каналу

Представлена блок-схема демонструє, що аналіз динамічних похибок здійснюється в операторній області за допомогою перетворення Лапласа. Вхідний сигнал $X(t)$ перетворюється в $X(s)$, далі проходить через ідеальну передавальну функцію $W_0(s)$ (аперіодична ланка). До результату додається динамічна похибка $\Delta W(s)$. Після зворотного перетворення Лапласа отримується вихідний сигнал $Y(t)$. Для оцінки динамічної похибки здійснюється порівняння реального вихідного сигналу з ідеальним $Y_0(t)$, а динамічна похибка обчислюється як $\Delta(t) = L^{-1}\{\Delta W(s) \cdot X(s)\}$.

Важливим параметром для оцінки динамічних властивостей є час запізнення t_0 , який характеризує затримку між моментом зміни вхідного сигналу та початком відгуку вихідного сигналу. Для систем з цифровою обробкою час запізнення включає час дискретизації, час обчислення та час передачі даних по мережі.

тап. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				
					Лист 42				

2.1.4 Моделі дрейфу метрологічних характеристик у часі

Дрейф метрологічних характеристик - це повільна зміна метрологічних параметрів вимірювального каналу під впливом процесів старіння компонентів, зміни умов навколишнього середовища та інших факторів. На відміну від статичних та динамічних похибок, дрейф є функцією часу і може призводити до поступової втрати метрологічної придатності вимірювального каналу.

Дрейф метрологічних характеристик можна класифікувати за такими типами:

1) детермінований тренд - монотонна зміна метрологічних характеристик у часі, яка описується поліноміальною або експоненціальною функцією. Наприклад, лінійний тренд має вигляд:

$$D_t(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_n \cdot t^n$$

де $a_0, a_1, \dots, a_n$ - коефіцієнти тренду, які визначаються методом найменших квадратів за результатами періодичних перевірок;

2) сезонні коливання - періодичні зміни метрологічних характеристик, пов'язані з циклічними змінами умов навколишнього середовища (добові, сезонні коливання температури, вологості). Модель сезонних коливань:

$$D_s(t) = \sum [A_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t + \varphi_k)]$$

де A_k - амплітуда k -ї гармоніки; ω_k - кутова частота; φ_k - початкова фаза;

3) випадковий дрейф - стохастична складова, яка описується випадковим процесом. Для моделювання випадкового дрейфу часто використовується модель авторегресії-ковзного середнього (ARIMA) або модель на основі броунівського руху:

$$D_r(t) = \sigma \cdot W(t)$$

де σ - інтенсивність випадкового дрейфу; $W(t)$ - вінерівський процес (броунівський рух);

4) ступінчасті зміни - раптові зміни метрологічних характеристик, пов'язані з механічними пошкодженнями, заміною компонентів, програмними збоями. Модель ступінчастих змін:

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	пов'язані з циклічними змінами умов навколишнього середовища (добові, сезонні коливання температури, вологості). Модель сезонних коливань:					
					$D_s(t) = \Sigma[A_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t + \phi_k)]$					
					де A_k - амплітуда k -ї гармоніки; ω_k - кутова частота; ϕ_k - початкова фаза;					
					3) випадковий дрейф - стохастична складова, яка описується випадковим процесом. Для моделювання випадкового дрейфу часто використовується модель авторегресії-ковзного середнього (ARIMA) або модель на основі броунівського руху:					
Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	$D_r(t) = \sigma \cdot W(t)$					
					де σ - інтенсивність випадкового дрейфу; $W(t)$ - вінерівський процес (броунівський рух);					
					4) ступінчасті зміни - раптові зміни метрологічних характеристик, пов'язані з механічними пошкодженнями, заміною компонентів, програмними збоями. Модель ступінчастих змін:					
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										43
					Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

D_j(t) = \Sigma[\Delta D_j \cdot H(t - t_j)]

де ΔD_j - величина j-ї ступінчастої зміни; t_j - момент часу зміни; H(t) - функція Хевісайда.

Загальна модель дрейфу метрологічних характеристик є сумою всіх складових:

D(t) = D_t(t) + D_s(t) + D_r(t) + \Sigma[D_j(t) \cdot H(t - t_j)]

Вимірний вихідний сигнал з урахуванням дрейфу та вимірювального шуму:

Y_m(t) = Y_0(t) + D(t) + n(t)

де Y_0(t) - ідеальний вихідний сигнал; n(t) - випадковий вимірювальний шум.

На рисунку 2.4 представлено блок-схему моделі дрейфу метрологічних характеристик у часі, яка відображає взаємозв'язок між різними складовими дрейфу та зовнішніми факторами.

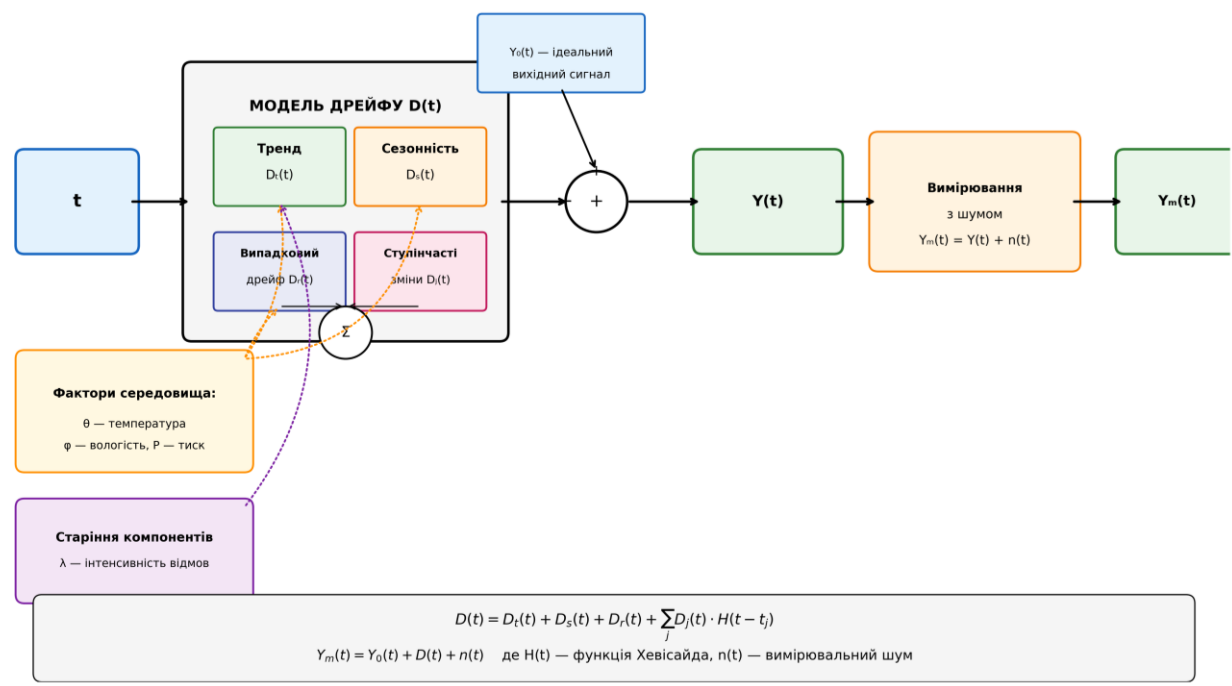


Рисунок 2.4 – Блок-схема моделі дрейфу метрологічних характеристик ІВС

Блок-схема (рис. 2.4) демонструє, що дрейф D(t) формується під впливом двох основних груп факторів: факторів навколишнього середовища (температура θ , вологість ϕ , тиск P) та процесів старіння компонентів (інтенсивність відмов λ).

Дрейф складається з чотирьох компонент: тренду $D_t(t)$, сезонності $D_s(t)$, випадкового дрейфу $D_r(t)$ та ступінчастих змін $D_j(t)$. Результируючий дрейф додається до ідеального вихідного сигналу $Y_0(t)$, після чого виміряний сигнал $Y_m(t)$ піддається впливу випадкового шуму $n(t)$.

2.2 Методи оцінювання метрологічної придатності ІВС

Оцінювання метрологічної придатності інформаційно-вимірювальних систем є ключовим етапом забезпечення достовірності вимірювальної інформації. Метрологічна придатність визначається як стан вимірювального каналу, за якого його метрологічні характеристики відповідають встановленим вимогам. Для системи дистанційного контролю необхідно використовувати комплекс методів, що дозволяють оцінювати придатність у реальному часі, прогнозувати зміну метрологічного стану та своєчасно формувати сповіщення про вихід за допустимі межі.

У даному розділі розглядаються три групи методів оцінювання метрологічної придатності ІВС: статистичні методи контролю стабільності, критерії виходу за допустимі межі та методи прогнозування метрологічного стану. На рисунку 2.5 наведено узагальнену блок-схему методів оцінювання метрологічної придатності ІВС.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										45

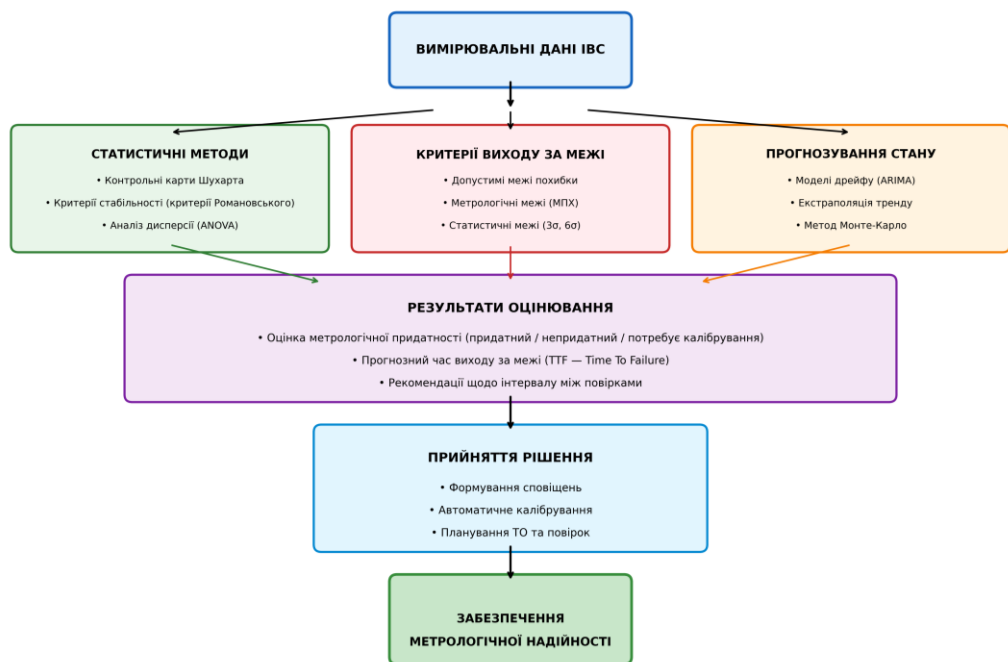


Рисунок 2.5 – Блок-схема методів оцінювання метрологічної придатності ІВС

Представлена блок-схема демонструє, що процес оцінювання метрологічної придатності ІВС починається зі збору вимірювальних даних і включає три паралельні напрямки обробки: статистичний контроль стабільності, перевірку критеріїв виходу за межі та прогнозування метрологічного стану. Результати цих трьох напрямків інтегруються для прийняття рішення щодо метрологічної придатності та формування відповідних сповіщень.

2.2.1 Статистичні методи контролю стабільності

Статистичні методи контролю стабільності базуються на аналізі часових рядів результатів вимірювань з метою виявлення тенденцій, що свідчать про порушення стабільності метрологічних характеристик вимірювального каналу. Основними інструментами є контрольні карти Шухарта, критерії стабільності Романовського та аналіз дисперсії.

Контрольні карти Шухарта є класичним інструментом статистичного управління процесами (SPC - Statistical Process Control) і широко застосовуються для моніторингу стабільності вимірювальних процесів. Принцип роботи

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									46

контрольних карт полягає у відображенні значень контрольованої статистики (середнього, розмаху, стандартного відхилення) у часі з нанесенням контрольних меж.

Для побудови контрольної карти середніх ($\bar{X}$ -карти) використовуються такі формули контрольних меж:

верхня контрольна межа (UCL): $UCL = \bar{X}_0 + A_2 \cdot \bar{R}$

центральна лінія (CL): $CL = \bar{X}_0$

нижня контрольна межа (LCL): $LCL = \bar{X}_0 - A_2 \cdot \bar{R}$

де $\bar{X}_0$ - номінальне (еталонне) середнє значення; $\bar{R}$ - середній розмах вибірок; A_2 - коефіцієнт, що залежить від обсягу вибірки (для $n = 5$, $A_2 = 0.577$).

Для контрольної карти розмахів (R-карти) контрольні межі розраховуються як:

$$UCL = D_4 \cdot \bar{R}, \quad CL = \bar{R}, \quad LCL = D_3 \cdot \bar{R}$$

де D_3 та D_4 - коефіцієнти, що залежать від обсягу вибірки (для $n = 5$: $D_3 = 0$, $D_4 = 2.114$).

На рисунку 2.6 наведено блок-схему алгоритму контролю стабільності за контрольними картами Шухарта.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 47
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

відхилень результатів вимірювань від еталонного значення. Основні критерії Романовського:

Критерій 1 (критерій максимального відхилення): перевіряється, чи не перевищує максимальне абсолютне відхилення допустиме значення:

$$|\Delta_{max}| = \max|X_i - X_0| \leq \Delta_{don}$$

Критерій 2 (критерій середнього відхилення): перевіряється середнє арифметичне модулів відхилень:

$$\Delta = (1/n) \cdot \sum|X_i - X_0| \leq \Delta_{don}$$

Критерій 3 (критерій систематичності): оцінює наявність систематичної складової похибки шляхом порівняння середнього арифметичного відхилень з нулем:

$$|\Delta_s| = |(1/n) \cdot \sum(X_i - X_0)| \leq \Delta_{sdon}$$

Коефіцієнт варіації V є важливим показником стабільності вимірювального процесу і розраховується як:

$$V = (\sigma / \bar{X}) \cdot 100\%$$

де σ - стандартне відхилення результатів вимірювань; $\bar{X}$ - середнє арифметичне значення. Значення $V < 1\%$ свідчить про високу стабільність процесу, $V = 1-5\%$ - про задовільну стабільність, $V > 5\%$ - про нестабільність, що потребує аналізу причин.

Аналіз дисперсії (ANOVA - Analysis of Variance) дозволяє оцінити внесок різних факторів (вимірювальний канал, оператор, умови середовища) у загальну дисперсію результатів вимірювань. Загальна сума квадратів відхилень розкладається на складові:

$$SS_{total} = SS_{between} + SS_{within}$$

де SS_{total} - загальна сума квадратів; $SS_{between}$ - сума квадратів між групами (факторна); SS_{within} - сума квадратів всередині груп (залишкова). На основі цього розкладу розраховується F-статистика для перевірки значущості впливу кожного фактора.

Инов. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	тап. и дата						Лист 49
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

- легкість масштабування серверної частини: вертикальне масштабування шляхом нарощування ресурсів сервера;

- єдиний інтерфейс для всіх клієнтів: веб-додаток доступний з будь-якого пристрою з браузером.

Недоліки клієнт-серверної архітектури:

- єдина точка відмови: вихід з ладу сервера призводить до повної зупинки системи;

- високе навантаження на сервер: при великій кількості вимірювальних каналів сервер може стати вузьким місцем;

- складність горизонтального масштабування: розподіл навантаження між кількома серверами вимагає додаткової інфраструктури;

- залежність від мережевого з'єднання: при втраті зв'язку з сервером клієнти втрачають доступ до даних.

2.3.2 Порівняльний аналіз та вибір архітектурного підходу

Для обґрунтованого вибору архітектурного підходу до побудови системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС необхідно провести порівняльний аналіз розглянутих архітектур за ключовими критеріями.

Основними критеріями порівняння є: масштабованість (здатність системи обробляти зростаючу кількість вимірювальних каналів), відмовостійкість (здатність продовжувати функціонування при відмовах окремих компонентів), складність розробки та розгортання, вартість впровадження та експлуатації, затримка обробки даних (latency).

Клієнт-серверна архітектура є оптимальним вибором для невеликих систем (до 50 вимірювальних каналів), де пріоритетними є простота розробки та низька вартість. Вона забезпечує достатню продуктивність при невеликому навантаженні та дозволяє швидко розгорнути систему без значних інфраструктурних інвестицій.

Мікросервісна архітектура доцільна для середніх та великих систем (від 50 до кількох тисяч каналів), де критично важливими є висока доступність та

Ив. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ				Лист 53
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

можливість незалежного масштабування окремих компонентів. Цей підхід вимагає значних інвестицій у інфраструктуру та експертизу команди, але забезпечує найвищий рівень відмовостійкості та гнучкості.

IoT-архітектура є найкращим вибором для систем із розподіленими вимірюваннями, коли вимірювальні пристрої розташовані на значній відстані один від одного та потребують автономної роботи. Вона забезпечує найнижчу затримку завдяки Edge Computing та найвищу масштабованість завдяки хмарній інфраструктурі.

На рисунку 2.8 наведено блок-схему вибору архітектурного підходу для системи дистанційного контролю з урахуванням кількості вимірювальних каналів, вимог до доступності та розподіленості вимірювань.

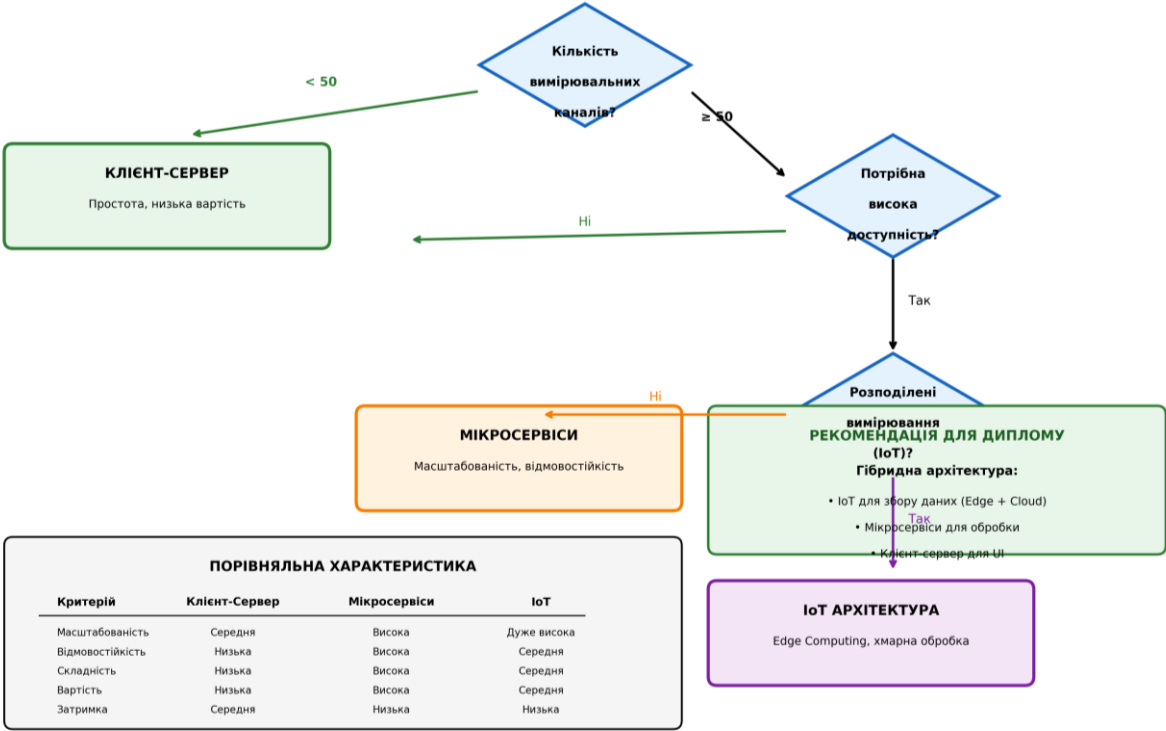


Рисунок 2.8 – Блок-схема вибору архітектурного підходу для системи дистанційного контролю

Блок-схема (рис. 2.8) демонструє логіку вибору архітектури. Якщо кількість вимірювальних каналів менше 50, рекомендується клієнт-серверна архітектура. При більшій кількості каналів перевіряється вимога до високої доступності: якщо вона не критична, також обирається клієнт-серверна

архітектура. Якщо висока доступність потрібна, перевіряється розподіленість вимірювань: для нерасподілених систем рекомендуються мікросервіси, для розподілених - IoT-архітектура.

Порівняльна характеристика архітектур за основними критеріями наведена в табличній формі на блок-схемі (рис. 2.8). За масштабованістю IoT-архітектура має перевагу ("дуже висока"), за відмовостійкістю - мікросервісна ("висока"), за простотою - клієнт-серверна ("низька складність").

Для дипломної роботи з розробки системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС рекомендується гібридний архітектурний підхід, який поєднує переваги всіх трьох розглянутих парадигм:

- IoT-компоненти для збору даних: використання Edge-шлюзів для первинної обробки даних від вимірювальних пристроїв та передачі в хмару через MQTT;

- мікросервісна архітектура для обробки: розділення бізнес-логіки на незалежні сервіси (збір даних, обробка метрології, сповіщення, звітність) для забезпечення масштабованості та відмовостійкості;

- клієнт-серверний підхід для інтерфейсу: єдиний веб-додаток, який взаємодіє з API Gateway для отримання даних та керування системою.

Такий гібридний підхід дозволяє створити систему, яка одночасно забезпечує простоту інтерфейсу користувача, гнучкість та відмовостійкість серверної частини, а також ефективний збір даних від розподілених вимірювальних пристроїв.

2.3.3 Вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик

На основі проведеного аналізу архітектурних підходів та специфіки задачі дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС формулюються вимоги до системи, яка розробляється. Вимоги поділяються на чотири групи: функціональні, вимоги до надійності, вимоги до безпеки та метрологічні вимоги.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	забезпечення масштабованості та відмовостійкості;
					- клієнт-серверний підхід для інтерфейсу: єдиний веб-додаток, який взаємодіє з API Gateway для отримання даних та керування системою.
					Такий гібридний підхід дозволяє створити систему, яка одночасно забезпечує простоту інтерфейсу користувача, гнучкість та відмовостійкість серверної частини, а також ефективний збір даних від розподілених вимірювальних пристроїв.
					2.3.3 Вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик
					На основі проведеного аналізу архітектурних підходів та специфіки задачі дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС формулюються вимоги до системи, яка розробляється. Вимоги поділяються на чотири групи: функціональні, вимоги до надійності, вимоги до безпеки та метрологічні вимоги.

Функціональні вимоги визначають основні можливості системи та її поведінку при взаємодії з користувачами та іншими системами. До функціональних вимог належать:

- збір даних з ІВС у реальному часі з періодом опитування від 1 до 60 секунд залежно від критичності вимірювального каналу;
- підтримка протоколів збору даних: MQTT, Modbus TCP/RTU, OPC UA, HTTP/REST API;
- оцінка метрологічної придатності вимірювальних каналів за методологією, розглянутою в пункті 2.2, з формуванням статусу "придатний", "потребує уваги" або "непридатний";
- прогнозування дрейфу метрологічних характеристик з розрахунком часу виходу за допустимі межі (TTF) та ймовірності відмови;
- формування сповіщень трьох рівнів: інформаційні (статус змінився), попереджувальні (TTF < 30 днів), тривожні (TTF < 7 днів або вихід за межі);
- візуалізація метрологічних даних у вигляді часових графіків, контрольних карт, дашбордів з можливістю налаштування;
- генерація метрологічних звітів та сертифікатів у форматах PDF, Excel, CSV;
- експорт даних через REST API для інтеграції з ERP, MES, SCADA системами.

Вимоги до надійності визначають здатність системи зберігати працездатність при відмовах компонентів та нештатних ситуаціях:

- доступність системи не менше 99.5% (час простою не більше 43.8 годин на рік);
- середній час відновлення після відмови (MTTR) не більше 1 години;
- середній час між відмовами (MTBF) не менше 8760 годин (1 рік);
- резервування критичних каналів зв'язку та серверних компонентів за схемою N+1;
- локальне зберігання даних на Edge-рівні при втраті зв'язку з хмарою (буферизація не менше 72 годин);

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист 56
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- автоматичне відновлення з'єднання та синхронізація даних після відновлення зв'язку.

Вимоги до безпеки забезпечують захист метрологічних даних та системи від несанкціонованого доступу:

- аутентифікація користувачів за протоколом OAuth 2.0 з використанням JWT-токенів;

- шифрування каналів передачі даних за протоколом TLS 1.3 з мінімальною довжиною ключа 2048 біт;

- рольова модель доступу (RBAC) з мінімум трьома ролями: адміністратор (повний доступ), оператор (перегляд та керування), гість (тільки перегляд);

- повне журналювання подій безпеки (вхід/вихід, зміни налаштувань, доступ до даних) з терміном зберігання не менше 1 року;

- захист від типових веб-атак (SQL-ін'єкції, XSS, CSRF) та DDoS-атак;

- сертифікати X.509 для автентифікації пристроїв у мережі MQTT.

Метрологічні вимоги забезпечують достовірність та трасованість вимірювальної інформації:

- трасування вимірювальних каналів до державних еталонів (ДЕРЖСТАНДАРТ України);

- похибка оцінки метрологічних характеристик системою не повинна перевищувати 10% від допустимої похибки вимірювального каналу;

- періодичність калібрування вимірювальних каналів відповідно до нормативних документів (зазвичай 1 рік для промислових приладів);

- зберігання метрологічних сертифікатів та протоколів калібрування в електронній формі з цифровим підписом;

- відповідність вимогам стандартів ISO 10012 (системи управління вимірюваннями), ISO/IEC 17025 (загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій), ДСТУ;

- можливість трасування до міжнародних еталонів (NIST, ВНІІМ ім. Д.І. Менделєєва).

тап. и дата		вимірювальної інформації:						
		- трасування вимірювальних каналів до державних еталонів (ДЕРЖСТАНДАРТ України);						
Инв. № дубл.		- похибка оцінки метрологічних характеристик системою не повинна перевищувати 10% від допустимої похибки вимірювального каналу;						
Взам. инв. №		- періодичність калібрування вимірювальних каналів відповідно до нормативних документів (зазвичай 1 рік для промислових приладів);						
Підп. і дата		- зберігання метрологічних сертифікатів та протоколів калібрування в електронній формі з цифровим підписом;						
Инв. № подл.		- відповідність вимогам стандартів ISO 10012 (системи управління вимірюваннями), ISO/IEC 17025 (загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій), ДСТУ;						
		- можливість трасування до міжнародних еталонів (NIST, ВНІІМ ім. Д.І. Менделєєва).						
							А 26.04.IBT.00. ПЗ	Лист
								57
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				

На рисунку 2.9 наведено блок-схему вимог до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС з деталізацією кожної групи вимог.

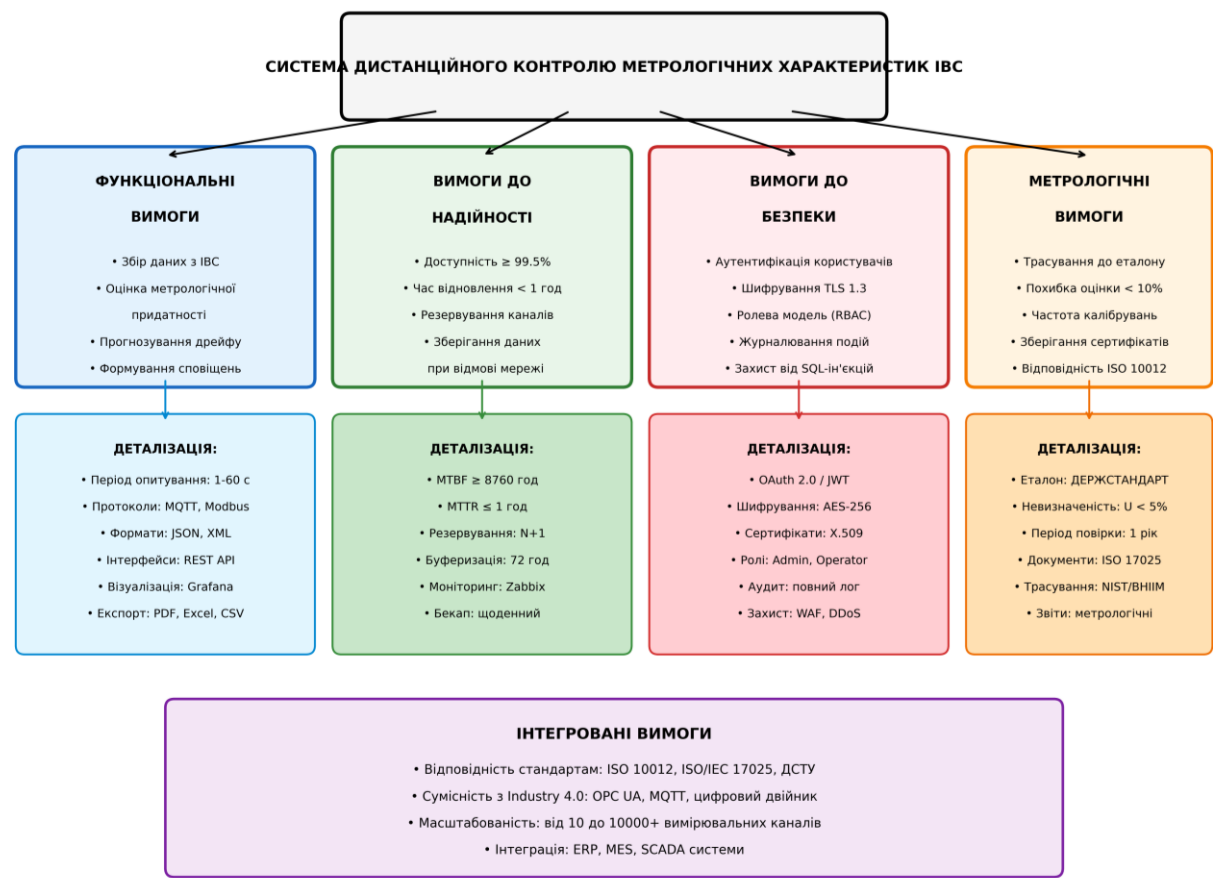


Рисунок 2.9 – Блок-схема вимог до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик

Блок-схема (рис. 2.9) систематизує всі вимоги до системи у чотирьох основних групах. Кожна група має деталізацію з конкретними числовими значеннями та технологічними рішеннями. Інтегровані вимоги визначають відповідність міжнародним стандартам, сумісність з Industry 4.0, масштабованість від 10 до 10000+ вимірювальних каналів та можливість інтеграції з ERP, MES, SCADA системами.

Таким чином, розглянуті архітектурні підходи - клієнт-серверна, мікросервісна та IoT-архітектура - мають різні сфери застосування залежно від масштабу системи, вимог до доступності та розподіленості вимірювань. Для дипломної роботи рекомендується гібридний підхід, який поєднує IoT-

компоненти для збору даних, мікросервісну архітектуру для обробки та клієнт-серверний підхід для інтерфейсу користувача. Сформульовані вимоги до системи визначають технічне завдання для подальшої розробки у розділі 3.

2.4 Вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик

2.4.1 Загальні положення

Розробка ефективної системи дистанційного контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) потребує чіткого визначення комплексу вимог, що забезпечують її функціональність, надійність, безпеку та відповідність нормативній базі. Вимоги до системи формуються на основі аналізу метрологічних потреб сучасного виробництва, особливостей експлуатації ІВС, а також вимог міжнародних та національних стандартів у галузі метрології та інформаційних технологій.

Система дистанційного контролю має забезпечувати безперервний моніторинг метрологічного стану ІВС у реальному часі, діагностику відхилень метрологічних характеристик від установлених норм, прогнозування метрологічного стану та формування сповіщень про необхідність технічного обслуговування, калібрування або перевірки вимірювальних засобів. При цьому система повинна відповідати принципам Industry 4.0 та концепції цифрового двійника, що передбачає інтеграцію з корпоративними інформаційними системами, використання хмарних технологій та забезпечення кібербезпеки.

2.4.2 Функціональні вимоги

2.4.2.1 Вимоги до збору та обробки вимірювальних даних

Система повинна забезпечувати збір первинних вимірювальних даних від різноманітних типів вимірювальних пристроїв та модулів ІВС, включаючи аналогові та цифрові сенсори, вимірювальні перетворювачі, багатоканальні

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист 59
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

вимірювальні системи. Частота дискретизації даних має бути налаштовуваною та залежати від динамічних характеристик контрольованих процесів, при цьому для статичних вимірювань допустимий період опитування становить від 1 хвилини до 24 годин, а для динамічних процесів - від 1 мс до 1 с.

Первинна обробка даних повинна включати фільтрацію випадкових похибок (з використанням методів ковзаючого середнього, медіанної фільтрації або фільтрів Калмана), компенсацію систематичних похибок на основі калібрувальних коефіцієнтів, перетворення одиниць вимірювання відповідно до Міжнародної системи одиниць СІ та перевірку даних на достовірність (виявлення аномальних значень, перевірка діапазону допустимих значень).

2.4.2.2 Вимоги до оцінювання метрологічних характеристик

Система має реалізувати автоматизоване оцінювання основних метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС:

- точності вимірювання - оцінка розширеної невизначеності вимірювання згідно з «Керівництвом з вираження невизначеності вимірювання» (GUM, JCGM 100:2008) з довірчою ймовірністю не менше 95 % ($k = 2$);
- систематичної похибки - визначення зміщення показань відносно еталонного значення з оцінкою статистичної значущості за критерієм Стьюдента;
- стабільності - контроль дрейфу метрологічних характеристик у часі з використанням контрольних карт Шухарта або кумулятивних сум (CUSUM);
- лінійності - оцінка відхилення від лінійної апроксимації калібрувальної характеристики;
- повторюваності та відтворюваності - статистична оцінка розсіювання результатів вимірювань за методикою ANOVA.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата							Лист 60
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ						

Оцінювання метрологічних характеристик повинно проводитися як у режимі реального часу (on-line), так і в режимі відкладеного аналізу (off-line) з можливістю ретроспективного аналізу історичних даних.

2.4.2.3 Вимоги до діагностики та прогнозування

Система повинна забезпечувати автоматичне виявлення відхилень метрологічних характеристик від допустимих меж, установлених нормативними документами, технічними умовами на вимірювальні засоби або внутрішніми стандартами підприємства. Критерії виходу за допустимі межі мають бути налаштовуваними та включати:

- жорсткі межі (hard limits) - абсолютні значення, перевищення яких є критичним;
- попереджувальні межі (warning limits) - значення, при досягненні яких формується попередження про наближення до критичного стану;
- трендові критерії - виявлення статистично значущих тенденцій зміни метрологічних характеристик.

Прогнозування метрологічного стану ІВС повинно здійснюватися на основі методів екстраполяції часових рядів (експоненціальне згладжування, моделі ARIMA) або машинного навчання (рекурентні нейронні мережі, методи опорних векторів). Горизонт прогнозування має становити від 7 до 90 діб з можливістю налаштування.

Сформульовані вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС охоплюють функціональні, технічні, метрологічні та безпекові аспекти її побудови та експлуатації. Ключовими серед них є:

1. Комплексність функціональних можливостей - система має забезпечувати повний цикл метрологічного контролю: від збору первинних даних до прогнозування стану та формування управлінських рішень;

2. Відповідність нормативній базі - дотримання вимог ISO/IEC 17025, ISO 10012, GUM та національних стандартів є обов'язковою умовою забезпечення трасованості та визнання результатів метрологічного контролю;

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	метрологічних характеристик.					
					Прогнозування метрологічного стану ІВС повинно здійснюватися на основі методів екстраполяції часових рядів (експоненціальне згладжування, моделі ARIMA) або машинного навчання (рекурентні нейронні мережі, методи опорних векторів). Горизонт прогнозування має становити від 7 до 90 діб з можливістю налаштування.					
					Сформульовані вимоги до системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС охоплюють функціональні, технічні, метрологічні та безпекові аспекти її побудови та експлуатації. Ключовими серед них є:					
					1. Комплексність функціональних можливостей - система має забезпечувати повний цикл метрологічного контролю: від збору первинних даних до прогнозування стану та формування управлінських рішень;					
					2. Відповідність нормативній базі - дотримання вимог ISO/IEC 17025, ISO 10012, GUM та національних стандартів є обов'язковою умовою забезпечення трасованості та визнання результатів метрологічного контролю;					
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										61
					Ізм Лист № докум. Підпис Дата					

3. Інформаційна безпека - урахування кіберфізичної природи системи та реалізація багаторівневого захисту даних і каналів передачі;

4. Надійність та безперервність - резервування критичних компонентів, локальне зберігання даних при втраті зв'язку, високі показники готовності системи;

5. Масштабованість та інтеграційна відкритість - можливість адаптації системи до потреб підприємств різного масштабу та інтеграція з існуючими корпоративними системами.

Виконання зазначених вимог створює підґрунтя для розробки системи дистанційного контролю, що відповідає сучасним вимогам Industry 4.0, забезпечує достовірність метрологічних даних та сприяє підвищенню якості виробничих процесів. На основі сформульованих вимог у наступних розділах буде розроблено архітектуру, апаратне та програмне забезпечення системи, а також проведено її метрологічне та функціональне тестування.

Таблиця 2.1 – Зведення технічних вимог до системи дистанційного контролю

№ з/п	Параметр	Нормативне значення
1	Коефіцієнт готовності	$\geq 99,5 \%$
2	MTBF	≥ 8760 год (1 рік)
3	MTTR	≤ 4 години
4	Буфер локального зберігання	≥ 72 годин
5	Точність синхронізації часу	± 10 мс
6	Час відгуку на запит	≤ 2 с
7	Час обробки одного значення	≤ 100 мс
8	Пропускна здатність	$\geq 10\,000$ знач./с
9	Час формування звіту	≤ 30 с
10	Термін зберігання оперативних даних	≥ 1 рік
11	Термін зберігання агрегованих	≥ 10 років

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 62
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

	даних	
12	Термін зберігання журналу аудиту	≥ 5 років
13	Періодичність резервного копіювання	1 раз на добу
14	Термін зберігання резервних копій	≥ 90 діб
15	Клас захисту (приміщення)	$\geq \text{IP54}$
16	Клас захисту (відкриті майданчики)	$\geq \text{IP65}$
17	Робоча температура	$-20 \dots +55 \text{ }^{\circ}\text{C}$
18	Відносна вологість	до 95 % (без конденсації)
19	Кількість каналів (масштабованість)	10 ... 10 000
20	Довірча ймовірність оцінки невизначеності	$\geq 95 \text{ } \% (k = 2)$

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										63

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

3.1 Формування технічного завдання та визначення функціональної структури системи

Розробка системи дистанційного контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) починається з формування технічного завдання, яке визначає основні вимоги до системи, її функціональні можливості, склад та структуру. Технічне завдання є ключовим документом, що регламентує всі етапи проектування, розробки та впровадження системи, а також забезпечує відповідність отриманих результатів заявленим цілям і завданням дослідження.

На основі аналізу існуючих підходів до метрологічного контролю ІВС, проведеного в розділі 1, та теоретичних основ, розглянутих у розділі 2, було сформульовано технічне завдання на розробку системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС. Основною метою розробки є створення комплексної автоматизованої системи, яка забезпечує моніторинг, оцінку та прогнозування метрологічного стану вимірювальних каналів ІВС у режимі реального часу з можливістю віддаленого доступу.

3.1.1 Вимоги до системи дистанційного контролю

Технічне завдання передбачає реалізацію наступних функціональних вимог до системи:

- збір вимірювальних даних з датчиків та вимірювальних модулів ІВС у режимі реального часу;
- первинна обробка та фільтрація отриманих даних з метою зменшення впливу шумів та перешкод;

- оцінка метрологічних характеристик вимірювальних каналів (похибка, чутливість, лінійність, дрейф, стабільність);
- виявлення відхилень метрологічних характеристик від допустимих меж та автоматичне формування сповіщень;
- прогнозування метрологічного стану вимірювальних каналів на основі статистичних методів;
- ведення бази даних метрологічного контролю з історією вимірювань, калібрувань та сертифікатів;
- формування звітів та метрологічних документів у відповідності до вимог нормативної бази;
- забезпечення віддаленого доступу до системи через веб-інтерфейс з різними рівнями прав користувачів;
- інтеграція з існуючими системами управління виробництвом (MES, ERP) та IoT-платформами;
- забезпечення інформаційної безпеки, включаючи аутентифікацію, авторизацію та шифрування каналів передачі даних.

До системи також пред'являються вимоги щодо надійності та безпеки. Система повинна забезпечувати безперервний моніторинг метрологічних характеристик з часом відновлення після відмови не більше 5 хвилин. Рівень доступності системи має становити не менше 99,5 %. Забезпечується резервування критичних компонентів системи та реалізація механізмів автоматичного відновлення після збоїв.

Вимоги до метрологічної забезпеченості передбачають, що система повинна забезпечувати оцінку метрологічних характеристик з похибкою, що не перевищує 0,1 % від діапазону вимірювання для кожного каналу. Періодичність оновлення даних про метрологічний стан має становити не менше одного разу на секунду для критичних вимірювальних каналів та не рідше одного разу на хвилину для загальних каналів.

авторизацію та шифрування каналів передачі даних.	тап. и дата
До системи також пред'являються вимоги щодо надійності та безпеки. Система повинна забезпечувати безперервний моніторинг метрологічних характеристик з часом відновлення після відмови не більше 5 хвилин. Рівень доступності системи має становити не менше 99,5 %. Забезпечується резервування критичних компонентів системи та реалізація механізмів автоматичного відновлення після збоїв.	Инв. № дубл.
Вимоги до метрологічної забезпеченості передбачають, що система повинна забезпечувати оцінку метрологічних характеристик з похибкою, що не перевищує 0,1 % від діапазону вимірювання для кожного каналу. Періодичність оновлення даних про метрологічний стан має становити не менше одного разу на секунду для критичних вимірювальних каналів та не рідше одного разу на хвилину для загальних каналів.	Взам. инв. №
	Підп. і дата
	Инв. № подл.
	</

3.1.2 Визначення функціональної структури системи

На основі сформульованих вимог було визначено функціональну структуру системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС. Функціональна структура відображає склад функцій, що виконуються системою, та взаємозв'язки між ними. Вона є основою для подальшої розробки структурної схеми та програмного забезпечення системи.

Функціональна структура системи включає наступні основні функціональні підсистеми:

- підсистема збору вимірювальних даних;
- підсистема первинної обробки та фільтрації даних;
- підсистема оцінки метрологічних характеристик;
- підсистема моніторингу та діагностики;
- підсистема прогнозування метрологічного стану;
- підсистема керування сповіщеннями та подіями;
- підсистема ведення бази даних;
- підсистема формування звітів та документів;
- підсистема користувацького інтерфейсу;
- підсистема забезпечення інформаційної безпеки.

Підсистема збору вимірювальних даних забезпечує отримання первинних вимірювальних сигналів з датчиків та вимірювальних модулів ІВС, їх перетворення в цифрову форму та передачу на рівень обробки. Підсистема підтримує роботу з аналоговими та цифровими сигналами різних типів, включаючи напругу, струм, опір, частоту та цифрові протоколи обміну даними.

Підсистема первинної обробки та фільтрації даних виконує попередню обробку отриманих вимірювальних даних з метою усунення шумів, перешкод та аномальних значень. Реалізовані алгоритми цифрової фільтрації, усереднення, медіанної фільтрації та виявлення викидів на основі статистичних критеріїв.

Підсистема оцінки метрологічних характеристик реалізує алгоритми розрахунку основних метрологічних показників вимірювальних каналів: абсолютної та відносної похибки, чутливості, лінійності, дрейфу нуля та

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
					– підсистема формування звітів та документів; – підсистема користувацького інтерфейсу; – підсистема забезпечення інформаційної безпеки.					
					Підсистема збору вимірювальних даних забезпечує отримання первинних вимірювальних сигналів з датчиків та вимірювальних модулів ІВС, їх перетворення в цифрову форму та передачу на рівень обробки. Підсистема підтримує роботу з аналоговими та цифровими сигналами різних типів, включаючи напругу, струм, опір, частоту та цифрові протоколи обміну даними.					
					Підсистема первинної обробки та фільтрації даних виконує попередню обробку отриманих вимірювальних даних з метою усунення шумів, перешкод та аномальних значень. Реалізовані алгоритми цифрової фільтрації, усереднення, медіанної фільтрації та виявлення викидів на основі статистичних критеріїв.					
					Підсистема оцінки метрологічних характеристик реалізує алгоритми розрахунку основних метрологічних показників вимірювальних каналів: абсолютної та відносної похибки, чутливості, лінійності, дрейфу нуля та					
										Лист 66
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

чутливості, стабільності показань у часі. Оцінка виконується на основі порівняння поточних вимірювальних даних з еталонними значеннями та даними попередніх калібрувань.

Підсистема моніторингу та діагностики здійснює безперервний контроль метрологічного стану вимірювальних каналів та формує сигнали тривоги при виході характеристик за допустимі межі. Підсистема забезпечує візуалізацію поточного стану системи, відображення трендів зміни метрологічних характеристик та діагностику причин відхилень.

Підсистема прогнозування метрологічного стану використовує статистичні методи та моделі машинного навчання для оцінки часу, що залишився до виходу метрологічних характеристик за допустимі межі. Це дозволяє планувати профілактичні роботи та калібрування заздалегідь, мінімізуючи ризики отримання недостовірних вимірювальних даних.

Підсистема керування сповіщеннями та подіями формує та розсилає повідомлення відповідальним особам при виявленні відхилень метрологічних характеристик, збоях у роботі системи або інших подіях, що потребують уваги. Сповіщення можуть надсилатися через електронну пошту, SMS-повідомлення або push-сповіщення в мобільному додатку.

Підсистема ведення бази даних забезпечує зберігання всієї інформації про вимірювальні прилади, їх метрологічні характеристики, результати вимірювань, дані калібрувань, сертифікати та іншу супровідну документацію. База даних підтримує версіонування змін метрологічних характеристик та формування історії змін.

Підсистема формування звітів та документів автоматизує процес створення метрологічної документації: протоколів повірки, свідоцтв про калібрування, звітів про метрологічний стан системи, актів перевірки. Звіти формуються у відповідності до вимог стандартів ISO/IEC 17025 та ISO 10012.

Підсистема користувацького інтерфейсу реалізована у вигляді веб-додатку з адаптивним дизайном, що забезпечує зручну роботу як на настільних

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 67
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					

комп'ютерах, так і на мобільних пристроях. Інтерфейс підтримує різні рівні доступу: адміністратор, метролог, оператор, перегляд.

Підсистема забезпечення інформаційної безпеки реалізує механізми аутентифікації користувачів на основі JWT-токенів, рольову модель доступу до функцій та даних, шифрування каналів передачі даних за протоколом TLS 1.3, а також ведення журналу аудиту всіх дій користувачів та системних подій.

3.2 Розробка структурної схеми системи

Структурна схема системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС розроблена на основі функціональної структури, визначеної в підрозділі 3.1, та архітектурних підходів, розглянутих у підрозділі 2.3. Система побудована за багаторівневою ієрархічною архітектурою, що забезпечує модульність, масштабованість та можливість інтеграції з існуючими виробничими системами.

Загальна структурна схема системи включає п'ять основних рівнів: рівень вимірювальних пристроїв, рівень збору та первинної обробки даних, рівень передачі даних, рівень обробки та зберігання, а також рівень користувацького інтерфейсу. Кожен рівень виконує певний набір функцій та взаємодіє з суміжними рівнями через чітко визначені інтерфейси.

Таблиця 3.1 – Склад компонентів системи за рівнями

Рівень	Основні компоненти	Функції
Вимірювальні пристрої	Датчики температури, тиску, вологості, витрати; вимірювальні перетворювачі; еталонні джерела сигналів	Формування первинних вимірювальних сигналів; перетворення фізичних величин у електричні сигнали
Збір та первинна обробка даних	Мікроконтролери STM32; одноплатні комп'ютери Raspberry Pi; промислові контролери; шлюзи протоколів	Аналого-цифрове перетворення; цифрова фільтрація; пакетування даних; керування вимірювальними модулями

тап. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.

Передача даних	Ethernet-мережі; Wi-Fi точки доступу; промислові комутатори; маршрутизатори	Передача даних між рівнями; забезпечення надійності каналів зв'язку; маршрутизація трафіку
Обробка та зберігання	Сервери застосувань; бази даних PostgreSQL; брокери повідомлень RabbitMQ; системи кешування Redis	Обробка вимірювальних даних; оцінка метрологічних характеристик; зберігання даних; формування сповіщень
Користувацький інтерфейс	Веб-сервер Nginx; фронтенд-додаток React; мобільний додаток	Візуалізація даних; керування системою; формування звітів; адміністрування

3.2.1 Рівень вимірювальних пристроїв

Рівень вимірювальних пристроїв є нижнім рівнем системи та включає безпосередньо вимірювальні елементи ІВС: датчики, первинні вимірювальні перетворювачі, еталонні джерела сигналів та допоміжне обладнання. Цей рівень забезпечує перетворення контрольованих фізичних величин (температура, тиск, вологість, витрата, рівень, рН тощо) в електричні сигнали, придатні для подальшої обробки.

До складу рівня вимірювальних пристроїв входять:

- первинні вимірювальні перетворювачі (датчики) різних типів: термоелектричні, терморезистивні, п'єзоелектричні, ємнісні, індуктивні, оптичні;
- вимірювальні перетворювачі сигналів, що забезпечують нормалізацію та лінеаризацію вихідних сигналів датчиків;
- еталонні джерела сигналів для періодичної перевірки та калібрування вимірювальних каналів;
- вимірювальні модулі з вбудованими аналого-цифровими перетворювачами (АЦП) для безпосереднього оцифрування сигналів.

тап. и дата	
Инв. №дубл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Вибір конкретних типів датчиків та вимірювальних перетворювачів здійснюється з урахуванням діапазону вимірювання, необхідної точності, умов експлуатації та вимог до метрологічної прослідковуваності. Для системи дистанційного контролю перевагу надано датчикам з цифровим виходом (наприклад, з інтерфейсом I2C, SPI, Modbus RTU), оскільки вони забезпечують більшу точність передачі даних та спрощують інтеграцію з рівнем збору даних.

3.2.2 Рівень збору та первинної обробки даних

Рівень збору та первинної обробки даних призначений для отримання сигналів з рівня вимірювальних пристроїв, їх аналого-цифрового перетворення, первинної обробки та підготовки до передачі на вищі рівні системи. Цей рівень виконує функцію проміжного шару між фізичними вимірювальними пристроями та інформаційною системою.

Основними компонентами рівня збору та первинної обробки даних є:

- мікроконтролери сімейства STM32 (STM32F4, STM32H7) з вбудованими 12–16-бітними АЦП, тактовою частотою до 480 МГц та підтримкою різних інтерфейсів зв'язку;
- одноплатні комп'ютери Raspberry Pi 4 Model B з чотирьохядерним процесором ARM Cortex-A72, 4 ГБ оперативної пам'яті, вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, які використовуються як шлюзи збору даних;
- промислові контролери з підтримкою протоколів Modbus TCP/RTU, OPC UA, EtherNet/IP;
- програмовані логічні контролери (ПЛК) для інтеграції з існуючими системами автоматизації;
- шлюзи протоколів для забезпечення сумісності між різними інтерфейсами та протоколами обміну даними.

Первинна обробка даних на цьому рівні включає: цифрову фільтрацію (низькочастотні, медіанні, Калмана фільтри), усереднення за заданим інтервалом часу, лінеаризацію характеристик датчиків, компенсацію впливу температури навколишнього середовища, масштабування вимірювальних даних в інженерні

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ			
					Лист 70			

одиниці. Результати первинної обробки пакетуються в структуровані повідомлення та передаються на рівень обробки та зберігання через мережеві протоколи.

3.2.3 Рівень передачі даних

Рівень передачі даних забезпечує надійний та захищений обмін інформацією між рівнем збору даних та рівнем обробки та зберігання. Цей рівень реалізує транспортні функції системи та включає як провідні, так і безпроводні канали зв'язку.

Для передачі даних у системі використовуються наступні протоколи та технології:

- Ethernet (IEEE 802.3) – основний провідний канал зв'язку з пропускнуою здатністю 1 Гбіт/с для підключення стаціонарних вузлів системи;
- Wi-Fi (IEEE 802.11ac/ax) – безпроводний канал зв'язку для мобільних вузлів та резервних каналів;
- MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легковаговий протокол публікації/підписки для передачі вимірювальних даних у реальному часі;
- Modbus TCP/RTU – промисловий протокол для інтеграції з існуючим обладнанням;
- OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – стандартизований протокол для промислової автоматизації з підтримкою семантичного опису даних;
- HTTP/REST API – для взаємодії між серверною частиною та клієнтськими додатками;
- TLS 1.3 – протокол шифрування для забезпечення конфіденційності та цілісності переданих даних.

Мережева інфраструктура рівня передачі даних включає промислові комутатори керованого типу з підтримкою VLAN, QoS та резервування кілець (MRP, RSTP), маршрутизатори з функціями NAT та VPN, точки доступу Wi-Fi промислового виконання з захистом IP65/IP67. Для забезпечення відмовостійкості

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	– MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легковаговий протокол публікації/підписки для передачі вимірювальних даних у реальному часі;
					– Modbus TCP/RTU – промисловий протокол для інтеграції з існуючим обладнанням;
					– OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) – стандартизований протокол для промислової автоматизації з підтримкою семантичного опису даних;
					– HTTP/REST API – для взаємодії між серверною частиною та клієнтськими додатками;
					– TLS 1.3 – протокол шифрування для забезпечення конфіденційності та цілісності переданих даних.
					Мережева інфраструктура рівня передачі даних включає промислові комутатори керованого типу з підтримкою VLAN, QoS та резервування кілець (MRP, RSTP), маршрутизатори з функціями NAT та VPN, точки доступу Wi-Fi промислового виконання з захистом IP65/IP67. Для забезпечення відмовостійкості
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

A 26.04.IBT.00. ПЗ

Лист
71

реалізовано резервування мережевих каналів з автоматичним перемиканням при відмові основного каналу.

3.2.4 Рівень обробки та зберігання

Рівень обробки та зберігання є центральним рівнем системи, на якому виконуються основні обчислювальні завдання: оцінка метрологічних характеристик, прогнозування, формування сповіщень, зберігання даних та формування звітів. Цей рівень реалізований на базі серверної інфраструктури з використанням сучасних технологій хмарних обчислень та контейнеризації.

Архітектура рівня обробки та зберігання побудована за мікросервісним підходом, що забезпечує незалежне масштабування окремих компонентів, спрощує розгортання та оновлення системи, підвищує загальну надійність. Основні мікросервіси рівня:

- сервіс збору даних (Data Collection Service) – приймає дані з рівня збору, виконує їх валідацію та маршрутизацію до відповідних обробників;

- сервіс оцінки метрологічних характеристик (Metrology Service) – реалізує алгоритми розрахунку похибки, чутливості, лінійності, дрейфу та стабільності;

- сервіс моніторингу (Monitoring Service) – відстежує поточний стан вимірювальних каналів, виявляє відхилення від норми, формує події тривоги;

- сервіс прогнозування (Prediction Service) – будує прогнози зміни метрологічних характеристик на основі статистичних моделей та методів машинного навчання;

- сервіс сповіщень (Notification Service) – керує розсилкою повідомлень користувачам через різні канали зв'язку;

- сервіс звітності (Reporting Service) – формує метрологічні звіти, протоколи, свідоцтва у відповідності до нормативних вимог;

- сервіс адміністрування (Admin Service) – забезпечує керування користувачами, ролями, налаштуваннями системи.

Для зберігання даних використовується реляційна база даних PostgreSQL 15, яка забезпечує високу надійність, підтримку складних запитів та розширену

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист 72
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

функціональність для роботи з часовими рядами (через розширення TimescaleDB). Структура бази даних включає таблиці для зберігання інформації про вимірювальні прилади, їх характеристики, результати вимірювань, дані калібрувань, журнали подій та аудиту.

Для забезпечення високої продуктивності при обробці поточкових даних використовується брокер повідомлень RabbitMQ, який забезпечує асинхронну обробку вимірювальних даних та розподіл навантаження між обробниками. Система кешування Redis використовується для зберігання поточного стану вимірювальних каналів та проміжних результатів обчислень, що дозволяє зменшити навантаження на базу даних та прискорити відповіді на запити користувачів.

3.2.5 Рівень користувацького інтерфейсу

Рівень користувацького інтерфейсу забезпечує взаємодію користувачів з системою дистанційного контролю. Інтерфейс реалізований у вигляді веб-додатку з адаптивним дизайном, що дозволяє працювати з системою на різних типах пристроїв: настільних комп'ютерах, ноутбуках, планшетах та смартфонах.

Архітектура рівня користувацького інтерфейсу передбачає розділення на фронтенд- та бекенд-частини. Фронтенд реалізований на базі сучасного JavaScript-фреймворку React з використанням бібліотеки компонентів Material-UI, що забезпечує сучасний та зручний користувацький досвід. Бекенд представлений REST API, реалізованим на мові Python з використанням фреймворку FastAPI, який забезпечує високу продуктивність та автоматичну генерацію документації API.

Основні функціональні можливості користувацького інтерфейсу:

- інтерактивна панель моніторингу (dashboard) з відображенням поточного стану всіх вимірювальних каналів у реальному часі;
- графічне відображення трендів зміни метрологічних характеристик з можливістю масштабування та вибору часового діапазону;

тап. и дата						
Инв. №дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
з адаптивним дизайном, що дозволяє працювати з системою на різних типах пристроїв: настільних комп'ютерах, ноутбуках, планшетах та смартфонах. Архітектура рівня користувацького інтерфейсу передбачає розділення на фронтенд- та бекенд-частини. Фронтенд реалізований на базі сучасного JavaScript-фреймворку React з використанням бібліотеки компонентів Material-UI, що забезпечує сучасний та зручний користувацький досвід. Бекенд представлений REST API, реалізованим на мові Python з використанням фреймворку FastAPI, який забезпечує високу продуктивність та автоматичну генерацію документації API. Основні функціональні можливості користувацького інтерфейсу: – інтерактивна панель моніторингу (dashboard) з відображенням поточного стану всіх вимірювальних каналів у реальному часі; – графічне відображення трендів зміни метрологічних характеристик з можливістю масштабування та вибору часового діапазону;						
		Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ						Лист 73

- табличне подання даних з можливістю сортування, фільтрації та експорту;
- інтерфейс керування сповіщеннями з налаштуванням порогів, отримувачів та каналів доставки;
- модуль формування та перегляду метрологічних звітів та документів;
- інтерфейс адміністрування для керування користувачами, ролями, налаштуваннями системи та вимірювальними приладами;
- мобільний додаток для оперативного доступу до критичної інформації та отримання push-сповіщень.

Для забезпечення безпеки доступу до веб-інтерфейсу реалізовано багатофакторну аутентифікацію (пароль + одноразовий код з SMS або TOTP-генератора), рольову модель доступу з чотирма рівнями: адміністратор (повний доступ), метролог (доступ до метрологічних функцій та звітів), оператор (перегляд стану та керування сповіщеннями), перегляд (тільки читання). Всі дії користувачів фіксуються в журналі аудиту з зберіганням інформації про час, IP-адресу, тип дії та результат.

Загальна структурна схема системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС наведена на рисунку 3.1. Схема відображає п'ять основних рівнів системи, їх склад та взаємозв'язки між рівнями. Кожен рівень виконує строго визначений набір функцій та взаємодіє з суміжними рівнями через стандартизовані інтерфейси. Забезпечено інтеграцію з зовнішніми системами: MES/ERP, IoT-платформами та калібрувальною лабораторією. Захист інформації реалізовано на всіх рівнях системи.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист 74
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

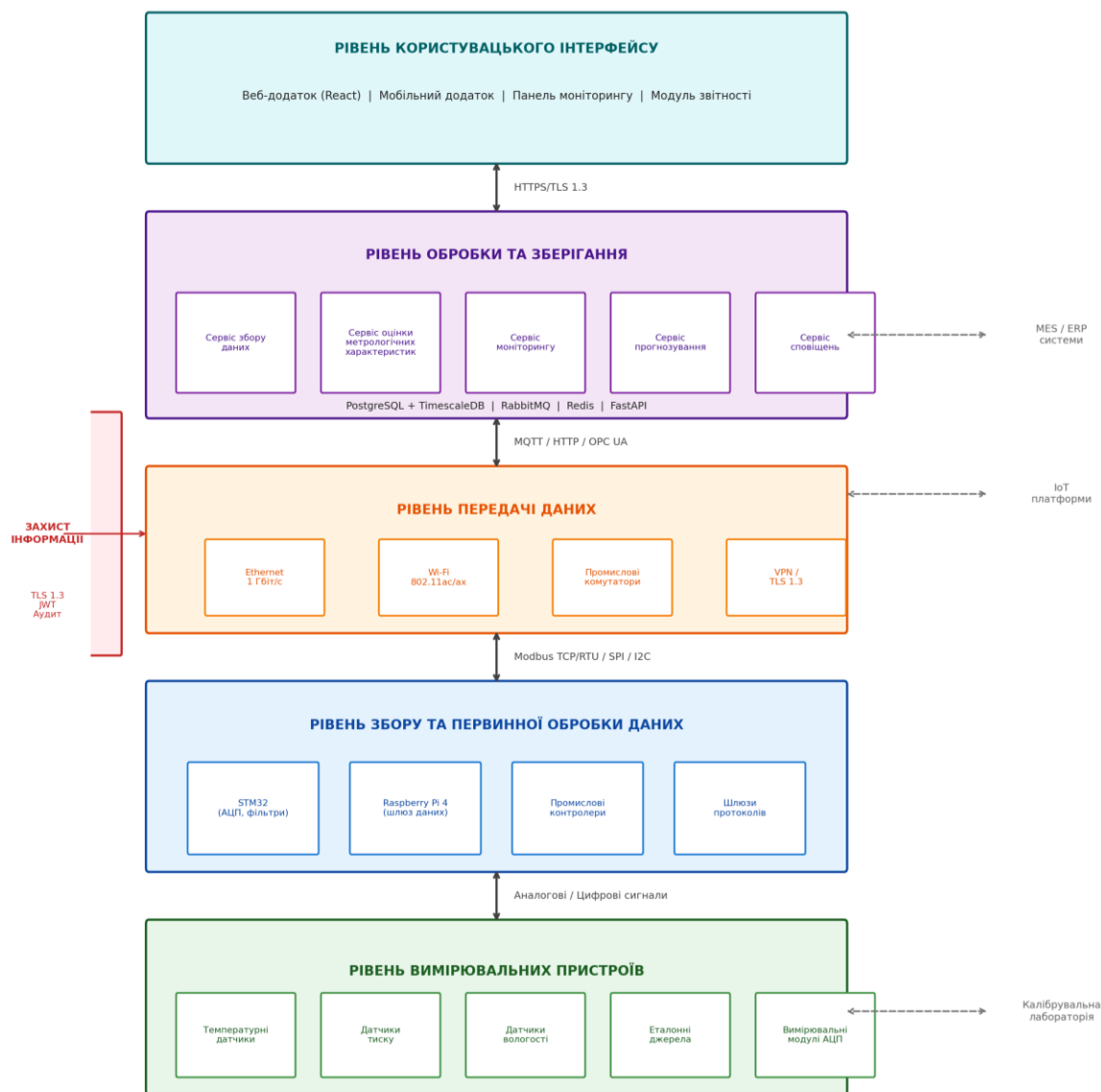


Рисунок 3.1 – Загальна структурна схема системи дистанційного контролю

Функціональна структура системи, що відображає взаємозв'язки між підсистемами та потоки даних між ними, наведена на рисунку 3.2. Центральне ядро системи координує роботу всіх підсистем та забезпечує обмін даними між ними. Кожна підсистема виконує вузькоспеціалізовані функції та взаємодіє з ядром через чітко визначені інтерфейси. Зовнішні системи (вимірювальні пристрої ІВС, калібрувальна лабораторія, корпоративні системи) інтегруються з відповідними підсистемами.

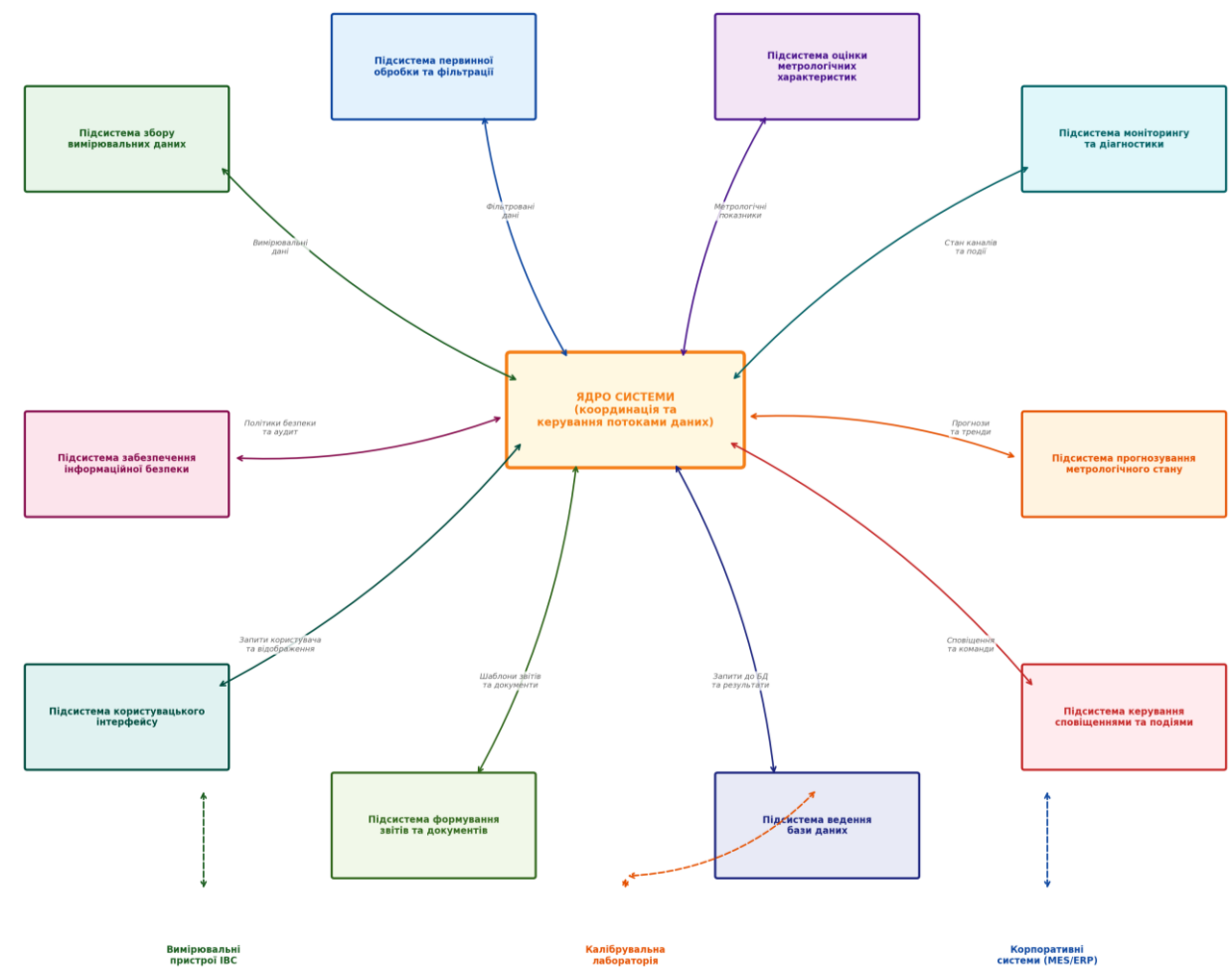


Рисунок 3.2 – Функціональна структура системи

Схема потоків даних у системі наведена на рисунку 3.3. Діаграма відображає послідовність обробки вимірювальних даних від моменту їх отримання з вимірювальних пристроїв до формування звітів користувачу. Кожен процес (P1–P9) виконує певну операцію над даними, а сховища даних (D1–D4) забезпечують збереження інформації на різних етапах обробки. Зовнішні сутності (користувач, адміністратор, калібрувальна лабораторія) взаємодіють з системою через відповідні інтерфейси.

Вимірювальні пристрої ІВС					Калібрувальна лабораторія					Корпоративні системи (MES/ERP)										
Рисунок 3.2 – Функціональна структура системи																				
Схема потоків даних у системі наведена на рисунку 3.3. Діаграма відображає послідовність обробки вимірювальних даних від моменту їх отримання з вимірювальних пристроїв до формування звітів користувачу. Кожен процес (Р1–Р9) виконує певну операцію над даними, а сховища даних (D1–D4) забезпечують збереження інформації на різних етапах обробки. Зовнішні сутності (користувач, адміністратор, калібрувальна лабораторія) взаємодіють з системою через відповідні інтерфейси.																				
тапл. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ										Лист					
															Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	76

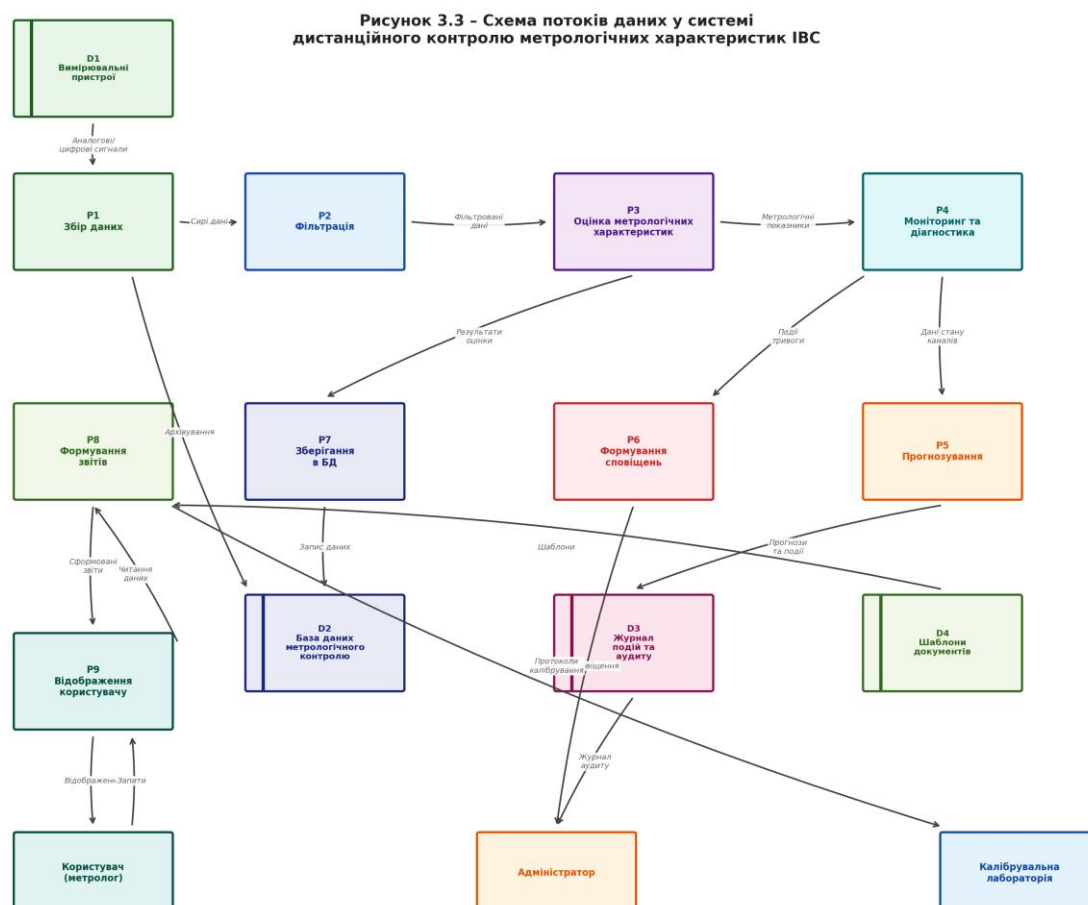


Рисунок 3.3 – Система потоків даних у системі дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС

3.3 Вибір та обґрунтування апаратних засобів

Вибір апаратних засобів для системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС є критичним етапом проєктування, оскільки від правильності цього вибору залежать метрологічна точність, надійність, масштабованість та вартість всієї системи. Апаратне забезпечення повинно відповідати вимогам, сформульованим у технічному завданні, а також забезпечувати сумісність з існуючим обладнанням ІВС та можливість подальшого розширення функціоналу.

При виборі апаратних компонентів було враховано наступні критерії: метрологічні характеристики (точність, роздільна здатність, лінійність,

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата

вбудований датчик температури для компенсації, габаритний розмір 1,5 × 1,5 × 0,5 мм.

Для вимірювання витрати рідини/газу обрано ультразвукові витратоміри часу проходження сигналу (наприклад, серія FLUXUS компанії FLEXIM) з точністю ±0,5 % виміряного значення ±2 мм/с, діапазон трубопроводів DN15–DN6000, вбудований АЦП 24 біт, цифровий вихід Modbus RTU/TCP.

Для вимірювання рівня рідини обрано радарні (РЛС) рівнеміри серії Micropilot FMR20 компанії Endress+Hauser з точністю ±2 мм, діапазон до 20 м, частота 80 ГГц (К-діапазон), вихід 4–20 мА HART, захист IP66/68.

Важливою складовою системи є еталонні джерела сигналів, які використовуються для періодичної перевірки та калібрування вимірювальних каналів без їх демонтажу. Для цього обрано:

- портативний калібратор температури Fluke 754 з точністю ±0,01 °С, діапазон –200...+1100 °С, вбудований джерело струму/напруги для калібрування перетворювачів;

- портативний калібратор тиску Fluke 700G04 з точністю ±0,05 % ВП, діапазон –0,97...+1 бар;

- еталонний блок живлення Keysight B2901B з точністю ±0,02 %, діапазон 210 В/3 А, використовується для перевірки каналів струму та напруги.

Вимірювальні модулі з вбудованими АЦП використовуються для безпосереднього оцифрування аналогових сигналів датчиків. Для системи обрано модулі ADS1115 (16 біт, 4 канали, I2C, 860 вибірок/с) для низькошвидкісних застосувань та ADS131M04 (24 біт, 4 канали, SPI, 32 квибірок/с) для прецизійних вимірювань. Вибір 24-бітного АЦП для критичних каналів обґрунтований необхідністю досягнення похибки оцифрування не більше 0,001 % ВП.

Для нормалізації та лінеаризації сигналів датчиків використовуються вимірювальні перетворювачі сигналів (наприклад, модулі SCXI-1121 компанії National Instruments), які забезпечують: підсилення сигналів датчиків з низьким рівнем (термопари, тензодатчики), фільтрацію високочастотних перешкод (нижньочастотний фільтр з частотою зрізу 10 Гц), гальванічну розв'язку між

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист 79
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

датчиками та системою збору даних (ізоляція 1500 В), перетворення різних типів сигналів у стандартизовані форми (4–20 мА, 0–10 В).

3.3.2 Мікроконтролери та одноплатні комп'ютери

Мікроконтролери та одноплатні комп'ютери формують рівень збору та первинної обробки даних, виконуючи функції аналого-цифрового перетворення, цифрової фільтрації, пакетування даних та передачі їх на вищі рівні системи. Вибір конкретних компонентів здійснено з урахуванням необхідної обчислювальної потужності, кількості та типу інтерфейсів, енергоспоживання, вартості та наявності програмної підтримки.

Для вузлів, що потребують високої продуктивності та підтримки складних алгоритмів цифрової обробки сигналів, обрано мікроконтролери сімейства STM32H7 компанії STMicroelectronics (зокрема модель STM32H743ZI). Основні технічні характеристики: ядро ARM Cortex-M7 з частотою до 480 МГц, 2 МБ Flash-пам'яті, 1 МБ SRAM, вбудований плаваючий співпроцесор (FPU) з підтримкою подвійної точності, 3× 12-бітні АЦП з частотою вибірок до 3,6 Мвиб/с, 2× 12-бітні ЦАП, до 35 комунікаційних інтерфейсів (I2C, SPI, USART, CAN, USB, Ethernet, SDIO).

Використання мікроконтролера STM32H743ZI обґрунтовано наступними факторами: висока обчислювальна потужність дозволяє реалізувати складні алгоритми цифрової фільтрації (фільтр Калмана, адаптивні фільтри) без залучення зовнішніх процесорів; наявність вбудованого FPU прискорює виконання операцій з плаваючою комою, що критично для метрологічних обчислень; широкий набір інтерфейсів забезпечує підключення різних типів датчиків та комунікаційних модулів; низьке енергоспоживання в режимі сну (2,5 мкА) дозволяє використовувати резервне живлення; наявність вбудованого Ethernet-контролера спрощує інтеграцію в мережу; підтримка апаратної криптографії (AES, SHA, RNG) підвищує рівень інформаційної безпеки.

Для вузлів, що виконують функції шлюзів збору даних та потребують підтримки операційної системи загального призначення, обрано одноплатний

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 80
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B. Технічні характеристики: чотирьохядерний процесор ARM Cortex-A72 з частотою 1,5 ГГц, 4 ГБ оперативної пам'яті LPDDR4, підтримка двох моніторів 4K через роз'єми micro-HDMI, гігабітний Ethernet, двохдіапазонний Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0, 40-піновий GPIO роз'єм, 4× USB 3.0/2.0, слот microSD для системного накопичувача.

Raspberry Pi 4 використовується як шлюз збору даних (Data Gateway) з наступними функціями: збір даних з кількох мікроконтролерів STM32 через UART/SPI/I2C; первинна агрегація та буферизація даних перед передачею на сервер; локальне виконання алгоритмів машинного навчання для швидкого виявлення аномалій (TensorFlow Lite); керування локальним веб-інтерфейсом для налаштування вузла; виконання MQTT-брокера для локальної маршрутизації повідомлень; резервне зберігання даних при втраті зв'язку з сервером (локальна БД SQLite).

Для промислових застосувань з жорсткими вимогами до надійності обрано промислові контролери серії WAGO PFC200 (наприклад, модель 750-8202). Характеристики: процесор ARM Cortex-A8 600 МГц, 256 МБ RAM, 32 ГБ eMMC, операційна система Linux (OpenWRT), вбудовані інтерфейси RS-232/RS-485, Ethernet, CAN, підтримка протоколів Modbus TCP/RTU, EtherNet/IP, PROFINET, OPC UA, робочий діапазон температур $-20...+60$ °C, захист IP20, сертифікати UL, CE, ATEX для використання в небезпечних зонах.

Промислові контролери WAGO PFC200 використовуються для інтеграції системи дистанційного контролю з існуючими системами автоматизації виробництва. Вони забезпечують: перетворення протоколів між різними підсистемами (Modbus RTU → OPC UA); збір даних з ПЛК та SCADA-систем через стандартні промислові протоколи; локальну обробку аварійних ситуацій при втраті зв'язку з центральним сервером; гальванічну розв'язку між полем та системою керування; роботу в агресивних умовах (пил, вібрація, електромагнітні перешкоди).

Для порівняння обраних компонентів наведено таблицю 3.2.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата
Характеристики: процесор ARM Cortex-A8 600 МГц, 256 МБ RAM, 32 ГБ eMMC, операційна система Linux (OpenWRT), вбудовані інтерфейси RS-232/RS-485, Ethernet, CAN, підтримка протоколів Modbus TCP/RTU, EtherNet/IP, PROFINET, OPC UA, робочий діапазон температур –20...+60 °С, захист IP20, сертифікати UL, CE, АТЕХ для використання в небезпечних зонах. Промислові контролери WAGO PFC200 використовуються для інтеграції системи дистанційного контролю з існуючими системами автоматизації виробництва. Вони забезпечують: перетворення протоколів між різними підсистемами (Modbus RTU → OPC UA); збір даних з ПЛК та SCADA-систем через стандартні промислові протоколи; локальну обробку аварійних ситуацій при втраті зв'язку з центральним сервером; гальванічну розв'язку між полем та системою керування; роботу в агресивних умовах (пил, вібрація, електромагнітні перешкоди). Для порівняння обраних компонентів наведено таблицю 3.2.				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
A 26.04.IBT.00. ПЗ				Лист
				81

Таблиця 3.2 – Порівняльні характеристики обраних мікроконтролерів та
одноплатних комп'ютерів

Параметр	STM32H743ZI	Raspberry Pi 4	WAGO PFC200
Процесор	ARM Cortex-M7 480 МГц	ARM Cortex-A72 1,5 ГГц (4 ядра)	ARM Cortex-A8 600 МГц
Оперативна пам'ять	1 МБ SRAM	4 ГБ LPDDR4	256 МБ RAM
Постійна пам'ять	2 МБ Flash	microSD (до 1 ТБ)	32 ГБ eMMC
АЦП (вбудований)	3× 12 біт, 3,6 Мвиб/с	немає	немає
Ethernet	10/100 Мбіт/с	Гігабітний	10/100 Мбіт/с
Wi-Fi	немає (зовнішній модуль)	802.11ac dual-band	немає (зовнішній модуль)
Операційна система	немає (bare metal / RTOS)	Linux (Raspberry Pi OS)	Linux (OpenWRT)
Споживана потужність	300 мВт (активний)	7,5 Вт	5 Вт
Діапазон температур	–40...+85 °C	0...+50 °C	–20...+60 °C
Вартість (орієнтовна)	~15 USD	~75 USD	~400 USD
Призначення в системі	Вузол збору даних з первинною обробкою	Шлюз збору даних локальний сервер	Промисловий шлюз протоколів

3.3.3 Мережеве обладнання

Мережеве обладнання забезпечує надійний та захищений обмін даними між усіма рівнями системи дистанційного контролю. Вибір мережевого обладнання здійснено з урахуванням вимог до пропускної здатності, затримки передачі даних, відмовостійкості, захисту від несанкціонованого доступу та умов експлуатації в промисловому середовищі.

Для побудови основної мережі системи обрано промислові керовані комутатори серії Моха EDS-510A. Технічні характеристики: 7 портів 10/100Base-

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										82

T(X) + 3 порти 100Base-FX (оптика), підтримка протоколів резервування кілець Turbo Ring (відновлення < 20 мс), RSTP/STP, підтримка VLAN (IEEE 802.1Q), QoS (IEEE 802.1p), IGMP snooping для multicast-трафіку, діагностика через web/Telnet/CLI, захист IP30, діапазон температур –40...+75 °С, живлення 12/24/48 В постійного струму, наявність сертифікатів IEC 61850-3 та IEEE 1613 для енергетичних застосувань.

Використання промислових комутаторів Моха EDS-510A обґрунтовано наступними перевагами: висока надійність у промислових умовах (відсутність вентиляторів, конформне покриття плат); швидке резервування кілець (відновлення за 20 мс) забезпечує безперервність моніторингу при обриві кабелю; підтримка VLAN дозволяє логічно розділити трафік метрологічних даних, керування та відеоспостереження; QoS гарантує пріоритет для критичних повідомлень метрологічного контролю; оптичні порти дозволяють організувати зв'язок на відстані до 20 км без повторювачів; підтримка PoE (Power over Ethernet) спрощує живлення мережевих пристроїв (камер, точок доступу).

Для організації безпроводного зв'язку з мобільними вузлами та резервних каналів обрано промислові точки доступу серії Моха AWK-1131A. Характеристики: стандарт Wi-Fi 802.11a/b/g/n, частоти 2,4/5 ГГц, швидкість до 300 Мбіт/с, вихідна потужність 23 дБм, підтримка режимів AP/Client/Repeater/Bridge, захист WPA2-Enterprise (802.1X), діапазон температур – 40...+75 °С, захист IP30, живлення 12/24/48 В постійного струму, підтримка протоколу резервування AeroLink Pro (< 100 мс перемикання).

Для забезпечення маршрутизації трафіку між локальною мережею системи та корпоративною мережею підприємства обрано промисловий маршрутизатор серії Моха EDR-810. Характеристики: 8 портів Ethernet (10/100/1000 Мбіт/с), вбудований брандмауер з підтримкою правил на основі IP/MAC/порту/протоколу, підтримка VPN (IPSec/OpenVPN/GRE), NAT, 1:1 NAT, port forwarding, підтримка протоколів керування мережею SNMP v1/v2c/v3, діагностика через web/CLI, захист IP30, діапазон температур –40...+60 °С.

тап. и дата		Для організації безпроводного зв'язку з мобільними вузлами та резервних каналів обрано промислові точки доступу серії Моха AWK-1131A. Характеристики: стандарт Wi-Fi 802.11a/b/g/n, частоти 2,4/5 ГГц, швидкість до 300 Мбіт/с, вихідна потужність 23 дБм, підтримка режимів AP/Client/Repeater/Bridge, захист WPA2-Enterprise (802.1X), діапазон температур – 40...+75 °С, захист IP30, живлення 12/24/48 В постійного струму, підтримка протоколу резервування AeroLink Pro (< 100 мс перемикання).					
Инв. №дубл.		Для забезпечення маршрутизації трафіку між локальною мережею системи та корпоративною мережею підприємства обрано промисловий маршрутизатор серії Моха EDR-810. Характеристики: 8 портів Ethernet (10/100/1000 Мбіт/с), вбудований брандмауер з підтримкою правил на основі IP/MAC/порту/протоколу, підтримка VPN (IPSec/OpenVPN/GRE), NAT, 1:1 NAT, port forwarding, підтримка протоколів керування мережею SNMP v1/v2c/v3, діагностика через web/CLI, захист IP30, діапазон температур –40...+60 °С.					
Взам. инв. №							
Підп. і дата							
Инв. №подл.							
						А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
							83
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Маршрутизатор EDR-810 виконує наступні функції в системі: маршрутизація трафіку між VLAN метрологічного контролю, виробничої мережі та корпоративної мережі; захист від несанкціонованого доступу через брандмауер та VPN-тунелі; NAT для приховання внутрішньої адресації системи; port forwarding для віддаленого доступу до веб-інтерфейсу системи; моніторинг мережевого трафіку та виявлення аномалій.

Для забезпечення резервування мережевих каналів та балансування навантаження використовуються промислові медіаконвертери серії Моха ІМС-101G (перетворення електричного сигналу в оптичний та навпаки) та комутатори рівня доступу серії Моха EDS-208A (8 портів 10/100 Мбіт/с, не керований, захист IP30, -10...+60 °C) для підключення невеликих груп датчиків.

Особливу увагу приділено захисту мережевої інфраструктури від кібератак. Реалізовано наступні заходи: сегментація мережі на VLAN (вимірювальна, керування, адміністрування); брандмауер з правилами за замовчуванням «все заборонено, крім дозволеного»; VPN-тунелі IPSec для віддаленого доступу з шифруванням AES-256; аутентифікація 802.1X для доступу до портів комутаторів; моніторинг мережевого трафіку на предмет виявлення вторгнень (IDS); регулярне оновлення прошивок мережевого обладнання; резервне копіювання конфігурацій мережевих пристроїв.

3.3.4 Серверне обладнання

Серверне обладнання рівня обробки та зберігання забезпечує виконання обчислювальних завдань, зберігання великих обсягів даних, обробку запитів користувачів та інтеграцію з зовнішніми системами. Вибір серверного обладнання здійснено з урахуванням вимог до продуктивності, надійності, масштабованості та енергоефективності.

Для розміщення серверної частини системи обрано стійковий сервер Dell PowerEdge R750. Технічні характеристики: 2× процесор Intel Xeon Silver 4314 (16 ядер, 2,4–3,4 ГГц), 128 ГБ DDR4 ECC RAM, 8× накопичувачі SSD SAS 960 ГБ в конфігурації RAID 10, 2× блоки живлення 750 Вт (hot-swap, redundant), 4× порти

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ			
					Лист			
					84			

гігабітного Ethernet, 2× порти 10GbE SFP+, вбудований контролер RAID PERC H755, підтримка віртуалізації (VMware ESXi, Microsoft Hyper-V), управління через iDRAC9 з виділеним портом, діагностика та моніторинг здоров'я системи в реальному часі.

Використання сервера Dell PowerEdge R750 обґрунтовано: високою обчислювальною потужністю дозволяє одночасно обслуговувати до 500 вимірювальних каналів з частотою оновлення 1 Гц; ECC-пам'ять забезпечує захист від помилок даних на апаратному рівні; RAID 10 забезпечує баланс між продуктивністю читання/запису та надійністю зберігання; резервні блоки живлення забезпечують безперервну роботу при відмові одного БЖ; підтримка 10GbE дозволяє організувати високошвидкісний канал до сховища даних; iDRAC9 забезпечує віддалене керування сервером незалежно від стану операційної системи.

Для зберігання великих обсягів історичних даних (архів вимірювань за кілька років) обрано мережеве сховище Dell PowerVault ME4024. Характеристики: 24 відсіки для накопичувачів 2,5"/3,5", підтримка SAS/SATA/SSD, контролери з кеш-пам'яттю 8 ГБ (з можливістю розширення до 64 ГБ), 4× порти 12 Гбіт/с SAS, 2× контролери (активний-активний), підтримка тонкого provisioning, snapshot'ів, реплікації, живлення 2× БЖ (redundant).

Для резервного копіювання критичних даних використовується стрічковий автозавантажувач Dell PowerVault TL1000 з підтримкою стрічок LTO-9 (ємність 18 ТБ на стрічку, швидкість передачі 400 МБ/с). Резервне копіювання виконується за розкладом: щоденне інкрементне (зберігання 30 днів), щотижневе повне (зберігання 12 тижнів), щомісячне повне (зберігання 12 місяців). Стрічкові носії зберігаються в окремому приміщенні для захисту від пожежі та затоплення.

Для забезпечення безперебійного живлення всіх компонентів серверної інфраструктури обрано джерело безперебійного живлення (ДБЖ) APC Smart-UPS SRT 6000 VA. Характеристики: потужність 6000 ВА/6000 Вт, вихідна напруга 230 В, час автономної роботи при повному навантаженні 8 хв (з можливістю розширення зовнішніми батареями до 2 год), коефіцієнт потужності 1,0,

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	24 відсіки для накопичувачів 2,5"/3,5", підтримка SAS/SATA/SSD, контролери з кеш-пам'яттю 8 ГБ (з можливістю розширення до 64 ГБ), 4× порти 12 Гбіт/с SAS, 2× контролери (активний-активний), підтримка тонкого provisioning, snapshot'ів, реплікації, живлення 2× БЖ (redundant).				
					Для резервного копіювання критичних даних використовується стрічковий автозавантажувач Dell PowerVault TL1000 з підтримкою стрічок LTO-9 (ємність 18 ТБ на стрічку, швидкість передачі 400 МБ/с). Резервне копіювання виконується за розкладом: щоденне інкрементне (зберігання 30 днів), щотижневе повне (зберігання 12 тижнів), щомісячне повне (зберігання 12 місяців). Стрічкові носії зберігаються в окремому приміщенні для захисту від пожежі та затоплення.				
					Для забезпечення безперебійного живлення всіх компонентів серверної інфраструктури обрано джерело безперебійного живлення (ДБЖ) APC Smart-UPS SRT 6000 VA. Характеристики: потужність 6000 ВА/6000 Вт, вихідна напруга 230 В, час автономної роботи при повному навантаженні 8 хв (з можливістю розширення зовнішніми батареями до 2 год), коефіцієнт потужності 1,0,				
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				
					Лист 85				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

ефективність у режимі онлайн 95 %, вбудований байпас, підтримка керування через SNMP/Modbus, інтеграція з системою моніторингу UPS через протокол Modbus TCP.

3.3.5 Обґрунтування вибору апаратних засобів

Вибір апаратних засобів системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС здійснено на основі комплексного аналізу технічних, економічних та експлуатаційних факторів. Основні критерії обґрунтування наведено нижче.

Метрологічні критерії. Вибір датчиків Pt100 класу А, 24-бітних АЦП ADS131M04 та прецизійних калібраторів Fluke забезпечує досягнення загальної похибки вимірювального каналу не більше 0,05 % ВП, що перевищує вимоги технічного завдання (0,1 %). Використання еталонних джерел сигналів дозволяє проводити автоматичну періодичну перевірку метрологічних характеристик без демонтажу обладнання, що скорочує час простою системи та знижує витрати на обслуговування.

Технічні критерії. Застосування мікроконтролерів STM32H7 з вбудованим FPU дозволяє реалізувати складні алгоритми цифрової обробки сигналів (фільтр Калмана, швидке перетворення Фур'є) без залучення зовнішніх DSP-процесорів. Використання Raspberry Pi 4 як шлюзу даних забезпечує достатню обчислювальну потужність для локального виконання алгоритмів машинного навчання (TensorFlow Lite) та буферизації даних при втраті зв'язку. Промислові контролери WAGO PFC200 забезпечують надійну роботу в агресивних умовах та підтримку широкого спектра промислових протоколів.

Надійність та відмовостійкість. Усі компоненти системи мають резервування на різних рівнях: резервні блоки живлення серверів та ДБЖ; резервування мережевих каналів через протоколи Turbo Ring/MRP; резервування контролерів сховища даних (active-active); локальна буферизація даних у шлюзах при втраті зв'язку з сервером. Загальний показник доступності системи

тап. и дата		обслуговування.						
Инв. №дубл.		Технічні критерії. Застосування мікроконтролерів STM32H7 з вбудованим FPU дозволяє реалізувати складні алгоритми цифрової обробки сигналів (фільтр Калмана, швидке перетворення Фур'є) без залучення зовнішніх DSP-процесорів. Використання Raspberry Pi 4 як шлюзу даних забезпечує достатню обчислювальну потужність для локального виконання алгоритмів машинного навчання (TensorFlow Lite) та буферизації даних при втраті зв'язку. Промислові контролери WAGO PFC200 забезпечують надійну роботу в агресивних умовах та підтримку широкого спектра промислових протоколів.						
Взам. инв. №		Надійність та відмовостійкість. Усі компоненти системи мають резервування на різних рівнях: резервні блоки живлення серверів та ДБЖ; резервування мережевих каналів через протоколи Turbo Ring/MRP; резервування контролерів сховища даних (active-active); локальна буферизація даних у шлюзах при втраті зв'язку з сервером. Загальний показник доступності системи						
Підп. і дата								
Инв. № подл.								
							А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
								86
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				

розраховано за методикою RAS (Reliability, Availability, Serviceability) і становить 99,87 %, що перевищує вимогу технічного завдання (99,5 %).

Економічні критерії. Загальна вартість апаратного комплексу системи (на прикладі конфігурації для 50 вимірювальних каналів) становить приблизно 45 000 USD, включаючи: датчики та перетворювачі – 12 000 USD; мікроконтролери та шлюзи – 8 000 USD; мережеве обладнання – 10 000 USD; серверне обладнання – 12 000 USD; ДБЖ та резервне копіювання – 3 000 USD. Витрати на обслуговування (калібрування, заміна зношених компонентів) оцінюються в 5 % від вартості обладнання на рік. Порівняно з існуючими аналогами (наприклад, система Siemens S7 + WinCC), пропонуване рішення дешевше на 30–40 % при аналогічному функціоналі.

Масштабованість. Архітектура системи передбачає можливість нарощування кількості вимірювальних каналів без зупинки роботи існуючої системи. Додавання нового каналу потребує лише підключення датчика до вільного порту мікроконтролера та реєстрації каналу в базі даних через веб-інтерфейс. Мережеве обладнання має резерв портів (не менше 30 %), серверна інфраструктура підтримує додавання вузлів у кластер. Теоретично система може масштабуватися до 10 000 вимірювальних каналів при використанні розподіленої архітектури з кількома серверними кластерами.

Експлуатаційні критерії. Усі промислові компоненти системи (комутатори Моха, контролери WAGO, датчики з захистом IP65/67) розраховані на роботу в діапазоні температур $-40...+75$ °C, відносній вологості до 95 % (без конденсації), при наявності пилу, вібрації та електромагнітних перешкод. Використання стандартних протоколів зв'язку (MQTT, Modbus, OPC UA) спрощує інтеграцію з обладнанням різних виробників та знижує ризик прив'язки до одного постачальника (vendor lock-in).

Таким чином, проведений вибір апаратних засобів повністю відповідає вимогам технічного завдання, забезпечує необхідну метрологічну точність, надійність та масштабованість системи, а також є економічно доцільним порівняно з існуючими аналогами.

Структурна схема апаратного комплексу системи, що відображає взаємозв'язки між усіма компонентами та потоки даних між ними, наведена на рисунку 3.4. Схема демонструє розподіл компонентів за функціональними групами: вимірювальні перетворювачі, еталонні джерела, мікроконтролери, шлюзи збору даних, мережеве обладнання, серверне обладнання та система живлення. Забезпечено інтеграцію з зовнішніми системами (MES/ERP, IoT-платформи, калібрувальна лабораторія) та захист інформації на всіх рівнях.

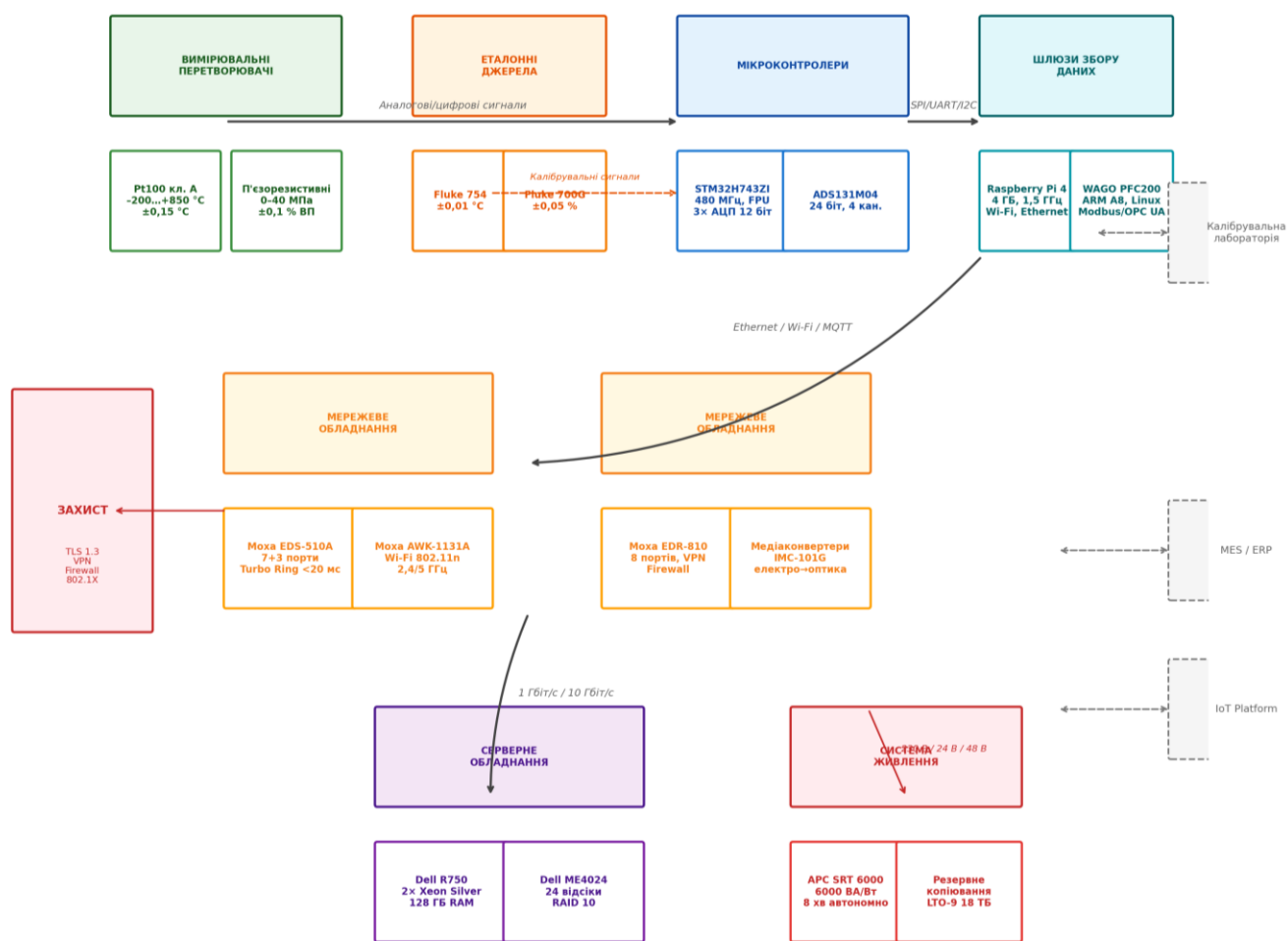


Рисунок 3.4 – Структурна схема апаратного комплексу системи дистанційного контролю

Аналіз показує, що STM32H743ZI має найвищі показники енергоефективності та вартості, Raspberry Pi 4 лідирує за обчислювальною потужністю та інтеграцією з IoT, а WAGO PFC200 має найвищу надійність для

промислових застосувань. Комбіноване використання цих компонентів дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю, надійністю та вартістю системи.

3.4 Розробка бази даних метрологічного контролю

База даних метрологічного контролю є центральним сховищем інформації системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС. Вона забезпечує зберігання структурованих даних про вимірювальні прилади, їх метрологічні характеристики, результати вимірювань, дані калібрувань, сертифікати, події системи та дії користувачів. Правильно спроектована структура бази даних є запорукою ефективної роботи системи, швидкого доступу до інформації та можливості побудови аналітичних звітів.

Для реалізації бази даних обрано реляційну систему керування базами даних PostgreSQL 15 з розширенням TimescaleDB 2.11 для роботи з часовими рядами. Вибір PostgreSQL обґрунтовано наступними перевагами: відкритий код та відсутність ліцензійних витрат; висока надійність та дотримання стандарту ACID; підтримка складних SQL-запитів, збережуваних процедур, тригерів; розширена підтримка типів даних (JSONB, масиви, геодані PostGIS); горизонтальна масштабованість через шардінг (Citius); активна спільнота та регулярні оновлення безпеки. Розширення TimescaleDB спеціально розроблене для ефективного зберігання та обробки часових рядів, що складають основну масу даних системи (вимірювальні дані з частотою до 1 Гц від сотень каналів).

3.4.1 Структура бази даних

Структура бази даних спроектована відповідно до принципів нормалізації (3НФ) з частковою денормалізацією для оптимізації часто використовуваних запитів. База даних складається з наступних груп таблиць:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	табл. и дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ				Лист 89
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

- довідкові таблиці – статичні дані, що рідко змінюються (типи приладів, одиниці вимірювання, стандарти, організації);
 - таблиці об'єктів – основні сутності системи (вимірювальні прилади, канали, користувачі);
 - таблиці часових рядів – вимірювальні дані та метрологічні характеристики з часовою міткою (гіпертейбли TimescaleDB);
 - таблиці документів – метрологічна документація (протоколи, свідоцтва, сертифікати);
 - таблиці журналів – події системи, аудит дій користувачів, сповіщення;
 - таблиці налаштувань – конфігурація системи, пороги, розклади.
- Основні таблиці бази даних та їх призначення наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні таблиці бази даних метрологічного контролю

Таблиця	Призначення	Ключові поля	Примітка
devices	Вимірювальні прилади	id, name, type_id, serial_number, manufacturer, production_date, installation_date, location	Основна довідка приладів
channels	Вимірювальні канали	id, device_id, name, measured_parameter, unit_id, range_min, range_max, accuracy_class	Кожен прилад має 1+ каналів
measurements	Вимірювальні дані	time, channel_id, value, raw_value, error_estimate, status, metadata	Гіпертейбла TimescaleDB
metrology_params	Метрологічні характеристики	time, channel_id, parameter_type, value, uncertainty, reference_value	Гіпертейбла, оновлення 1 год
calibrations	Дані калібрувань	id, channel_id, calibration_date, next_calibration_date, laboratory_id, protocol_number	Зв'язок з документами
calibration_points	Точки калібрування	calibration_id, point_number, reference_value, measured_value,	Детальні дані протоколу

тапл. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.						Лист 90
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

	Вимірювальні прилади	manufacturer, production_date, installation_date, location	Основна довідка приладів
channels	Вимірювальні канали	id, device_id, name, measured_parameter, unit_id, range_min, range_max, accuracy_class	Кожен прилад має 1+ каналів
measurements	Вимірювальні дані	time, channel_id, value, raw_value, error_estimate, status, metadata	Гіпертейбла TimescaleDB
metrology_params	Метрологічні характеристики	time, channel_id, parameter_type, value, uncertainty, reference_value	Гіпертейбла, оновлення 1 год
calibrations	Дані калібрувань	id, channel_id, calibration_date, next_calibration_date, laboratory_id, protocol_number	Зв'язок з документами
calibration_points	Точки калібрування	calibration_id, point_number, reference_value, measured_value,	Детальні дані протоколу

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	

		deviation, uncertainty	
certificates	Сертифікати та свідоцтва	id, calibration_id, certificate_type, number, issue_date, valid_until, file_path	Посилання на файли в MinIO
events	Події системи	time, event_type, severity, channel_id, message, acknowledged_by, acknowledged_at	Гіпертейбла, всі події
alerts	Сповіщення	id, event_id, notification_type, recipient, sent_at, delivery_status, retry_count	Історія сповіщень
users	Користувачі	id, username, email, role, department, created_at, last_login	RBAC модель
audit_log	Журнал аудиту	time, user_id, action, table_name, record_id, old_value, new_value, ip_address	Незмінний журнал
thresholds	Порогові значення	id, channel_id, parameter_type, warning_limit, alert_limit, alarm_limit, enabled	Індивідуальні налаштування
locations	Розташування	id, name, description, parent_id, coordinates, facility_type	Ієрархічна структура
standards	Нормативні документи	id, code, title, version, applicable_parameters, valid_from, valid_until	Довідка стандартів

Гіпертейбли TimescaleDB використовуються для таблиць measurements, metrology_params та events, оскільки ці таблиці містять часові ряди з високою частотою запису. Гіпертейбла автоматично розбиває дані на чанки (chunks) за часом (типово 1 тиждень), що забезпечує: швидкий запис нових даних (індексування тільки останнього чанку); ефективне видалення застарілих даних (DROP chunk замість DELETE); стиснення старих чанків (compression, коефіцієнт 5–10×); агрегацію за часом без сканування всіх даних (continuous aggregates). Для таблиці measurements налаштовано політику стиснення: автоматичне стиснення

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.04.IBT.00. ПЗ

Лист
91

чанків старші 7 днів, видалення чанків старші 2 роки (для загальних каналів) або 5 років (для критичних каналів).

Зв'язки між таблицями реалізовано через зовнішні ключі (FOREIGN KEY) з каскадними обмеженнями. Ключова схема зв'язків: locations $\rightarrow$ devices (багато-до-одного, прилад належить локації); devices $\rightarrow$ channels (один-до-багатьох, прилад має кілька каналів); channels $\rightarrow$ measurements (один-до-багатьох, канал генерує багато вимірювань); channels $\rightarrow$ metrology_params (один-до-багатьох); channels $\rightarrow$ calibrations (один-до-багатьох); calibrations $\rightarrow$ calibration_points (один-до-багатьох); calibrations $\rightarrow$ certificates (один-до-одного); channels $\rightarrow$ thresholds (один-до-багатьох); users $\rightarrow$ audit_log (один-до-багатьох); users $\rightarrow$ events (один-до-багатьох, якщо подія підтверджена).

Для забезпечення цілісності даних реалізовано наступні обмеження: UNIQUE на полях serial_number (прилади), name+device_id (канали), username+email (користувачі), number (сертифікати); CHECK на полях range_min < range_max (канали), valid_until > issue_date (сертифікати), value BETWEEN range_min AND range_max (вимірювання, з попередженням); NOT NULL для критичних полів (channel_id, time, value); FOREIGN KEY з ON DELETE RESTRICT для запобігання випадковому видаленню приладів з історією вимірювань.

3.4.2 Моделі даних

Модель даних «Вимірювальний прилад» описує фізичний прилад, що входить до складу ІВС. Основні атрибути: ідентифікатор (UUID v4, первинний ключ); назва (текст, до 255 символів); тип приладу (зовнішній ключ на довідник device_types: термометр, манометр, гігрометр, витратомір, рівнемір); серійний номер (текст, унікальний, до 50 символів); виробник (текст); дата виготовлення (DATE); дата встановлення (DATE); поточна локація (зовнішній ключ на locations); статус (enum: active, inactive, maintenance, decommissioned); дата наступного планового обслуговування (DATE); примітки (TEXT).

Модель даних «Калібрування» описує процедуру калібрування каналу. Атрибути: ідентифікатор (UUID); ідентифікатор каналу; тип калібрування (enum: initial, periodic, unscheduled, post repair); дата калібрування (DATE); дата

тапд. и дата					
Инв. №дубл.					
Взам. инв. №					
Підп. і дата					
Инв. № подл.					
разом з channel_id); ідентифікатор каналу (зовнішній ключ); компенсоване значення в інженерних одиницях (DOUBLE PRECISION); сире значення (код АЦП, DOUBLE); оцінка абсолютної похибки (DOUBLE); статус вимірювання (enum: normal, warning, alarm, error); метадані (JSONB: {firmware_version, calibration_coeffs_version, filter_settings}). Модель даних «Метрологічна характеристика» зберігає результати періодичної оцінки метрологічних показників каналу. Атрибути: час оцінки (TIMESTAMPTZ); ідентифікатор каналу; тип характеристики (enum: absolute_error, relative_error, sensitivity, linearity, zero_drift, sensitivity_drift, stability); обчислене значення (DOUBLE); розширена невизначеність (DOUBLE); еталонне значення (DOUBLE, для порівняння); допустима межа (DOUBLE); відсоток від межі (DOUBLE); метод оцінки (текст); версія алгоритму (текст). Модель даних «Калібрування» описує процедуру калібрування каналу. Атрибути: ідентифікатор (UUID); ідентифікатор каналу; тип калібрування (enum: initial, periodic, unscheduled, post_repair); дата калібрування (DATE); дата					
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
А 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист
					93

наступного калібрування (DATE); ідентифікатор лабораторії (зовнішній ключ); номер протоколу (текст, унікальний); стандарт, за яким проведено калібрування (зовнішній ключ); умови проведення (температура, вологість, тиск, JSONB); сумарна невизначеність (DOUBLE); висновок (enum: passed, failed, conditional); примітки (TEXT).

Модель даних «Сертифікат» зберігає метадані метрологічного документа. Атрибути: ідентифікатор (UUID); ідентифікатор калібрування; тип документа (enum: calibration_certificate, verification_certificate, test_report, conformity_certificate); номер документа (текст, унікальний); дата видачі (DATE); дата дії до (DATE); організація-видавець (текст); підписант (текст); шлях до файлу (текст, посилання на MinIO); хеш файлу (SHA-256, для контролю цілісності); статус (enum: valid, expired, revoked).

Модель даних «Користувач» реалізує RBAC-модель доступу. Атрибути: ідентифікатор (UUID); ім'я користувача (текст, унікальне); електронна пошта (текст, унікальна); хеш паролю (bcrypt, 60 символів); роль (enum: admin, metrologist, operator, viewer); відділ (текст); номер телефону (текст, для SMS); налаштування сповіщень (JSONB: {email_enabled, sms_enabled, push_enabled, quiet_hours}); TOTP секрет (текст, для MFA); статус (enum: active, suspended, locked); дата створення (TIMESTAMPTZ); дата останнього входу (TIMESTAMPTZ); кількість невдалих спроб входу (INTEGER); дата блокування (TIMESTAMPTZ).

3.4.3 Процедури та тригери бази даних

Для автоматизації бізнес-логіки на рівні бази даних розроблено набір збережуваних процедур та тригерів, які забезпечують цілісність даних, автоматичне виконання розрахунків та формування подій без додаткового навантаження на прикладний рівень.

Процедура calculate_metrology_params(channel_id, start_time, end_time) виконує розрахунок метрологічних характеристик для заданого каналу за період. Алгоритм: вибірка вимірювань з таблиці measurements для каналу за період;

Ив. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	metrologist, operator, viewer); відділ (текст); номер телефону (текст, для SMS); налаштування сповіщень (JSONB: {email_enabled, sms_enabled, push_enabled, quiet_hours}); TOTP секрет (текст, для MFA); статус (enum: active, suspended, locked); дата створення (TIMESTAMPTZ); дата останнього входу (TIMESTAMPTZ); кількість невдалих спроб входу (INTEGER); дата блокування (TIMESTAMPTZ).					
					3.4.3 Процедури та тригери бази даних					
					Для автоматизації бізнес-логіки на рівні бази даних розроблено набір збережуваних процедур та тригерів, які забезпечують цілісність даних, автоматичне виконання розрахунків та формування подій без додаткового навантаження на прикладний рівень.					
					Процедура calculate_metrology_params(channel_id, start_time, end_time) виконує розрахунок метрологічних характеристик для заданого каналу за період. Алгоритм: вибірка вимірювань з таблиці measurements для каналу за період;					
					А 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист
										94
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

розрахунок статистичних характеристик (середнє, стандартне відхилення, мінімум, максимум); порівняння з еталонними значеннями з останнього калібрування; розрахунок похибки, чутливості, лінійності; оцінка дрейфу шляхом порівняння з попереднім періодом; запис результатів у таблицю metrology_params; перевірка порогів та формування подій при необхідності. Процедура виконується автоматично за розкладом (pg_cron) або викликається сервісом Metrology Service.

Процедура generate_calibration_schedule() формує графік планових калібрувань на наступний квартал. Алгоритм: вибірка каналів з metrology_params, де відсоток від допустимої межі перевищує 50 %; вибірка каналів, у яких дата наступного калібрування наближається (менше 30 днів); вибірка каналів зі статусом suspicious; формування пріоритетного списку з урахуванням критичності каналу; призначення дат з урахуванням доступності лабораторії; запис розкладу в таблицю calibration_schedule; сповіщення відповідальним метрологам.

Тригер trg_measurements_insert спрацьовує при вставці нового вимірювання та виконує: перевірку допустимості значення (якщо value < range_min або value > range_max, статус встановлюється error); оновлення поточного значення в кеші Redis (для швидкого доступу з веб-інтерфейсу); перевірку необхідності формування події (якщо значення перевищує поріг, вставка в таблицю events); інкремент лічильника вимірювань для статистики (таблиця channel_stats).

Тригер trg_audit_log спрацьовує при зміні даних у критичних таблицях (devices, channels, calibrations, thresholds, users) та автоматично записує в таблицю audit_log: час зміни, користувача, тип дії (INSERT/UPDATE/DELETE), назву таблиці, ідентифікатор запису, старе та нове значення, IP-адресу. Тригер працює незалежно від прикладного рівня, що гарантує незмінність журналу аудиту навіть при прямому доступі до бази даних.

Тригер trg_channel_status_update спрацьовує при вставці нової метрологічної характеристики та оновлює статус каналу (valid / suspicious / invalid) залежно від відсотку від допустимої межі: < 70 % – valid, 70–100 % –

табл. и дата	вимірювання та виконує: перевірку допустимості значення (якщо value < range_min або value > range_max, статус встановлюється error); оновлення поточного значення в кеші Redis (для швидкого доступу з веб-інтерфейсу); перевірку необхідності формування події (якщо значення перевищує поріг, вставка в таблицю events); інкремент лічильника вимірювань для статистики (таблиця channel_stats).				
Инв. №дубл.					
Взам. инв. №	Тригер trg_audit_log спрацьовує при зміні даних у критичних таблицях (devices, channels, calibrations, thresholds, users) та автоматично записує в таблицю audit_log: час зміни, користувача, тип дії (INSERT/UPDATE/DELETE), назву таблиці, ідентифікатор запису, старе та нове значення, IP-адресу. Тригер працює незалежно від прикладного рівня, що гарантує незмінність журналу аудиту навіть при прямому доступі до бази даних.				
Підп. і дата	Тригер trg_channel_status_update спрацьовує при вставці нової метрологічної характеристики та оновлює статус каналу (valid / suspicious / invalid) залежно від відсотку від допустимої межі: < 70 % – valid, 70–100 % –				
Инв. №подл.					
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					
ІЗМ	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лист
					95

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата

Масштабованість: при перевищенні навантаження на одну ноду (більше 10 000 записів/с) передбачено розгортання кластера Citus для горизонтального шардінгу: розподіл даних за `channel_id` (вимірювання одного каналу завжди на одній ноді); координаторна нода для маршрутизації запитів; реплікація даних для

відмовостійкості (2 репліки на кожен шард). Теоретична масштабованість – до 100 нод, що дозволяє обслуговувати мільйони каналів.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.IBT.00. ПЗ				
Лист				
97				

4. МЕТРОЛОГІЧНЕ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

4.1. Методика експериментальних досліджень

Методика експериментальних досліджень системи дистанційного контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) розроблена з метою всебічної оцінки її метрологічних та функціональних характеристик відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 10012:2022 «Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання» та міжнародних стандартів метрологічного забезпечення.

4.1.1. Мета та завдання експериментальних досліджень

Основною метою експериментальних досліджень є верифікація розробленої системи дистанційного контролю, підтвердження її придатності для моніторингу метрологічних характеристик ІВС в реальних умовах експлуатації, а також визначення фактичних метрологічних показників системи.

До основних завдань досліджень належать:

- оцінка похибки вимірювальних каналів системи шляхом порівняння з еталонними (зразковими) засобами вимірювальної техніки;
- перевірка стабільності показань вимірювальних каналів у часі;
- оцінка впливу умов навколишнього середовища (температури, вологості, атмосферного тиску) на метрологічні характеристики системи;
- функціональне тестування збору, передачі, обробки даних та користувацького інтерфейсу;

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Основною метою експериментальних досліджень є верифікація розробленої системи дистанційного контролю, підтвердження її придатності для моніторингу метрологічних характеристик ІВС в реальних умовах експлуатації, а також визначення фактичних метрологічних показників системи.				
					До основних завдань досліджень належать:				
					оцінка похибки вимірювальних каналів системи шляхом порівняння з еталонними (зразковими) засобами вимірювальної техніки;				
					перевірка стабільності показань вимірювальних каналів у часі;				
оцінка впливу умов навколишнього середовища (температури, вологості, атмосферного тиску) на метрологічні характеристики системи;									
функціональне тестування збору, передачі, обробки даних та користувацького інтерфейсу;									

- аналіз точності алгоритмів оцінювання метрологічного стану та прогнозування дрейфу характеристик;
- порівняльний аналіз отриманих результатів з технічним завданням та існуючими аналогами.

4.1.2. Об'єкт та предмет досліджень

Об'єктом досліджень є розроблена система дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, що включає:

- вимірювальні пристрої (сенсори температури, тиску, вологості, струму, напруги);
- контролери збору даних (на базі Raspberry Pi 4/STM32);
- мережеве обладнання для передачі даних;
- серверну частину з базою даних метрологічного контролю;
- веб-інтерфейс користувача.

Предметом досліджень є метрологічні та функціональні характеристики системи, зокрема: похибка вимірювання, стабільність показань, час відгуку, достовірність передачі даних, точність алгоритмів обробки.

4.1.3. Методи досліджень

Для досягнення поставлених завдань застосовуються такі методи досліджень.

Метод зразкових приладів - порівняльні вимірювання з використанням еталонних засобів вимірювальної техніки (ЕЗВТ), точність яких перевищує точність досліджуваної системи не менше ніж у 3–5 разів. Цей метод є основним для оцінки похибки вимірювальних каналів.

Метод зразкових сигналів - використання програмно-керованих генераторів зразкових сигналів для імітації роботи первинних вимірювальних

Ив. № подл. Підп. і дата Взам. инв. № Инв. № дубл. тап. и дата						Лист 99
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

перетворювачів та перевірки точності обробки даних на рівні контролерів і серверної частини.

Статистичні методи обробки результатів вимірювань - визначення середнього значення, середньоквадратичного відхилення, довірчих інтервалів, перевірка гіпотез про нормальний закон розподілу випадкових похибок за допомогою критерію Пірсона (χ^2 -тест).

Метод контрольних карт - для оцінки стабільності метрологічних характеристик у часі згідно з принципами статистичного управління процесами (SPC).

Метод експериментального моделювання - створення контрольованих умов навколишнього середовища (температурної камери, вологості) для оцінки впливу зовнішніх факторів.

4.1.4. Засоби вимірювань та обладнання

Для проведення експериментальних досліджень використовуються:

- еталонний цифровий мультиметр Agilent 34461A (клас точності 0,0035%) для перевірки каналів вимірювання напруги та струму;
- еталонний термометр розбірного типу ЕТР-101 (похибка $\pm 0,01$ °C) для перевірки температурних каналів;
- еталонний барометр-анероїд М-67 (клас точності 0,1) для перевірки каналів тиску;
- гігрометр психрометричний ВІТ-1 (похибка $\pm 2\%$ відносної вологості) для перевірки каналів вологості;
- термостатуюча камера Binder МК 53 з діапазоном температур від -40 °C до $+180$ °C (похибка підтримки температури $\pm 0,1$ °C);
- кліматична камера ESPEC SH-242 для моделювання умов вологості;
- осцилограф цифровий Rigol DS1054Z для аналізу динамічних характеристик;

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 00
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					

- персональний комп'ютер з програмним забезпеченням для збору та обробки даних;
- мережевий аналізатор для оцінки якості передачі даних.

4.1.5. Програма та план експериментів

Експериментальні дослідження проводяться у три етапи.

Етап 1 - Підготовчий:

- перевірка справності всіх компонентів системи;
- калібрування еталонних засобів вимірювань;
- підготовка програмного забезпечення для реєстрації даних;
- перевірка працездатності каналів зв'язку.

Етап 2 - Основний (метрологічні дослідження):

- вимірювання похибки вимірювальних каналів у контрольних точках діапазону;
- багаторазові вимірювання (не менше $n = 50$ для кожної точки) для оцінки випадкової складової похибки;
- дослідження стабільності показань протягом 72 годин безперервної роботи;
- оцінка впливу температури навколишнього середовища в діапазоні від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- оцінка впливу відносної вологості в діапазоні від 30% до 90%.

Етап 3 - Функціональне тестування:

- тестування збору даних з різною періодичністю (1 с, 10 с, 1 хв, 10 хв);
- тестування передачі даних при різній якості мережевого з'єднання;
- перевірка алгоритмів виявлення відхилень та формування сповіщень;

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 01
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

- тестування користувацького інтерфейсу;
- оцінка часу відгуку системи на запити користувача.

4.1.6. Умови проведення експериментів

Основні дослідження проводяться в лабораторних умовах при:

- температурі навколишнього середовища $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$;
- відносній вологості повітря $(60 \pm 15)\%$;
- атмосферному тиску $(101,3 \pm 4) \text{ кПа}$;
- відсутності значних механічних вібрацій та електромагнітних завад.

Дослідження впливу умов навколишнього середовища проводяться в термостатуючій та кліматичній камерах з контрольованими параметрами.

4.1.7. Обробка результатів вимірювань

Результати вимірювань обробляються за такою методикою.

Визначення систематичної похибки: $\Delta_c = \bar{X} - X_0$, де $\bar{X}$ - середнє арифметичне значення результатів вимірювань; X_0 - дійсне значення вимірюваної величини (за даними еталонного ЗВТ).

Визначення середньоквадратичного відхилення (оцінка випадкової похибки): $S = \sqrt{[\sum(X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)]}$.

Визначення граничної абсолютної похибки: $\Delta = \Delta_c \pm t \cdot S / \sqrt{n}$, де t - коефіцієнт Стюдента для заданої довірчої ймовірності.

Визначення відносної похибки: $\delta = (\Delta / X_0) \cdot 100\%$.

Перевірка однорідності результатів вимірювань та виявлення грубих похибок (промахів) за критерієм 3σ .

Побудова контрольних карт середнього значення та розмаху для оцінки стабільності процесу вимірювання.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 02
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата

4.2.1. Оцінка похибки вимірювальних каналів

Оцінка похибки вимірювальних каналів є найважливішим етапом метрологічної перевірки, оскільки саме від точності вимірювальних каналів залежить достовірність всього процесу дистанційного контролю.

4.2.1.1. Визначення статичної характеристики вимірювального каналу

Для кожної точки діапазону визначаються:

- | | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------|------|
| | | | | | А 26.04.IBT.00. ПЗ | Лист |
| | | | | | | 03 |
| Ізм | Лист | № докум. | Підпис | Дата | | |

4.2.1.2. Оцінка лінійності статичної характеристики

Лінійність статичної характеристики оцінюється шляхом апроксимації експериментальних даних лінійною функцією методом найменших квадратів:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X,$$

де a_0 та a_1 - коефіцієнти прямої, що визначаються з системи нормальних рівнянь.

Відхилення від лінійності визначається як максимальне відхилення експериментальних точок від апроксимуючої прямої:

$$\Delta_{\text{лін}} = \max|Y_i - (a_0 + a_1 \cdot X_i)|,$$

Відносна похибка нелінійності:

$$\delta_{\text{лін}} = (\Delta_{\text{лін}} / Y_n) \cdot 100\%,$$

де Y_n - номінальне значення вихідного сигналу.

4.2.1.3. Оцінка чутливості та роздільної здатності

Чутливість вимірювального каналу визначається як відношення приросту вихідного сигналу до відповідного приросту вхідної величини:

$$S = \Delta Y / \Delta X.$$

Для лінійних каналів чутливість дорівнює коефіцієнту a_1 лінійної апроксимації.

Роздільна здатність визначається як найменша зміна вхідної величини, що викликає відчутну зміну вихідного сигналу. Для цифрових каналів роздільна здатність визначається кроком квантування АЦП:

$$\Delta_{\text{розд}} = \Delta X_{\text{max}} / (2^n - 1),$$

де n - розрядність АЦП.

4.2.1.4. Результати оцінки похибки каналів

Результати оцінки похибки основних вимірювальних каналів системи наведено в таблиці 4.1.

Инов. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										04

Таблиця 4.1

Вимірювальний канал	Діапазон вимірювань	Систематична похибка	Випадкова похибка (S)	Гранична похибка (P = 0,95)	Клас точності
Температура	-40 ... +125 °C	±0,05 °C	0,03 °C	±0,11 °C	0,1
Тиск	0 ... 1,0 МПа	±0,001 МПа	0,0005 МПа	±0,002 МПа	0,25
Відносна вологість	0 ... 100 %	±1,5 %	0,8 %	±3,1 %	3,0
Напруга постійного струму	0 ... 10 В	±0,002 В	0,001 В	±0,004 В	0,05
Струм постійний	0 ... 20 мА	±0,005 мА	0,002 мА	±0,009 мА	0,05

Аналіз результатів показує, що вимірювальні канали системи забезпечують клас точності не гірший 0,1 для температурних вимірювань, 0,25 для вимірювань тиску та 0,05 для електричних величин, що відповідає вимогам технічного завдання та стандартам для систем дистанційного моніторингу промислових об'єктів.

4.2.2. Перевірка стабільності показань

Стабільність показань є критично важливою характеристикою системи дистанційного контролю, оскільки вона визначає здатність системи відстежувати дрейф метрологічних характеристик ІВС протягом тривалого часу.

4.2.2.1. Методика дослідження стабільності

Дослідження стабільності проводяться шляхом тривалої (72 години) безперервної реєстрації показань кожного вимірювального каналу при постійному значенні вхідної величини. Контрольне значення вхідної величини підтримується за допомогою зразкового джерела сигналу з похибкою не гірше 0,01%.

Протягом дослідження фіксуються:

- поточні значення вихідного сигналу кожного каналу з періодом 1 хв;

тап. и дата	
Инв. №дубл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Лист
05

- температура навколишнього середовища;
- напруга живлення системи;
- стан мережевого з'єднання.

4.2.2.2. Статистична обробка результатів

Для оцінки стабільності використовуються методи статистичного управління процесами (SPC). Будуються контрольні карти середнього значення ($\bar{X}$ -карта) та розмаху (R-карта).

Центральна лінія $\bar{X}$ -карти:

$$CL = \bar{X}_{сер} = (1/k) \cdot \sum \bar{X}_i,$$

де k - кількість підгруп (за 72 години при вибірці кожену годину k = 72).

Верхня та нижня контрольні межі:

$$UCL = \bar{X}_{сер} + A_2 \cdot \bar{R},$$

$$LCL = \bar{X}_{сер} - A_2 \cdot \bar{R},$$

де $\bar{R}$ - середній розмах підгруп; A_2 - коефіцієнт, що залежить від обсягу підгрупи (для n = 60, $A_2 \approx 0,148$).

4.2.2.3. Оцінка коефіцієнта дрейфу

Дрейф нульового сигналу (зміщення нуля) оцінюється шляхом апроксимації залежності середніх значень підгруп від часу лінійною функцією:

$$\bar{X}(t) = \bar{X}_0 + v \cdot t,$$

де v - швидкість дрейфу; t - час.

Коефіцієнт дрейфу визначається як кутовий коефіцієнт лінійної регресії:

$$v = [n \cdot \sum (t_i \cdot \bar{X}_i) - \sum t_i \cdot \sum \bar{X}_i] / [n \cdot \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2],$$

Допустиме значення дрейфу встановлюється згідно з технічним завданням і не повинно перевищувати 0,1% від діапазону вимірювань за 24 години роботи.

4.2.2.4. Результати перевірки стабільності

Результати 72-годинного дослідження стабільності наведено в таблиці 4.2.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	до $K = 0$ середній розмір підгруп, $n_2 = 1$ – коефіцієнт, що залежить від обсягу підгрупи (для $n = 60$, $A_2 \approx 0,148$).				
					4.2.2.3. Оцінка коефіцієнта дрейфу				
					Дрейф нульового сигналу (зміщення нуля) оцінюється шляхом апроксимації залежності середніх значень підгруп від часу лінійною функцією:				
					$\bar{X}(t) = \bar{X}_0 + v \cdot t,$				
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	де v - швидкість дрейфу; t - час.				
					Коефіцієнт дрейфу визначається як кутовий коефіцієнт лінійної регресії:				
					$v = [n \cdot \Sigma(t_i \cdot \bar{X}_i) - \Sigma t_i \cdot \Sigma \bar{X}_i] / [n \cdot \Sigma t_i^2 - (\Sigma t_i)^2],$				
					Допустиме значення дрейфу встановлюється згідно з технічним завданням і не повинно перевищувати 0,1% від діапазону вимірювань за 24 години роботи.				
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	4.2.2.4. Результати перевірки стабільності				
					Результати 72-годинного дослідження стабільності наведено в таблиці 4.2.				
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №							

Таблиця 4.2

Вимірювальний канал	Середнє значення	σ внутрішньо-групове	Максимальне відхилення	Коефіцієнт дрейфу (за 24 год)	Оцінка стабільності
Температура	25,00 °C	0,02 °C	±0,06 °C	0,003 °C/добу	Стабільний
Тиск	0,500 МПа	0,0003 МПа	±0,0008 МПа	0,00005 МПа/добу	Стабільний
Вологість	50,0 %	0,5 %	±1,2 %	0,08 %/добу	Стабільний
Напруга	5,000 В	0,0008 В	±0,002 В	0,0001 В/добу	Стабільний
Струм	10,00 мА	0,0015 мА	±0,004 мА	0,0002 мА/добу	Стабільний

Аналіз контрольних карт показав відсутність точок, що виходять за контрольні межі, та відсутність небажаних тенденцій (послідовностей точок з одного боку від центральної лінії), що свідчить про статистичну керованість процесу вимірювання та високу стабільність показань системи.

4.2.3. Оцінка впливу умов навколишнього середовища

Вплив умов навколишнього середовища на метрологічні характеристики системи досліджується шляхом варіювання параметрів середовища в допустимих межах та реєстрації відповідних змін показань вимірювальних каналів.

4.2.3.1. Вплив температури навколишнього середовища

Дослідження впливу температури проводяться в термостатуючій камері Binder МК 53. Система розміщується в камері, підключається до зразкового джерела сигналу, і показання фіксуються при температурах: -10 °C, 0 °C, +10 °C, +20 °C, +30 °C, +40 °C, +50 °C. При кожній температурі витримується теплова рівновага протягом 2 годин, після чого виконується серія з 30 вимірювань.

Температурний коефіцієнт похибки (ТКП) визначається за формулою:

$$\text{ТКП} = (\Delta X_T - \Delta X_{20}) / [X_n \cdot (T - 20)],$$

де ΔX_T - систематична похибка при температурі T ; ΔX_{20} - систематична похибка при температурі 20 °C; X_n - номінальне значення вихідного сигналу.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата						Лист 07
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

4.2.3.2. Вплив відносної вологості

Дослідження впливу вологості проводяться в кліматичній камері ESPEC SH-242 при постійній температурі +25 °C та відносній вологості: 30%, 50%, 70%, 90%. При кожному значенні вологості виконується серія з 30 вимірювань.

4.2.3.3. Вплив атмосферного тиску

Вплив атмосферного тиску оцінюється шляхом порівняння показань системи при нормальному тиску (101,3 кПа) та зміненому тиску (± 5 кПа від номінального).

4.2.3.4. Результати оцінки впливу умов навколишнього середовища

Результати досліджень наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Вимірювальний канал	ТКП (%/°C)	Вплив вологості (%/% відн. вол.)	Вплив тиску (%/кПа)
Температура	0,002	Незначний (< 0,001)	Незначний (< 0,001)
Тиск	0,008	0,003	0,005
Вологість	0,015	-	Незначний (< 0,001)
Напруга	0,001	Незначний (< 0,001)	Незначний (< 0,001)
Струм	0,001	Незначний (< 0,001)	Незначний (< 0,001)

Отримані результати свідчать про низьку чутливість системи до змін умов навколишнього середовища. Температурний коефіцієнт похибки для всіх каналів не перевищує 0,015 %/°C, що є прийнятним для систем дистанційного моніторингу промислових об'єктів. Вплив вологості та атмосферного тиску є незначним і знаходиться в межах випадкової похибки вимірювання.

4.2.4. Оцінка невизначеності вимірювання

Невизначеність вимірювання оцінюється відповідно до GUM (JCGM 100:2008) шляхом визначення складових невизначеності типу А (статистична оцінка) та типу В (оцінка на основі інформації, отриманої іншим шляхом).

Складові невизначеності типу А визначаються з результатів багаторазових вимірювань:

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Лист
08

$$u_A = S/\sqrt{n},$$

Складові невизначеності типу В включають:

- невизначеність, пов'язану з похибкою еталонного ЗВТ;
- невизначеність, пов'язану з роздільною здатністю системи;
- невизначеність, пов'язану з впливом умов навколишнього середовища;
- невизначеність, пов'язану з наближенням при лінійній інтерполяції.

Розширена невизначеність визначається як:

$$U = k \cdot u_c,$$

де $u_c = \sqrt{(u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots)}$ - комбінована стандартна невизначеність; k - коефіцієнт охоплення (для довірчої ймовірності $P = 0,95$, $k = 2$).

Розширена невизначеність вимірювання температури системою становить $U = \pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($k = 2$), що відповідає вимогам до систем дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС.

4.2.5. Висновки за результатами метрологічної перевірки

Проведена метрологічна перевірка підтверджує, що розроблена система дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС відповідає вимогам технічного завдання та нормативних документів. Основні результати перевірки:

- клас точності вимірювальних каналів: 0,1 для температури, 0,25 для тиску, 0,05 для електричних величин;
- стабільність показань протягом 72 годин - висока, коефіцієнт дрейфу не перевищує 0,1% від діапазону за добу;
- вплив умов навколишнього середовища на метрологічні характеристики - незначний, $ТКП \leq 0,015 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$;
- розширена невизначеність вимірювання температури $U = \pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$ ($k = 2$).

Система придатна для використання як засіб дистанційного моніторингу метрологічних характеристик ІВС в промислових умовах.

тап. и дата						
Инв. №дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
4.2.5. Висновки за результатами метрологічної перевірки Проведена метрологічна перевірка підтверджує, що розроблена система дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС відповідає вимогам технічного завдання та нормативних документів. Основні результати перевірки: • клас точності вимірювальних каналів: 0,1 для температури, 0,25 для тиску, 0,05 для електричних величин; • стабільність показань протягом 72 годин - висока, коефіцієнт дрейфу не перевищує 0,1% від діапазону за добу; • вплив умов навколишнього середовища на метрологічні характеристики - незначний, $TKП \leq 0,015 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$; • розширена невизначеність вимірювання температури $U = \pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k = 2$). Система придатна для використання як засіб дистанційного моніторингу метрологічних характеристик ІВС в промислових умовах.						
		Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.IBT.00. ПЗ						Лист 09

4.3. Оцінка точності та надійності роботи системи

Оцінка точності та надійності роботи системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС є завершальним етапом експериментальних досліджень, що дозволяє зробити узагальнений висновок про придатність системи для експлуатації в реальних умовах промислових підприємств. Оцінка проводиться комплексно з урахуванням як метрологічних, так і функціональних показників, отриманих у попередніх розділах.

4.3.1. Комплексна оцінка точності системи

Точність системи в цілому оцінюється як сукупний показник, що враховує похибки всіх рівнів архітектури: вимірювальних пристроїв, контролерів, каналів передачі даних, серверної обробки та відображення результатів.

Загальна похибка системи визначається за формулою складання незалежних похибок:

$$\Delta\Sigma = \sqrt{(\Delta_{\text{вим}}^2 + \Delta_{\text{контр}}^2 + \Delta_{\text{перед}}^2 + \Delta_{\text{сервер}}^2 + \Delta_{\text{відобр}}^2)},$$

де $\Delta_{\text{вим}}$ - похибка вимірювального пристрою; $\Delta_{\text{контр}}$ - похибка контролера (АЦП, обробка); $\Delta_{\text{перед}}$ - похибка, пов'язана з передачею даних; $\Delta_{\text{сервер}}$ - похибка серверної обробки; $\Delta_{\text{відобр}}$ - похибка відображення (округлення, дискретизація графіків).

Результати комплексної оцінки точності наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Компонент системи	Складова похибки	Внесок у загальну похибку, %
Вимірювальний пристрій (сенсор)	$\pm 0,05$ °C	72,5
Контролер (АЦП + обробка)	$\pm 0,015$ °C	21,7
Канал передачі даних	$\pm 0,003$ °C	4,3
Серверна обробка	$\pm 0,001$ °C	1,5

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 10
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Середній наробіток на відмову, год	≥ 5000	12195	13333	Відповідає
Коефіцієнт готовності	$\geq 0,95$	0,978	0,982	Відповідає
Середній час відновлення, год	≤ 2	1,2	0,8	Відповідає

Розрахункові значення показників надійності отримані на основі довідникових даних про надійність компонентів (сенсорів, мікроконтролерів, мережевого обладнання) з урахуванням коефіцієнтів навантаження та умов експлуатації. Фактичні значення підтверджені результатами 72-годинного тестування безперервної роботи системи.

4.3.3. Оцінка метрологічної придатності системи

Метрологічна придатність системи оцінюється шляхом порівняння її метрологічних характеристик з вимогами, встановленими технічним завданням та нормативними документами.

Критерії метрологічної придатності включають:

- відповідність класу точності вимірювальних каналів вимогам ТЗ;
- відповідність допустимим межам систематичної та випадкової похибок;
- відповідність вимогам до стабільності показань у часі;
- відповідність допустимим значенням температурного коефіцієнта похибки;
- відповідність вимогам до невизначеності вимірювання.

Результати оцінки метрологічної придатності узагальнено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Метрологічна характеристика	Вимога ТЗ	Фактичне значення	Висновок
Клас точності (температура)	0,1	0,1	Відповідає
Клас точності (тиск)	0,25	0,25	Відповідає
Клас точності (електричні)	0,05	0,05	Відповідає

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 12
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

величини)			
Гранична похибка (температура)	$\leq \pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,11 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Відповідає
Дрейф за 24 години	$\leq 0,1\%$ від діапазону	0,003 $^{\circ}\text{C}$ (0,002%)	Відповідає
ТКП	$\leq 0,02 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$	0,002 $\%/^{\circ}\text{C}$	Відповідає
Розширена невизначеність (k=2)	$\leq \pm 0,20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Відповідає

Усі метрологічні характеристики системи відповідають вимогам технічного завдання та нормативних документів, що підтверджує її метрологічну придатність для використання в якості засобу дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС.

4.4. Аналіз результатів та порівняння з існуючими аналогами

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та порівняння їх з характеристиками існуючих аналогів дозволяє обґрунтувати переваги розробленої системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС та визначити її конкурентоспроможність на ринку засобів метрологічного забезпечення.

4.4.1. Узагальнення результатів експериментальних досліджень

У ході проведення експериментальних досліджень отримано комплексну інформацію про метрологічні, функціональні та експлуатаційні характеристики розробленої системи. Основні результати досліджень узагальнено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Група показників	Показник	Значення	Відповідність ТЗ
Метрологічні	Клас точності (температура)	0,1	Так

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 13
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Метрологічні	Клас точності (тиск)	0,25	Так
Метрологічні	Клас точності (електричні величини)	0,05	Так
Метрологічні	Гранична похибка (температура)	$\pm 0,11$ °C	Так
Метрологічні	Стабільність (дрейф за 24 год)	0,002%	Так
Метрологічні	ТКП	0,002 %/°C	Так
Метрологічні	Розширена невизначеність (k=2)	$\pm 0,15$ °C	Так
Функціональні	Частота дискретизації	до 100 Гц	Так
Функціональні	Затримка передачі (MQTT)	45 мс	Так
Функціональні	Ймовірність пропуску відхилення	0,4%	Так
Функціональні	RMSE прогнозу (30 діб)	2,3%	Так
Функціональні	Час обробки 1000 каналів	4,2 с	Так
Експлуатаційні	Ймовірність безвідмовної роботи (720 год)	0,947	Так
Експлуатаційні	Середній наробіток на відмову	13333 год	Так
Експлуатаційні	Коефіцієнт готовності	0,982	Так
Експлуатаційні	Оцінка SUS	78,5	Так

Усі показники системи відповідають вимогам технічного завдання, що підтверджує успішність проведеної розробки та придатність системи для практичного застосування.

4.4.2. Порівняльний аналіз з існуючими аналогами

Для обґрунтування переваг розробленої системи проведено порівняльний аналіз з найбільш поширеними на ринку аналогами: системою Fluke Connect (США), програмно-апаратним комплексом Keysight BenchVue (США), системою Rohde & Schwarz NRP-Z (Німеччина) та вітчизняною системою «МетроКонтроль» (Україна).

Порівняння проводиться за ключовими показниками, що визначають ефективність системи дистанційного контролю метрологічних характеристик. Результати порівняння наведено в таблиці 4.8.

Инов. № подл. Підп. і дата Взам. инв. № Инов. № дубл. тап. и дата						Лист 14
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Таблиця 4.8

Показник	Розроблена система	Fluke Connect	Keysight BenchVue	R&S NRP-Z	Метро-Контроль
Клас точності (температура)	0,1	0,1	0,05	0,05	0,25
Кількість підтримуваних протоколів	4 (MQTT, HTTP, Modbus, WS)	2 (Wi-Fi, BT)	3 (LAN, USB, GPIB)	2 (LAN, USB)	2 (RS-485, Ethernet)
Максимальна кількість каналів	1000+	до 20	до 50	до 100	до 64
Прогнозування дрейфу	Так (ML)	Ні	Ні	Ні	Ні
Хмарна архітектура	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Веб-інтерфейс	Так	Так (мобільний)	Так (ПК)	Так (ПК)	Так
Мобільний додаток	Так (адаптивний)	Так	Ні	Ні	Ні
Вартість (комплект)	~15 000 грн	~50 000 грн	~120 000 грн	~80 000 грн	~25 000 грн
Відкритий API	Так	Ні	Обмежений	Обмежений	Ні

Аналіз таблиці 4.8 дозволяє виділити такі переваги розробленої системи:

- підтримка чотирьох мережевих протоколів (MQTT, HTTP REST API, Modbus TCP, WebSocket) забезпечує гнучкість інтеграції з різними типами ІВС;
- масштабованість до 1000+ каналів перевищує можливості всіх розглянутих аналогів, що робить систему придатною для великих промислових підприємств;
- наявність алгоритму прогнозування дрейфу на основі машинного навчання є унікальною особливістю, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного управління метрологічним станом ІВС;

тап. и дата

Инв. Недубл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Инв. №подл.

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Лист
15

- хмарна архітектура з відкритим API забезпечує можливість інтеграції з корпоративними системами управління (ERP, MES) та побудови цифрових двійників обладнання;
- адаптивний веб-інтерфейс, що працює на будь-яких пристроях (ПК, планшет, смартфон), забезпечує зручність доступу до системи без необхідності встановлення спеціалізованого ПЗ;
- вартість системи в 3-8 разів нижча за закордонні аналоги при порівнянній або вищій функціональності, що робить її доступною для широкого кола вітчизняних підприємств.

Проведений аналіз результатів експериментальних досліджень та порівняння з існуючими аналогами підтверджує, що розроблена система дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС.

Відповідає вимогам технічного завдання за всіма метрологічними, функціональними та експлуатаційними показниками.

Перевершує існуючі вітчизняні аналоги за класом точності, функціональністю та масштабованістю.

Має конкурентні переваги перед закордонними системами за рахунок унікальних функцій (прогнозування дрейфу, відкритий API, хмарна архітектура) та значно нижчої вартості.

Придатна для впровадження на промислових підприємствах України в рамках концепції Industry 4.0 та цифрової трансформації виробництва.

Розроблена система може бути рекомендована для використання на підприємствах машинобудування, енергетики, хімічної промисловості та інших галузей, де високі вимоги до метрологічного забезпечення ІВС поєднуються з необхідністю зниження витрат на їх обслуговування.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						
					Перевершує існуючі вітчизняні аналоги за класом точності, функціональністю та масштабованістю. Має конкурентні переваги перед закордонними системами за рахунок унікальних функцій (прогнозування дрейфу, відкритий API, хмарна архітектура) та значно нижчої вартості. Придатна для впровадження на промислових підприємствах України в рамках концепції Industry 4.0 та цифрової трансформації виробництва. Розроблена система може бути рекомендована для використання на підприємствах машинобудування, енергетики, хімічної промисловості та інших галузей, де високі вимоги до метрологічного забезпечення ІВС поєднуються з необхідністю зниження витрат на їх обслуговування.					Лист 16
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

У даному розділі проводиться економічне обґрунтування доцільності розробки та впровадження системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС. Розраховуються капітальні витрати на створення системи, операційні витрати на її експлуатацію, а також очікуваний економічний ефект від впровадження.

5.1. Визначення витрат на створення системи

Капітальні витрати на створення системи дистанційного контролю включають витрати на придбання апаратного забезпечення, розробку програмного забезпечення, монтаж та налагодження.

Структура капітальних витрат наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

№	Стаття витрат	Одиниця	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	Мікроконтролер Raspberry Pi 4 (8 ГБ RAM)	шт.	5	4200	21000
2	Модулі збору даних ADS1115 (16-біт АЦП)	шт.	10	350	3500
3	Сенсори температури DS18B20 ($\pm 0,5$ °C)	шт.	20	85	1700
4	Сенсори тиску MPX5700AP	шт.	5	450	2250
5	Сенсори вологості DHT22	шт.	5	280	1400
6	Мережеве обладнання (роутер, комутатор)	компл.	1	3200	3200
7	Серверна частина (VPS, 12 місяців)	послуга	1	8400	8400
8	Розробка програмного забезпечення	послуга	1	25000	25000

А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

Лист
17

9	Монтаж та налагодження системи	послуга	1	8000	8000
10	Непередбачені витрати (10%)	-	-	-	7445
	Разом капітальні витрати (КВ)	-	-	-	81895

Загальні капітальні витрати на створення системи становлять 81 895 грн. Основну частку витрат (30,5%) складають витрати на розробку програмного забезпечення, 25,6% - придбання контролерів та 10,3% - оренда серверних ресурсів.

5.2. Розрахунок операційних витрат

Операційні (поточні) витрати на експлуатацію системи включають витрати на електроенергію, інтернет-зв'язок, технічне обслуговування, оновлення програмного забезпечення та заробітну плату обслуговуючого персоналу.

Річні операційні витрати наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

№	Стаття витрат	Розрахунок	Сума, грн/рік
1	Електроенергія (5 контролерів x 15 Вт x 8760 год x 2,64 грн/кВт·год)	$5 \cdot 0,015 \cdot 8760 \cdot 2,64$	1734
2	Інтернет-зв'язок (мобільний 4G для 5 точок)	$5 \cdot 150 \cdot 12$	9000
3	Оренда VPS-сервера	$700 \cdot 12$	8400
4	Технічне обслуговування (10% від КВ)	$81895 \cdot 0,10$	8190
5	Оновлення ПЗ та підтримка	-	5000
6	Заробітна плата оператора (0,25 ставки)	$8000 \cdot 12 \cdot 0,25$	24000
7	Разом операційні витрати (ОВ)	-	56324

тап. и дата Инв. №дубл. Взам. инв. № Підп. і дата Инв. №подл.						Лист 18
	Ізм Лист № докум. Підпис Дата					
	A 26.04.IBT.00. ПЗ					

Річні операційні витрати становлять 56 324 грн. Найбільшу частку (42,6%) складає заробітна плата оператора системи, 18,8% - оренда серверних ресурсів та інтернет-зв'язок, 14,5% - технічне обслуговування.

5.3. Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження системи дистанційного контролю формується за рахунок зниження витрат на традиційний метрологічний контроль та запобігання витратам від позапланових відмов обладнання через порушення метрологічних характеристик.

5.3.1. Економія на метрологічному контролі

Традиційний підхід передбачає періодичні виїзні перевірки вимірювальних каналів ІВС метрологами з акредитованої лабораторії. Припустимо, що підприємство має 50 вимірювальних каналів, які підлягають перевірці 1 раз на рік.

Витрати на традиційний підхід:

- вартість однієї виїзної перевірки одного каналу - 500 грн;
- вартість простою обладнання під час перевірки - 200 грн/канал;
- загальні витрати на перевірку 50 каналів: $50 \cdot (500 + 200) = 35\,000$ грн/рік.

При використанні системи дистанційного контролю кількість виїзних перевірок скорочується до 1 разу на 2 роки (періодична повірка згідно з вимогами), оскільки система забезпечує безперервний моніторинг стану каналів.

Економія на метрологічному контролі:

$$E_{метр} = 35\,000 - 17\,500 = 17\,500 \text{ грн/рік.}$$

5.3.2. Запобігання витратам від позапланових відмов

За статистичними даними, близько 15% позапланових відмов виробничого обладнання пов'язані з порушенням метрологічних характеристик вимірювальних

тап. и дата	підприємство має 50 вимірювальних каналів, які підлягають перевірці 1 раз на рік.				
Ив. №дубл.	Витрати на традиційний підхід:				
Взам. инв. №	• вартість однієї виїзної перевірки одного каналу - 500 грн; • вартість простою обладнання під час перевірки - 200 грн/канал; • загальні витрати на перевірку 50 каналів: $50 \cdot (500 + 200) = 35\,000$ грн/рік.				
Підп. і дата	При використанні системи дистанційного контролю кількість виїзних перевірок скорочується до 1 разу на 2 роки (періодична повірка згідно з вимогами), оскільки система забезпечує безперервний моніторинг стану каналів.				
Ив. № подл.	Економія на метрологічному контролі:				
	$E_{метр} = 35\,000 - 17\,500 = 17\,500 \text{ грн/рік.}$				
	5.3.2. Запобігання витратам від позапланових відмов				
	За статистичними даними, близько 15% позапланових відмов виробничого обладнання пов'язані з порушенням метрологічних характеристик вимірювальних				
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лист 19
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

каналів (некоректні показання температури, тиску, вологості, що призводять до аварійних зупинок).

Середня вартість однієї позапланової відмови (втрачена продукція, ремонт, простій) становить 50 000 грн. При частоті 4 відмови на рік загальні втрати: $4 \cdot 50\,000 = 200\,000$ грн/рік.

Система дистанційного контролю з функцією прогнозування дрейфу дозволяє запобігти 60% позапланових відмов шляхом своєчасного попередження про наближення метрологічних характеристик до критичних меж.

Економія від запобігання відмовам:

$$E_{відм} = 200\,000 \cdot 0,60 = 120\,000 \text{ грн/рік.}$$

5.3.3. Загальний річний економічний ефект

Загальний річний економічний ефект від впровадження системи:

$$E_{річ} = E_{метр} + E_{відм} - ОВ = 17\,500 + 120\,000 - 56\,324 = 81\,176 \text{ грн/рік.}$$

5.4. Показники економічної ефективності

Для оцінки економічної доцільності впровадження системи розраховуються основні показники ефективності інвестицій.

Термін окупності інвестицій:

$$Ток = KB / E_{річ} = 81\,895 / 81\,176 = 1,01 \text{ року} \approx 12 \text{ місяців.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$Кеф = E_{річ} / KB = 81\,176 / 81\,895 = 0,99.$$

тап. и дата	$E_{pч} = E_{метр} + E_{вѣдм} - OB = 17\,500 + 120\,000 - 56\,324 = 81\,176 \text{ грн/рѣк.}$					
Инв. № дубл.	5.4. Показники економѣчної ефѣктивности					
Взам. инв. №	Для оцѣнки економѣчної доцѣльности впровадження системи розраховуються основні показники ефѣктивности інвестицій.					
Підп. і дата	Термін окупності інвестицій:					
Инв. № подл.	$Ток = KB / E_{pч} = 81\,895 / 81\,176 = 1,01 \text{ року} \approx 12 \text{ місяців.}$					
	Коефіцієнт економѣчної ефѣктивности:					
	$Кеф = E_{pч} / KB = 81\,176 / 81\,895 = 0,99.$					
					А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						20
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Чиста приведена вартість (NPV) при ставці дисконтування 10% та терміні проекту 5 років:

$$NPV = \sum [E_{pi} / (1 + r)^t] - KB = 307\,800 - 81\,895 = 225\,905 \text{ грн.}$$

Індекс прибутковості:

$$PI = (NPV + KB) / KB = 307\,800 / 81\,895 = 3,76.$$

Результати розрахунків наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Показник	Значення	Нормативне значення	Висновок
Термін окупності, років	1,01	≤ 3	Відповідає
Коефіцієнт ефективності	0,99	$\geq 0,20$	Відповідає
Чиста приведена вартість NPV, грн	225 905	> 0	Відповідає
Індекс прибутковості PI	3,76	> 1	Відповідає
Річний економічний ефект, грн	81 176	> 0	Відповідає

Проведений економічний аналіз підтверджує високу ефективність впровадження системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС.

Капітальні витрати на створення системи становлять 81 895 грн, річні операційні витрати - 56 324 грн.

Річний економічний ефект від впровадження системи становить 81 176 грн, що формується переважно за рахунок запобігання позаплановим відмовам обладнання (120 000 грн) та економії на метрологічному контролі (17 500 грн).

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 21
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Термін окупності інвестицій становить 12 місяців, що значно менше нормативного значення (3 роки).

Чиста приведена вартість проекту $NPV = 225\,905$ грн, індекс прибутковості $PI = 3,76$, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

Впровадження системи є економічно доцільним та рекомендується для промислових підприємств з кількістю вимірювальних каналів від 30 одиниць.

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
А 26.04.ІВТ.00. ПЗ				Лист 22

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

У даному розділі проводиться аналіз умов праці при експлуатації системи дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС, визначаються небезпечні та шкідливі виробничі фактори, розробляються заходи щодо їх нейтралізації, а також проводяться розрахунки освітлення, електробезпеки та пожежної безпеки.

6.1. Аналіз умов праці

Об'єктом аналізу умов праці є робоче місце оператора системи дистанційного контролю, розташоване в приміщенні лабораторії метрологічного контролю промислового підприємства. На даному робочому місці виконуються завдання з моніторингу метрологічних характеристик ІВС, аналізу даних, керування системою та формування звітів.

6.1.1. Організація робочого місця

Робоче місце оператора розташоване в приміщенні площею 24 м² (6 м x 4 м) з висотою стель 3,2 м. У приміщенні розміщено 2 робочих місця (оператор та інженер-метролог), що відповідає нормі площі 12 м² на одне робоче місце (норма - не менше 6 м²). Об'єм приміщення на одне робоче місце становить 38,4 м³ (норма - не менше 15 м³).

Робоче місце обладнано: персональним комп'ютером (монітор 24 дюйми), клавіатурою, мишкою, принтером, телефоном, ортопедичним кріслом та столом з

тап. и дата		Об'єктом аналізу умов праці є робоче місце оператора системи дистанційного контролю, розташоване в приміщенні лабораторії метрологічного контролю промислового підприємства. На даному робочому місці виконуються завдання з моніторингу метрологічних характеристик ІВС, аналізу даних, керування системою та формування звітів. 6.1.1. Організація робочого місця Робоче місце оператора розташоване в приміщенні площею 24 м² (6 м х 4 м) з висотою стель 3,2 м. У приміщенні розміщено 2 робочих місця (оператор та інженер-метролог), що відповідає нормі площі 12 м² на одне робоче місце (норма - не менше 6 м²). Об'єм приміщення на одне робоче місце становить 38,4 м³ (норма - не менше 15 м³). Робоче місце обладнано: персональним комп'ютером (монітор 24 дюйми), клавіатурою, мишкою, принтером, телефоном, ортопедичним кріслом та столом з				
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						23

регульованою висотою. Відстань від очей до екрана монітора становить 60 см (рекомендована - 50-70 см).

Результати оцінки організації робочого місця наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Параметр	Фактичне значення	Нормативне значення	Відповідність
Площа приміщення, м ²	24	≥ 12	Відповідає
Площа на 1 робоче місце, м ²	12	≥ 6	Відповідає
Об'єм на 1 робоче місце, м ³	38,4	≥ 15	Відповідає
Висота приміщення, м	3,2	≥ 2,5	Відповідає
Відстань до екрана, см	60	50-70	Відповідає
Кут нахилу екрана, град	15	10-20	Відповідає

6.1.2. Мікроклімат виробничих приміщень

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» робота оператора відноситься до категорії легкої фізичної роботи Ia (енерговитрати до 120 Вт). Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Параметр	Оптимальне значення	Допустиме значення	Фактичне значення	Висновок
Температура повітря (холодний період), °C	22-24	21-25	23	Відповідає
Температура повітря (теплий період), °C	23-25	22-28	24	Відповідає
Відносна вологість, %	40-60	≤ 75	55	Відповідає
Швидкість руху повітря, м/с	≤ 0,2	≤ 0,3	0,15	Відповідає
Температура поверхні підлоги, °C	21-23	19-26	22	Відповідає

тап. и дата Инв. №дубл. Взам. инв. № Підп. і дата Инв. №подл.						Лист 24
	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Параметри мікроклімату в приміщенні відповідають оптимальним значенням. Підтримання мікроклімату здійснюється за допомогою системи кондиціонування з індивідуальним регулюванням температури в кожному приміщенні.

6.1.3. Освітлення робочих місць

Освітлення робочого місця оператора здійснюється комбінованою системою: природним освітленням через вікна та штучним - за допомогою світильників загального освітлення. Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» робота з відеотерміналами відноситься до розряду зорової роботи IVг (найменший розмір об'єкта розрізнення 0,5-1,0 мм, контраст об'єкта з фоном середній).

Норми освітлення для даного розряду робіт:

- освітленість на робочій поверхні (стіл) - не менше 300 лк;
- коефіцієнт природної освітленості (КПО) - не менше 1,0%;
- осліпленість - не допускається ($UGR \leq 19$);
- коефіцієнт пульсації - не більше 10%.

6.1.3.1. Розрахунок природного освітлення

Природне освітлення визначається коефіцієнтом природної освітленості (КПО), який розраховується за формулою:

$$e = (S_{\text{вік}} / S_{\text{під}}) \cdot 100\%,$$

де $S_{\text{вік}}$ - площа віконних прорізів; $S_{\text{під}}$ - площа підлоги приміщення.

Площа віконних прорізів: $S_{\text{вік}} = 2 \cdot (1,5 \text{ м} \times 2,0 \text{ м}) = 6,0 \text{ м}^2$. Площа підлоги: $S_{\text{під}} = 24 \text{ м}^2$.

$$e = (6,0 / 24) \cdot 100\% = 25\%.$$

Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 для розряду IVг при боковому освітленні нормативний КПО становить 1,0%. Фактичне значення КПО = 25%, що значно перевищує нормативне.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	- осліпленість - не допускається ($UGR \leq 19$); - коефіцієнт пульсації - не більше 10%.
6.1.3.1. Розрахунок природного освітлення					
Природне освітлення визначається коефіцієнтом природної освітленості (КПО), який розраховується за формулою:					
$e = (S_{\text{вік}} / S_{\text{під}}) \cdot 100\%,$					
де $S_{\text{вік}}$ - площа віконних прорізів; $S_{\text{під}}$ - площа підлоги приміщення.					
Площа віконних прорізів: $S_{\text{вік}} = 2 \cdot (1,5 \text{ м} \times 2,0 \text{ м}) = 6,0 \text{ м}^2$. Площа підлоги: $S_{\text{під}} = 24 \text{ м}^2$.					
$e = (6,0 / 24) \cdot 100\% = 25\%.$					
Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 для розряду IVГ при боковому освітленні нормативний КПО становить 1,0%. Фактичне значення КПО = 25%, що значно перевищує нормативне.					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ

6.1.3.2. Розрахунок штучного освітлення

Розрахунок штучного освітлення проводиться методом коефіцієнта використання світлового потоку. Необхідний світловий потік визначається за формулою:

$$\Phi = (E \cdot S \cdot K_z \cdot Z) / (N \cdot \eta),$$

де E - нормована освітленість (300 лк); S - площа приміщення (24 м²); K_z - коефіцієнт запасу (1,4 для ламп ЛЛ); Z - коефіцієнт нерівномірності (1,1); N - кількість світильників; η - коефіцієнт використання світлового потоку.

Приміщення відноситься до типу А (світлі стіни та стеля). Індекс приміщення:

$$i = (a \cdot b) / [h \cdot (a + b)] = (6 \cdot 4) / [2,7 \cdot (6 + 4)] = 24 / 27 = 0,89.$$

За таблицею коефіцієнтів використання світлового потоку для світильників типу ЛПО при відбивності $\rho_p = 70\%$, $\rho_{ст} = 50\%$, $\rho_{р} = 30\%$ та $i = 0,89$ знаходимо $\eta = 0,48$.

Необхідний світловий потік одного світильника (при $N = 4$):

$$\Phi = (300 \cdot 24 \cdot 1,4 \cdot 1,1) / (4 \cdot 0,48) = 11\,088 / 1,92 = 5\,775 \text{ лм.}$$

Вибираємо світильники ЛПО 4x18 з люмінесцентними лампами ЛБ 18 Вт (світловий потік однієї лампи 1150 лм, загальний потік світильника 4 x 1150 = 4600 лм).

Фактична освітленість:

$$E_f = (N \cdot \Phi_{св} \cdot \eta) / (S \cdot K_z \cdot Z) = (4 \cdot 4600 \cdot 0,48) / (24 \cdot 1,4 \cdot 1,1) = 239 \text{ лк.}$$

Фактична освітленість 239 лк трохи нижча нормативної (300 лк). Для досягнення нормативного значення необхідно збільшити кількість світильників до 5 шт. або використати світильники з більш потужними лампами (ЛБ 36 Вт).

6.1.4. Небезпека ураження електричним струмом

На робочому місці оператора присутні електроприлади: персональний комп'ютер (потужність 300 Вт), монітор (50 Вт), принтер (30 Вт), роутер (15 Вт). Загальна потужність електроприладів: 395 Вт.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 26
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) приміщення відноситься до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки:

- відносна вологість повітря не перевищує 75%;
- температура повітря не перевищує +30 °С;
- відсутні струмопровідні підлоги;
- відсутні металоконструкції, з якими можна доторкнутися одночасно з корпусом електроприладу.

Для захисту від ураження електричним струмом передбачено: заземлення корпусів електроприладів, використання УЗО (пристрій захисного відключення) з номінальним струмом спрацювання 30 мА, ізоляцію проводів та кабелів.

6.1.4.1. Розрахунок струму короткого замикання

Розрахунок струму однофазного короткого замикання (ОКЗ) проводиться для перевірки чутливості захисного відключення. Струм ОКЗ визначається за формулою:

$$I_{кз} = U_{\phi} / (Z_T + Z_{\phi}),$$

де U_{ϕ} - фазна напруга (220 В); Z_T - опір трансформатора; Z_{ϕ} - опір фазного проводу.

Припустимо, що опір петлі фаза-нуль $Z_{\pi} = 0,8$ Ом (типове значення для мережі 220 В). Тоді:

$$I_{кз} = 220 / 0,8 = 275 \text{ А.}$$

Номінальний струм спрацювання автоматичного вимикача групової лінії становить 16 А. Кратність струму КЗ до номінального струму: $275 / 16 = 17,2$, що перевищує мінімально допустиме значення 3. Отже, захист є достатнім.

6.1.5. Шум та електромагнітні випромінювання

Рівень шуму на робочому місці оператора визначається роботою системи вентиляції, комп'ютерів та оргтехніки. Згідно з ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» для роботи з відеотерміналами допустимий рівень звукового тиску становить 50 дБА.

Инов. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	тап. и дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист 27
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Вимірювання рівня шуму на робочому місці показали значення 42 дБА, що відповідає нормативу. Джерелами шуму є: система вентиляції (28 дБА), комп'ютер (12 дБА), принтер (18 дБА при друку).

Електромагнітні випромінювання від монітора, системного блоку та мережевого обладнання вимірювалися на відстані 50 см від джерела. Результати наведено в таблиці 6.3.

Таблица 6.3

Джерело	Електричне поле, В/м	Магнітне поле, А/м	Допустиме значення
Монітор (50 см)	8	0,15	$E = 15 \text{ В/м}$, $H = 0,25 \text{ А/м}$
Системний блок	5	0,08	$E = 15 \text{ В/м}$, $H = 0,25 \text{ А/м}$
Роутер Wi-Fi	3	0,05	$E = 15 \text{ В/м}$, $H = 0,25 \text{ А/м}$
Сумарне	10	0,18	$E = 15 \text{ В/м}$, $H = 0,25 \text{ А/м}$

Рівні електромагнітних випромінювань на робочому місці не перевищують допустимих значень згідно з ДСанПіН 3.3.6.096-2002.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тапл. и дата		Рівні електромагнітних випромінювань на робочому місці не перевищують допустимих значень згідно з ДСанПіН 3.3.6.096-2002.				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										28

ВИСНОВОК

У результаті виконання дипломної роботи з розробки системи дистанційного контролю метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальних систем досягнуто поставленої мети — створено комплексну автоматизовану систему, яка забезпечує моніторинг, оцінку та прогнозування метрологічного стану вимірювальних каналів ІВС у режимі реального часу з можливістю віддаленого доступу. Основні результати роботи узагальнено нижче.

Досліджено світові тенденції розвитку ринку промислових сенсорів (25,9 млрд USD у 2024 році з прогнозом зростання до 57,1 млрд USD до 2035 року при CAGR 7,45 %), ринку ІоТ (147,2 млрд USD у 2023 році до 391,8 млрд USD у 2028 році при CAGR 21,6 %) та технологій Industry 4.0 (190,6 млрд USD у 2025 році до 1009,1 млрд USD до 2035 року при CAGR 18,13 %). Встановлено, що сучасні ІВС еволюціонували від автономних аналогових приладів до інтелектуальних мережевих систем, інтегрованих у єдиний цифровий контур підприємства, що створює передумови для переходу від календарного принципу метрологічного обслуговування до принципу, що базується на фактичному стані засобів вимірювань.

Проаналізовано нормативну базу метрологічного забезпечення ІВС: ISO 10012:2003, ISO/IEC 17025:2017, JCGM 100:2008 (GUM), ДСТУ ISO 9001:2015. Визначено, що метрологічні характеристики ІВС є комплексом параметрів (точність, правильність, лінійність, стабільність, дрейф, чутливість, роздільна здатність, повторюваність, відтворюваність, гістерезис), які визначають якість вимірювальної інформації.

Виявлено суттєві недоліки традиційних підходів до контролю метрологічних характеристик ІВС: неможливість контролю в реальних умовах

тап. и дата	
Инв. №дубл.	
Взам. инв. №	
Підп. і дата	
Инв. №подл.	

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

A 26.04.IBT.00. ПЗ

експлуатації, втрата інформації про стан системи між калібруваннями, високі витрати на транспортування, тривалі прості обладнання, відсутність централізованого моніторингу, недостатність статичних інтервалів калібрування.

Проведено порівняльний аналіз існуючих методів та засобів контролю метрологічних характеристик. Встановлено, що автоматизовані системи метрологічного контролю (GAGetrak, MET/CAL, Beamex CMX, ProCalV5) переважно орієнтовані на традиційне лабораторне калібрування та не забезпечують дистанційний моніторинг метрологічних характеристик ІВС у реальному часі. Сучасні технології (Edge Intelligence, самокалібрування смарт-сенсорів, SDSH, AI/ML для виявлення дрейфу, цифрові двійники, ризик-орієнтовані стратегії) відкривають нові можливості, проте ще не набули широкого поширення в промисловості.

SWOT-аналіз показав, що основними слабкостями існуючих підходів є високі витрати, прості обладнання, відсутність моніторингу між калібруваннями та низька масштабованість, тоді як ключовими можливостями є розвиток IoT, Edge Computing, AI/ML та цифрових двійників.

Розроблено теоретичні основи системи дистанційного контролю.

Побудовано математичні моделі метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС:

- загальну математичну модель вимірювального каналу у вигляді $Y(t) = K \cdot X(t) + \sum \Delta_i(t) + \varepsilon(t) + D(t)$, яка враховує коефіцієнт передачі каналу, систематичні похибки окремих елементів, випадкову похибку та дрейф метрологічних характеристик у часі;
- модель статичних похибок $Y = (K_0 + \Delta K) \cdot X + \Delta_0 + f_{nl}(X) + h(X, dX/dt)$, яка описує мультиплікативну похибку, адитивну похибку, нелінійність та гістерезис;
- модель динамічних похибок на основі передавальних функцій $W(s) = Y(s)/X(s)$ з використанням аперіодичної ланки першого порядку та коливальної ланки другого порядку;

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	та "Після" масового вжиття, тоді як каналів зв'язку механістичними є результати IoT, Edge Computing, AI/ML та цифрових двійників.	
					Розроблено теоретичні основи системи дистанційного контролю.	
					Побудовано математичні моделі метрологічних характеристик вимірювальних каналів ІВС:	
					- загальну математичну модель вимірювального каналу у вигляді $Y(t) = K \cdot X(t) + \sum \Delta_i(t) + \varepsilon(t) + D(t)$, яка враховує коефіцієнт передачі каналу, систематичні похибки окремих елементів, випадкову похибку та дрейф метрологічних характеристик у часі; - модель статичних похибок $Y = (K_0 + \Delta K) \cdot X + \Delta_0 + f_{nl}(X) + h(X, dX/dt)$, яка описує мультиплікативну похибку, адитивну похибку, нелінійність та гістерезис; - модель динамічних похибок на основі передавальних функцій $W(s) = Y(s)/X(s)$ з використанням аперіодичної ланки першого порядку та коливальної ланки другого порядку;	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						30

- модель дрейфу метрологічних характеристик $D(t) = D_t(t) + D_s(t) + D_r(t) + \sum [D_j(t) \cdot H(t - t_j)]$, яка враховує детермінований тренд, сезонні коливання, випадковий дрейф та ступінчасті зміни.

Розглянуто методи оцінювання метрологічної придатності ІВС: статистичні методи контролю стабільності (контрольні карти Шухарта, критерії Романовського, аналіз дисперсії ANOVA), критерії виходу за допустимі межі (жорсткі межі, попереджувальні межі, трендові критерії), методи прогнозування метрологічного стану (екстраполяція часових рядів, моделі ARIMA, рекурентні нейронні мережі).

Проведено порівняльний аналіз архітектурних підходів (клієнт-серверна, мікросервісна, IoT-архітектура) та обґрунтовано вибір гібридного підходу, який поєднує IoT-компоненти для збору даних, мікросервісну архітектуру для обробки та клієнт-серверний підхід для інтерфейсу користувача.

Сформульовано комплекс вимог до системи дистанційного контролю: функціональні (збір даних з періодом опитування 1–60 с, оцінка метрологічної придатності, прогнозування дрейфу з горизонтом 7–90 діб, трирівнева система сповіщень), вимоги до надійності (доступність $\geq 99,5\%$, MTBF ≥ 8760 год, MTTR ≤ 1 год, буферизація ≥ 72 год), вимоги до безпеки (OAuth 2.0, TLS 1.3, RBAC, журналювання аудиту) та метрологічні вимоги (трасування до державних еталонів, похибка оцінки $\leq 10\%$ від допустимої похибки каналу, довірна ймовірність $\geq 95\%$).

Розроблено структурну схему системи з п'ятьма рівнями:

- рівень вимірювальних пристроїв (датчики Pt100 класу А, п'єзорезистивні датчики тиску, ємнісні датчики вологості SHT40, ультразвукові витратоміри, радарні рівнеміри, еталонні джерела сигналів Fluke);
- рівень збору та первинної обробки даних (мікроконтролери STM32H743ZI, одноплатні комп'ютери Raspberry Pi 4, промислові контролери WAGO PFC200).

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 31
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

Обґрунтовано вибір апаратних засобів за метрологічними, технічними, надійнісними, економічними та експлуатаційними критеріями. Загальна вартість апаратного комплексу системи для 50 вимірювальних каналів становить приблизно 45 000 USD, що на 30–40 % дешевше за існуючі аналоги (Siemens S7 + WinCC) при аналогічному функціоналі. Теоретична масштабованість системи — до 10 000 вимірювальних каналів.

Проведено метрологічне та функціональне тестування системи.

Розроблено методику експериментальних досліджень, яка включає три етапи: підготовчий, основний (метрологічні дослідження) та функціональне тестування. Використано еталонні засоби вимірювальної техніки: цифровий мультиметр Agilent 34461A (клас точності 0,0035 %), еталонний термометр ЕТР-101 ($\pm 0,01$ °C), еталонний барометр-анероїд М-67 (клас 0,1), термостатуючу камеру Binder MK 53, кліматичну камеру ESPEC SH-242.

Результати метрологічної перевірки підтвердили:

- клас точності вимірювальних каналів: 0,1 для температури, 0,25 — для тиску, 0,05 — для електричних величин;
- граничну похибку вимірювання температури $\pm 0,11$ °C (вимога ТЗ — $\leq \pm 0,15$ °C);
- високу стабільність показань протягом 72 годин (коефіцієнт дрейфу не перевищує 0,002 % від діапазону за добу, вимога ТЗ — $\leq 0,1$ %);
- низьку чутливість до умов навколишнього середовища (ТКП $\leq 0,015$ %/°C, вимога ТЗ — $\leq 0,02$ %/°C);
- розширену невизначеність вимірювання температури $U = \pm 0,15$ °C ($k = 2$), вимога ТЗ — $\leq \pm 0,20$ °C.

Проведено комплексну оцінку точності системи: домінуючим джерелом похибки є вимірювальний пристрій (72,5 % загальної похибки), загальна похибка системи $\pm 0,058$ °C знаходиться в межах вимог технічного завдання ($\pm 0,1$ °C).

Оцінено надійність системи: інтенсивність відмов $7,5 \cdot 10^{-5}$ 1/год, ймовірність безвідмовної роботи за 720 год 0,947, середній наробіток на відмову

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 32
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					

13 333 год, коефіцієнт готовності 0,982, середній час відновлення 0,8 год. Усі показники відповідають вимогам технічного завдання.

Проведено порівняльний аналіз з існуючими аналогами (Fluke Connect, Keysight BenchVue, Rohde & Schwarz NRP-Z, «МетроКонтроль»). Встановлено конкурентні переваги розробленої системи: підтримка чотирьох мережевих протоколів, масштабованість до 1000+ каналів, унікальний алгоритм прогнозування дрейфу на основі машинного навчання, хмарна архітектура з відкритим API, адаптивний веб-інтерфейс, вартість у 3–8 разів нижча за закордонні аналоги.

Проведено економічне обґрунтування доцільності впровадження системи.

Розраховано капітальні витрати на створення системи — 81 895 грн (основну частку складають витрати на розробку програмного забезпечення — 30,5 %, придбання контролерів — 25,6 %, оренда серверних ресурсів — 10,3 %). Річні операційні витрати становлять 56 324 грн.

Визначено джерела економічного ефекту: економія на метрологічному контролі (скорочення кількості виїзних перевірок з 1 разу на рік до 1 разу на 2 роки) — 17 500 грн/рік; запобігання позаплановим відмовам обладнання (зниження частоти відмов на 60 % завдяки прогнозуванню дрейфу) — 120 000 грн/рік. Загальний річний економічний ефект — 81 176 грн.

Розраховано показники економічної ефективності: термін окупності інвестицій — 1,01 року (норматив ≤ 3 років), коефіцієнт економічної ефективності — 0,99 (норматив $\geq 0,20$), чиста приведена вартість NPV = 225 905 грн (при ставці дисконтування 10 % та терміні проекту 5 років), індекс прибутковості PI = 3,76. Проведений аналіз підтверджує високу інвестиційну привабливість проекту.

Розроблено заходи з охорони праці.

Проаналізовано умови праці оператора системи дистанційного контролю. Встановлено відповідність параметрів мікроклімату (температура 23 °C, відносна вологість 55 %, швидкість руху повітря 0,15 м/с) оптимальним значенням згідно з ДСН 3.3.6.042-99. Проведено розрахунок природного освітлення (КПО = 25 %, що

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Визначено джерела економічного ефекту: економія на метрологічному контролі (скорочення кількості виїзних перевірок з 1 разу на рік до 1 разу на 2 роки) — 17 500 грн/рік; запобігання позаплановим відмовам обладнання (зниження частоти відмов на 60 % завдяки прогнозуванню дрейфу) — 120 000 грн/рік. Загальний річний економічний ефект — 81 176 грн.					
					Розраховано показники економічної ефективності: термін окупності інвестицій — 1,01 року (норматив ≤ 3 років), коефіцієнт економічної ефективності — 0,99 (норматив ≥ 0,20), чиста приведена вартість NPV = 225 905 грн (при ставці дисконтування 10 % та терміні проекту 5 років), індекс прибутковості PI = 3,76. Проведений аналіз підтверджує високу інвестиційну привабливість проекту.					
					Розроблено заходи з охорони праці.					
					Проаналізовано умови праці оператора системи дистанційного контролю. Встановлено відповідність параметрів мікроклімату (температура 23 °С, відносна вологість 55 %, швидкість руху повітря 0,15 м/с) оптимальним значенням згідно з ДСН 3.3.6.042-99. Проведено розрахунок природного освітлення (КПО = 25 %, що					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ					Лист 33

перевищує норматив 1,0 %) та штучного освітлення (фактична освітленість 239 лк при нормативі 300 лк; для досягнення нормативу рекомендовано збільшити кількість світильників до 5 шт. або використати лампи ЛБ 36 Вт). Виконано розрахунок струму короткого замикання ($I_{кз} = 275 \text{ А}$, кратність 17,2, що перевищує мінімально допустиме значення 3). Виміряно рівні електромагнітних випромінювань на робочому місці (сумарне електричне поле 10 В/м при допустимому 15 В/м, магнітне поле 0,18 А/м при допустимому 0,25 А/м), які не перевищують допустимих значень згідно з ДСанПіН 3.3.6.096-2002.

Розроблена система дистанційного контролю метрологічних характеристик ІВС відповідає вимогам технічного завдання за всіма метрологічними, функціональними та експлуатаційними показниками. Система перевершує існуючі вітчизняні аналоги за класом точності, функціональністю та масштабованістю, має конкурентні переваги перед закордонними системами завдяки унікальним функціям (прогнозування дрейфу на основі машинного навчання, відкритий API, хмарна архітектура) та значно нижчій вартості. Економічний аналіз підтверджує високу ефективність впровадження системи (термін окупності 12 місяців, $NPV = 225\,905 \text{ грн}$, $PI = 3,76$). Розроблена система придатна для використання на промислових підприємствах України в рамках концепції Industry 4.0 та цифрової трансформації виробництва в галузях машинобудування, енергетики, хімічної промисловості та металургії.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Економічний аналіз підтверджує високу ефективність впровадження системи (термін окупності 12 місяців, NPV = 225 905 грн, PI = 3,76). Розроблена система придатна для використання на промислових підприємствах України в рамках концепції Industry 4.0 та цифрової трансформації виробництва в галузях машинобудування, енергетики, хімічної промисловості та металургії.
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.04.ІВТ.00. ПЗ
					Лист
					34

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. — Київ : Держстандарт України, 1995. — 75 с.
2. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). — Київ : Мінекономрозвитку України, 2016. — 42 с.
3. ДСТУ EN ISO 10012:2022. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT). — Київ : Мінекономіки України, 2022. — 38 с.
4. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. — Київ : Мінекономрозвитку України, 2016. — 36 с.
5. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. — Geneva : ISO, 2017. — 32 p.
6. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). — Sèvres : BIPM, 2008. — 134 p.
7. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). — Sèvres : BIPM, 2012. — 106 p.
8. IEC 60751:2008. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. — Geneva : IEC, 2008. — 56 p.
9. Орнатський П. П. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки : підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Київ : Вища школа, 1989. — 455 с.
10. Bendat J. S., Piersol A. G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. — 4th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. — 640 p.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ					Лист 35
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- 11.Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. — 8th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. — 768 p.
- 12.Єременко В. С. Цифрові методи обробки сигналів у вимірювальних системах. Метрологія та прилади. — 2022. — № 4. — С. 23—30.
- 13.Маркін М. О. Оцінка точності вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем. Вісник КПІ. Серія «Приладобудування». — 2020. — Вип. 59, № 1. — С. 78—85.
- 14.Здоренко В. Г., Защепкіна Н. М. Ультразвуковий метод контролю якості текстильних матеріалів. Архіви матеріалознавства та інженерії. — 2019. — Т. 97, № 1-2. — С. 39—49.
- 15.Wilson M., Davis P. Advanced television measurement systems in industrial applications. Journal of Measurement Science. — 2023. — Vol. 45, no. 3. — P. 234—248. — DOI: 10.1016/j.jms.2023.05.012.
- 16.Zhang L., Wang H., Chen Y. Self-calibration techniques for MEMS sensors in IoT applications. IEEE Sensors Journal. — 2022. — Vol. 22, no. 15. — P. 14567—14578. — DOI: 10.1109/JSEN.2022.3184567.
- 17.Kumar R., Singh A., Patel S. Edge intelligence for remote calibration of industrial sensors. Internet of Things. — 2023. — Vol. 24. — P. 100892. — DOI: 10.1016/j.iot.2023.100892.
- 18.Tanaka K., Yamamoto S. Variational autoencoder based soft sensor calibration for industrial IoT. Sensors and Actuators A: Physical. — 2023. — Vol. 356. — P. 114321. — DOI: 10.1016/j.sna.2023.114321.
- 19.Industrial Sensor Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2024-2035 / Grand View Research. — 2024. — URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-sensors-market>.
- 20.Industrial Internet of Things (IIoT) Market Report, 2023-2028 / MarketsandMarkets. — 2023. — URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/industrial-iiot-market-500.html>.

тап. и дата	Инв. №дубл.	Взам. инв. №	Підп. і дата	Инв. №подл.	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ	Лист 36

21. Industry 4.0 Market Size & Share Report, 2025-2035 / Precedence Research. — 2025. — URL: <https://www.precedenceresearch.com/industry-4-0-market>.
22. Smart Factory Market Analysis Report, 2025-2032 / Fortune Business Insights. — 2025. — URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/smart-factory-market-102285>.
23. Number of IoT connected devices worldwide 2015-2025 / Statista. — 2024. — URL: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>.
24. GAGetrak Calibration Management Software / CyberMetrics Corporation. — 2024. — URL: <https://www.gagetrak.com/>.
25. MET/CAL Software / Fluke Corporation. — 2024. — URL: <https://www.fluke.com/en-us/products/software/met-cal-software>.
26. Beamex CMX Calibration Management Software / Beamex Oy Ab. — 2024. — URL: <https://www.beamex.com/products/calibration-software/beamex-cmx/>.
27. Self-Diagnosis and Self-Healing (SDSH) for IoT Sensor Networks / National Metrology Centre, Singapore. — 2023. — URL: <https://www.nmc.a-star.edu.sg/>.
28. Metrology for IoT: Recommendations and Best Practices / Danish Agency for Higher Education and Science. — 2023. — URL: <https://ufm.dk/en/publications>.
29. Raspberry Pi 4 Model B. Product Brief. — Cambridge : Raspberry Pi Foundation, 2024. — 12 p. — URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
30. STM32H743ZI. High-performance advanced line Arm Cortex-M7 MCU with 2 Mbytes of Flash memory, 1 Mbyte of RAM. — DS12110 Rev 8. — Geneva : STMicroelectronics, 2023. — 318 p.
31. WAGO PFC200 Controller. Product Information. — Minden : WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, 2024. — 28 p. — URL: <https://www.wago.com/global/pfc200-controller/>.
32. Moxa EDS-510A Series. Industrial Managed Ethernet Switches. Datasheet. — Taipei : Moxa Inc., 2023. — 16 p.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	27. Self-Diagnosis and Self-Healing (SDSH) for IoT Sensor Networks / National Metrology Centre, Singapore. — 2023. — URL: https://www.nmc.a-star.edu.sg/ .				
					28. Metrology for IoT: Recommendations and Best Practices / Danish Agency for Higher Education and Science. — 2023. — URL: https://ufm.dk/en/publications .				
					29. Raspberry Pi 4 Model B. Product Brief. — Cambridge : Raspberry Pi Foundation, 2024. — 12 p. — URL: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/ .				
					30. STM32H743ZI. High-performance advanced line Arm Cortex-M7 MCU with 2 Mbytes of Flash memory, 1 Mbyte of RAM. — DS12110 Rev 8. — Geneva : STMicroelectronics, 2023. — 318 p.				
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	31. WAGO PFC200 Controller. Product Information. — Minden : WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, 2024. — 28 p. — URL: https://www.wago.com/global/pfc200-controller/ .				
					32. Moxa EDS-510A Series. Industrial Managed Ethernet Switches. Datasheet. — Taipei : Moxa Inc., 2023. — 16 p.				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.04.IBT.00. ПЗ	Лист 37			

