

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 метрологічного забезпечення системи контролю парового котла

Виконав: студент 4 курсу, групи 4-МІТ-22
напряму підготовки (спеціальності)

152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна
техніка»

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

ХОБТА С.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Чернецький Є.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Тітова О.В.

(прізвище та ініціали)

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 ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

ХОБТА Станіслав Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка метрологічного забезпечення системи контролю парового котла»

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

(підпис)

Хобта С. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Чернецький Є. В.

(прізвище та ініціали)

Реферат.

Робота містить:

Листів: 126.

Таблиць: 27.

Рисунків: 1.

Листів графічної частини: 11 (презентація).

Ключові слова: метрологічне забезпечення (МЗ), вимірювальний канал, прослідковуваність вимірювань, метрологічна надійність, калібрування, повірка, невизначеність вимірювання, самодіагностика, триплексне резервування (2003), метод GUM, метод Монте-Карло, Condition-based maintenance, SIL (Safety Integrity Level)

Мета: розробка комплексного метрологічного забезпечення системи контролю парового котла, що забезпечує необхідну точність вимірювань технологічних параметрів та підвищує ефективність його експлуатації.

					А 26.07.IBT.00 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Хо́дта С.О.			Розробка метрологічного забезпечення системи контролю парового котла	Літ.		Арк.	Акрушів
Перевір.		Чернецький Є.В.						2	
Реценз.		Тітова О.В.				ННІ УДХТУ KIT та Р, Гр. 4-MIT-22			
Н. Контр.									
Затверд.		Левчук І.Л.							

ЗМІСТ

Розділ	Стор.
ВСТУП	8
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1. Загальна характеристика парових котлів як об'єкта контролю	11
1.2. Аналіз існуючих систем контролю та автоматизації парових котлів	12
1.3. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів системи контролю	14
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	17
2.1. Методологія метрологічного забезпечення технічних систем	17
2.1.1. Сутність та зміст метрологічного забезпечення	17
2.1.2. Метрологічна експлуатація засобів вимірювальної техніки	18
2.1.3. Прослідковуваність вимірювань	19
2.1.4. Метрологічна надійність вимірювальних каналів	20
2.1.5. Автоматизація метрологічного забезпечення	21
2.1.6. Метрологічні вимоги до системи контролю парового котла	22
2.2. Методи оцінки похибок вимірювальних каналів	23
2.2.1. Класифікація похибок вимірювань	23
2.2.2. Метрологічна модель вимірювального каналу	24
2.2.3. Метод оцінки невизначеності вимірювання за GUM	26
2.2.4. Застосування методу GUM для вимірювального каналу тиску	27

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									3

Розділ	Стор.
3.1.3. Діапазони вимірювань та допустимі похибки	55
3.1.4. Вимоги до швидкодії та надійності каналів контролю	56
3.1.5. Інтеграція параметрів у систему автоматичного регулювання	57
3.2. Вибір та обґрунтування засобів вимірювальної техніки	58
3.2.1. Вибір датчиків тиску	58
3.2.2. Вибір датчиків температури	60
3.2.3. Вибір рівнемірів	62
3.2.4. Вибір витратомірів	64
3.2.5. Вибір газоаналізаторів	66
3.2.6. Вибір датчиків якості води	67
3.3. Розробка структурної схеми системи контролю	69
3.3.1. Структурна схема системи контролю	69
3.3.2. Архітектура системи метрологічного моніторингу	72
3.3.3. Розподілена vs централізована архітектура	73
3.4. Розробка алгоритмів обробки вимірювальної інформації	74
3.4.1. Загальні вимоги до алгоритмів обробки	74
3.4.2. Фільтрація сигналів	72
3.4.3. Лінеаризація характеристик первинних перетворювачів	77
3.4.4. Термокомпенсація та компенсація впливу додаткових факторів	78
3.4.5. Алгоритми діагностики відмов датчиків	79
3.4.6. Адаптивні алгоритми компенсації дрейфу	80
3.4.7. Алгоритми обробки для системи метрологічного моніторингу	82

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ				Лист
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					5

Розділ	Стор.
4. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ	84
4.1. Розробка метрологічної моделі вимірювального каналу	84
4.1.1. Структурна схема вимірювального каналу	84
4.1.2. Математична модель похибки каналу	85
4.1.3. Модель похибки для каналу температури	86
4.1.4. Модель похибки для каналу рівня	88
4.1.5. Оцінка кореляцій між складовими похибки	89
4.1.6. Параметризація моделі за результатами калібрування	89
4.1.7. Верифікація метрологічної моделі	92
4.2. Розрахунок метрологічних характеристик вимірювальних каналів	94
4.2.1. Загальна методика розрахунку сумарної похибки	94
4.2.2. Розрахунок метрологічних характеристик каналу тиску пари	94
4.2.3. Розрахунок метрологічних характеристик каналу температури	99
4.2.4. Розрахунок метрологічних характеристик каналу рівня	101
4.2.5. Розрахунок метрологічних характеристик каналу витрати	102
4.2.6. Аналіз чутливості до впливу факторів	104
4.2.7. Порівняльний аналіз розрахункових та нормативних метрологічних характеристик	105
6. ОХОРОНА ПРАЦІ	107
6.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	107
6.2. Заходи з охорони праці при експлуатації системи контролю	108
6.2.1. Електробезпека	108

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 6
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Розділ	Стор.
6.2.2. Безпека при роботі з тиском	109
6.2.3. Пожежна та вибухова безпека	109
6.2.4. Ергономіка робочого місця оператора	109
6.3. Розрахунок заземлення	110
6.4. Розрахунок освітлення	110
7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	112
7.1. Визначення вартості розробки метрологічного забезпечення	112
ВИСНОВКИ	122
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						7

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Парові котли є ключовим елементом енергетичного обладнання підприємств теплоенергетики, хімічної промисловості, харчової галузі та комунального господарства. Надійність та ефективність їх роботи безпосередньо залежить від точності вимірювання та контролю основних технологічних параметрів: тиску пари, температури, рівня води в барабані котла, витрати палива, складу димових газів та інших показників. Відхилення фактичних значень цих параметрів від номінальних може призвести до зниження енергоефективності, передчасного зношування обладнання або, у найгіршому випадку, до аварійних ситуацій з негативними наслідками для життя та здоров'я персоналу.

У сучасних умовах підвищення вимог до енергоефективності та екологічної безпеки особливого значення набуває метрологічне забезпечення систем контролю парових котлів. Метрологічне забезпечення являє собою сукупність правових, організаційних, технічних та економічних заходів, спрямованих на досягнення єдності та необхідної точності вимірювань, що є невід'ємною умовою отримання достовірної інформації про стан технологічного процесу. Незважаючи на широке впровадження сучасних автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), питання всебічного метрологічного забезпечення вимірювальних каналів часто залишаються недостатньо опрацьованими на практиці. Існує розрив між технічними можливостями сучасних засобів вимірювальної техніки та реальним рівнем їх метрологічної експлуатації, що зумовлює необхідність розробки комплексних рішень з метрологічного забезпечення.

В Україні питання метрологічного забезпечення регулюються Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність», національними

стандартами ДСТУ ISO/IEC 17025, ДСТУ ISO 10012, а також галузевими нормативними документами. Проте специфіка парових котлів як об'єктів контролю потребує детального опрацювання методик оцінки похибок, процедур калібрування та алгоритмів підтримки метрологічної придатності вимірювальних каналів у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, розробка метрологічного забезпечення системи контролю парового котла є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню точності вимірювань, зменшенню енерговитрат, зниженню аварійності та підвищенню загальної ефективності експлуатації парогенеруючого обладнання.

Разом з тим, аналіз науково-технічної літератури свідчить про недостатній рівень комплексного опрацювання метрологічного забезпечення саме для систем контролю парових котлів з урахуванням сучасних вимог до точності, автоматизації процедур калібрування та інтелектуальної діагностики метрологічного стану вимірювальних каналів. Більшість існуючих робіт або узагальнено розглядають метрологічне забезпечення без прив'язки до конкретного об'єкта, або фокусуються виключно на технічних аспектах контролю без належної уваги до метрологічних аспектів. Це зумовлює необхідність подальших досліджень у даному напрямі.

Мета та завдання дослідження. Метою дипломної роботи є розробка комплексного метрологічного забезпечення системи контролю парового котла, що забезпечує необхідну точність вимірювань технологічних параметрів та підвищує ефективність його експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналітичний огляд стану та перспектив метрологічного забезпечення систем контролю парових котлів, визначити основні проблеми та напрями їх вирішення.
2. Дослідити теоретичні основи метрологічного забезпечення вимірювальних каналів, методи оцінки похибок та невизначеності

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 9
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

вимірювань, процедури калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки.

3. Розробити структуру системи контролю парового котла, обґрунтувати вибір засобів вимірювальної техніки та розробити алгоритми обробки вимірювальної інформації.

4. Розробити метрологічне забезпечення системи контролю: побудувати метрологічні моделі вимірювальних каналів, виконати розрахунок метрологічних характеристик, розробити процедури калібрування та систему метрологічного моніторингу.

5. Виконати практичну реалізацію та експериментальні дослідження розробленого метрологічного забезпечення, оцінити його ефективність.

Об'єкт дослідження - система контролю технологічних параметрів парового котла.

Предмет дослідження - метрологічне забезпечення вимірювальних каналів системи контролю парового котла, методи та засоби підвищення точності та надійності вимірювань.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу, математичного моделювання, теорії похибок вимірювань, теорії ймовірностей та математичної статистики, чисельні методи, методи калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки, методи програмної інженерії, порівняльного аналізу.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										10

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальна характеристика парових котлів як об'єкта контролю

Паровий котел являє собою складний енергетичний агрегат, призначений для виробництва насиченої або перегрітої водяної пари шляхом перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію. Залежно від призначення, тиску пари, типу палива та конструктивних особливостей парові котли поділяються на промислові, енергетичні, водогрійні, пароперегрівачі та комбіновані. У промисловій практиці найбільшого поширення набули водотрубні котли, в яких вода та пар циркулюють по трубах, а продукти згоряння палива омивають їх зовнішню поверхню.

Основні технологічні параметри парового котла, що підлягають контролю, включають:

- тиск пари на виході з котла (типовий діапазон 1,0–14,0 МПа для промислових котлів);
- температура пари (для насиченої пари визначається тиском, для перегрітої - додатково контролюється у межах 250–540 °С);
- рівень води в паровому барабані (критичний параметр, підтримується в межах ± 50 мм від номінального);
- витрата палива (природний газ, мазут, вугілля, біомаса);
- витрата води на живлення котла;
- концентрація кисню у димових газах (індикатор повноти згоряння, оптимальне значення 1,0–3,5%);
- температура димових газів на виході з котла;
- рН та електропровідність живильної та котлової води;
- вміст шкідливих речовин у димових газах (SO_2 , NO_x , CO , зола).

тапл. и дата		Основні технологічні параметри парового котла, що підлягають контролю, включають: - тиск пари на виході з котла (типовий діапазон 1,0–14,0 МПа для промислових котлів); - температура пари (для насиченої пари визначається тиском, для перегрітої - додатково контролюється у межах 250–540 °С); - рівень води в паровому барабані (критичний параметр, підтримується в межах ± 50 мм від номінального); - витрата палива (природний газ, мазут, вугілля, біомаса); - витрата води на живлення котла; - концентрація кисню у димових газах (індикатор повноти згорання, оптимальне значення 1,0–3,5%); - температура димових газів на виході з котла; - рН та електропровідність живильної та котлової води; - вміст шкідливих речовин у димових газах (SO₂, NO_x, CO, зола).				
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	
					Лист 11	

Таким чином, паровий котел є багатопараметричним об'єктом з взаємопов'язаними технологічними процесами, що потребує комплексного автоматизованого контролю з високою метрологічною надійністю вимірювальних каналів.

Розвиток систем контролю парових котлів пройшов етапи від локальних приладів контролю (манометрів, термометрів, рівнемірів з прямою індикацією) через аналогові системи автоматичного регулювання до сучасних цифрових автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП).

Традиційні системи контролю базувалися на показувальних та самописних приладах з передачею інформації до щита оператора. Регулювання здійснювалося за допомогою пневматичних або електричних регуляторів з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом. Такі системи мали обмежені метрологічні можливості: похибка вимірювання складала 1,0–2,5%, міжповірочний інтервал був коротким, діагностика стану засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) практично відсутня.

Сучасні АСУ ТП парових котлів будуються на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК), промислових комп'ютерів, розподілених систем

	тапл. и дата				
	Инв. № дубл.				
	Взам. инв. №				
	Підп. і дата				
Инв. № подл.					
Розвиток систем контролю парових котлів пройшов етапи від локальних приладів контролю (манометрів, термометрів, рівнемірів з прямою індикацією) через аналогові системи автоматичного регулювання до сучасних цифрових автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП).					
Традиційні системи контролю базувалися на показувальних та самописних приладах з передачею інформації до щита оператора. Регулювання здійснювалося за допомогою пневматичних або електричних регуляторів з пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом. Такі системи мали обмежені метрологічні можливості: похибка вимірювання складала 1,0–2,5%, міжповірочний інтервал був коротким, діагностика стану засобів виміральної техніки (ЗВТ) практично відсутня.					
Сучасні АСУ ТП парових котлів будуються на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК), промислових комп'ютерів, розподілених систем					
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
А 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 12

збору даних та інтелектуальних датчиків з цифровими інтерфейсами (HART, Foundation Fieldbus, Profibus PA, Modbus). Вони забезпечують:

- безперервний збір даних від сотень точок контролю з періодом опитування 10–500 мс;
- складні алгоритми регулювання з прогнозуванням, адаптацією та координацією контурів;
- візуалізацію технологічного процесу на мнемосхемах у реальному часі;
- архівування даних, формування звітів, інтеграцію з корпоративними системами (MES, ERP);
- дистанційний моніторинг та керування через Web-інтерфейс.

Прикладом сучасних рішень є системи Siemens SIMATIC PCS 7, Emerson Ovation, Honeywell Experion PKS, Yokogawa CENTUM VP. Ці платформи підтримують інтеграцію інтелектуальних датчиків, що надають інформацію не лише про вимірювану величину, а й про власний метрологічний стан (самодіагностика, статистика відмов, час напрацювання).

Проте аналіз експлуатації показує, що навіть у сучасних АСУ ТП метрологічне забезпечення часто обмежується періодичною перевіркою датчиків згідно з встановленим міжповірочним інтервалом. При цьому:

- метрологічні характеристики датчиків можуть погіршуватися між перевітками через дрейф нуля, зміну чутливості, вплив агресивного середовища;
- відсутній оперативний контроль метрологічної придатності в реальному часі;
- процедури калібрування виконуються вручну, що збільшує трудомісткість та ймовірність людської помилки;
- не враховується вплив умов експлуатації (температура навколишнього середовища, вологість, вібрація, електромагнітні перешкоди) на сумарну похибку вимірювального каналу.

Таким чином, існує суттєвий резерв підвищення якості контролю шляхом удосконалення метрологічного забезпечення вимірювальних каналів.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Проте аналіз експлуатації показує, що навіть у сучасних АСУ ТП метрологічне забезпечення часто обмежується періодичною перевіркою датчиків згідно з встановленим міжповірочним інтервалом. При цьому: - метрологічні характеристики датчиків можуть погіршуватися між повірками через дрейф нуля, зміну чутливості, вплив агресивного середовища; - відсутній оперативний контроль метрологічної придатності в реальному часі; - процедури калібрування виконуються вручну, що збільшує трудомісткість та ймовірність людської помилки; - не враховується вплив умов експлуатації (температура навколишнього середовища, вологість, вібрація, електромагнітні перешкоди) на сумарну похибку вимірювального каналу. Таким чином, існує суттєвий резерв підвищення якості контролю шляхом удосконалення метрологічного забезпечення вимірювальних каналів.					Лист 13
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

1.3. Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів системи контролю

Метрологічне забезпечення (МЗ) системи контролю парового котла охоплює нормативне, матеріальне, інформаційне та кадрове забезпечення.

Нормативна база включає:

- Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» (Відомості Верховної Ради України, 1998, № 29);

- ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій»;

- ДСТУ ISO 10012:2005 «Системи управління засобами вимірювань. Вимоги до процесів вимірювань та засобів вимірювань»;

- ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2012 «Невизначеність вимірювання. Частина 3. Посібник з вираження невизначеності вимірювання» (GUM);

- ДСТУ EN 12952, ДСТУ EN 12953 (стандарти на водотрубні та вогнетрубні парові котли);

- галузеві норми та правила з експлуатації енергетичних котлів.

Матеріальне забезпечення передбачає наявність еталонів та засобів калібрування, прослідковуваність яких до національних еталонів забезпечується через акредитовані калібрувальні лабораторії. Для парових котлів критичними є еталони тиску (манометричні або поршневі манометри), температури (термостати з еталонними термометрами опору), витрати (вагові системи або стандартні сопла), складу газів (газові суміші з сертифікованою концентрацією).

Інформаційне забезпечення охоплює бази даних про метрологічні характеристики ЗВТ, результати калібрувань, повірок, ремонтів, відмов. Ефективне управління цими даними потребує спеціалізованого програмного забезпечення, що інтегрується з АСУ ТП.

Основні метрологічні характеристики вимірювальних каналів системи контролю:

- похибка основної відносна або приведена (% від діапазону);

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 14

- варіація показів (%);
- чутливість (одиниця вимірюваної величини / одиниця вихідного сигналу);
- час відгуку (с);
- дрейф нуля (% / рік);
- діапазон робочих температур навколишнього середовища (°C);
- ступінь захисту (IP).

Для типових датчиків тиску (наприклад, Rosemount 3051S) базова похибка становить $\pm 0,025\%$ від діапазону, дрейф - до $0,1\%$ за 10 років. Датчики температури (термопари типу К) мають похибку $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ або $0,75\%$ (що більше), терморезистори Pt100 класу А - $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рівнеміри ємнісні - похибка $\pm 0,25\text{--}1,0\%$ від діапазону.

Сумарна похибка вимірювального каналу формується з похибок первинного перетворювача, нормуючого перетворювача, лінії зв'язку, аналого-цифрового перетворювача, програмної обробки. При стандартному підході до оцінки часто враховується лише базова похибка датчика, що дає занижену оцінку реальної невизначеності вимірювання.

Проведений аналітичний огляд дозволяє зробити наступні висновки:

1. Паровий котел є складним багатопараметричним об'єктом контролю, для якого характерна висока взаємопов'язаність технологічних процесів та жорсткі вимоги до безпеки. Основні контрольовані параметри - тиск пари, температура, рівень води, витрата палива, склад димових газів, параметри водного режиму.

2. Сучасні АСУ ТП парових котлів досягли високого рівня автоматизації технологічних процесів, проте метрологічне забезпечення вимірювальних каналів часто відстає від технічних можливостей обладнання. Переважна більшість систем обмежується періодичною перевіркою без оперативного моніторингу метрологічного стану та автоматизації процедур калібрування.

3. Існуюча нормативна база (Закон України «Про метрологію», ДСТУ ISO/IEC 17025, ДСТУ ISO 10012, GUM) створює правові та методичні

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ			
					Лист			
					15			

передумови для комплексного метрологічного забезпечення, однак потребує конкретизації щодо специфіки парових котлів.

4. Реальна сумарна похибка вимірювального каналу суттєво перевищує базову похибку датчика через вплив додаткових факторів: умов експлуатації, характеристик лінії зв'язку, перетворювачів, програмної обробки. Існуючі підходи до оцінки похибок часто є неповними.

5. Розвиток інтелектуальних датчиків з самодіагностикою, цифрових інтерфейсів та обчислювальних можливостей ПЛК створює технічні передумови для впровадження прогресивних методів метрологічного забезпечення: автоматизованого калібрування, онлайн-моніторингу метрологічного стану, адаптивної компенсації похибок.

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

Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						16

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1. Методологія метрологічного забезпечення технічних систем

2.1.1. Сутність та зміст метрологічного забезпечення

Метрологічне забезпечення (МЗ) являє собою сукупність правових, організаційних, наукових, технічних та економічних заходів, спрямованих на досягнення єдності та необхідної точності вимірювань, а також однозначності оцінок якості продукції, робіт і послуг на основі використання засобів, методів і норм метрології. У широкому розумінні метрологічне забезпечення охоплює всі стадії життєвого циклу технічної системи - від проєктування та виготовлення до експлуатації та утилізації.

Згідно з ДСТУ 3651.0-97 «Метрологія. Забезпечення єдності вимірювань. Основні положення», метрологічне забезпечення включає такі основні напрями:

- правове метрологічне забезпечення (створення нормативно-правової бази у сфері метрології);
- науково-технічне метрологічне забезпечення (створення, вдосконалення та утримання державної системи забезпечення єдності вимірювань);
- метрологічне забезпечення конкретних галузей народного господарства (розробка та впровадження нормативних документів, методик вимірювань, засобів калібрування та контролю).

Для технічних систем, зокрема систем контролю парових котлів, найбільшого значення набуває галузеве метрологічне забезпечення, яке конкретизує загальні положення щодо специфіки об'єкта.

Структура метрологічного забезпечення системи контролю парового котла включає чотири взаємопов'язані складові:

1. Нормативне забезпечення - сукупність законів, стандартів, норм,

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	Згідно з ДСТУ 3651.0-97 «Метрологія. Забезпечення єдності вимірювань. Основні положення», метрологічне забезпечення включає такі основні напрями:				
					- правове метрологічне забезпечення (створення нормативно-правової бази у сфері метрології);				
					- науково-технічне метрологічне забезпечення (створення, вдосконалення та утримання державної системи забезпечення єдності вимірювань);				
					- метрологічне забезпечення конкретних галузей народного господарства (розробка та впровадження нормативних документів, методик вимірювань, засобів калібрування та контролю).				
					Для технічних систем, зокрема систем контролю парових котлів, найбільшого значення набуває галузеве метрологічне забезпечення, яке конкретизує загальні положення щодо специфіки об'єкта.				
Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	Структура метрологічного забезпечення системи контролю парового котла включає чотири взаємопов'язані складові:				
					1. Нормативне забезпечення - сукупність законів, стандартів, норм,				
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				
					Лист 17				

правил, методик, що регламентують вимоги до вимірювань, засобів вимірювальної техніки, процедур калібрування та повірки, кваліфікації персоналу;

2. Матеріальне забезпечення - комплекс засобів вимірювальної техніки (робочих, контрольних, еталонних), випробувального та калібрувального обладнання, допоміжних пристроїв, стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів;

3. Інформаційне забезпечення - бази даних про метрологічні характеристики ЗВТ, результати калібрувань і повірок, нормативні документи, програмне забезпечення для обробки та аналізу вимірювальної інформації;

4. Кадрове забезпечення - персонал, що має відповідну кваліфікацію та повноваження для виконання метрологічних робіт: метрологи, інженери-метрологи, повірники, калібрувальники.

2.1.2. Метрологічна експлуатація засобів вимірювальної техніки

Метрологічна експлуатація ЗВТ охоплює сукупність операцій, пов'язаних із підтримкою метрологічних характеристик засобів вимірювань у межах установлених норм протягом усього періоду їх використання. Основні етапи метрологічної експлуатації:

Приймальний контроль. Проводиться при отриманні ЗВТ від постачальника. Перевіряється комплектність, цілісність, наявність паспорта, свідоцтва про повірку або калібрування, відповідність заявленим метрологічним характеристикам. Для критичних вимірювальних каналів рекомендується проведення додаткового калібрування власними еталонами.

Введення в експлуатацію. Включає встановлення ЗВТ на об'єкті, підключення до системи збору даних, первинне налаштування, реєстрацію в обліковій системі з фіксацією метрологічних характеристик, дати введення в експлуатацію, міжповірочного інтервалу.

Періодична повірка. Обов'язкова процедура для ЗВТ, що підлягають державному метрологічному контролю (перелік затверджується Кабінетом

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 18
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Міністрів України). Повірка проводиться акредитованими метрологічними службами з періодичністю, встановленою в технічній документації на ЗВТ або нормативних документах (типовий міжповірочний інтервал для датчиків тиску - 1 рік, для термопар - 1–2 роки, для рівнемірів - 1–2 роки).

Калібрування. Процедура визначення фактичних метрологічних характеристик ЗВТ шляхом порівняння з еталоном. На відміну від повірки, калібрування може проводитися власними силами підприємства за наявності відповідних еталонів та кваліфікованого персоналу. Результатом є свідоцтво про калібрування з вказанням фактичних значень похибки, невизначеності, умов проведення робіт.

Ремонт та відновлення. Після ремонту, що може вплинути на метрологічні характеристики, проводиться обов'язкове калібрування або повірка. Ремонтні роботи фіксуються в технічній документації.

Зняття з експлуатації. Проводиться при досягненні граничного стану, неможливості відновлення метрологічних характеристик, моральному зношенні. Супроводжується оформленням акту та оновленням облікової документації.

Для системи контролю парового котла характерна складність метрологічної експлуатації через велику кількість різнотипних ЗВТ, жорсткі вимоги до безперервності контролю, агресивність середовища (висока температура, тиск, вологість, хімічно активні речовини), необхідність робіт у складних умовах.

2.1.3. Прослідковуваність вимірювань

Прослідковуваність вимірювань - властивість результату вимірювання або значення стандарту бути пов'язаним з відповідними еталонами через безперервний ланцюг калібрувань, кожне з яких сприяє визначенню невизначеності. Прослідковуваність є фундаментальною вимогою ДСТУ ISO/IEC 17025 та забезпечує довіру до результатів вимірювань.

Для системи контролю парового котла ланцюг прослідковуваності формується наступним чином:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 19
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Національний первинний еталон одиниці вимірювання (тиску, температури, маси тощо) → державний спеціальний еталон або еталон одиниць вимірювання → робочий еталон калібрувальної лабораторії → еталонне ЗВТ підприємства → робоче ЗВТ системи контролю.

Кожна ланка ланцюга вносить додаткову складову невизначеності, що враховується при оцінці сумарної невизначеності вимірювання робочим ЗВТ. Для системи контролю парового котла критичним є забезпечення прослідковуваності для каналів контролю тиску пари (безпека), рівня води (безпека), температури пари (ефективність), витрати палива (економіка).

2.1.4. Метрологічна надійність вимірювальних каналів

Метрологічна надійність - комплексна властивість вимірювального каналу, що характеризує здатність зберігати метрологічні характеристики в установлених межах протягом заданого часу при дотриманні умов експлуатації. На відміну від загальної надійності (безвідмовності), метрологічна надійність акцентується на збереженні точності, а не просто працездатності.

Основні фактори, що впливають на метрологічну надійність вимірювальних каналів системи контролю парового котла:

- природний дрейф метрологічних характеристик ЗВТ з часом;
- вплив температури навколишнього середовища (для датчиків, встановлених поза приміщенням, діапазон $-40 \dots +60$ °C);
- вплив вологості та конденсації вологи в з'єднувальних коробках;
- вібрація від роботи насосів, вентиляторів, турбін;
- електромагнітні перешкоди від силового обладнання;
- хімічна активність середовища (агресивні компоненти димових газів, кислотність конденсату);
- механічне зношування (ерозія, корозія, осідання продуктів згоряння);
- якість живлення (перепади напруги, пульсації).

Для кількісної оцінки метрологічної надійності використовуються показники:

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 20
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					

- середній час напрацювання на метрологічну відмову (час до виходу характеристик за допустимі межі);
- ймовірність збереження метрологічних характеристик протягом заданого часу;
- інтенсивність метрологічних відмов;
- метрологічна готовність - ймовірність того, що в довільний момент часу канал перебуває в метрологічно справному стані.

Підвищення метрологічної надійності досягається резервуванням каналів (установкою двох або трьох датчиків на критичний параметр із системою голосування), використанням ЗВТ із розширеним діапазоном робочих умов, періодичною автоматичною калібруванням, програмною компенсацією впливових факторів.

2.1.5. Автоматизація метрологічного забезпечення

Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки та засобів зв'язку створює передумови для автоматизації процедур метрологічного забезпечення. Автоматизоване метрологічне забезпечення (АМЗ) системи контролю парового котла включає:

Автоматизований збір метрологічних даних. Інтелектуальні датчики з цифровими інтерфейсами (HART, Foundation Fieldbus) передають не лише вимірюване значення, а й діагностичну інформацію: статус самодіагностики, час напрацювання, кількість циклів перекалібровки, поточні значення температури електроніки, напруги живлення.

Автоматизоване калібрування. Реалізується двома способами: (а) програмна перекалібровка - корекція калібрувальних коефіцієнтів у пам'яті датчика на підставі порівняння з еталонним значенням, що подається системою; (б) апаратне калібрування - підключення еталонного генератора сигналу або еталонного датчика через комутаційну апаратуру під керуванням програми.

Онлайн-моніторинг метрологічного стану. Алгоритми аналізу статистичних характеристик сигналу (дисперсія, спектральний склад,

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	створює передумови для автоматизації процедур метрологічного забезпечення. Автоматизоване метрологічне забезпечення (АМЗ) системи контролю парового котла включає:					
					Автоматизований збір метрологічних даних. Інтелектуальні датчики з цифровими інтерфейсами (HART, Foundation Fieldbus) передають не лише вимірюване значення, а й діагностичну інформацію: статус самодіагностики, час напрацювання, кількість циклів перекалібровки, поточні значення температури електроніки, напруги живлення.					
					Автоматизоване калібрування. Реалізується двома способами: (а) програмна перекалібровка - корекція калібрувальних коефіцієнтів у пам'яті датчика на підставі порівняння з еталонним значенням, що подається системою; (б) апаратне калібрування - підключення еталонного генератора сигналу або еталонного датчика через комутаційну апаратуру під керуванням програми.					
					Онлайн-моніторинг метрологічного стану. Алгоритми аналізу статистичних характеристик сигналу (дисперсія, спектральний склад,					
					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										21
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Управління метрологічними ресурсами. Автоматизовані системи планування калібрувань формують графіки на підставі фактичного стану ЗВТ, а не фіксованого міжповірочного інтервалу, що дозволяє оптимізувати витрати та ризики.

На підставі аналізу нормативних документів та технічних регламентів сформульовано основні метрологічні вимоги до системи контролю парового котла.

Контрольований параметр	Діапазон вимірювання	Допустима похибка	Клас точності ЗВТ
Тиск пари	0...16 МПа	±0,5%	0,4
Температура пари	0...550 °C	±1,0%	1,0
Рівень води в барабані	±300 мм	±1,5%	1,5
Витрата палива (газ)	0...5000 м³/год	±1,0%	1,0
Витрата палива (рідке)	0...10000 кг/год	±0,5%	0,5
Вміст O₂ у димових газах	0...10% об.	±0,2% абс.	2,0
pH води	6...10	±0,2	1,0
Електропровідність води	0...1000 мкСм/см	±2,0%	2,0

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тапл. и дата																																				
<table><tr><td>Контрольований параметр</td><td>Діапазон вимірювання</td><td>Допустима похибка</td><td>Клас точності ЗВТ</td></tr><tr><td>Тиск пари</td><td>0...16 МПа</td><td>±0,5%</td><td>0,4</td></tr><tr><td>Температура пари</td><td>0...550 °С</td><td>±1,0%</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Рівень води в барабані</td><td>±300 мм</td><td>±1,5%</td><td>1,5</td></tr><tr><td>Витрата палива (газ)</td><td>0...5000 м³/год</td><td>±1,0%</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Витрата палива (рідке)</td><td>0...10000 кг/год</td><td>±0,5%</td><td>0,5</td></tr><tr><td>Вміст O₂ у димових газах</td><td>0...10% об.</td><td>±0,2% абс.</td><td>2,0</td></tr><tr><td>рН води</td><td>6...10</td><td>±0,2</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Електропровідність води</td><td>0...1000 мкСм/см</td><td>±2,0%</td><td>2,0</td></tr></table>					Контрольований параметр	Діапазон вимірювання	Допустима похибка	Клас точності ЗВТ	Тиск пари	0...16 МПа	±0,5%	0,4	Температура пари	0...550 °С	±1,0%	1,0	Рівень води в барабані	±300 мм	±1,5%	1,5	Витрата палива (газ)	0...5000 м³/год	±1,0%	1,0	Витрата палива (рідке)	0...10000 кг/год	±0,5%	0,5	Вміст O ₂ у димових газах	0...10% об.	±0,2% абс.	2,0	рН води	6...10	±0,2	1,0	Електропровідність води	0...1000 мкСм/см	±2,0%	2,0
Контрольований параметр	Діапазон вимірювання	Допустима похибка	Клас точності ЗВТ																																					
Тиск пари	0...16 МПа	±0,5%	0,4																																					
Температура пари	0...550 °С	±1,0%	1,0																																					
Рівень води в барабані	±300 мм	±1,5%	1,5																																					
Витрата палива (газ)	0...5000 м³/год	±1,0%	1,0																																					
Витрата палива (рідке)	0...10000 кг/год	±0,5%	0,5																																					
Вміст O ₂ у димових газах	0...10% об.	±0,2% абс.	2,0																																					
рН води	6...10	±0,2	1,0																																					
Електропровідність води	0...1000 мкСм/см	±2,0%	2,0																																					
Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тапл. и дата																																				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата																																				
А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				Лист 22																																				

Додаткові вимоги:

- час відгуку каналу контролю тиску - не більше 100 мс (для аварійного захисту);
- надмірність критичних каналів (тиск, рівень) - не менше двох із трьох;
- прослідковуваність калібрувань до національних еталонів;
- автоматична фіксація результатів калібрувань в електронному журналі;
- можливість віддаленої діагностики метрологічного стану.

Таким чином, методологія метрологічного забезпечення системи контролю парового котла представляє собою комплексну багаторівневу систему, що інтегрує нормативне, матеріальне, інформаційне та кадрове забезпечення на всіх етапах життєвого циклу. Ключовими принципами є прослідковуваність вимірювань, забезпечення метрологічної надійності, автоматизація процедур калібрування та моніторингу, адаптація до специфічних умов експлуатації парогенеруючого обладнання.

2.2. Методи оцінки похибок вимірювальних каналів

2.2.1. Класифікація похибок вимірювань

Похибка вимірювання - це відхилення результату вимірювання від дійсного (або істинного) значення вимірюваної величини. Згідно з ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення», похибки класифікуються за різними ознаками.

За характером прояву розрізняють.

Систематичні похибки - складові похибки вимірювання, що залишаються постійними або змінюються за передбачуваним законом при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини. Джерела систематичних похибок: неточність градування датчика, зсув нульової точки, нелінійність характеристики, вплив температури навколишнього середовища, тиску, вологості. Систематичні похибки піддаються виявленню та корекції шляхом введення

тап. и дата					
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Підп. і дата					
Инв. № подл.					
2.2. Методи оцінки похибок вимірювальних каналів 2.2.1. Класифікація похибок вимірювань Похибка вимірювання - це відхилення результату вимірювання від дійсного (або істинного) значення вимірюваної величини. Згідно з ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення», похибки класифікуються за різними ознаками. За характером прояву розрізняють. Систематичні похибки - складові похибки вимірювання, що залишаються постійними або змінюються за передбачуваним законом при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини. Джерела систематичних похибок: неточність градування датчика, зсув нульової точки, нелінійність характеристики, вплив температури навколишнього середовища, тиску, вологості. Систематичні похибки піддаються виявленню та корекції шляхом введення					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 23

поправок, калібрування, компенсації впливових факторів.

Випадкові похибки - складові похибки вимірювання, що змінюються випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї й тієї самої величини. Вони обумовлені безліччю неконтрольованих факторів: флуктуаціями електричних сигналів, механічними вібраціями, нестабільністю джерел живлення, шумами вимірювального тракту. Випадкові похибки піддаються статистичній обробці та оцінці через стандартне відхилення або дисперсію.

Грубі похибки (промахи) - похибки, що значно перевищують очікувані за умовами досліду. Вони виникають через раптові збої обладнання, помилки оператора, зовнішні перешкоди. Грубі похибки виявляються статистичними критеріями (критерій Романовського, критерій Граббса, правило 3σ) та виключаються з обробки.

За джерелом виникнення похибки поділяють на:

- похибки еталона або зразка (похибка 1-го роду);
- похибки засобу вимірювань;
- похибки методу вимірювань;
- похибки оператора (суб'єктивні);
- похибки від впливу умов експлуатації.

Для вимірювального каналу системи контролю парового котла типова структура похибки включає всі зазначені складові, причому вплив умов експлуатації є особливо значущим через агресивне середовище та значні коливання температури.

2.2.2. Метрологічна модель вимірювального каналу

Вимірювальний канал системи контролю парового котла являє собою сукупність функціонально пов'язаних технічних засобів, що забезпечують вимірювання та перетворення інформації про контрольований параметр у форму, придатну для подальшої обробки. Структурно канал складається з таких елементів.

Первинний перетворювач (датчик) - безпосередньо сприймає вимірювану

Ив. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 24
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

величину та перетворює її в електричний сигнал. Приклади: мембранний датчик тиску, термопара, ємнісний рівнемір.

Нормуючий перетворювач - перетворює вихідний сигнал датчика у стандартний уніфікований сигнал (типово 4–20 мА, 0–10 В) або цифровий код. Часто інтегрується в корпус інтелектуального датчика.

Лінія зв'язку - передає сигнал від датчика до пристрою збору даних. Може бути аналоговою (двопровідна лінія 4–20 мА) або цифровою (Fieldbus, Ethernet).

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) - перетворює аналоговий сигнал у цифровий код з певною розрядністю (типово 12–16 біт).

Програмна обробка - фільтрація, лінеаризація, компенсація температури, масштабування в інженерні одиниці.

Математична модель вимірювального каналу описує зв'язок між дійсним значенням вимірюваної величини X та результатом вимірювання Y :

$$Y = f(X) + \Delta Y$$

де $f(X)$ - ідеальна перетворювальна функція каналу; ΔY - сумарна похибка каналу.

Для лінеаризованого каналу в околі робочої точки:

$$Y = k \cdot X + b + \Delta Y$$

де k - коефіцієнт передачі (чутливість); b - зсув нульової точки.

Сумарна похибка каналу ΔY формується з похибок окремих елементів з урахуванням їх взаємозв'язку. При незалежності складових:

$$\Delta Y = \Delta Y_1 + \Delta Y_2 + \Delta Y_3 + \dots + \Delta Y_n$$

де ΔY_i - похибка i -го елемента каналу.

Для каналу вимірювання тиску парового котла типова структура похибки:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{дат}} + \Delta P_{\text{нп}} + \Delta P_{\text{лін}} + \Delta P_{\text{АЦП}} + \Delta P_{\text{пр}}$$

де $\Delta P_{\text{дат}}$ - похибка датчика тиску (базова + додаткова від температури, статичного тиску); $\Delta P_{\text{нп}}$ - похибка нормуючого перетворювача; $\Delta P_{\text{лін}}$ - похибка лінії зв'язку (падіння напруги, наведення); $\Delta P_{\text{АЦП}}$ - похибка квантування та нелінійності АЦП; $\Delta P_{\text{пр}}$ - похибка програмної обробки (округлення, апроксимація).

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 25
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

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

Лист
26

достатньому числі ступенів свободи $k = 2$.

Результат вимірювання записується у формі:

$$Y = y \pm U (k = 2, p = 95\%)$$

2.2.4. Застосування методу GUM для вимірювального каналу тиску

Розглянемо практичне застосування методу GUM для каналу вимірювання тиску пари парового котла з такими характеристиками:

- діапазон вимірювання: 0–10 МПа;
- датчик: Rosemount 3051S, базова точність $\pm 0,025\%$ від діапазону;
- нормуючий перетворювач: інтегрований у датчик;
- лінія зв'язку: двопровідна, 4–20 мА, опір навантаження 250 Ом;
- АЦП: 16-біт, діапазон 0–20 мА;
- умови експлуатації: температура навколишнього середовища 20 ± 15 °С.

Вхідні величини та їх невизначеності:

1. Базова похибка датчика (з паспорта, рівномірний розподіл, межі $\pm 0,025\%$ від 10 МПа = $\pm 2,5$ кПа) $u_1 = 2,5/\sqrt{3} = 1,44$ кПа;

2. Додаткова похибка від температури навколишнього середовища (з паспорта, $\pm 0,1\%$ на 10 °С, діапазон зміни 30 °С, рівномірний розподіл, межі $\pm 0,3\%$ від 10 МПа = $\pm 3,0$ кПа): $u_2 = 3,0/\sqrt{3} = 1,73$ кПа;

3. Похибка лінії зв'язку (падіння напруги, опір з'єднань, оцінка експертна, межі $\pm 0,01\%$ від 10 МПа = $\pm 1,0$ кПа, рівномірний розподіл): $u_3 = 1,0/\sqrt{3} = 0,58$ кПа;

4. Похибка АЦП (16 біт, діапазон 20 мА, крок квантування 0,305 мкА, що відповідає 0,019% від діапазону тиску, межі $\pm 0,01\%$ з урахуванням нелінійності = $\pm 1,0$ кПа, рівномірний розподіл): $u_4 = 1,0/\sqrt{3} = 0,58$ кПа;

5. Похибка програмної обробки (округлення, апроксимація, межі $\pm 0,005\% = \pm 0,5$ кПа, рівномірний розподіл): $u_5 = 0,5/\sqrt{3} = 0,29$ кПа.

Припускаючи незалежність складових, комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(1,44^2 + 1,73^2 + 0,58^2 + 0,58^2 + 0,29^2)} = \sqrt{(2,07 + 2,99 + 0,34 + 0,34 + 0,08)} =$$

тап. и дата						
Инв. №дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. №подл.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						27

$$\sqrt{5,82} = 2,41 \text{ кПа}$$

Розширена невизначеність ($k = 2$, $p \approx 95\%$):

$$U = 2 \cdot 2,41 = 4,82 \text{ кПа}$$

Відносна розширена невизначеність:

$$U_{\text{відн}} = (4,82 / 10\,000) \cdot 100\% = 0,048\%$$

Результат вимірювання тиску 5,0 МПа записується:

$$P = 5,000 \pm 0,005 \text{ МПа } (k = 2, p = 95\%)$$

Аналіз внесків показує, що основний внесок у сумарну невизначеність вносять базова похибка датчика (34%) та додаткова похибка від температури (51%). Це вказує на пріоритетність заходів із термокомпенсації та стабілізації температурного режиму для зниження невизначеності каналу.

2.2.5. Метод Монте-Карло для оцінки невизначеності

Доповненням 1 до GUM (JCGM 101:2008) пропонує метод Монте-Карло як альтернативу аналітичному методу GUM для складних моделей, нелінійних перетворень або ненормальних розподілів. Суть методу полягає у статистичному моделюванні:

1. Задаються розподіли вхідних величин (нормальний, рівномірний, трикутний тощо);
2. Генерується N (типово 10^6) наборів випадкових значень вхідних величин відповідно до їх розподілів;
3. Для кожного набору обчислюється значення вихідної величини за моделлю $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$;
4. З отриманої вибірки результатів оцінюється середнє значення, стандартне відхилення, довірчі інтервали.

Переваги методу Монте-Карло: можливість обробки будь-яких розподілів, нелінійних моделей, корельованих вхідних величин; отримання повної інформації про розподіл вихідної величини; відсутність необхідності у лінеаризації та обчисленні часткових похідних.

Недоліки: висока обчислювальна вартість (хоча сучасні комп'ютери

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

перетворень або ненормальних розподілів. Суть методу полягає у статистичному моделюванні:

1. Задаються розподіли вхідних величин (нормальний, рівномірний, трикутний тощо);
2. Генерується N (типово 10⁶) наборів випадкових значень вхідних величин відповідно до їх розподілів;
3. Для кожного набору обчислюється значення вихідної величини за моделлю $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$;
4. З отриманої вибірки результатів оцінюється середнє значення, стандартне відхилення, довірчі інтервали.

Переваги методу Монте-Карло: можливість обробки будь-яких розподілів, нелінійних моделей, корельованих вхідних величин; отримання повної інформації про розподіл вихідної величини; відсутність необхідності у лінеаризації та обчисленні часткових похідних.

Недоліки: висока обчислювальна вартість (хоча сучасні комп'ютери

					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						28
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Контроль за критерієм Шухарта. Результати вимірювань групуються у підгрупи (типово 3–5 значень), обчислюються середні значення підгруп та їх розмахи. Будуються контрольні карти з лініями центру (CL), верхньої та нижньої контрольних меж (UCL, LCL). Вихід точки за межі або систематична тенденція свідчать про порушення статистичної управлінності процесу вимірювання, тобто про зміну метрологічних характеристик.

Спектральний аналіз сигналу. Швидке перетворення Фур'є (FFT) дозволяє виділити періодичні складові шуму, пов'язані з роботою обладнання (насоси, вентилятори), електромережі (50 Гц та гармоніки), та оцінити їх внесок у сумарну похибку.

2.2.7. Методи оцінки похибок вимірювальних каналів у реальних умовах експлуатації

Умови експлуатації парового котла суттєво відрізняються від нормальних умов калібрування (20 °С, 101,325 кПа, 65% відносної вологості). Для оцінки додаткових похибок застосовуються:

Метод прямих вимірювань впливових факторів. Під час експлуатації фіксуються значення температури навколишнього середовища, вологості, вібрації, напруги живлення. За паспортними коефіцієнтами впливу обчислюються додаткові похибки. Недолік - необхідність наявності відповідних датчиків моніторингу умов.

Метод порівняльних вимірювань з переносним еталоном. Періодично (наприклад, раз на місяць) до вимірювального каналу підключається переносний еталонний прилад, що має вищий клас точності та пройшов калібрування в акредитованій лабораторії. Різниця показань дає оцінку поточної похибки каналу з урахуванням усіх факторів експлуатації. Перевага - інтегральна оцінка; недолік - необхідність зупинки технологічного процесу або встановлення байпасу.

Метод косвенної оцінки за моделлю впливових факторів. На підставі теоретичних залежностей та експериментальних даних будується математична модель:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 30
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

$$\Delta Y_{\text{дод}} = f(T_{\text{amb}}, H, V, U_{\text{supply}}, \dots)$$

де T_{amb} - температура навколишнього середовища; H - відносна вологість; V - рівень вібрації; U_{supply} - напруга живлення.

Коефіцієнти моделі визначаються методом планування експерименту (повний факторний план, плани типу «латинський квадрат») або регресійним аналізом історичних даних. Модель інтегрується в програмне забезпечення системи контролю для онлайн-компенсації додаткових похибок.

Метод байєсівської оцінки. Поєднує апіорну інформацію про розподіл похибки (з паспорта, результатів попередніх калібрувань) з поточними даними експлуатації. Дозволяє оновлювати оцінку невизначеності в реальному часі з урахуванням «віком» інформації. Перспективний для інтелектуальних систем з самонавчанням.

Таким чином, оцінка похибок вимірювальних каналів системи контролю парового котла потребує застосування комплексу методів: аналітичного моделювання за GUM, статистичної обробки експериментальних даних, імітаційного моделювання Монте-Карло, оперативних методів оцінки в реальних умовах експлуатації. Вибір конкретного методу або їх комбінації залежить від призначення каналу (контроль, регулювання, аварійний захист), доступної інформації про впливові фактори та вимог до достовірності оцінки.

2.3. Методи калібрування та перевірки засобів вимірювальної техніки

2.3.1. Поняття та сутність калібрування і перевірки

Калібрування та перевірка є ключовими процедурами метрологічного забезпечення, що забезпечують достовірність вимірювань шляхом встановлення відповідності метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки вимогам нормативних документів.

Калібрування - сукупність операцій, що виконуються для встановлення в експлуатаційних умовах або в умовах, наближених до експлуатаційних,

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	імітаційного моделювання Монте-Карло, оперативних методів оцінки в реальних умовах експлуатації. Вибір конкретного методу або їх комбінації залежить від призначення каналу (контроль, регулювання, аварійний захист), доступної інформації про впливові фактори та вимог до достовірності оцінки.					
					2.3. Методи калібрування та повірки засобів вимірювальної техніки					
					2.3.1. Поняття та сутність калібрування і повірки					
					Калібрування та повірка є ключовими процедурами метрологічного забезпечення, що забезпечують достовірність вимірювань шляхом встановлення відповідності метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки вимогам нормативних документів.					
Калібрування - сукупність операцій, що виконуються для встановлення в експлуатаційних умовах або в умовах, наближених до експлуатаційних,										
										Лист
					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					31
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

фактичних значень метрологічних характеристик засобу вимірювальної техніки або визначення інших метрологічних властивостей. Результатом калібрування є свідоцтво про калібрування, яке містить фактичні значення метрологічних характеристик, їх невизначеність, умови проведення робіт та прослідковуваність до еталону.

Повірка - сукупність операцій, що виконуються державною метрологічною службою або уповноваженими організаціями з метою перевірки та підтвердження відповідності засобів вимірювальної техніки встановленим метрологічним вимогам. Повірка є обов'язковою для ЗВТ, включених до Переліку засобів вимірювальної техніки, що підлягають державному метрологічному контролю. Результатом є свідоцтво про повірку або позначка про придатність.

Основні відмінності калібрування та повірки наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Порівняльна характеристика калібрування та повірки

Ознака	Калібрування	Повірка
Організація	Будь-яка компетентна лабораторія	Акредитована метрологічна служба
Обов'язковість	Добровільна (за рішенням власника)	Обов'язкова (для ЗВТ з Переліку)
Результат	Свідоцтво з фактичними характеристиками	Свідоцтво або позначка про придатність/непридатність
Прослідковуваність	До еталону лабораторії	До державного еталону
Періодичність	За рішенням власника	Встановлена нормативно
Мета	Визначення фактичних характеристик	Підтвердження відповідності вимогам

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 32
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Для системи контролю парового котла доцільно поєднувати обидві процедури: обов'язкову періодичну повірку критичних ЗВТ та оперативне калібрування для підтримки метрологічної придатності між повірками.

2.3.2. Методика калібрування датчиків тиску

Датчики тиску є одними з найбільш критичних ЗВТ системи контролю парового котла, оскільки тиск пари безпосередньо пов'язаний із безпекою та ефективністю роботи обладнання.

Обладнання для калібрування:

- еталонний манометр або цифровий манометр-калібратор класу точності 0,05 або вище (наприклад, Fluke 700G, Beamex PGM);
- пневматичний або гідравлічний гвинтовий прес із діапазоном, що покриває діапазон калібрування;
- джерело стабільного тиску (компресор із редуктором, балон з інертним газом);
- термостат або камера для підтримки температури 20 ± 2 °С;
- мультиметр для вимірювання вихідного струму (при калібруванні датчиків з виходом 4–20 мА);
- персональний комп'ютер із програмним забезпеченням для реєстрації та обробки даних.

Підготовка до калібрування:

1. Візуальний огляд датчика на відсутність механічних пошкоджень, корозії, цілісність кабелю;
2. Перевірка комплектності (датчик, паспорт, попереднє свідоцтво про калібрування/повірку);
3. Витримування датчика в камері калібрування не менше 2 годин для температурної стабілізації;
4. Підключення датчика до джерела живлення та вимірювального обладнання відповідно до схеми;
5. Підключення еталонного манометра до калібрувальної лінії.

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ
					Лист 33

Порядок калібрування.

Калібрування проводять за методом прямих вимірювань у нормальних умовах (20 ± 2 °С, атмосферний тиск 86–106 кПа, відносна вологість $\leq 80\%$). Точки калібрування розподіляють рівномірно по всьому діапазону, включаючи нижню та верхню межі. Рекомендована кількість точок - не менше 5 (0, 25, 50, 75, 100% діапазону).

Алгоритм вимірювань у кожній точці:

1. Встановлення тиску, що калібрується, за еталонним манометром із точністю $\pm 0,5\%$ від кроку дискретизації;
2. Витримування протягом часу стабілізації (не менше 30 секунд для датчиків тиску з мембраною $\varnothing 50$ мм, до 120 секунд для датчиків з ізольованою мембраною);
3. Зчитування показань еталонного манометра ($P_{\text{ет}}$) та вихідного сигналу датчика ($I_{\text{вих}}$ або цифрове значення $P_{\text{дат}}$);
4. Повторення вимірювань 3 рази для оцінки відтворюваності;
5. Перехід до наступної точки.

Послідовність проходження точок: зростання тиску (прямий хід) $\rightarrow$ зменшення тиску (зворотний хід). Це дозволяє оцінити гістерезис датчика.

Обробка результатів:

Для кожної точки калібрування обчислюються:

- середнє значення вихідного сигналу: $\bar{I} = (1/n) \cdot \sum I_i$
- експериментальне стандартне відхилення: $s = \sqrt{[\sum (I_i - \bar{I})^2 / (n-1)]}$
- абсолютна похибка в точці: $\Delta P = P_{\text{дат}} - P_{\text{ет}}$
- відносна похибка: $\delta = (\Delta P / P_{\text{діап}}) \cdot 100\%$

де $P_{\text{діап}}$ - верхня межа діапазону вимірювання.

За результатами всіх точок визначаються:

- основна приведена похибка: $\delta_{\text{осн}} = \max |\delta_i|$
- варіація показів (гістерезис): $V = \max |P_{\text{прям}} - P_{\text{звор}}|$
- лінійність: $L = \max |(P_{\text{дат}} - P_{\text{лін}}) / P_{\text{діап}}| \cdot 100\%$

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 34
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

де Р_лін - значення на прямій, що з'єднує точки 0 та 100%, у даній точці калібрування.

Оформлення результатів:

Результати калібрування оформляються у вигляді свідоцтва про калібрування, яке містить:

- ідентифікаційні дані ЗВТ (тип, заводський номер, виробник);
- умови калібрування (температура, тиск, вологість);
- опис еталонів та обладнання з їх метрологічними характеристиками;
- таблицю результатів з точками калібрування;
- графік похибки та гістерезису;
- висновок про придатність або непридатність за заявленим класом точності;
- розширену невизначеність калібрування ($k = 2$);
- прослідковуваність до еталону;
- підпис калібрувальника та затвердження керівником лабораторії.

2.3.3. Методика калібрування термометрів опору та термопар

Температура пари та димових газів є критичним параметром ефективності та безпеки роботи парового котла. Для її вимірювання застосовують термометри опору (переважно Pt100, Pt1000) та термопари (типу K, N, S).

Обладнання для калібрування:

- еталонний термометр опору або термопара зі свідоцтвом про калібрування;
- термостат рідинний (діапазон $-40...+200$ °C) або піч трубчаста (діапазон $+200...+1200$ °C);
- вимірювач опору або термо-ЕРС точністю не гірше 0,01 %;
- комп'ютер із програмним забезпеченням;
- лідовий баня для визначення 0 °C (при калібруванні термопар та Pt100);
- точки фіксованої температури (трійна точка води, точка плавлення галлію, точка замерзання індію).

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист
										35
					Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Калібрування термометрів опору Pt100:

Термометри опору калібрують за методом порівняльних вимірювань у термостаті. Точки калібрування вибирають із розрахунку покриття робочого діапазону з кроком 50–100 °С, але не менше 3 точок.

Порядок калібрування:

1. Встановлення еталонного та каліброваного термометрів у термостаті на одній глибині, забезпечення теплового контакту із робочою середою;
2. Витримування до досягнення температурної рівноваги (не менше 15 хвилин після стабілізації показань еталонного термометра);
3. Зчитування опору еталонного термометра ($R_{ет}$) та каліброваного ($R_{дат}$) одночасно або з мінімальним інтервалом (до 1 секунди);
4. Повторення вимірювань 4–5 разів для оцінки відтворюваності;
5. Перехід до наступної температури.

Обробка результатів:

Температура за еталонним термометром визначається за його калібрувальним рівнянням або таблицею. Для каліброваного термометра обчислюється відхилення:

$$\Delta t = t_{дат} - t_{ет}$$

де $t_{дат}$ - температура, визначена за опором каліброваного термометра за номінальною характеристикою; $t_{ет}$ - температура за еталонним термометром.

Будується калібрувальна характеристика - залежність $\Delta t(t)$ або $R_{дійс}(t)$. Для практичного застосування апроксимується поліномом:

$$R_{дійс} = R_{ном} + a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots$$

Коефіцієнти a_0 , a_1 , a_2 визначаються методом найменших квадратів.

Калібрування термопар:

Термопари калібрують у печі трубчастій або за точками фіксованої температури. Особливістю є необхідність компенсації температури холодного спая (ТХС). Застосовують:

- льову баню (0 °С) - найточніший метод;
- електронну компенсацію за датчиком температури холодного спая;

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 36
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

- ізотермічний блок з автоматичною компенсацією.

Порядок калібрування аналогічний термометрам опору, але з урахуванням ЕРС термопари. Результатом є залежність $ЕРС_{дійс}(t)$ або поправки до стандартної таблиці.

2.3.4. Методика калібрування рівнемірів

Рівень води в паровому барабані - параметр, що безпосередньо впливає на безпеку котла. Застосовують ємнісні, ультразвукові, диференціальні, радарні рівнеміри.

Калібрування ємнісного рівнеміра:

Ємнісні рівнеміри вимірюють зміну ємності конденсатора, утвореного електродом та стінкою барабана (при зонному типі) або двома електродами (при врізному типі), при зміні рівня води.

Методика калібрування у виробничих умовах:

1. Встановлення мінімального рівня (0%) - повний злив води з контрольної трубки або визначення нижньої мертвої зони;
2. Фіксація вихідного сигналу при 0% (має відповідати 4 мА або цифровому еквіваленту);
3. Поступове наповнення водою до номінального рівня з кроком 10–20%;
4. Фіксація вихідного сигналу в кожній точці;
5. Встановлення максимального рівня (100%) - повне наповнення до верхньої мертвої зони;
6. Фіксація вихідного сигналу при 100% (має відповідати 20 мА);
7. Повторення циклу зменшення рівня для оцінки гістерезису.

Для лабораторного калібрування використовують вертикальну трубку з міліметровою шкалою та еталонний рівнемір або лінійку. Перевага - точність визначення положення рівня; недолік - відмінність умов від експлуатаційних (тиск, температура, якість води).

Калібрування диференціального рівнеміра.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 37
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Диференціальні рівнеміри вимірюють різницю гідростатичного тиску між двома точками занурення. Калібрування проводять за методом моделювання тиску:

1. Підключення датчика до джерела тиску замість імпульсних трубок;
2. Подача тиску, що відповідає мінімальному рівню (різниця тисків на межі діапазону);
3. Налаштування нульового значення (4 мА);
4. Подача тиску, що відповідає максимальному рівню;
5. Налаштування межі діапазону (20 мА);
6. Перевірка лінійності в проміжних точках.

Важливо врахувати, що калібрування диференціального рівнеміра в лабораторних умовах не враховує впливу температури води, її щільності, газового подушки в барабані. Тому рекомендується проводити додаткове калібрування в реальних умовах методом порівняння з еталонним рівнеміром.

2.3.5. Методика калібрування витратомірів палива

Витрата палива (природний газ, мазут, вугілля) визначає економічність роботи парового котла. Для рідких та газоподібних палив застосовують турбінні, ультразвукові, коріолісові, діафрагмові витратоміри.

Калібрування діафрагмового витратоміра:

Діафрагмові витратоміри базуються на вимірюванні перепаду тиску на стандартній діафрагмі. Калібрування зводиться до перевірки коефіцієнта витрати C або дискового коефіцієнта K .

Обладнання:

- еталонний витратомір (наприклад, коріолісовий або турбінний) вищого класу точності;
- колектор для створення заданих режимів витрати;
- манометри для вимірювання тиску до та після діафрагми;
- термометр для вимірювання температури середовища.

Методика:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 38

1. Встановлення заданої витрати за еталонним витратоміром;
2. Витримування до стабілізації режиму (не менше 5 хвилин);
3. Зчитування перепаду тиску на діафрагмі, тиску та температури середовища;

4. Обчислення фактичної витрати за формулою:

$$Q_{\text{факт}} = C \cdot \varepsilon \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) \cdot \sqrt{(2 \cdot \Delta P / \rho)}$$

де C - коефіцієнт витрати; ε - коефіцієнт стисливості; d - діаметр отвору діафрагми; ΔP - перепад тиску; ρ - густина середовища.

5. Порівняння $Q_{\text{факт}}$ з $Q_{\text{ет}}$ та обчислення відносної похибки;
6. Повторення для 5–7 точок у діапазоні витрат (типово $Q_{\min}$, $0,25Q_{\max}$, $0,5Q_{\max}$, $0,75Q_{\max}$, $Q_{\max}$).

Калібрування коріолісового витратоміра:

Коріолісові витратоміри мають високу точність (0,1–0,2%) та не потребують попередньої підготовки середовища. Калібрування проводять методом порівняльних вимірювань з еталонним ваговим методом або еталонним витратоміром.

Ваговий метод (найточніший):

1. Наповнення накопичувального резервуара середовищем через калібруваний витратомір;
2. Фіксація часу наповнення та маси за еталонними вагами;
3. Обчислення фактичної витрати: $Q_{\text{факт}} = m / (\rho \cdot t)$;
4. Порівняння з показаннями витратоміра.

2.3.6. Програмно-апаратні засоби автоматизації калібрування

Сучасний рівень розвитку техніки дозволяє значною мірою автоматизувати процедури калібрування, що особливо актуально для систем контролю парових котлів з великою кількістю ЗВТ.

Автоматизовані калібрувальні установки:

Портативні калібратори (наприклад, Fluke 754, Veamex MC6) інтегрують у собі:

тап. и дата	витратоміром.				
Инв. № дубл.	Ваговий метод (найточніший):				
Взам. инв. №	1. Наповнення накопичувального резервуара середовищем через калібруваний витратомір;				
Підп. і дата	2. Фіксація часу наповнення та маси за еталонними вагами;				
Инв. № подл.	3. Обчислення фактичної витрати: $Q_{\text{факт}} = m / (\rho \cdot t)$;				
	4. Порівняння з показаннями витратоміра.				
	2.3.6. Програмно-апаратні засоби автоматизації калібрування				
	Сучасний рівень розвитку техніки дозволяє значною мірою автоматизувати процедури калібрування, що особливо актуально для систем контролю парових котлів з великою кількістю ЗВТ.				
	Автоматизовані калібрувальні установки:				
	Портативні калібратори (наприклад, Fluke 754, Veamex MC6) інтегрують у собі:				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ
					Лист 39

- джерела та вимірювачі тиску, температури, електричних сигналів;
- комунікаційні інтерфейси для підключення до інтелектуальних датчиків (HART, Foundation Fieldbus);
- вбудовані процедури автоматичного калібрування;
- програмне забезпечення для документування.

Порядок автоматичного калібрування:

1. Підключення калібратора до датчика через відповідний інтерфейс;
2. Вибір типу датчика з бази даних або ручне введення параметрів;
3. Завантаження програми калібрування (кількість точок, кількість циклів, критерії придатності);
4. Автоматичне створення тиску/сигналу калібратором, зчитування відгуку датчика;
5. Автоматичне порівняння, обчислення похибок, прийняття рішення про придатність;
6. Формування протоколу калібрування з електронним підписом;
7. Запис калібрувальних коефіцієнтів у пам'ять датчика (для інтелектуальних датчиків).

Програмне забезпечення для управління калібруванням:

Спеціалізовані програми (Beamex CMX, Fluke DPCTrack2, CompuCal) забезпечують:

- планування графіків калібрувань з урахуванням міжповірочних інтервалів;
- автоматичне сповіщення про наближення терміну калібрування;
- зберігання історії калібрувань кожного ЗВТ;
- аналіз трендів метрологічних характеристик;
- інтеграцію з системою управління якістю (ISO 9001);
- формування звітів для аудитів.

Для системи контролю парового котла доцільна розробка спеціалізованого програмного модуля, що інтегрується з АСУ ТП та виконує:

- моніторинг метрологічного стану всіх ЗВТ у реальному часі;

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 40

- автоматичне планування калібрувань за фактичним станом, а не за календарем;
- дистанційне калібрування інтелектуальних датчиків без зупинки технологічного процесу;
- архівування результатів з прослідковуваністю;
- прогнозування дрейфу характеристик на основі статистичних моделей.

2.3.7. Оформлення результатів калібрування та повірки

Результати калібрування та повірки оформлюються відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025 та національних положень про повірку.

Свідоцтво про калібрування (Додаток Г) повинно містити:

1. Назву та адресу лабораторії, що провела калібрування;
2. Унікальний ідентифікаційний номер свідоцтва та сторінки;
3. Ідентифікацію замовника;
4. Опис каліброваного ЗВТ (тип, модель, заводський номер, виробник);
5. Дату отримання, дату калібрування, дату видачі свідоцтва;
6. Ідентифікацію методики калібрування;
7. Опис еталонів та допоміжного обладнання з їх метрологічними характеристиками та прослідковуваністю;
8. Умови навколишнього середовища під час калібрування;
9. Таблицю результатів з точками калібрування, еталонними значеннями, показаннями ЗВТ, похибками, невизначеністю;
10. Графічне представлення результатів (за необхідності);
11. Висновок про придатність або непридатність за заявленим класом точності;
12. Розширену невизначеність калібрування з указанням коефіцієнта охоплення та рівня довіри;
13. Заяву про те, що свідоцтво може бути відтворене лише частково без письмового дозволу лабораторії;
14. Підписи калібрувальника, технічного керівника, печатку лабораторії.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 41
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

подальшою обробкою їхніх показань за певним алгоритмом. Види резервування наведено нижче.

Структурне резервування - дублювання або триплексування всього вимірювального каналу від датчика до пристрою введення АСУ ТП. Забезпечує найвищу надійність, але потребує значних капітальних витрат.

Функціональне резервування - резервування лише первинних перетворювачів із спільним використанням нормуючих перетворювачів, ліній зв'язку та АЦП. Досягає компромісу між надійністю та вартістю.

Інформаційне резервування - використання різнотипних датчиків, що вимірюють різні величини, але дозволяють обчислити контрольований параметр. Наприклад, рівень води в барабані можна оцінити за показаннями датчиків тиску на різних висотах.

Алгоритми обробки показань резервованих каналів:

Для двократного резервування (два датчики):

Алгоритм порогового контролю. Порівняння різниці показань із допустимим порогом:

- $|y_1 - y_2| \leq \Delta_{\text{доп}}$ - обидва датчики працездатні, результат - середнє значення;
- $|y_1 - y_2| > \Delta_{\text{доп}}$ - фіксація невідповідності, аналіз за додатковими критеріями.

Недолік - неможливість визначення, який із датчиків несправний.

Алгоритм вагового середнього. Припускаючи різну точність датчиків (оцінену за дисперсією похибки σ_1^2, σ_2^2):

$$y_{\text{рез}} = (y_1/\sigma_1^2 + y_2/\sigma_2^2) / (1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2)$$

Датчик із меншою дисперсією має більшу вагу. Перевага - адаптація до різної якості каналів; недолік - необхідність оцінки дисперсій.

Для триплексного резервування (три датчики).

Алгоритм «два з трьох» (2oo3 - two out of three). Результат формується як середнє двох показань, що найменше відрізняються. Третє показання вважається несправним і виключається з обробки.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	допустимим порогом:	
					$y_1 - y_2 \leq \Delta_{\text{доп}}$ - обидва датчики працездатні, результат - середнє значення; $y_1 - y_2 > \Delta_{\text{доп}}$ - фіксація невідповідності, аналіз за додатковими критеріями.	
					Недолік - неможливість визначення, який із датчиків несправний.	
					Алгоритм вагового середнього. Припускаючи різну точність датчиків (оцінену за дисперсією похибки σ_1^2, σ_2^2): $y_{\text{рез}} = (y_1/\sigma_1^2 + y_2/\sigma_2^2) / (1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2)$ Датчик із меншою дисперсією має більшу вагу. Перевага - адаптація до різної якості каналів; недолік - необхідність оцінки дисперсій. Для триплексного резервування (три датчики). Алгоритм «два з трьох» (2oo3 - two out of three). Результат формується як середнє двох показань, що найменше відрізняються. Третє показання вважається несправним і виключається з обробки.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						43

Реалізація:

1. Обчислення абсолютних різниць: $d_{12} = |y_1 - y_2|$, $d_{13} = |y_1 - y_3|$, $d_{23} = |y_2 - y_3|$;
2. Визначення мінімальної різниці: $d_{\min} = \min(d_{12}, d_{13}, d_{23})$;
3. Якщо $d_{\min} = d_{12}$ - результат $y_{\text{рез}} = (y_1 + y_2)/2$, y_3 - підозрілий;
4. Якщо $d_{\min} = d_{13}$ - результат $y_{\text{рез}} = (y_1 + y_3)/2$, y_2 - підозрілий;
5. Якщо $d_{\min} = d_{23}$ - результат $y_{\text{рез}} = (y_2 + y_3)/2$, y_1 - підозрілий.

Перевірка підозрілого каналу: якщо його відхилення від результату перевищує поріг $\Delta_{\text{доп}} = k \cdot \sigma_{\text{каналу}}$ (типово $k = 3$), фіксується метрологічна відмова та генерується аварійне сповіщення.

Переваги триплексного резервування:

- можливість виявлення несправного каналу без зупинки технологічного процесу;
- збереження працездатності системи при відмові одного каналу;
- підвищення точності результату за рахунок усереднення двох справних каналів.

Недоліки:

- збільшення вартості обладнання у 3 рази;
- ускладнення системи обслуговування;
- необхідність синхронізації датчиків.

Для системи контролю парового котла триплексне резервування є обов'язковим для каналів:

- тиску пари в барабані (захист від перевищення тиску);
- рівня води в барабані (захист від сухого ходу або затоплення);
- тиску палива (газу) перед пальниками.

Двократне резервування достатнє для каналів:

- температури пари;
- витрати палива;
- складу димових газів.

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 44
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

2.4.2. Самодіагностика та самокалібрування

Самодіагностика - вбудована функція інтелектуальних датчиків та систем контролю, що дозволяє автоматично виявляти відхилення від нормального функціонування та деградацію метрологічних характеристик без зовнішнього втручання, яка має наступні рівні.

Рівень 0 - базова діагностика: контроль живлення, обрив лінії зв'язку, вихід за межі діапазону.

Рівень 1 - розширена діагностика: моніторинг внутрішньої температури електроніки, напруги живлення, часу напрацювання, кількості циклів вмикання/вимикання.

Рівень 2 - метрологічна діагностика: оцінка дрейфу нульової точки, коефіцієнта передачі, нелінійності на основі внутрішніх еталонів або алгоритмічних методів.

Рівень 3 - прогнозна діагностика: прогнозування залишкового ресурсу, планування технічного обслуговування на основі трендів деградації.

Методи самодіагностики.

Контроль нульової точки (zero check). Періодичне (наприклад, раз на добу при зупинці котла) відключення вимірюваного впливу та фіксація вихідного сигналу. Дрейф нуля оцінюється як різниця поточного та еталонного (після останнього калібрування) значень нуля. Перевага - простота реалізації для датчиків тиску з байпасними клапанами; недолік - необхідність зупинки технологічного процесу або наявності байпасу.

Контроль чутливості (span check). Подача еталонного впливу або підключення еталонного джерела сигналу для перевірки коефіцієнта передачі. Для датчиків тиску - підключення переносного еталонного манометра; для електричних входів - підключення еталонного джерела струму/напруги.

Алгоритмічна діагностика за статистичними характеристиками сигналу:

- аналіз дисперсії: різке зростання дисперсії сигналу свідчить про появу додаткового шуму, можливо, через механічне пошкодження датчика або погіршення контакту;

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										45

- спектральний аналіз: поява нових частотних складових (наприклад, 50 Гц при пошкодженні екранування) вказує на конкретний дефект;

- аналіз автокореляційної функції: зміна характеру кореляції вказує на зміну динамічних властивостей датчика.

Методи самокалібрування:

Програмна корекція коефіцієнтів. Інтелектуальні датчики (HART, Foundation Fieldbus) зберігають у пам'яті калібрувальні коефіцієнти нуля та чутливості. При виявленні дрейфу система АСУ ТП або вбудований процесор датчика можуть автоматично скоригувати ці коефіцієнти на основі:

- порівняння з еталонним датчиком (при наявності резервування);

- аналізу тренду за історичними даними;

- результатів процедури zero check/span check.

Вбудований еталон. Деякі прецизійні датчики (наприклад, деякі моделі Rosemount, Endress+Hauser) містять вбудований еталонний елемент - стабільне джерело тиску, температури або електричного сигналу, що використовується для періодичної автоматичної перевірки. Перевага - висока точність та надійність; недолік - значне підвищення вартості.

Адаптивна фільтрація. Алгоритми Калмана або адаптивні фільтри дозволяють оцінювати та компенсувати дрейф метрологічних характеристик у реальному часі. Стан фільтра включає оцінку вимірюваної величини та параметрів дрейфу, що оновлюються за новими даними.

2.4.3. Адаптивні алгоритми компенсації похибок

Адаптивна компенсація похибок передбачає автоматичне коригування результатів вимірювань на основі поточної інформації про стан вимірювального каналу та умов експлуатації.

Компенсація впливу температури навколишнього середовища:

Для більшості датчиків тиску та температури температурний коефіцієнт нуля та чутливості є основним джерелом додаткової похибки. Адаптивна компенсація реалізується за формулою:

Ив. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата				
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ			
					Лист			
					46			

$$P_{\text{комп}} = P_{\text{вим}} - \alpha_0 \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{реф}}) - \alpha_1 \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{реф}}) \cdot P_{\text{вим}}$$

де $P_{\text{вим}}$ - вимірне значення тиску; T_{amb} - поточна температура навколишнього середовища (виміряна вбудованим датчиком); $T_{\text{реф}}$ - референтна температура калібрування (20 °C); α_0 - температурний коефіцієнт нуля; α_1 - температурний коефіцієнт чутливості.

Коефіцієнти α_0 та α_1 можуть бути:

- номінальними (з паспорта датчика);
- уточненими за результатами калібрування при різних температурах;
- адаптивно оціненими за даними експлуатації (метод найменших квадратів, фільтр Калмана).

Компенсація впливу статичного тиску:

Для диференціальних датчиків тиску, що вимірюють рівень або витрату, статичний тиск на мембрані вносить додаткову похибку. Адаптивна компенсація потребує вимірювання статичного тиску додатковим датчиком та застосування коригування:

$$\Delta P_{\text{комп}} = \Delta P_{\text{вим}} - \beta \cdot P_{\text{стат}}$$

де β - коефіцієнт впливу статичного тиску, визначений експериментально або з паспорта.

Компенсація нелінійності методом сплайн-апроксимації:

Для датчиків із суттєвою нелінійністю (термопари, ємнісні рівнеміри) застосовується кусково-лінійна або сплайн-апроксимація калібрувальної характеристики. Вузли сплайна встановлюються в точках калібрування, між вузлами використовується інтерполяція поліномами 3-го ступеня (кубічні сплайни) або лінійна інтерполяція.

Переваги: висока точність відтворення характеристики; можливість локальної корекції при перекалібруванні окремих ділянок.

Недоліки: необхідність зберігання таблиці вузлів; потенційна негладкість похідних при лінійній інтерполяції.

Компенсація дрейфу методом експоненційного згладжування:

Для повільного дрейфу нуля застосовується рекурентна оцінка:

тап. и дата		$\Delta P_{\text{комп}} = \Delta P_{\text{вим}} - \beta \cdot P_{\text{стат}}$						
		де β - коефіцієнт впливу статичного тиску, визначений експериментально або з паспорта.						
Инв. № дубл.		Компенсація нелінійності методом сплайн-апроксимації:						
Взам. инв. №		Для датчиків із суттєвою нелінійністю (термопари, ємнісні рівнеміри) застосовується кусково-лінійна або сплайн-апроксимація калібрувальної характеристики. Вузли сплайна встановлюються в точках калібрування, між вузлами використовується інтерполяція поліномами 3-го ступеня (кубічні сплайни) або лінійна інтерполяція.						
Підп. і дата		Переваги: висока точність відтворення характеристики; можливість локальної корекції при перекалібруванні окремих ділянок.						
Инв. № подл.		Недоліки: необхідність зберігання таблиці вузлів; потенційна негладкість похідних при лінійній інтерполяції.						
		Компенсація дрейфу методом експоненційного згладжування:						
		Для повільного дрейфу нуля застосовується рекурентна оцінка:						
							А 26.07.IBT.00. ПЗ	Лист
								47
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				

- метод опорних векторів (SVM) для класифікації стану;
- випадковий ліс (Random Forest) для оцінки важливості факторів;
- рекурентні нейронні мережі (LSTM) для прогнозування часових рядів.

Вхідні параметри моделі: температура, вологість, вібрація, час напруження, кількість циклів, історія похибок. Вихід: прогноз похибки на заданий горизонт, ймовірність відмови, оптимальний час наступного калібрування.

2.4.5. Комплексна система підвищення метрологічної надійності

На підставі розглянутих методів пропонується комплексна система підвищення метрологічної надійності вимірювальних каналів системи контролю парового котла, що інтегрує кілька рівнів.

Рівень 1 - апаратний: триплексне резервування критичних каналів (тиск пари, рівень води), двократне резервування інших каналів; використання ЗВТ із розширеним діапазоном робочих умов (температура навколишнього середовища $-40...+85$ °C, вологість до 100%, вібростійкість до 2 g); гальванічна розв'язка та екранування ліній зв'язку.

Рівень 2 - алгоритмічний: алгоритм «два з трьох» для обробки резервованих каналів; адаптивна компенсація температурного дрейфу та впливу статичного тиску; кубічна сплайн-інтерполяція для лінеаризації; експоненційне згладжування для оцінки дрейфу нуля; медіанна фільтрація для придушення імпульсних перешкод.

Рівень 3 - діагностичний: періодичний zero check та span check (автоматичний або напівавтоматичний); моніторинг статистичних характеристик сигналу (дисперсія, спектр); контроль узгодженості резервованих каналів; інтеграція діагностичної інформації інтелектуальних датчиків у SCADA-систему.

Рівень 4 - прогнозний: екстраполяція тренду похибки для планування калібрувань; Марковські моделі для оцінки ризиків; машинне навчання для оптимізації стратегії технічного обслуговування; формування рекомендацій щодо заміни ЗВТ до досягнення граничного стану.

тап. и дата	–40...+85 °С, вологість до 100%, вібростійкість до 2 g); гальванічна розв'язка та екранування ліній зв'язку. Рівень 2 - алгоритмічний: алгоритм «два з трьох» для обробки резервованих каналів; адаптивна компенсація температурного дрейфу та впливу статичного тиску; кубічна сплайн-інтерполяція для лінеаризації; експоненційне згладжування для оцінки дрейфу нуля; медіанна фільтрація для придушення імпульсних перешкод. Рівень 3 - діагностичний: періодичний zero check та span check (автоматичний або напіваавтоматичний); моніторинг статистичних характеристик сигналу (дисперсія, спектр); контроль узгодженості резервованих каналів; інтеграція діагностичної інформації інтелектуальних датчиків у SCADA-систему. Рівень 4 - прогнозний: екстраполяція тренду похибки для планування калібрувань; Марковські моделі для оцінки ризиків; машинне навчання для оптимізації стратегії технічного обслуговування; формування рекомендацій щодо заміни ЗВТ до досягнення граничного стану.				
Инв. № дубл.					
Взам. инв. №					
Підп. і дата					
Инв. № подл.					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.IBT.00. ПЗ
					Лист
					49

Таблиця 2.3 - Очікуваний ефект від впровадження методів підвищення метрологічної надійності

Метод	Зниження похибки	Подовження міжповірного інтервалу	Зниження аварійності
Триплексне резервування	30% (усереднення)	-	50% (виявлення відмов)
Адаптивна компенсація температури	40–60%	20%	10%
Самодіагностика zero check	20%	30%	15%
Прогнозування дрейфу	15%	40–50%	20%
Комплексна система	60–70%	50–100%	60–70%

Таким чином, підвищення метрологічної надійності системи контролю парового котла досягається через багаторівневий підхід, що поєднує апаратне резервування, алгоритмічну обробку, самодіагностику, адаптивну компенсацію та прогнозування. Кожен рівень доповнює та посилює ефект інших, забезпечуючи синергетичний результат: суттєве зниження сумарної похибки вимірювань, подовження міжповірочних інтервалів без погіршення достовірності, зниження аварійності та витрат на технічне обслуговування. Перехід від фіксованих графіків перевірки до обслуговування за фактичним станом (condition-based maintenance) є ключовою перевагою запропонованого підходу та відповідає сучасним тенденціям Industry 4.0 та цифровізації виробництва.

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										50
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРОВОГО КОТЛА

3.1. Визначення складу контрольованих параметрів парового котла

3.1.1. Технологічна схема парового котла та основні процеси

Паровий котел являє собою складний теплоенергетичний агрегат, призначений для виробництва водяної пари шляхом передачі тепла від продуктів згоряння палива до води. Як об'єкт контролю розглядається водотрубний паровий котел типу ДКВР-10/13 або аналогічний промисловий котел із природною або примусовою циркуляцією.

Основні елементи конструкції котла.

Паровий барабан - горизонтальний циліндричний корпус, у якому відбувається розділення води та пари, підтримується необхідний рівень води. Від барабана відходить паропровід до споживачів.

Топкова камера - простір, у якому відбувається згоряння палива. Обладнана пальниками (газовими, мазутними або комбінованими), системою подачі повітря, пристроями запалювання та контролю полум'я.

Змійовики (трубні системи) - системи труб, у яких вода нагрівається до температури кипіння, частково випаровується та перетворюється на пар. Розрізняють екранні труби (охоплюють топку), проміжні перегрівачі (для перегріву пари), економайзери (для підігріву живильної води).

Економайзер - теплообмінник для підігріву живильної води за рахунок тепла димових газів на виході з котла.

Повітропідігрівач - теплообмінник для підігріву повітря, що подається у топку.

Димар - труба для відведення димових газів у атмосферу.

Система живлення - насоси, що подають воду в барабан котла з

тап. и дата							
Инв. №дубл.							
Взам. инв. №							
Підп. і дата							
Инв. №подл.							
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ		Лист
							51

відбувається розділення води та пари, підтримується необхідний рівень води. Від барабана відходить паропровід до споживачів.

Топкова камера - простір, у якому відбувається згоряння палива. Обладнана пальниками (газовими, мазутними або комбінованими), системою подачі повітря, пристроями запалювання та контролю полум'я.

Змійовики (трубні системи) - системи труб, у яких вода нагрівається до температури кипіння, частково випаровується та перетворюється на пар. Розрізняють екранні труби (охоплюють топку), проміжні перегрівачі (для перегріву пари), економайзери (для підігріву живильної води).

Економайзер - теплообмінник для підігріву живильної води за рахунок тепла димових газів на виході з котла.

Повітропідігрівач - теплообмінник для підігріву повітря, що подається у топку.

Димар - труба для відведення димових газів у атмосферу.

Система живлення - насоси, що подають воду в барабан котла з

підтриманням необхідного тиску.

Система продувки - пристрої для видалення солей та шламу з барабана (безперервна та періодична продувка).

Основні технологічні процеси, що відбуваються в котлі:

1. Процес згоряння палива - хімічна реакція окиснення палива киснем повітря з виділенням тепла. Контролюється подачею палива та повітря, підтриманням стехіометричного співвідношення, стабільністю полум'я;
2. Процес теплопередачі - передача тепла від продуктів згоряння через стінки труб до води. Контролюється температурними режимами, запобіганням перегріву металу;
3. Процес пароутворення - нагрівання, кипіння та пароутворення води. Контролюється рівнем води, тиском пари, якістю води;
4. Процес видалення димових газів - відведення продуктів згоряння через димар. Контролюється тяга, температура газів, вміст шкідливих речовин.

3.1.2. Перелік контрольованих параметрів та їх класифікація

На підставі аналізу технологічної схеми та вимог безпеки визначено склад контрольованих параметрів парового котла. Параметри класифіковано за функціональним призначенням та критичністю.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										52

Таблиця 3.1 - Перелік контрольованих параметрів парового котла

№	Параметр	Позначення	Одиниці	Діапазон вимірювання	Критичність
1	Тиск пари в барабані	P _п	МПа	0...1,3 (або 0...3,9)	Критичний
2	Температура насиченої пари	T _п	°C	150...250	Критичний
3	Температура перегрітої пари	T _{пп}	°C	250...450	Високий
4	Рівень води в барабані	L	мм	-300...+300	Критичний
5	Тиск живильної води	P _{жв}	МПа	0...2,5	Високий
6	Температура живильної води	T _{жв}	°C	50...150	Середній
7	Витрата живильної води	Q _{жв}	т/год	0...15	Високий
8	Витрата природного газу	Q _г	м³/год	0...1000	Високий
9	Тиск газу перед пальниками	P _г	кПа	0...50	Критичний
10	Температура газу	T _г	°C	0...50	Середній
11	Витрата повітря	Q _п	м³/год	0...5000	Високий
12	Тиск у топці	P _т	Па	-50...+50	Середній
13	Температура димових газів після економайзера	T _{дг}	°C	100...250	Середній

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тадп. и дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 53
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

№	Параметр	Позначення	Одиниці	Діапазон вимірювання	Критичність
14	Вміст кисню у димових газах	O ₂	% об.	0...10	Високий
15	Вміст CO у димових газах	CO	мг/м³	0...1000	Середній
16	Вміст NO _x у димових газах	NO _x	мг/м³	0...500	Середній
17	рН живильної води	рН_жв	-	6,0...9,0	Середній
18	Електропровідність живильної води	σ_жв	мкС м/см	0...1000	Середній
19	рН котлової води	рН_кв	-	9,0...11,0	Середній
20	Електропровідність котлової води	σ_кв	мкС м/см	0...5000	Середній
21	Положення регулюючих органів	α	%	0...100	Високий

Класифікація за критичністю.

Критичні параметри - відхилення яких безпосередньо загрожує безпеці персоналу, цілісності обладнання або навколишньому середовищу. Для цих параметрів передбачено триплексне резервування вимірювальних каналів, автоматичний аварійний захист (АЗ) з незалежним від АСУ ТП виконавчим пристроєм, періодичність повірки не рідше 1 разу на рік.

До критичних параметрів належать: тиск пари в барабані, рівень води в барабані, тиск газу перед пальниками. Температура насиченої пари є критичною опосередковано, оскільки вона однозначно пов'язана з тиском.

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

A 26.07.IBT.00. ПЗ

Лист
54

Середній рівень критичності - відхилення впливають на економічність, довговічність, екологічні показники. Без резервування, контроль та реєстрація, перевірка 1 раз на 2 роки.

Діапазони вимірювань визначаються робочими умовами котла з урахуванням можливих аварійних режимів. Верхня межа діапазону вибирається з таким розрахунком, щоб номінальне робоче значення становило 60–80% від діапазону, що забезпечує запас для аварійних ситуацій та оптимальну точність вимірювання.

Параметр	Номінальне значення	Діапазон вимірювання	Допустима абсолютна похибка	Допустима відносна похибка
Тиск пари	1,0 МПа	0...1,6 МПа	±8 кПа	±0,5%
Температура пари	183 °С	0...250 °С	±2,5 °С	±1,0%
Рівень води	0 мм	−400...+400 мм	±6 мм	±1,5%
Тиск живильної води	2,0 МПа	0...2,5 МПа	±12,5 кПа	±0,5%
Витрата живильної води	10 т/год	0...16 т/год	±0,16 т/год	±1,0%
Витрата газу	800 м³/год	0...1200 м³/год	±12 м³/год	±1,0%

Параметр	Номинальне значення	Діапазон вимірювання	Допустима абсолютна похибка	Допустима відносна похибка
Тиск газу	30 кПа	0...50 кПа	±0,5 кПа	±1,0%
Витрата повітря	4000 м³/год	0...6000 м³/год	±60 м³/год	±1,0%
Температура димових газів	150 °С	0...300 °С	±6 °С	±2,0%
Вміст O ₂	3,0%	0...10%	±0,2% абс.	-
pH води	8,5	0...14	±0,2	-
Електропровідність	500 мкСм/см	0...1000	±20 мкСм/см	±2,0%

Допустимі похибки встановлені з урахуванням:

- вимог нормативних документів (Правила будови та безпечної експлуатації парових котлів, ДНАОП 0.00-1.08-94);
- точності регулювання (похибка вимірювання має бути у 3–5 разів меншою за допустиме відхилення регулювання);
- точності аварійного захисту (похибка вимірювання має забезпечувати спрацювання захисту з запасом не менше 10% від уставки);
- економічної доцільності (зниження вимог до точності призводить до втрат ефективності, завищення - до неоправданих витрат).

3.1.4. Вимоги до швидкодії та надійності каналів контролю

Для забезпечення якості регулювання та безпеки пред'являються вимоги до часу відгуку вимірювальних каналів:

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

Лист
56

Таблиця 3.3 - Вимоги до часу відгуку каналів

Призначення каналу	Максимальний час відгуку	Примітки
Аварійний захист тиску пари	100 мс	Безпосередній захист барабана
Аварійний захист рівня води	200 мс	Захист від сухого ходу
Контур регулювання тиску пари	500 мс	Якість регулювання
Контур регулювання рівня води	1 с	Запобігання коливанням
Контур регулювання співвідношення «повітря-газ»	2 с	Ефективність згоряння
Контроль якості води	10 с	Повільні процеси
Контроль викидів	30 с	Нормативний облік

Вимоги до надійності:

- імовірність безвідмовної роботи вимірювального каналу протягом міжповірного інтервалу - не менше 0,99 для критичних параметрів, 0,95 - для інших;
- середній час відновлення при відмові - не більше 2 годин для критичних каналів, 8 годин - для інших;
- наявність резервування: триплексне - для критичних, дуплексне - для високої критичності.

3.1.5. Інтеграція параметрів у систему автоматичного регулювання

Контрольовані параметри об'єднуються в контури автоматичного регулювання (АР).

Контур 1 - регулювання тиску пари. Вимірюваний параметр: тиск пари в барабані (P_p). Регулюючий орган: клапан подачі палива. Закон регулювання:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 57
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

ПІД. Уставка: номінальний тиск. Захист: при перевищенні $P_{п} > 1,15 \cdot P_{ном}$ - аварійне відключення пальників.

Контур 2 - регулювання рівня води. Вимірюваний параметр: рівень води в барабані (L). Регулюючий орган: клапан живильної води. Закон регулювання: ПІД з корекцією по витраті пари (каскадне регулювання). Уставка: номінальний рівень. Захист: при $L < -200$ мм - аварійне відключення пальників; при $L > +250$ мм - аварійна продувка.

Контур 3 - регулювання співвідношення «повітря-газ». Вимірювані параметри: витрата газу ($Q_{г}$), витрата повітря ($Q_{п}$), вміст O_2 у димових газах. Регулюючі органи: клапан газу, заслінка повітря. Закон регулювання: ПІД з корекцією по O_2 (оптимізація згоряння). Уставка по O_2 : 2,0–3,5% (залежно від потужності).

Контур 4 - регулювання температури перегрітої пари. Вимірюваний параметр: $T_{пп}$. Регулюючий орган: клапан інжекції води в проміжний перегрівач. Закон регулювання: ПІД.

Контур 5 - контроль водного режиму. Вимірювані параметри: рН, електропровідність живильної та котлової води. Регулюючі органи: дозатори хімреагентів. Закон регулювання: двопозиційний або ПІД.

3.2. Вибір та обґрунтування засобів вимірювальної техніки

3.2.1. Вибір датчиків тиску

Для вимірювання тиску пари в барабані, живильної води, газу перед пальниками розглянуто наступні типи датчиків.

Мембранні датчики тиску з п'єзорезистивним чутливим елементом. Принцип дії базується на зміні електричного опору напівпровідникових резисторів, нанесених на мембрану, під дією деформації від тиску. Переваги: висока точність (0,025–0,1%), широкий діапазон, стійкість до перевантажень, компактність. Недоліки: чутливість до температури (вимагає компенсації),

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				
					Лист 58				

Ємнісні датчики тиску. Принцип дії - зміна ємності конденсатора при деформації мембрани. Переваги: висока чутливість, низький дрейф, хороша стійкість до перепадів тиску. Недоліки: складність виготовлення, вища вартість, вимогливість до електроніки.

На підставі аналізу для системи контролю парового котла обрано мембранні датчики тиску з п'єзорезистивним чутливим елементом та силіконовою ізоляцією для агресивних середовищ.

Характеристика	Rosemount 3051S	Endress+Hauser Cerabar S	Siemens SITRANS P DS III	WIKA S-20
Базова точність	±0,025%	±0,055%	±0,065%	±0,1%
Діапазон тиску	0,1...40 МПа	0,005...40 МПа	0,01...40 МПа	0,01...60 МПа
Температура середовища	−40...+120 °C	−40...+125 °C	−40...+100 °C	−40...+125 °C
Вихідний сигнал	4–20 мА, HART	4–20 мА, HART, FF	4–20 мА, HART	4–20 мА, HART
Самодіагностика	Так	Так	Так	Hi
Ціна (умовна)	100%	95%	85%	60%

					А 26.07.IBT.00. ПЗ	Лис
						59
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Обґрунтування вибору: для критичних каналів (тиск пари в барабані, тиск газу) обрано Rosemount 3051S завдяки найвищій точності, розвиненій самодіагностиці, наявності функції Power Advisory (діагностика якості живлення), вбудованої температурної компенсації, широкому визнанню в енергетиці. Для менш критичних каналів (тиск живильної води) допустимий варіант Siemens SITRANS P DS III з оптимальним співвідношенням ціна/якість.

Технічні характеристики обраного датчика Rosemount 3051S:

- тип: датчик абсолютного/надлишкового тиску;
- чутливий елемент: п'єзорезистивний на кремнієвій мембрані;
- базова точність: $\pm 0,025\%$ від діапазону;
- стабільність: $\pm 0,1\%$ від діапазону протягом 10 років;
- діапазон робочих температур: $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (електроніка), $-40...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (чутливий елемент);
- вихід: 4–20 мА з цифровим сигналом HART;
- матеріали мембрани: 316L, Hastelloy C-276, Monel;
- ступінь захисту: IP66/67;
- вибухозахист: Ex ia IIC T6...T4 Ga;
- функції: самодіагностика, локальна індикація, дистанційне конфігурування, керування діапазоном.

3.2.2. Вибір датчиків температури

Для вимірювання температури пари, димових газів, живильної води, палива розглянуто термопари та термометри опору.

Термопари. Принцип дії базується на термоелектричному ефекті Зеєбека - виникненні ЕРС у замкненому колі з двох різнорідних металів при різниці температур спаїв. Переваги: широкий діапазон (до $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$), механічна міцність, швидка відповідь. Недоліки: потреба компенсації температури холодного спая, нелінійність, дрейф характеристик з часом.

Термометри опору (RTD). Принцип дії - зміна електричного опору металу

тап. и дата		- матеріали мембрани: 316L, Hastelloy C-276, Monel; - ступінь захисту: IP66/67; - вибухозахист: Ex ia IIC T6...T4 Ga; - функції: самодіагностика, локальна індикація, дистанційне конфігурування, керування діапазоном.					
Инв. № дубл.		3.2.2. Вибір датчиків температури					
Взам. инв. №		Для вимірювання температури пари, димових газів, живильної води, палива розглянуто термопари та термометри опору.					
Підп. і дата		Термопари. Принцип дії базується на термоелектричному ефекті Зеєбека - виникненні ЕРС у замкненому колі з двох різнорідних металів при різниці температур спаїв. Переваги: широкий діапазон (до 1700 °С), механічна міцність, швидка відповідь. Недоліки: потреба компенсації температури холодного спая, нелінійність, дрейф характеристик з часом.					
Инв. № подл.		Термометри опору (RTD). Принцип дії - зміна електричного опору металу					
						А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
							60
		Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

(платина, мідь, нікель) з температурою. Переваги: висока точність (клас А: $\pm 0,15$ °С), відмінна лінійність, стабільність. Недоліки: обмежений діапазон (до 600 °С для Pt100), більший розмір, повільніша відповідь.

Таблиця 3.5 - Порівняльна характеристика датчиків температури

Характеристика	Термопара типу К	Термопара типу N	Pt100 клас А	Pt100 клас В
Діапазон	-200...+1260 °С	-270...+1300 °С	-200...+850 °С	-200...+850 °С
Точність	$\pm 2,2$ °С або 0,75%	$\pm 2,2$ °С або 0,75%	$\pm 0,15$ °С	$\pm 0,3$ °С
Лінійність	Погана	Погана	Відмінна	Відмінна
Стабільність	Середня	Висока	Висока	Висока
Вартість	Низька	Середня	Середня	Низька

Обґрунтування вибору:

- для температури насиченої пари (до 250 °С) та живильної води - термометри опору Pt100 класу А (висока точність, лінійність, стабільність);
- для температури перегрітої пари (до 450 °С) - термопари типу N (покращена стабільність порівняно з типом К, менший дрейф);
- для температури димових газів (до 300 °С) - термопари типу К (достатня точність, низька вартість, можливість заміни без зупинки котла).

Технічні характеристики обраних датчиків:

Термометр опору WKA TR10-B (Pt100 клас А):

- чутливий елемент: тонкоплівковий Pt100;
- клас точності: А (ІЕС 60751), $\pm 0,15$ °С при 0 °С;
- діапазон: -200...+600 °С;
- діаметр захисної гільзи: 6 мм;
- матеріал гільзи: нержавіюча сталь 1.4571;
- вихід: 4-провідне з'єднання (компенсація опору проводів);

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	Обґрунтування вибору:					Лист 61	
					Технічні характеристики обраних датчиків:						
					Термометр опору WKA TR10-B (Pt100 клас А):						
Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист 61

- ступінь захисту: IP65;

- динамічна характеристика: $\tau_{0,63} = 5$ с при $v = 0,2$ м/с.

Термопара WKA TC10-K (тип K):

- чутливий елемент: хромель-алюмель;

- точність: клас 1, $\pm 1,5$ °C при $t < 375$ °C, $\pm 0,004 \cdot t$ при $t > 375$ °C;

- діапазон: $-40 \dots +1000$ °C;

- діаметр захисної гільзи: 3 мм (швидка відповідь);

- матеріал гільзи: нержавіюча сталь 1.4841;

- вихід: компенсаційні проводи до вимірювального перетворювача;

- вимірювальний перетворювач: WKA T32 (4–20 мА, HART, автоматична компенсація ТХС).

3.2.3. Вибір рівнемірів

Для вимірювання рівня води в паровому барабані розглянуто такі типи.

Поплавкові рівнеміри. Принцип дії - переміщення поплавця, зв'язаного з магнітною системою або потенціометром. Переваги: простота, надійність, пряме вимірювання. Недоліки: механічний знос, обмежена точність, вплив вібрації, необхідність герметизації валу.

Ємнісні рівнеміри. Принцип дії - зміна ємності електрода при зміні рівня діелектрика (води). Переваги: відсутність рухомих частин, висока точність, можливість вимірювання різних рідин. Недоліки: чутливість до зміни діелектричної проникності (щільність, температура, солоність), необхідність калібрування для конкретного середовища.

Ультразвукові рівнеміри. Принцип дії - вимірювання часу проходження ультразвукового імпульсу від датчика до поверхні рідини та назад. Переваги: безконтактність, універсальність. Недоліки: вплив температури повітря (зміна швидкості звуку), піна, бризки, турбулентність поверхні.

Радарні рівнеміри. Принцип дії - вимірювання часу проходження електромагнітного імпульсу (часовий домен) або зсуву частоти (частотний домен). Переваги: висока точність, стійкість до піни, пару, пилу, високих

тап. и дата						
Ив. №дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Ив. №подл.						
магнітною системою або потенціометром. Переваги: простота, надійність, пряме вимірювання. Недоліки: механічний знос, обмежена точність, вплив вібрації, необхідність герметизації валу. Ємнісні рівнеміри. Принцип дії - зміна ємності електрода при зміні рівня діелектрика (води). Переваги: відсутність рухомих частин, висока точність, можливість вимірювання різних рідин. Недоліки: чутливість до зміни діелектричної проникності (щільність, температура, солоність), необхідність калібрування для конкретного середовища. Ультразвукові рівнеміри. Принцип дії - вимірювання часу проходження ультразвукового імпульсу від датчика до поверхні рідини та назад. Переваги: безконтактність, універсальність. Недоліки: вплив температури повітря (зміна швидкості звуку), піна, бризки, турбулентність поверхні. Радарні рівнеміри. Принцип дії - вимірювання часу проходження електромагнітного імпульсу (часовий домен) або зсуву частоти (частотний домен). Переваги: висока точність, стійкість до піни, пару, пилу, високих						
Ив. №подл.						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	
						Лист 62

температур. Недоліки: висока вартість, складність налаштування.

Диференціальні рівнеміри. Принцип дії - вимірювання гідростатичного тиску стовпа рідини. Переваги: простота, надійність, низька вартість. Недоліки: чутливість до зміни щільності, необхідність компенсації тиску в газовому просторі, проблеми з імпульсними трубками (замерзання, засмічення).

Таблиця 3.6 - Порівняльна характеристика рівнемірів

Характеристика	Поплавковий	Ємнісний	Ультразвуковий	Радарний	Диференціальний
Точність	±10 мм	±5 мм	±3 мм	±2 мм	±5 мм
Діапазон	до 3 м	до 6 м	до 15 м	до 40 м	до 100 м
Вплив піни	Ні	Слабкий	Сильний	Ні	Слабкий
Вплив температури	Слабкий	Середній	Сильний	Слабкий	Середній
Рухомі частини	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Ціна (умовна)	40%	60%	80%	100%	50%

Обґрунтування вибору - для парового барабана обрано комбіновану систему:

- основний канал: радарний рівнемір Endress+Hauser Levelflex FMP54 (висока точність, стійкість до пари, піни, високих температур до 200 °С, можливість вимірювання через металеву решітку);

- резервний канал 1: диференціальний рівнемір на базі Rosemount 3051S (незалежний принцип вимірювання, перевірка узгодженості);

- резервний канал 2: ємнісний рівнемір Endress+Hauser Liquicap FMI51 (контроль у разі відмови радарного та диференціального).

Технічні характеристики радарного рівнеміра Endress+Hauser Levelflex

Ив. №подл. Підп. і дата Взам. инв. № Ив. №дубл. тап. и дата						Лист 63
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.IBT.00. ПЗ	

FMP54:

- принцип: guided radar (TDR - Time Domain Reflectometry);
- точність: ± 2 мм;
- діапазон: до 6 м (для барабана котла достатньо);
- температура процесу: $-196 \dots +200$ °С;
- тиск процесу: $-1 \dots +40$ бар;
- матеріал зонда: нержавіюча сталь, Hastelloy;
- вихід: 4–20 мА, HART, Foundation Fieldbus;
- функції: самодіагностика, компенсація зміни діелектричної проникності, візуалізація кривої відбиття.

3.2.4. Вибір витратомірів

Для вимірювання витрати живильної води, природного газу, палива розглянуто наступні засоби вимірювання.

Турбінні витратоміри. Принцип дії - обертання турбіни потоком рідини/газу, частота обертання пропорційна витраті. Переваги: висока точність (0,25–0,5%), широкий діапазон, низька вартість. Недоліки: чутливість до забруднення, знос підшипників, необхідність прямолінійних ділянок до/після.

Ультразвукові витратоміри. Принцип дії - вимірювання різниці часу проходження ультразвукових імпульсів за/проти течії. Переваги: безконтактність, відсутність рухомих частин, робота з агресивними середовищами. Недоліки: чутливість до профілю швидкостей, наявності бульбашок, температури.

Електромагнітні витратоміри. Принцип дії - індукція ЕРС у провідній рідині, що рухається в магнітному полі. Переваги: відсутність рухомих частин, висока точність, робота з забрудненими рідинами. Недоліки: придатні лише для провідних рідин, чутливість до електромагнітних перешкод.

Коріолісові витратоміри. Принцип дії - вимірювання сили Коріоліса, що діє на рідину/газ, яка рухається по коливальній трубці. Переваги: найвища точність (0,1–0,2%), пряме вимірювання масової витрати, незалежність від профілю швидкостей, температури, тиску. Недоліки: висока вартість, обмежений

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
					A 26.07.IBT.00. ПЗ			
					Лист 64			

діапазон розмірів, чутливість до вібрації.

Діафрагмові витратоміри. Принцип дії - вимірювання перепаду тиску на стандартній діафрагмі. Переваги: простота, надійність, низька вартість, прослідковуваність. Недоліки: втрати тиску, обмежений діапазон (3:1–5:1), чутливість до забруднення.

Таблиця 3.7 - Порівняльна характеристика витратомірів

Характеристика	Турбінний	Ультразвуковий	Електромагнітний	Коріолісовий	Діафрагмовий
Точність	±0,25%	±0,5...1%	±0,3%	±0,1%	±0,5...1%
Діапазон	10:1	100:1	100:1	20:1	3...5:1
Втрати тиску	Середні	Нульові	Нульові	Середні	Високі
Рухомі частини	Так	Ні	Ні	Так (коливання)	Ні
Вартість	Середня	Висока	Середня	Дуже висока	Низька

Обґрунтування вибору:

- живильна вода: електромагнітний витратомір Endress+Hauser Promag 53P (провідна рідина, можливість забруднення, висока точність, відсутність втрат тиску);
- природний газ: турбінний витратомір Elster QA/e (висока точність, широкий діапазон, надійність, досвід експлуатації в газовій галузі);
- контроль співвідношення «повітря-газ»: діафрагмові витратоміри з диференціальними датчиками тиску (простота, достатня точність для оптимізації згоряння).

Інв. № подл. Підп. і дата Взам. инв. № Инв. № дубл. тап. и дата						Лист 65
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

Технічні характеристики електромагнітного витратоміра Endress+Hauser Promag 53P:

- діаметр: DN 80;
- точність: $\pm 0,3\%$ від вимірюваного значення;
- діапазон: 0,3...10 м/с (0...90 м³/год);
- тиск: PN 16;
- температура: -20...+60 °C (електроніка), -20...+150 °C (середовище);
- матеріал футеровки: PTFE;
- електроди: нержавіюча сталь 1.4435;
- вихід: 4–20 мА, HART, Profibus PA;
- живлення: 85...260 В AC або 20...55 В DC.

3.2.5. Вибір газоаналізаторів

Для вимірювання вмісту кисню, оксидів азоту, чадного газу у димових газах розглянуто наступні технічні засоби.

Парамагнітні аналізатори кисню. Принцип дії - вимірювання магнітної сприйнятливості кисню (парамагнетик). Переваги: висока точність, стабільність, прослідковуваність. Недоліки: чутливість до механічних перешкод, вібрації.

Цирконієві датчики кисню. Принцип дії - вимірювання ЕРС твердоелектролітного елемента на основі діоксиду цирконію при високій температурі. Переваги: швидка відповідь, компактність, можливість роботи безпосередньо в димовому тракті. Недоліки: обмежений термін служби елемента (1–3 роки), чутливість до забруднення, необхідність підтримки температури 700 °C.

Інфрачервоні аналізатори (NDIR). Принцип дії - поглинання інфрачервоного випромінювання молекулами газу. Переваги: багатокомпонентний аналіз (CO, CO₂, CH₄), висока селективність. Недоліки: чутливість до забруднення оптичних елементів, необхідність періодичної калібрування нульовою газовою сумішшю.

Хемілюмінісцентні аналізатори NO_x. Принцип дії - вимірювання

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 66
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

інтенсивності хемілюмінісценції при реакції NO з озоном. Переваги: висока чутливість, селективність. Недоліки: складність, висока вартість, необхідність генератора озону.

Обґрунтування вибору:

- кисень у димових газах: цирконієвий датчик ABB AZ20 (швидка відповідь для контуру оптимізації згоряння, можливість встановлення безпосередньо в димовому каналі, вбудований нагрівач);

- CO та NO_x: багатокомпонентний інфрачервоний аналізатор ABB AO2000 (одночасний аналіз CO, NO, NO₂, SO₂, можливість автоматичної калібрування, інтеграція з АСУ ТП).

Технічні характеристики цирконієвого датчика кисню ABB AZ20:

- діапазон: 0...25% O₂;
- точність: ±0,5% від діапазону;
- час відгуку: < 5 с (T₉₀);
- температура зонда: до 700 °C;
- довжина зонда: 0,5...2,0 м;
- вихід: 4–20 мА;
- автоматична калібрування: так (програмовані цикли);
- термін служби зонда: 2...4 роки (залежно від умов).

3.2.6. Вибір датчиків якості води

Для контролю рН та електропровідності живильної та котлової води обрано комбіновані аналізатори Endress+Hauser Liquiline CM442 з відповідними сенсорами:

- рН-сенсор Orbisint CPS11D: скляний електрод, діапазон 0...14 рН, точність ±0,02 рН, автоматична компенсація температури, самодіагностика стану електроліту та мембрани;

- кондуктометричний сенсор Condumax CLS21D: 2-електродна комірка, діапазон 0...2000 мкСм/см, точність ±0,5% від діапазону, компенсація температури за лінійним або нелінійним законом.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 67
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Переваги вибору: цифровий інтерфейс Memosens (гальванічно розв'язаний, стійкий до вологи), можливість попередньої калібрування сенсорів у лабораторії та швидкої заміни на об'єкті, інтеграція з Liquiline для комплексного контролю водного режиму.

Таблиця 3.8 - Зведена таблиця вибраних ЗВТ

№	Параметр	ЗВТ	Виробник	Кількість	Клас точності
1	Тиск пари (критичний)	3051S	Rosemount	3	0,025%
2	Тиск живильної води	SITRANS P DS III	Siemens	2	0,065%
3	Тиск газу (критичний)	3051S	Rosemount	3	0,025%
4	Температура пари	TR10-B Pt100 A	WIKA	3	Клас А
5	Температура перегрітої пари	TC10-N	WIKA	2	Клас 1
6	Температура димових газів	TC10-K	WIKA	2	Клас 1
7	Рівень води (критичний)	Levelflex FMP54	Endress+Hauser	1	±2 мм
8	Рівень води (резерв)	3051S + діафрагма	Rosemount	1	±5 мм
9	Рівень води (резерв)	Liquicap FMI51	Endress+Hauser	1	±5 мм
10	Витрата живильної води	Promag 53P	Endress+Hauser	2	0,3%
11	Витрата газу	QA/e	Elster	2	0,5%
12	Витрата повітря	Діафрагма + 3051S	Rosemount	2	1,0%

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 68

№	Параметр	ЗВТ	Виробник	Кількість	Клас точності
13	O ₂ у димових газах	AZ20	ABB	2	0,5%
14	CO, NO _x	AO2000	ABB	1	1,0%
15	pH води	CPS11D + CM442	Endress+Hauser	2	±0,02 pH
16	Електропровідність	CLS21D + CM442	Endress+Hauser	2	0,5%

Таким чином, вибір засобів вимірювальної техніки для системи контролю парового котла здійснено на основі комплексного аналізу технічних, метрологічних, експлуатаційних та економічних критеріїв. Для критичних параметрів (тиск пари, рівень води, тиск газу) обрано ЗВТ найвищого класу точності з триплексним резервуванням. Для інших параметрів досягнуто оптимального співвідношення точності та вартості. Перевага надається інтелектуальним датчикам з цифровими інтерфейсами (HART, Foundation Fieldbus, Memosens), що забезпечує розвинені функції самодіагностики, дистанційного конфігурування та інтеграції з системою метрологічного моніторингу. Вибір обладнання провідних виробників (Rosemount, Endress+Hauser, WIKA, ABB, Siemens, Elster) гарантує наявність сервісної підтримки, запасних частин та прослідковуваність метрологічних характеристик.

3.3. Розробка структурної схеми системи контролю

3.3.1. Структурна схема системи контролю

Структурна схема системи контролю парового котла включає чотири рівні:
Рівень 0 - Поле (Field Level): первинні перетворювачі (датчики), виконавчі

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				Лист
									69

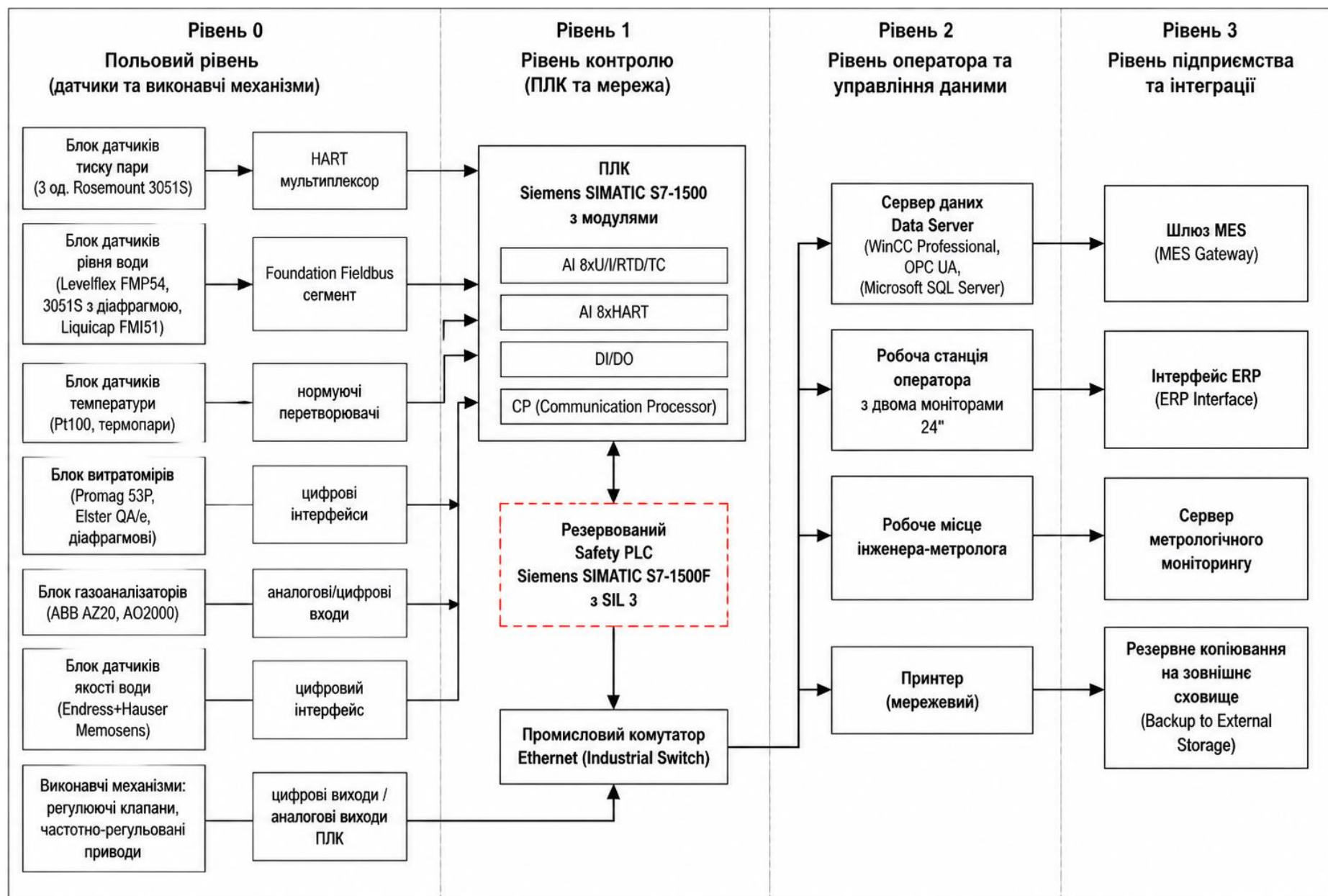


Рисунок 3.1 - Структурна схема системи контролю парового котла

3.3.2. Архітектура системи метрологічного моніторингу

Система метрологічного моніторингу інтегрується в загальну структуру АСУ ТП як спеціалізований програмний модуль з доступом до всіх вимірювальних каналів.

Структурна схема системи метрологічного моніторингу:

Рівень збору даних:

- опитування всіх вимірювальних каналів з періодом 1 с;
- збір первинних даних (виміряні значення, статуси, діагностична інформація HART/Fieldbus);
- збір додаткових параметрів (температура електроніки датчика, напруга живлення, час напрацювання).

Рівень обробки:

- фільтрація та валідація даних (контроль достовірності, виявлення аномалій);
- обчислення похідних метрологічних характеристик (дрейф нуля, дисперсія шуму, спектральні складові);
- порівняння показань резервованих каналів;
- оцінка узгодженості з модельними значеннями.

Рівень аналітики:

- екстраполяція трендів метрологічних характеристик;
- прогнозування часу досягнення граничних значень;
- розрахунок поточної невизначеності вимірювання за методом GUM;
- формування інтегрального індексу метрологічної надійності кожного каналу.

Рівень управління:

- автоматичне формування графіків калібрувань;
- генерація попереджень про наближення терміну калібрування;
- рекомендації щодо заміни датчиків;
- формування звітів для метрологічної служби та аудитів.

Рівень інтеграції:

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				Лист 72

- обмін даними з SCADA через OPC UA;
- експорт даних у систему управління якістю;
- веб-доступ для віддаленого моніторингу (з обмеженнями безпеки).

3.3.3. Розподілена vs централізована архітектура

Розглянуто два підходи до архітектури системи контролю:

Централізована архітектура:

- всі датчики підключені безпосередньо до центрального ПЛК або системи введення/виведення;

- переваги: простота, централізоване керування, нижча вартість для малих систем;

- недоліки: великий обсяг кабельної проводки, складність масштабування, залежність від центрального пристрою, обмежена відмовостійкість.

Розподілена архітектура:

- інтелектуальні датчики з вбудованою обробкою, розподілені модулі введення/виведення (Remote I/O), локальні контролери;

- переваги: зменшення кабельної проводки, модульність, масштабованість, локалізація відмов, можливість розподіленого регулювання, кращі умови для метрологічного моніторингу (локальна обробка діагностики);

- недоліки: вища складність, потреба в комунікаційній інфраструктурі, вища вартість для малих систем.

Для системи контролю парового котла обрано комбіновану архітектуру з елементами розподіленості:

- критичні канали (тиск пари, рівень води) - пряме підключення до Safety PLC для мінімізації часу відгуку;

- інтелектуальні датчики з HART/Fieldbus - розподілене збирання діагностичної інформації;

- виконавчі механізми - локальні позиціонери з Foundation Fieldbus;

- загальна мережа - Ethernet з кільцевою топологією та протоколом MRP для забезпечення відмовостійкості.

тап. и дата		введення/виведення (Remote I/O), локальні контролери;						
		- переваги: зменшення кабельної проводки, модульність, масштабованість, локалізація відмов, можливість розподіленого регулювання, кращі умови для метрологічного моніторингу (локальна обробка діагностики);						
Инв. № дубл.		- недоліки: вища складність, потреба в комунікаційній інфраструктурі, вища вартість для малих систем.						
Взам. инв. №		Для системи контролю парового котла обрано комбіновану архітектуру з елементами розподіленості:						
		- критичні канали (тиск пари, рівень води) - пряме підключення до Safety PLC для мінімізації часу відгуку;						
Підп. і дата		- інтелектуальні датчики з HART/Fieldbus - розподілене збирання діагностичної інформації;						
		- виконавчі механізми - локальні позиціонери з Foundation Fieldbus;						
		- загальна мережа - Ethernet з кільцевою топологією та протоколом MRP для забезпечення відмовостійкості.						
Инв. № подл.							А 26.07.IBT.00. ПЗ	Лист
								73
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				

Таблиця 3.9 - Порівняння архітектурних рішень

Критерій	Централізована	Розподілена	Комбінована (обрана)
Вартість кабельної проводки	Висока	Низька	Середня
Час відгуку критичних каналів	50–100 мс	100–200 мс	< 100 мс
Масштабованість	Обмежена	Висока	Висока
Відмовостійкість	Низька	Висока	Висока
Можливості метрологічного моніторингу	Обмежені	Розвинені	Розвинені
Складість налаштування	Низька	Висока	Середня
Загальна вартість	Низька	Висока	Середня

3.4. Розробка алгоритмів обробки вимірювальної інформації

3.4.1. Загальні вимоги до алгоритмів обробки

Алгоритми обробки вимірювальної інформації в системі контролю парового котла мають забезпечувати:

- достовірність отриманих даних шляхом фільтрації перешкод та виявлення аномалій;
- точність відтворення контрольованих параметрів з урахуванням нелінійностей первинних перетворювачів;
- стабільність роботи каналів при зміні умов експлуатації;
- оперативну діагностику стану вимірювальних каналів;
- адаптацію до дрейфу метрологічних характеристик з часом.

тап. и дата

Инв. №дубл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Инв. №подл.

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

Лист

74

Обробка здійснюється на кількох рівнях: первинна (у датчику або нормуючому перетворювачі), вторинна (у ПЛК), третинна (у системі метрологічного моніторингу та SCADA).

3.4.2. Фільтрація сигналів

Вимірювальні сигнали системи контролю парового котла піддаються впливу різноманітних перешкод: електромагнітних наведень від силового обладнання (50 Гц та гармоніки), механічних вібрацій від насосів та вентиляторів, гідродинамічних пульсацій тиску та витрати, теплових флуктуацій. Фільтрація спрямована на придушення цих перешкод без спотворення корисного сигналу.

Фільтр ковзного середнього (Moving Average, MA):

Найпростіший метод згладжування - усереднення n останніх вимірювань:

$$y_f(k) = (1/n) \cdot \sum y(k-i), i = 0 \dots n-1$$

Переваги: простота реалізації, ефективність проти випадкового шуму, відсутність фазового зсуву при симетричному вікні. Недоліки: інерційність, погана передача стрибкоподібних змін, ефективність залежить від правильного вибору n .

Для каналів контролю рівня води в барабані (повільні зміни, значні пульсації від кипіння) обрано $n = 10$ при періоді опитування 100 мс, що дає час згладжування 1 с. Для каналів аварійного захисту тиску $n = 3$ (300 мс) для збереження швидкодії.

Експоненційний фільтр першого порядку:

Рекурентний алгоритм з одним параметром α ($0 < \alpha < 1$):

$$y_f(k) = \alpha \cdot y(k) + (1-\alpha) \cdot y_f(k-1)$$

де α - коефіцієнт згладжування. Час згладжування $\tau \approx T_{\text{опит}} \cdot (1-\alpha)/\alpha$.

Переваги: мінімальні вимоги до пам'яті (зберігається лише попереднє значення), простота налаштування, можливість адаптації α залежно від швидкості зміни сигналу. Недоліки: фазовий зсув, інерційність при стрибках.

тап. и дата						
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
погана передача стрибкоподібних змін, ефективність залежить від правильного вибору n. Для каналів контролю рівня води в барабані (повільні зміни, значні пульсації від кипіння) обрано $n = 10$ при періоді опитування 100 мс, що дає час згладжування 1 с. Для каналів аварійного захисту тиску $n = 3$ (300 мс) для збереження швидкодії. Експоненційний фільтр першого порядку: Рекурентний алгоритм з одним параметром α ($0 < \alpha < 1$): $y_f(k) = \alpha \cdot y(k) + (1-\alpha) \cdot y_f(k-1)$ де α - коефіцієнт згладжування. Час згладжування $\tau \approx T_{\text{опит}} \cdot (1-\alpha)/\alpha$. Переваги: мінімальні вимоги до пам'яті (зберігається лише попереднє значення), простота налаштування, можливість адаптації α залежно від швидкості зміни сигналу. Недоліки: фазовий зсув, інерційність при стрибках.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.IBT.00. ПЗ	
					Лист 75	

Для каналів температури пари (інерційний процес, помірний шум) обрано $\alpha = 0,1$ ($\tau \approx 9 \cdot T_{\text{опит}}$). Для каналів витрати палива $\alpha = 0,3$ (баланс між згладжуванням та швидкодією).

Медіанний фільтр

Вибір медіани (середнього за порядком) з вікна n значень:

$$y_f(k) = \text{median}[y(k-(n-1)/2), \dots, y(k), \dots, y(k+(n-1)/2)]$$

Переваги: повна придушення імпульсних перешкод (викидів), збереження гострих меж сигналу. Недоліки: вимога сортування (обчислювальна вартість), фазовий зсув, ефективність лише при невеликій частці викидів.

Застосовується для каналів рівня води при наявності піни або бризок (імпульсні викиди), $n = 5$.

Фільтр Калмана:

Оптимальний лінійний фільтр для оцінки стану системи за наявності шумів вимірювання та моделі процесу. Алгоритм включає два етапи:

Прогноз:

$$\hat{x}(k|k-1) = F \cdot \hat{x}(k-1|k-1)$$

$$P(k|k-1) = F \cdot P(k-1|k-1) \cdot F^T + Q$$

Оновлення:

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot H^T \cdot [H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R]^{-1}$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) \cdot [z(k) - H \cdot \hat{x}(k|k-1)]$$

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot H] \cdot P(k|k-1)$$

де x - вектор стану (наприклад, [тиск, швидкість зміни тиску]); F - матриця переходу стану; H - матриця спостереження; Q - коваріаційна матриця шуму процесу; R - дисперсія шуму вимірювання; K - коефіцієнт підсилення Калмана; P - коваріаційна матриця помилки оцінки.

Переваги: оптимальність за критерієм мінімуму дисперсії помилки, можливість оцінки неспостережуваних змінних (наприклад, дрейфу нуля), адаптація до зміни умов. Недоліки: необхідність моделі процесу, обчислювальна складність.

тап. и дата					
Инв. №дубл.					
Взам. инв. №					
Підп. і дата					
Инв. № подл.					
$\hat{x}(k k-1) = F \cdot \hat{x}(k-1 k-1)$ $P(k k-1) = F \cdot P(k-1 k-1) \cdot F^T + Q$ Оновлення: $K(k) = P(k k-1) \cdot H^T \cdot [H \cdot P(k k-1) \cdot H^T + R]^{-1}$ $\hat{x}(k k) = \hat{x}(k k-1) + K(k) \cdot [z(k) - H \cdot \hat{x}(k k-1)]$ $P(k k) = [I - K(k) \cdot H] \cdot P(k k-1)$ де x - вектор стану (наприклад, [тиск, швидкість зміни тиску]); F - матриця переходу стану; H - матриця спостереження; Q - коваріаційна матриця шуму процесу; R - дисперсія шуму вимірювання; K - коефіцієнт підсилення Калмана; P - коваріаційна матриця помилки оцінки. Переваги: оптимальність за критерієм мінімуму дисперсії помилки, можливість оцінки неспостережуваних змінних (наприклад, дрейфу нуля), адаптація до зміни умов. Недоліки: необхідність моделі процесу, обчислювальна складність.					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ
					Лист 76

Застосовується для прецизійних каналів (тиск пари для обліку виробництва пара) з моделлю процесу як інтегратора з випадковим прискоренням.

3.4.3. Лінеаризація характеристик первинних перетворювачів

Багато первинних перетворювачів мають нелінійну залежність вихідного сигналу від вимірюваної величини. Для забезпечення лінійності вимірювального каналу застосовуються методи лінеаризації.

Лінеаризація термопар.

ЕРС термопар залежить від температури нелінійно (поліном 5–14-го ступеня за ІЕС 60584). У системі використовується стандартний поліном зворотного перетворення:

$$t = c_0 + c_1 \cdot E + c_2 \cdot E^2 + \dots + c_n \cdot E^n$$

де E - ЕРС термопар, мВ; c_i - коефіцієнти стандартного поліному.

Для термопар типу К у діапазоні $-200 \dots +1372$ °С застосовується поліном 10-го ступеня з коефіцієнтами ІЕС 60584-1. Похибка апроксимації не перевищує $\pm 0,02$ °С, що є неістотною порівняно з похибкою самої термопар ($\pm 2,2$ °С).

Лінеаризація ємнісних рівнемірів.

Ємність конденсатора залежить від рівня заповнення діелектриком (водою) нелінійно через крайові ефекти та зміну діелектричної проникності. Для точного вимірювання застосовується багатоточкова калібрувальна таблиця з лінійною інтерполяцією між точками:

$$L = L_i + (L_{i+1} - L_i) \cdot (C - C_i) / (C_{i+1} - C_i)$$

де C - виміряна ємність; C_i, C_{i+1} - ємності в сусідніх точках калібрування; L_i, L_{i+1} - відповідні рівні.

Для радарного рівнеміра Levelflex FMP54 лінеаризація виконується автоматично вбудованим мікропроцесором за кривою відбиття, що будується при налаштуванні.

Лінеаризація діафрагмових витратомірів.

Витрата через діафрагму пов'язана з перепадом тиску квадратичною залежністю:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 77
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

$$Q = K \cdot \sqrt{(\Delta P / \rho)}$$

де K - коефіцієнт, що залежить від діаметра труби та діафрагми; ΔP - перепад тиску; ρ - густина середовища.

У ПЛК реалізується обчислення квадратного кореня з компенсацією густини за температурою та тиском:

$$Q_{\text{кор}} = K \cdot \sqrt{[\Delta P \cdot \rho_{\text{н}} / (\rho_{\text{факт}})]} = K \cdot \sqrt{[\Delta P \cdot P_{\text{н}} \cdot T_{\text{факт}} / (P_{\text{факт}} \cdot T_{\text{н}})]}$$

де індекси «н» та «факт» відносяться до нормальних та фактичних умов.

3.4.4. Термокомпенсація та компенсація впливу додаткових факторів

Температурна компенсація датчиків тиску.

Вихідний сигнал датчика тиску залежить від температури навколишнього середовища T_{amb} та температури вимірюваного середовища T_{proc} . Для прецизійних датчиків (Rosemount 3051S) вбудована компенсація виконується мікропроцесором датчика на основі багатоточкової калібрувальної поверхні. Для датчиків без вбудованої компенсації або для уточнення застосовується програмна компенсація:

$$P_{\text{комп}} = P_{\text{вим}} - \alpha_T \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{реф}}) - \beta_T \cdot (T_{\text{proc}} - T_{\text{реф}})$$

де α_T - температурний коефіцієнт нуля; β_T - температурний коефіцієнт чутливості; $T_{\text{реф}} = 20^\circ\text{C}$.

Коефіцієнти визначаються за результатами калібрування при різних температурах або з паспорта датчика. Для Rosemount 3051S $\alpha_T = \pm 0,01\%$ від діапазону/ 10°C , $\beta_T = \pm 0,03\%$ від діапазону/ 10°C .

Компенсація статичного тиску для диференціальних датчиків:

При вимірюванні рівня або витрати диференціальним методом статичний тиск $P_{\text{стат}}$ впливає на нульову точку датчика. Компенсація:

$$\Delta P_{\text{комп}} = \Delta P_{\text{вим}} - \gamma \cdot P_{\text{стат}}$$

де γ - коефіцієнт впливу статичного тиску (% від діапазону/МПа), типово 0,05–0,2%.

Для точної компенсації необхідний додатковий датчик статичного тиску або використання датчика абсолютного тиску замість диференційного.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ			
					Лист 78			

Компенсація зміни густини середовища.

Для витратомірів, що вимірюють об'ємну витрату, при обліку масової витрати необхідна компенсація густини:

$$Q_{\text{мас}} = Q_{\text{об}} \cdot \rho(T, P)$$

Густина води та пари визначається за стандартними таблицями IAPWS-IF97 (Міжнародна асоціація властивостей води та пари). У ПЛК реалізується спрощена апроксимація або табличний метод з лінійною інтерполяцією.

Для природного газу густина визначається за рівнянням стану:

$$\rho = (P \cdot M) / (Z \cdot R \cdot T)$$

де M - молярна маса; Z - коефіцієнт стисливості; R - універсальна газова стала.

3.4.5. Алгоритми діагностики відмов датчиків

Алгоритм контролю діапазону (Range Check).

Перевірка, що виміряне значення знаходиться в межах фізично можливого діапазону:

$$y_{\text{min}} \leq y(k) \leq y_{\text{max}}$$

Наприклад, для тиску пари: $0 \leq P \leq 1,6$ МПа. Вихід за межі свідчить про обрив лінії зв'язку, коротке замикання або відмову датчика.

Алгоритм контролю швидкості зміни (Rate Check):

Обмеження максимально можливої швидкості зміни параметра:

$$|y(k) - y(k-1)| / T_{\text{опит}} \leq v_{\text{max}}$$

Наприклад, для тиску пари $v_{\text{max}} = 0,1$ МПа/с. Перевищення свідчить про імпульсну перешкоду або відмову.

Алгоритм контролю узгодженості резервованих каналів (Consistency Check):

Для триплексного резервування:

$$d_{12} = |y_1 - y_2|; d_{13} = |y_1 - y_3|; d_{23} = |y_2 - y_3|$$

Якщо всі $d_{ij} \leq \Delta_{\text{доп}}$ - всі канали справні, результат - медіана або середнє.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	діапазону:					
					$y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max}$					
					Наприклад, для тиску пари: $0 \leq P \leq 1,6$ МПа. Вихід за межі свідчить про обрив лінії зв'язку, коротке замикання або відмову датчика.					
					Алгоритм контролю швидкості зміни (Rate Check):					
					Обмеження максимально можливої швидкості зміни параметра:					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	$ y(k) - y(k-1) / T_{\text{опит}} \leq v_{\max}$					
					Наприклад, для тиску пари $v_{\max} = 0,1$ МПа/с. Перевищення свідчить про імпульсну перешкоду або відмову.					
					Алгоритм контролю узгодженості резервованих каналів (Consistency Check):					
					Для триплексного резервування:					
					$d_{12} = y_1 - y_2 ; d_{13} = y_1 - y_3 ; d_{23} = y_2 - y_3 $					
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	Якщо всі $d_{ij} \leq \Delta_{\text{доп}}$ - всі канали справні, результат - медіана або середнє.					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										79

Якщо всі $d_{ij} > \Delta_{\text{доп}}$ - невизначена відмова, перехід на аварійний режим.

Поріг $\Delta_{\text{доп}}$ встановлюється з урахуванням сумарної невизначеності каналів:

де $k = 3$ для довірчої ймовірності 99,7%.

Обчислення ковзного середнього та дисперсії за вікном N:

$$\sigma^2(k) = (1/N) \cdot \sum [y(k-i) - \mu(k)]^2$$

- $\sigma^2(k) > 3 \cdot \sigma^2_{\text{ет}}$ - різке збільшення шуму (механічне пошкодження, погіршення контакту);

Спектральний аналіз для виявлення періодичних перешкод:

$$Y(f) = \sum y(k) \cdot e^{(-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot k/N)}$$

- пік на 50 Гц - наведення від електромережі (перевірити екранування, заземлення);

- пік на частоті обертання насоса/вентилятора - механічна вібрація (перевірити кріплення датчика);

- широкосмугове збільшення - хаотичний шум (зношування підшипників, кавітація).

[illegible]

3.4.6. Адаптивні алгоритми компенсації дрейфу

Дрейф нульової точки є основною причиною погіршення метрологічних характеристик датчиків у часі. Адаптивна компенсація дозволяє підтримувати точність без частих калібрувань.

Алгоритм періодичної перевірки нуля (Zero Check):

1. При зупинці котла або за розкладом (наприклад, раз на тиждень у нічну зміну) відкривається байпасний клапан, що знімає тиск з датчика (для датчиків тиску) або встановлюється еталонна температура (для термометрів).
2. Фіксується вихідний сигнал датчика при нульовому впливі: $y_0(k)$.
3. Обчислюється дрейф: $\Delta_0(k) = y_0(k) - y_{0_ет.}$
4. Якщо $|\Delta_0(k)| < \Delta_{доп}$ - корекція коефіцієнта нуля: $b_new = b_old - \Delta_0(k)$.
5. Якщо $|\Delta_0(k)| \geq \Delta_{доп}$ - формування попередження, планування калібрування.

Для безперервних процесів, де зупинка неможлива, застосовується метод порівняння з резервованим каналом або модельним значенням.

Алгоритм експоненційного згладжування дрейфу:

Оцінка дрейфу нуля як повільнозмінного процесу:

$$\hat{b}(k) = \gamma \cdot [y(k) - y_{\text{модель}}(k)] + (1-\gamma) \cdot \hat{b}(k-1)$$

де $y_{\text{модель}}(k)$ - очікуване значення за моделлю процесу; γ - коефіцієнт адаптації (0,001–0,01).

Корекція вимірювання:

$$y_{\text{комп}}(k) = y(k) - \hat{b}(k)$$

Перевага: безперервна адаптація без спеціальних процедур. Недолік: чутливість до помилок моделі, можливість «загнання» оцінки при систематичних відхиленнях моделі.

Алгоритм на основі фільтра Калмана з розширеним станом:

Вектор стану доповнюється оцінкою дрейфу:

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 81
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

$$x = [P, dP/dt, b_0]^T$$

Матриця переходу:

$$F = [1, T, 0; 0, 1, 0; 0, 0, 1]$$

Матриця спостереження:

$$H = [1, 0, 1]$$

Таким чином, фільтр одночасно оцінює вимірювану величину, її швидкість зміни та дрейф нуля, компенсуючи його автоматично.

3.4.7. Алгоритми обробки для системи метрологічного моніторингу

Алгоритм розрахунку поточної невизначеності.

Для кожного вимірювального каналу в реальному часі обчислюється розширена невизначеність на підставі:

- базової похибки (з паспорта);
- додаткової похибки від температури (за поточною T_{amb});
- додаткової похибки від дрейфу (за оцінкою алгоритму адаптації);
- похибки квантування АЦП;
- похибки лінеаризації;
- похибки програмної обробки.

Комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(u_{баз}^2 + u_{тем}^2 + u_{дрейф}^2 + u_{кв}^2 + u_{лін}^2 + u_{пр}^2)}$$

Розширена невизначеність: $U = 2 \cdot u_c$ ($k = 2$, $p \approx 95\%$).

Результат візуалізується оператору як «довірчий інтервал» навколо вимірюваного значення та використовується для оцінки достовірності регулювання.

Алгоритм прогнозування дрейфу:

На підставі історичних даних $\{t_i, \hat{b}_i\}$ будується лінійна регресія:

$$\hat{b}(t) = a_0 + a_1 \cdot t$$

Коефіцієнти визначаються методом найменших квадратів:

$$a_1 = [n \cdot \sum(t_i \cdot \hat{b}_i) - \sum t_i \cdot \sum \hat{b}_i] / [n \cdot \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2]$$

$$a_0 = (\sum \hat{b}_i - a_1 \cdot \sum t_i) / n$$

Прогноз на горизонт T :

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ				Лист 82
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

$$\hat{b}_{\text{прогн}} = a_0 + a_1 \cdot (t_{\text{пот}} + T)$$

Час досягнення граничного дрейфу $b_{\text{гр}}$:

$$T_{\text{гр}} = (b_{\text{гр}} - a_0) / a_1 - t_{\text{пот}}$$

Результат використовується для планування калібрування: якщо $T_{\text{гр}} < T_{\text{запас}}$ (наприклад, 30 днів), формується попередження.

Алгоритм оцінки метрологічної придатності:

Інтегральний індекс метрологічної придатності формується як добуток часткових індексів:

$$I_{\text{мп}} = I_{\text{точн}} \cdot I_{\text{стаб}} \cdot I_{\text{діагн}} \cdot I_{\text{кал}}$$

де $I_{\text{точн}} = 1 - (U / U_{\text{доп}})$ - індекс точності; $I_{\text{стаб}} = 1 - (\sigma_{\text{дрейф}} / \sigma_{\text{доп}})$ - індекс стабільності; $I_{\text{діагн}}$ - індекс достовірності діагностики (1 - всі тести пройдені, 0 - відмова діагностики); $I_{\text{кал}} = \max[0, 1 - (t - t_{\text{ост_кал}}) / T_{\text{міжпов}}]$ - індекс актуальності калібрування.

При $I_{\text{мп}} < 0,7$ - формування попередження; при $I_{\text{мп}} < 0,5$ - аварійне повідомлення, рекомендація виведення каналу з експлуатації.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										83

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

4.1.1. Структурна схема вимірювального каналу

Вимірювальний канал системи контролю парового котла являє собою складну систему перетворення інформації, що проходить кілька стадій від первинного сприйняття фізичної величини до отримання цифрового результату в інженерних одиницях. Для метрологічного аналізу канал розбивається на функціонально завершені ланки, кожна з яких вносить власну складову в сумарну похибку.

Загальна структурна схема вимірювального каналу на прикладі каналу вимірювання тиску пари включає такі ланки:

Ланка 1 - Первинний перетворювач (датчик тиску Rosemount 3051S):

- чутливий елемент: кремнієва мембрана з п'єзорезистивними тензорезисторами;
- функція: перетворення тиску Р у пропорційну зміну електричного опору;
- внутрішня обробка: температурна компенсація, лінеаризація, масштабування;
- вихід: цифровий код (внутрішньо) $\rightarrow$ 4–20 мА + HART.

Ланка 2 - Лінія зв'язку:

- тип: двопровідна лінія 4–20 мА;
- опір лінії: $R_{\text{лін}} \leq 500 \text{ Ом}$ (з урахуванням опору навантаження);
- перешкоди: електромагнітні наведення, температурний дрейф опору проводів;
- довжина: типово до 1000 м для кабелю перерізом 1,5 мм².

Ланка 3 - Бар'єр іскробезпеки (для вибухонебезпечних зон):

- принцип: активний або пасивний обмежувач енергії;
- внесок: додатковий опір у колі (пасивний бар'єр) або власна похибка перетворення (активний бар'єр).

Ланка 4 - Аналого-цифровий перетворювач (АЦП):

- тип: 16-бітний сигма-дельта АЦП;
- діапазон введення: 0–20 мА або 4–20 мА;
- роздільна здатність: 27648 дискрет для 4–20 мА (Siemens SIMATIC);
- час перетворення: типово 50–100 мс.

Ланка 5 - Програмна обробка у ПЛК:

- масштабування: перетворення цифрового коду в інженерні одиниці (МПа);
- фільтрація: цифрові фільтри (див. розділ 3.4);
- компенсація: температурна, статичного тиску тощо;
- лінеаризація: таблична або аналітична;
- діагностика: контроль діапазону, швидкості зміни, узгодженості.

Ланка 6 - Передача до SCADA:

- протокол: PROFINET, OPC UA;
- похибка: відсутня (цифрова передача), затримка ≤ 100 мс.

Ланка 7 - Візуалізація та архівування:

- округлення до заданої точності;
- прив'язка до часової мітки;
- запис у базу даних.

4.1.2. Математична модель похибки каналу

Результат вимірювання Y каналу тиску представляється як функція дійсного значення тиску P та сукупності впливових факторів:

$$Y = f(P, T_{\text{amb}}, T_{\text{proc}}, U_{\text{supply}}, t_{\text{age}}, \dots) + \varepsilon_{\text{noise}}$$

де f - номінальна перетворювальна функція; T_{amb} - температура навколишнього середовища; T_{proc} - температура процесу; U_{supply} - напруга живлення; t_{age} - час напрацювання; $\varepsilon_{\text{noise}}$ - випадковий шум.

тап. и дата		Ланка 6 - Передача до SCADA: - протокол: PROFINET, OPC UA; - похибка: відсутня (цифрова передача), затримка ≤ 100 мс. Ланка 7 - Візуалізація та архівування: - округлення до заданої точності; - прив'язка до часової мітки; - запис у базу даних.				
Взам. инв. №		4.1.2. Математична модель похибки каналу				
Підп. і дата		Результат вимірювання Y каналу тиску представляється як функція дійсного значення тиску P та сукупності впливових факторів: $Y = f(P, T_{amb}, T_{proc}, U_{supply}, t_{age}, ...) + \varepsilon_{noise}$ де f - номінальна перетворювальна функція; T_{amb} - температура навколишнього середовища; T_{proc} - температура процесу; U_{supply} - напруга живлення; t_{age} - час напрацювання; ε_{noise} - випадковий шум.				
Инв. № подл.						А 26.07.ІВТ.00. ПЗ
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Лист	85
------	----

Лінеаризація в околі робочої точки P_0 :

$$Y \approx Y_0 + S \cdot (P - P_0) + \sum (\partial f / \partial x_i) \cdot \Delta x_i + \varepsilon$$

де $S = \partial f / \partial P$ - чутливість каналу (коефіцієнт передачі); x_i - впливові фактори; Δx_i - відхилення факторів від номінальних значень.

Абсолютна похибка каналу:

$$\Delta Y = Y - P = \Delta Y_0 + \Delta S \cdot (P - P_0) + \sum c_i \cdot \Delta x_i + \varepsilon$$

де ΔY_0 - похибка нуля; ΔS - похибка чутливості; c_i - коефіцієнти впливу; ε - випадкова похибка з нульовим середнім та дисперсією σ^2 .

Для каналу тиску з діапазоном 0–1,6 МПа ($P_0 = 0,8$ МПа) математична модель конкретизується:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{нуль}} + \Delta P_{\text{чутл}} \cdot (P/1,6) + \alpha_T \cdot (T_{\text{amb}} - 20) + \beta_T \cdot (T_{\text{proc}} - 20) + \gamma_P \cdot P_{\text{стат}} + \delta_t \cdot t_{\text{age}} + \varepsilon$$

де коефіцієнти визначаються за паспортними даними датчика та результатами калібрування:

- $\Delta P_{\text{нуль}}$ - похибка нуля після останнього калібрування (типово $\pm 0,025\%$ від 1,6 МПа = $\pm 0,4$ кПа);

- $\Delta P_{\text{чутл}}$ - похибка чутливості ($\pm 0,025\% = \pm 0,4$ кПа на верхній межі);

- α_T - температурний коефіцієнт нуля: $\pm 0,01\%$ від діапазону/10 °С = $\pm 0,16$ кПа/10 °С;

- β_T - температурний коефіцієнт чутливості: $\pm 0,03\%$ від діапазону/10 °С = $\pm 0,48$ кПа/10 °С;

- γ_P - коефіцієнт впливу статичного тиску: $0,05\%$ від діапазону/МПа = $0,8$ кПа/МПа;

- δ_t - коефіцієнт дрейфу з часом: $0,01\%$ від діапазону/рік = $0,16$ кПа/рік;

- ε - випадкова похибка з $\sigma = 0,05$ кПа (оцінка за статистикою).

4.1.3. Модель похибки для каналу температури

Канал вимірювання температури пари на базі термометра опору Pt100 включає ланки:

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 86

- чутливий елемент Pt100 (опір залежить від температури за стандартом ІЕС 60751);

- компенсаційні проводи (3-провідне з'єднання);

- нормуючий перетворювач WІКА Т32 (вимірювання опору, перетворення в 4–20 мА);

- лінія зв'язку;

- АЦП ПЛК;

- програмна обробка (перетворення опору в температуру за Callendar-Van Dusen).

Математична модель:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) \cdot T^3] \text{ (для } T < 0 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + A \cdot T + B \cdot T^2] \text{ (для } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

де $R_0 = 100 \text{ Ом}$ (опір при $0 \text{ } ^\circ\text{C}$); $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$; $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$.

Похибка вимірювання температури:

$$\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_{R0} + \Delta T_{A,B,C} + \Delta T_{\text{пров}} + \Delta T_{\text{пер}} + \Delta T_{\text{АЦП}} + \Delta T_{\text{пр}} + \varepsilon$$

де:

- ΔT_{R0} - похибка від неточності R_0 ($\pm 0,05\%$ для класу В, $\pm 0,02\%$ для класу А);

- $\Delta T_{A,B,C}$ - похибка від відхилення коефіцієнтів Callendar-Van Dusen (незначна для Pt100);

- $\Delta T_{\text{пров}}$ - похибка від опору компенсаційних проводів (компенсується 3-провідною схемою, залишкова похибка $\pm 0,1\%$ від опору проводів);

- $\Delta T_{\text{пер}}$ - похибка нормуючого перетворювача ($\pm 0,1\%$ від діапазону для WІКА Т32);

- $\Delta T_{\text{АЦП}}$ - похибка квантування (16 біт, діапазон $0\text{--}400 \text{ } ^\circ\text{C}$, крок $0,006 \text{ } ^\circ\text{C}$, похибка квантування неістотна);

- $\Delta T_{\text{пр}}$ - похибка програмної апроксимації (поліном 4-го ступеня, похибка $< 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}$);

- ε - випадкова похибка ($\sigma \approx 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$).

тапл. и дата		$\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_{R0} + \Delta T_{A,B,C} + \Delta T_{\text{пров}} + \Delta T_{\text{пер}} + \Delta T_{\text{АЦП}} + \Delta T_{\text{пр}} + \varepsilon$ де: - ΔT_{R0} - похибка від неточності R_0 ($\pm 0,05\%$ для класу В, $\pm 0,02\%$ для класу А); - $\Delta T_{A,B,C}$ - похибка від відхилення коефіцієнтів Callendar-Van Dusen (незначна для Pt100); - $\Delta T_{\text{пров}}$ - похибка від опору компенсаційних проводів (компенсується 3-провідною схемою, залишкова похибка $\pm 0,1\%$ від опору проводів); - $\Delta T_{\text{пер}}$ - похибка нормуючого перетворювача ($\pm 0,1\%$ від діапазону для WKA T32); - $\Delta T_{\text{АЦП}}$ - похибка квантування (16 біт, діапазон 0–400 °С, крок 0,006 °С, похибка квантування неістотна); - $\Delta T_{\text{пр}}$ - похибка програмної апроксимації (поліном 4-го ступеня, похибка $< 0,001$ °С); - ε - випадкова похибка ($\sigma \approx 0,05$ °С).						
Инв. № подл.							А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
Підп. і дата								87
Взам. инв. №								
Инв. № дубл.								
тапл. и дата								
		Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Температурна похибка Pt100 визначається класом точності:

- клас А: $\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 \cdot |T|)$ °С;

- клас В: $\Delta T = \pm(0,30 + 0,005 \cdot |T|)$ °С.

Для $T = 200$ °С: клас А - $\pm 0,55$ °С; клас В - $\pm 1,30$ °С.

4.1.4. Модель похибки для каналу рівня

Канал вимірювання рівня води на базі радарного рівнеміра Levelflex FMP54 має специфічні складові похибки:

- похибка вимірювання часу проходження імпульсу (± 1 мм);
- похибка від зміни діелектричної проникності води (залежить від температури, тиску, солоності, концентрації домішок);
- похибка від піни на поверхні води (поглинання та розсіювання електромагнітної хвилі);
- похибка від бризок та крапель конденсату на зонді;
- похибка від температурної деформації зонда;
- похибка налаштування (визначення точки відліку, калібрувальна таблиця).

Математична модель:

$$\Delta L_{\Sigma} = \Delta L_{\text{час}} + \Delta L_{\varepsilon} + \Delta L_{\text{піна}} + \Delta L_{\text{бриз}} + \Delta L_{\text{темр}} + \Delta L_{\text{нал}} + \varepsilon$$

де:

- $\Delta L_{\text{час}}$ - похибка електроніки вимірювання часу (± 1 мм за паспортом);
- ΔL_{ε} - похибка від зміни ε води: $\partial L / \partial \varepsilon \cdot \Delta \varepsilon$, типово ± 2 мм при $\Delta \varepsilon = \pm 5\%$;
- $\Delta L_{\text{піна}}$ - похибка від піни: залежить від товщини та щільності піни, до ± 10 мм при значній піні;
- $\Delta L_{\text{бриз}}$ - похибка від бризок: випадкова, зменшується фільтрацією та налаштуванням амплітудного порогу;
- $\Delta L_{\text{темр}}$ - похибка від температурної деформації зонда: $\alpha_{\text{ст}} \cdot L \cdot \Delta T$, для сталі $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹, $L = 2$ м, $\Delta T = 100$ °С $\rightarrow \Delta L = 2,4$ мм;
- $\Delta L_{\text{нал}}$ - похибка налаштування: залишкова після калібрування, типово ± 2 мм.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	- похибка налаштування (визначення точки відліку, калібрувальна таблиця). Математична модель: $\Delta L_{\Sigma} = \Delta L_{\text{час}} + \Delta L_{\varepsilon} + \Delta L_{\text{піна}} + \Delta L_{\text{бриз}} + \Delta L_{\text{темп}} + \Delta L_{\text{нал}} + \varepsilon$ де: - $\Delta L_{\text{час}}$ - похибка електроніки вимірювання часу (± 1 мм за паспортом); - ΔL_{ε} - похибка від зміни $\varepsilon_{\text{води}}$: $\partial L / \partial \varepsilon \cdot \Delta \varepsilon$, типово ± 2 мм при $\Delta \varepsilon = \pm 5\%$; - $\Delta L_{\text{піна}}$ - похибка від піни: залежить від товщини та щільності піни, до ± 10 мм при значній піні; - $\Delta L_{\text{бриз}}$ - похибка від бризок: випадкова, зменшується фільтрацією та налаштуванням амплітудного порогу; - $\Delta L_{\text{темп}}$ - похибка від температурної деформації зонда: $\alpha_{\text{ст}} \cdot L \cdot \Delta T$, для сталі $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $L = 2 \text{ м}$, $\Delta T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow \Delta L = 2,4 \text{ мм}$; - $\Delta L_{\text{нал}}$ - похибка налаштування: залишкова після калібрування, типово ± 2 мм.	
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						88

Для компенсації похибки від піни застосовується динамічний аналіз амплітуди відбитого сигналу: при піні амплітуда зменшується та розмивається, що дозволяє виявити цей фактор та скоригувати оцінку рівня або сформулювати попередження.

4.1.5. Оцінка кореляцій між складовими похибки

При оцінці сумарної похибки каналу важливо враховувати кореляцію між складовими. Корельовані похибки не підсумовуються за правилом квадратичного кореня, а додаються алгебраїчно.

Приклади корельованих похибок:

- температурні похибки датчика та нормуючого перетворювача при спільній зміні температури навколишнього середовища (кореляція +1);
- похибки нуля двох резервованих датчиків одного типу при спільному дрейфі з часом (кореляція +0,3...+0,7);
- похибка квантування АЦП та похибка округлення у програмній обробці (кореляція близька до 0).

Методика обліку кореляції:

Для двох складових u_1 та u_2 з коефіцієнтом кореляції r :

$$u_{\Sigma}^2 = u_1^2 + u_2^2 + 2 \cdot r \cdot u_1 \cdot u_2$$

При $r = +1$ (повна позитивна кореляція): $u_{\Sigma} = u_1 + u_2$ (алгебраїчне додавання).

При $r = -1$ (повна негативна кореляція): $u_{\Sigma} = |u_1 - u_2|$ (компенсація).

При $r = 0$ (незалежність): $u_{\Sigma} = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$ (правило GUM).

Для більшості випадків у вимірювальних каналах r невідомий точно. Консервативна оцінка: припустити $r = +1$ для систематичних складових одного знаку (гірший випадок) та $r = 0$ для випадкових складових.

4.1.6. Параметризація моделі за результатами калібрування

Метрологічна модель каналу параметризується за результатами експериментального калібрування. Процедура параметризації:

тап. и дата		(кореляція близька до 0).				
Инв. №дубл.		Методика обліку кореляції:				
Взам. инв. №		Для двох складових u_1 та u_2 з коефіцієнтом кореляції r :				
Підп. і дата		$u_{\Sigma}^2 = u_1^2 + u_2^2 + 2 \cdot r \cdot u_1 \cdot u_2$				
Инв. №подл.		При $r = +1$ (повна позитивна кореляція): $u_{\Sigma} = u_1 + u_2$ (алгебраїчне додавання).				
		При $r = -1$ (повна негативна кореляція): $u_{\Sigma} = u_1 - u_2 $ (компенсація).				
		При $r = 0$ (незалежність): $u_{\Sigma} = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$ (правило GUM).				
		Для більшості випадків у вимірювальних каналах r невідомий точно.				
		Консервативна оцінка: припустити $r = +1$ для систематичних складових одного знаку (гірший випадок) та $r = 0$ для випадкових складових.				
		4.1.6. Параметризація моделі за результатами калібрування				
		Метрологічна модель каналу параметризується за результатами експериментального калібрування. Процедура параметризації:				
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	
					Лист 89	

1. Калібрування датчика в лабораторних умовах ($T = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) при 5–7 точках діапазону;
2. Визначення фактичних значень: похибки нуля ΔP_0 , похибки чутливості ΔS , нелінійності L , гістерезису V , повторюваності $\sigma_{\text{повт}}$;
3. Калібрування при різних температурах навколишнього середовища (0, 20, 40, 60 $^{\circ}\text{C}$) для визначення коефіцієнтів α_T , β_T ;
4. Калібрування при різних статичних тисках (для диференціальних датчиків) для визначення γ_P ;
5. Довготривалі спостереження (6–12 місяців) для оцінки дрейфу δ_t ;
6. Запис параметрів у метрологічний паспорт каналу та в базу даних системи моніторингу;

Приклад параметризації каналу тиску Rosemount 3051S (діапазон 0–1,6 МПа).

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										90

Структурна схема формування похибки вимірювання тиску

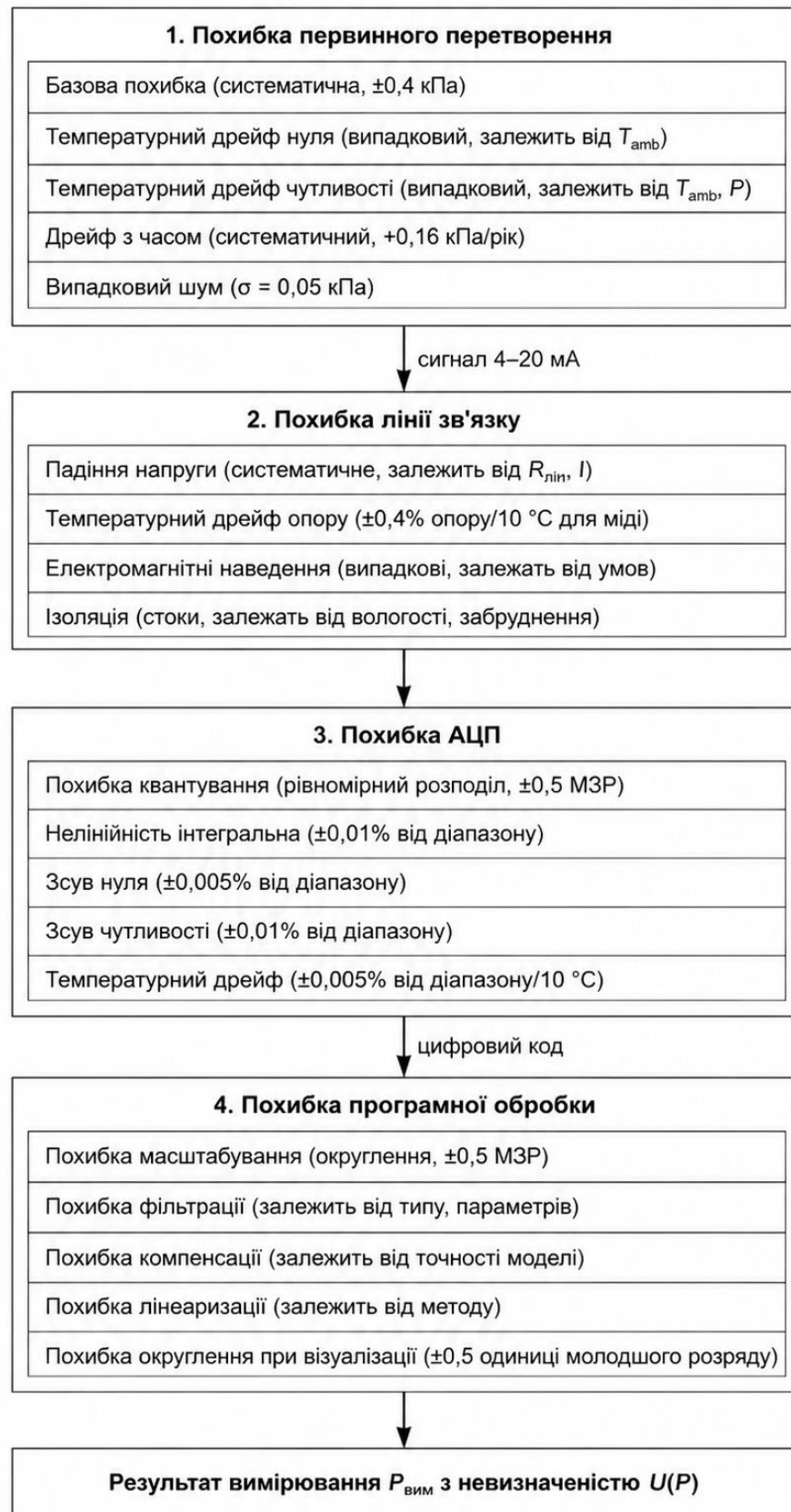


Рисунок 4.1 - Структурна схема метрологічної моделі каналу тиску

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ				
					Лист 91				

Таблиця 4.1 - Параметри метрологічної моделі каналу тиску

Параметр	Позначення	Значення	Джерело
Базова похибка	$\delta_{\text{баз}}$	$\pm 0,025\%$	Паспорт датчика
Похибка нуля (фактична)	ΔP_0	+0,12 кПа	Калібрування
Похибка чутливості	$\Delta S/S$	-0,03%	Калібрування
Нелінійність	L	0,018%	Калібрування
Гістерезис	V	0,012%	Калібрування
Повторюваність	$\sigma_{\text{повт}}$	0,008%	Калібрування
ТКН	α_T	+0,009% /10 °С	Калібрування
ТКЧ	β_T	+0,028% /10 °С	Калібрування
Коеф. впливу стат. тиску	γ_P	0,048% /МПа	Калібрування
Дрейф нуля (рік 1)	δ_{t0}	+0,08%	Спостереження
Дрейф чутливості (рік 1)	δ_{tS}	-0,02%	Спостереження
Похибка лінії зв'язку	$\delta_{\text{лін}}$	$\pm 0,005\%$	Розрахунок
Похибка АЦП	$\delta_{\text{АЦП}}$	$\pm 0,01\%$	Паспорт модуля
Похибка програми	$\delta_{\text{пр}}$	$\pm 0,003\%$	Оцінка

4.1.7. Верифікація метрологічної моделі

Верифікація моделі здійснюється шляхом порівняння розрахункових значень похибки з результатами незалежних вимірювань:

- Порівняння з еталонним приладом: під час експлуатації періодично підключається переносний еталонний манометр (клас 0,05),

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 92

різниця показань порівнюється з розрахунковою розширеною невизначеністю;

2. Порівняння резервованих каналів: для триплексного резервування різниця показань має узгоджуватися з моделлю (ймовірність виходу за межі U має бути $\approx 5\%$);

3. Порівняння з фізичними закономірностями: наприклад, температура насиченої пари має відповідати тиску за таблицями IAPWS-IF97 (з урахуванням невизначеності обох каналів);

4. Аналіз залишків: різниця між модельним та фактичним значеннями аналізується на предмет систематичних відхилень, що свідчать про неповноту моделі.

Критерій прийнятності моделі – не менше 95% незалежних перевірок підтверджують, що фактична похибка не перевищує розрахункову розширену невизначеність ($k = 2$). У разі систематичного перевищення модель уточнюється (додаються складові, коригуються коефіцієнти).

Таким чином, розроблена метрологічна модель вимірювального каналу системи контролю парового котла являє собою багатофакторний математичний опис, що враховує похибки всіх функціональних ланок каналу та їх взаємозв'язок. Модель параметризується за результатами калібрувань та верифікується незалежними методами. Вона служить основою для розрахунку метрологічних характеристик, розробки процедур калібрування, прогнозування дрейфу та оцінки поточної невизначеності вимірювання в реальному часі. Використання структурних схем та формалізованих математичних залежностей дозволяє стандартизувати підхід до метрологічного забезпечення різноманітних каналів та забезпечити прозорість та обґрунтованість усіх метрологічних оцінок.

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 93
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

4.2. Розрахунок метрологічних характеристик вимірювальних каналів

4.2.1. Загальна методика розрахунку сумарної похибки

Розрахунок метрологічних характеристик вимірювальних каналів системи контролю парового котла здійснюється відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2012 (GUM) з урахуванням специфіки кожного каналу. Методика включає такі етапи:

1. Формування математичної моделі вимірювання - визначення функціональної залежності результату вимірювання від вхідних величин та впливових факторів;
2. Ідентифікація джерел невизначеності - перелік усіх складових, що вносять внесок у сумарну похибку;
3. Оцінка стандартних невизначеностей кожної складової - типу А (статистичний аналіз) або типу Б (інші методи);
4. Обчислення комбінованої стандартної невизначеності - з урахуванням чутливості та кореляції;
5. Визначення розширеної невизначеності - з коефіцієнтом охоплення $k = 2$ (довірча ймовірність приблизно 95%);
6. Формулювання результату вимірювання - у форматі $Y = y \pm U$.

4.2.2. Розрахунок метрологічних характеристик каналу тиску пари

Розглянемо детальний розрахунок для каналу вимірювання тиску пари в барабані котла - найкритичнішого параметра з точки зору безпеки.

Вихідні дані:

- датчик: Rosemount 3051S, діапазон 0–1,6 МПа, базова точність $\pm 0,025\%$ від діапазону;

- умови експлуатації: $T_{amb} = 20 \pm 15$ °C (діапазон 5...35 °C);

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата						Лист 94
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

- статичний тиск: $P_{\text{стат}} = 1,0 \text{ МПа}$ (для диференціального датчика);
- час напрацювання з моменту калібрування: $t = 6 \text{ місяців}$;
- лінія зв'язку: мідний кабель перерізом $1,5 \text{ мм}^2$, довжина 150 м ;
- АЦП: Siemens SM 331, 16 біт, діапазон $4\text{--}20 \text{ мА}$;
- програмна обробка: фільтр ковзного середнього $n = 10$.

Математична модель вимірювання:

$$P_{\text{вим}} = P + \Delta P_{\Sigma}$$

де ΔP_{Σ} - сумарна похибка, що формується з наступних складових.

Оцінка стандартних невизначеностей:

Складова 1 - Базова похибка датчика (тип Б, рівномірний розподіл):

Межі: $a_1 = \pm 0,025\% \cdot 1,6 \text{ МПа} = \pm 0,4 \text{ кПа}$

Стандартна невизначеність: $u_1 = a_1/\sqrt{3} = 0,4/1,732 = 0,231 \text{ кПа}$

Відносний внесок: $0,231/1600 = 0,0144\%$

Складова 2 - Температурний дрейф нуля (тип Б, рівномірний розподіл):

ТКН: $\alpha_T = 0,01\%$ від діапазону/ $10 \text{ }^\circ\text{C}$

Діапазон зміни температури: $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (від 5 до $35 \text{ }^\circ\text{C}$)

Межі: $a_2 = \pm 0,01\% \cdot 30/10 \cdot 1600 = \pm 0,48 \text{ кПа}$

Стандартна невизначеність: $u_2 = 0,48/\sqrt{3} = 0,277 \text{ кПа}$

Відносний внесок: $0,0173\%$

Складова 3 - Температурний дрейф чутливості (тип Б, рівномірний розподіл):

ТКЧ: $\beta_T = 0,03\%$ від діапазону/ $10 \text{ }^\circ\text{C}$

При робочій точці $P = 0,8 \text{ МПа}$ (50% діапазону):

Межі: $a_3 = \pm 0,03\% \cdot 30/10 \cdot 0,8 = \pm 0,72 \text{ кПа}$

Стандартна невизначеність: $u_3 = 0,72/\sqrt{3} = 0,416 \text{ кПа}$

Відносний внесок: $0,0260\%$

Складова 4 - Дрейф з часом (тип Б, рівномірний розподіл):

Дрейф нуля: $\delta_{t0} = 0,08\%/рік$

За 6 місяців: $\Delta\delta = 0,04\%$ від діапазону $= 0,64 \text{ кПа}$

Дрейф чутливості: $\delta_{tS} = -0,02\%/рік$

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ				Лист 95
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

За 6 місяців при $P = 0,8$ МПа: $\Delta\delta_S = -0,01\% \cdot 0,8 = -0,128$ кПа

Сукупний дрейф (алгебраїчна сума найгірших випадків з урахуванням знаків):

Межі: $a_4 = \pm(0,64 + 0,128) = \pm 0,768$ кПа

Стандартна невизначеність: $u_4 = 0,768/\sqrt{3} = 0,443$ кПа

Відносний внесок: 0,0277%

Складова 5 - Похибка статичного тиску (тип Б, рівномірний розподіл):

Коефіцієнт впливу: $\gamma_P = 0,05\%$ від діапазону/МПа

При $P_{\text{стат}} = 1,0$ МПа:

Межі: $a_5 = \pm 0,05\% \cdot 1,0 \cdot 1600 = \pm 0,8$ кПа

Стандартна невизначеність: $u_5 = 0,8/\sqrt{3} = 0,462$ кПа

Відносний внесок: 0,0289%

Примітка: для абсолютного датчика тиску ця складова відсутня.

Складова 6 - Похибка лінії зв'язку (тип Б, рівномірний розподіл):

Опір кабелю: $R = \rho \cdot L/S = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} \cdot 150 \text{ м} / 1,5 \text{ мм}^2 = 1,75 \text{ Ом}$

Падіння напруги при $I = 20$ мА: $\Delta U = I \cdot R = 0,02 \cdot 1,75 = 0,035$ В

Відносна похибка: $\Delta U/U_{\text{діап}} = 0,035/16 = 0,22\%$ (для навантаження 250 Ом, $U_{\text{діап}} = 16$ В при 20 мА та 4 В при 4 мА)

Температурний дрейф опору міді: 0,4%/10 °С, при $\Delta T = 30$ °С: 1,2%

Сукупна похибка лінії: $\delta_{\text{лін}} = \sqrt{[(0,22\%)^2 + (1,2\% \cdot 1,75/250)^2]} \approx 0,22\%$

Межі: $a_6 = \pm 0,22\% \cdot 0,8 \text{ МПа} = \pm 1,76$ кПа

Стандартна невизначеність: $u_6 = 1,76/\sqrt{3} = 1,016$ кПа

Відносний внесок: 0,0635%

Примітка: при використанні стандартного навантаження 250 Ом та якісного кабелю ця складова зменшується до 0,05%.

Складова 7 - Похибка АЦП (тип Б, рівномірний розподіл):

Роздільна здатність: 16 біт = 65536 рівнів

Діапазон 4–20 мА: 27648 дискрет (Siemens)

Крок квантування: $q = 1,6 \text{ МПа} / 27648 = 0,0579$ кПа

Похибка квантування (рівномірний розподіл): $a_7 = \pm q/2 = \pm 0,029$ кПа

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 96
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Нелінійність АЦП: $\pm 0,01\% = \pm 0,16$ кПа

Зсув нуля: $\pm 0,005\% = \pm 0,08$ кПа

Зсув чутливості: $\pm 0,01\% = \pm 0,16$ кПа

Сукупні межі (алгебраїчна сума систематичних, квадратичний корінь випадкових):

$$a_7 = \pm \sqrt{[(0,029)^2 + (0,16)^2 + (0,08)^2 + (0,16)^2]} = \pm 0,24 \text{ кПа}$$

Стандартна невизначеність: $u_7 = 0,24/\sqrt{3} = 0,139$ кПа

Відносний внесок: 0,0087%

Складова 8 - Похибка програмної обробки (тип Б, рівномірний розподіл):

Похибка масштабування: $\pm 0,5$ МЗР = $\pm 0,029$ кПа

Похибка фільтра (зміна амплітуди корисного сигналу): $\pm 0,1\% = \pm 0,8$ кПа

Похибка компенсації температури (точність моделі): $\pm 0,2\% = \pm 1,6$ кПа

Похибка округлення: $\pm 0,5$ МЗР = $\pm 0,029$ кПа

Сукупні межі: $a_8 = \pm \sqrt{[(0,029)^2 + (0,8)^2 + (1,6)^2 + (0,029)^2]} = \pm 1,79$ кПа

Стандартна невизначеність: $u_8 = 1,79/\sqrt{3} = 1,033$ кПа

Відносний внесок: 0,0646%

Складова 9 - Випадкова похибка (тип А, нормальний розподіл):

Оцінка за результатами 10 вимірювань у стаціонарних умовах:

Середнє: $\bar{P} = 800,12$ кПа

Експериментальне стандартне відхилення: $s = 0,08$ кПа

Стандартна невизначеність типу А: $u_9 = s/\sqrt{10} = 0,025$ кПа

Відносний внесок: 0,0016%

Таблиця 4.2 - Зведення складових невизначеності каналу тиску

№	Складова	Тип	Розподіл	Межі а, кПа	u, кПа	Внесок u^2 , %
1	Базова похибка	Б	Рівномірний	$\pm 0,40$	0,231	2,0
2	ТКН	Б	Рівномірний	$\pm 0,48$	0,277	2,9

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 97
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

№	Складова	Тип	Розподіл	Межі а, кПа	u, кПа	Внесок u ² , %
3	ТКЧ	Б	Рівномірний	±0,72	0,416	6,5
4	Дрейф з часом	Б	Рівномірний	±0,77	0,443	7,4
5	Статичний тиск	Б	Рівномірний	±0,80	0,462	8,0
6	Лінія зв'язку	Б	Рівномірний	±1,76	1,016	38,7
7	АЦП	Б	Рівномірний	±0,24	0,139	0,7
8	Програма	Б	Рівномірний	±1,79	1,033	40,0
9	Випадкова	А	Нормальний	-	0,025	0,02

Комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2 + u_9^2)}$$

$$u_c = \sqrt{(0,231^2 + 0,277^2 + 0,416^2 + 0,443^2 + 0,462^2 + 1,016^2 + 0,139^2 + 1,033^2 + 0,025^2)}$$

$$u_c = \sqrt{(0,053 + 0,077 + 0,173 + 0,196 + 0,214 + 1,032 + 0,019 + 1,067 + 0,001)}$$

$$u_c = \sqrt{2,832} = 1,682 \text{ кПа}$$

Ефективні ступені свободи (за формулою Велча-Саттертвейта):

$$v_{\text{eff}} = u_c^4 / \sum(u_i^4/v_i)$$

Для типу Б приймаємо $v_i \rightarrow \infty$, для типу А $v_9 = 9$:

$$v_{\text{eff}} \approx (1,682)^4 / [(0,025)^4/9] \approx 8,00 / 0,0000434 \approx 184000$$

При великих v_{eff} коефіцієнт охоплення для $p = 95\%$: $k = 2,00$.

Розширена невизначеність:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 1,682 = 3,364 \text{ кПа}$$

Відносна розширена невизначеність:

$$U_{\text{відн}} = (3,364 / 1600) \cdot 100\% = 0,210\%$$

Результат вимірювання тиску 0,800 МПа:

$$P = 0,8000 \pm 0,0034 \text{ МПа} (k = 2, p = 95\%)$$

або

Инов. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. № дубл.	тап. и дата						Лист 98
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

$$P = 0,8000 \text{ МПа}, U = 0,21\% (k = 2)$$

Аналіз внесків показує, що основний внесок у сумарну невизначеність вносять похибка лінії зв'язку (38,7%) та похибка програмної обробки (40,0%). Це вказує на пріоритетність заходів: використання якісного екранованого кабелю, скорочення довжини лінії, застосування активних бар'єрів з точним перетворенням, уточнення моделі температурної компенсації.

4.2.3. Розрахунок метрологічних характеристик каналу температури

Канал вимірювання температури пари на базі термометра опору Pt100 класу А.

Вихідні дані:

- датчик: WІКА TR10-B, Pt100 клас А, діапазон 0–400 °С;
- нормуючий перетворювач: WІКА Т32, точність $\pm 0,1\%$;
- лінія зв'язку: 3-провідне з'єднання, мідний кабель 10 м;
- АЦП: аналоговий вхід ПЛК для 4–20 мА;
- умови: $T_{\text{amb}} = 20 \pm 20 \text{ °С}$, робоча точка $T = 200 \text{ °С}$.

Математична модель:

$$T_{\text{вим}} = T + \Delta T_{\Sigma}$$

Складові невизначеності:

Складова 1 - Похибка Pt100 класу А (тип Б, рівномірний розподіл):

$$\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 \cdot T) = \pm(0,15 + 0,4) = \pm 0,55 \text{ °С при } T = 200 \text{ °С}$$

$$u_1 = 0,55/\sqrt{3} = 0,318 \text{ °С}$$

Складова 2 - Похибка нормуючого перетворювача (тип Б):

$$\pm 0,1\% \text{ від діапазону } 400 \text{ °С} = \pm 0,4 \text{ °С}$$

$$u_2 = 0,4/\sqrt{3} = 0,231 \text{ °С}$$

Складова 3 - Похибка компенсації проводів (тип Б):

Залишкова похибка 3-провідної схеми: $\pm 0,1\%$ від опору проводів

$$\text{Опір } 10 \text{ м кабелю } 0,5 \text{ мм}^2: R = 0,0175 \cdot 10 / 0,5 = 0,35 \text{ Ом}$$

$$\text{Опір Pt100 при } 200 \text{ °С: } R \approx 177,0 \text{ Ом}$$

$$\text{Відносна похибка: } 0,1\% \cdot 0,35/177 = 0,0002\% \rightarrow \text{неістотна}$$

тап. и дата						
Инв. № дубл.						
Взам. инв. №						
Підп. і дата						
Инв. № подл.						
- умови: $T_{\text{amb}} = 20 \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, робоча точка $T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Математична модель: $T_{\text{вим}} = T + \Delta T_{\Sigma}$ Складові невизначеності: Складова 1 - Похибка Pt100 класу А (тип Б, рівномірний розподіл): $\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 \cdot T) = \pm(0,15 + 0,4) = \pm 0,55 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ при } T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $u_1 = 0,55 / \sqrt{3} = 0,318 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Складова 2 - Похибка нормуючого перетворювача (тип Б): $\pm 0,1\% \text{ від діапазону } 400 \text{ }^{\circ}\text{C} = \pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $u_2 = 0,4 / \sqrt{3} = 0,231 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Складова 3 - Похибка компенсації проводів (тип Б): Залишкова похибка 3-провідної схеми: $\pm 0,1\%$ від опору проводів Опір 10 м кабелю $0,5 \text{ мм}^2$: $R = 0,0175 \cdot 10 / 0,5 = 0,35 \text{ Ом}$ Опір Pt100 при $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $R \approx 177,0 \text{ Ом}$ Відносна похибка: $0,1\% \cdot 0,35 / 177 = 0,0002\% \rightarrow \text{неістотна}$						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	
					Лист 99	

Приймаємо $u_3 = 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (консервативна оцінка)

Складова 4 - Похибка АЦП (тип Б):

16 біт, діапазон 4–20 мА відповідає 0–400 $^{\circ}\text{C}$

Крок: $400/27648 = 0,0145 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Похибка квантування + нелінійність + зсув: $\pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$u_4 = 0,2/\sqrt{3} = 0,115 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Складова 5 - Похибка програмної обробки (тип Б):

Перетворення опору в температуру за Callendar-Van Dusen: похибка апроксимації $< 0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Округлення: $\pm 0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$u_5 = 0,01/\sqrt{3} = 0,006 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Складова 6 - Вплив температури навколишнього середовища (тип Б):

Температурний коефіцієнт перетворювача Т32: $\pm 0,01\% / 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

При $\Delta T = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $\pm 0,04\% = \pm 0,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$u_6 = 0,16/\sqrt{3} = 0,092 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Складова 7 - Випадкова похибка (тип А):

За результатами 10 вимірювань: $s = 0,12 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$u_7 = 0,12/\sqrt{10} = 0,038 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(0,318^2 + 0,231^2 + 0,05^2 + 0,115^2 + 0,006^2 + 0,092^2 + 0,038^2)}$$

$$u_c = \sqrt{(0,101 + 0,053 + 0,003 + 0,013 + 0,000 + 0,008 + 0,001)} = \sqrt{0,179} = 0,423 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Розширена невизначеність ($k = 2$):

$$U = 2 \cdot 0,423 = 0,846 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 0,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Результат вимірювання температури $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$T = 200,0 \pm 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C} (k = 2, p = 95\%)$$

Відносна розширена невизначеність: $U_{\text{відн}} = 0,45\%$

Основний внесок: похибка датчика Pt100 (56%) та перетворювача (30%).

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 00
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

4.2.4. Розрахунок метрологічних характеристик каналу рівня

Канал вимірювання рівня води в барабані на базі радарного рівнеміра Levelflex FMP54.

Вихідні дані:

- датчик: Levelflex FMP54, точність ± 2 мм, діапазон 0–2000 мм;
- умови: наявність піни (товщина до 50 мм при 10% часу), температура води 180–200 °С, тиск 1,0–1,3 МПа;

- цифровий вихід Foundation Fieldbus (похибка передачі неістотна);

- програмна обробка: фільтрація, компенсація температури зонда.

Складові невизначеності:

Складова 1 - Базова похибка датчика (тип Б):

± 2 мм

$$u_1 = 2/\sqrt{3} = 1,155 \text{ мм}$$

Складова 2 - Похибка від піни (тип Б, трикутний розподіл):

Максимальна похибка при повній піні: ± 10 мм

Ймовірність появи піни: 10%

Ефективні межі: $a_2 = \pm 10 \cdot 0,1 = \pm 1$ мм (спрощена оцінка)

Більш точно - метод Монте-Карло з моделлю появи піни.

$$u_2 = 1/\sqrt{6} = 0,408 \text{ мм (трикутний розподіл)}$$

Складова 3 - Температурна деформація зонда (тип Б):

$\alpha_{\text{ст}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $L = 2$ м, $\Delta T = 150$ °С (від 20 до 170 °С середня)

$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 150 = 3,6 \text{ мм}$$

Компенсація вбудована в датчик: залишкова похибка $\pm 0,5$ мм

$$u_3 = 0,5/\sqrt{3} = 0,289 \text{ мм}$$

Складова 4 - Похибка налаштування (тип Б):

± 2 мм (залишкова після калібрування)

$$u_4 = 2/\sqrt{3} = 1,155 \text{ мм}$$

Складова 5 - Похибка компенсації густини води (тип Б):

Густина води змінюється від 886 кг/м³ (при 200 °С) до 1000 кг/м³ (при 0 °С)

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Ив. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 01
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Вплив на радарний метод: неістотний (вимірюється час проходження, не гідростатичний тиск)

$u_5 = 0,1$ мм (консервативна оцінка)

Складова 6 - Випадкова похибка (тип A):

За результатами спостережень: $s = 0,8$ мм

$$u_6 = 0,8/\sqrt{20} = 0,179 \text{ мм (20 спостережень)}$$

Комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(1,155^2 + 0,408^2 + 0,289^2 + 1,155^2 + 0,1^2 + 0,179^2)}$$

$$u_c = \sqrt{(1,334 + 0,166 + 0,083 + 1,334 + 0,010 + 0,032)} = \sqrt{2,959} = 1,720 \text{ мм}$$

Розширена невизначеність ($k = 2$):

$$U = 2 \cdot 1,720 = 3,440 \text{ мм} \approx 3,5 \text{ мм}$$

Результат вимірювання рівня 0 мм (номінальний):

$$L = 0 \pm 4 \text{ мм (} k = 2, p = 95\%)$$

або з урахуванням діапазону ± 300 мм:

$$L = 0 \text{ мм, } U = 1,2\% \text{ від діапазону}$$

Основний внесок: базова похибка датчика (45%) та похибка налаштування (45%). Похибка від піни зменшується фільтрацією та спеціальним алгоритмом виявлення піни.

4.2.5. Розрахунок метрологічних характеристик каналу витрати

Канал вимірювання витрати природного газу на базі турбінного витратоміра Elster QA/e.

Вихідні дані:

- витратомір: Elster QA/e, G400, діапазон 40–800 м³/год, точність $\pm 0,5\%$ від виміряного значення;

- умови: $P = 30$ кПа, $T = 20$ °С, базова густина;

- цифровий вихід: імпульси (1 імп/дм³);

- лічильник імпульсів у ПЛК;

- програмна обробка: компенсація P , T до стандартних умов.

Математична модель:

тап. и дата		Инв. №дубл.		Взам. инв. №		Підп. і дата		Инв. №подл.		А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
											02
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							

$$Q_{\text{ст}} = Q_{\text{вим}} \cdot (P_{\text{факт}}/P_{\text{ст}}) \cdot (T_{\text{ст}}/T_{\text{факт}}) \cdot \sqrt{(Z_{\text{ст}}/Z_{\text{факт}})}$$

де $Q_{\text{ст}}$ - витрата за стандартних умов (0 °С, 101,325 кПа); Z - коефіцієнт стисливості.

Складові невизначеності:

Складова 1 - Похибка витратоміра (тип Б):

$\pm 0,5\%$ від виміряного значення, при $Q = 400 \text{ м}^3/\text{год}$: $\pm 2 \text{ м}^3/\text{год}$

$$u_1 = 2/\sqrt{3} = 1,155 \text{ м}^3/\text{год}$$

Складова 2 - Похибка вимірювання тиску (тип Б):

Датчик тиску $\pm 0,5\%$ від 50 кПа = $\pm 0,25 \text{ кПа}$

Вплив на Q : $\partial Q/\partial P = Q/P = 400/30 = 13,3 \text{ м}^3/\text{год}/\text{кПа}$

Похибка: $\pm 0,25 \cdot 13,3 = \pm 3,33 \text{ м}^3/\text{год}$

$$u_2 = 3,33/\sqrt{3} = 1,924 \text{ м}^3/\text{год}$$

Складова 3 - Похибка вимірювання температури (тип Б):

Pt100 клас В: $\pm 1,3 \text{ °С}$ при 20 °С

Вплив на Q : $\partial Q/\partial T = -Q/(2T) = -400/(2 \cdot 293) = -0,683 \text{ м}^3/\text{год}/\text{°С}$ (Т у Кельвінах)

Похибка: $\pm 1,3 \cdot 0,683 = \pm 0,89 \text{ м}^3/\text{год}$

$$u_3 = 0,89/\sqrt{3} = 0,514 \text{ м}^3/\text{год}$$

Складова 4 - Похибка коефіцієнта стисливості (тип Б):

Для природного газу при низьких тисках $Z \approx 1$, похибка $\pm 0,1\%$

$$u_4 = 0,001 \cdot 400/\sqrt{3} = 0,231 \text{ м}^3/\text{год}$$

Складова 5 - Похибка лічильника імпульсів (тип Б):

Квантування: $1 \text{ ім}/\text{дм}^3 = 1 \text{ ім}/0,001 \text{ м}^3$

При $Q = 400 \text{ м}^3/\text{год} = 0,111 \text{ м}^3/\text{с}$, частота 111 Гц

За час опитування 1 с: крок $0,111 \text{ м}^3$, але усереднення за 10 с: крок $0,011 \text{ м}^3$

Похибка квантування: $\pm 0,0056 \text{ м}^3/\text{год}$

$$u_5 = 0,0056/\sqrt{3} = 0,003 \text{ м}^3/\text{год} \text{ (неістотна)}$$

Комбінована стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{(1,155^2 + 1,924^2 + 0,514^2 + 0,231^2 + 0,003^2)}$$

$$u_c = \sqrt{(1,334 + 3,702 + 0,264 + 0,053 + 0,000)} = \sqrt{5,353} = 2,314 \text{ м}^3/\text{год}$$

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тадп. и дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист 03
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Розширена невизначеність ($k = 2$):

$$U = 2 \cdot 2,314 = 4,628 \text{ м}^3/\text{год} \approx 4,6 \text{ м}^3/\text{год}$$

Відносна розширена невизначеність:

$$U_{\text{відн}} = (4,6/400) \cdot 100\% = 1,15\%$$

Результат вимірювання витрати $400 \text{ м}^3/\text{год}$:

$$Q = 400 \pm 5 \text{ м}^3/\text{год} (k = 2, p = 95\%)$$

Основний внесок: похибка вимірювання тиску (69%) та похибка витратоміра (25%). Це вказує на необхідність підвищення точності вимірювання тиску газу (перехід на датчик $\pm 0,1\%$) для зниження сумарної невизначеності.

4.2.6. Аналіз чутливості до впливу факторів

Для оптимізації метрологічного забезпечення проведено аналіз чутливості сумарної невизначеності до зміни параметрів.

Таблиця 4.3 - Аналіз чутливості каналу тиску

Фактор	Базове значення	Зміна фактора	Зміна U , %	Рекомендація
Точність датчика	0,025%	До 0,1%	+45%	Зберегти 0,025%
Довжина лінії	150 м	До 50 м	-25%	Скоротити лінію
Темп. діапазон	$\pm 15^\circ\text{C}$	До $\pm 5^\circ\text{C}$	-18%	Термостатизація шафи
Статичний тиск	1,0 МПа	До 0 (абс. датчик)	-28%	Абсолютний датчик
Точність АЦП	16 біт	До 14 біт	+2%	16 біт достатньо
Точність компенсації	$\pm 0,2\%$	До $\pm 0,05\%$	-15%	Уточнити модель

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 04
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Аналіз показує, що найбільш ефективними заходами для зниження невизначеності є:

1. Скорочення довжини лінії зв'язку або використання активних перетворювачів 4–20 мА з внутрішньою компенсацією;
2. Заміна диференціального датчика на абсолютний (усунення впливу статичного тиску);
3. Термостатизація шафи з електронікою датчика (звуження діапазону T_{amb});
4. Уточнення моделі температурної компенсації за результатами багатоточкового калібрування.

4.2.7. Порівняльний аналіз розрахункових та нормативних метрологічних характеристик

Таблиця 4.4 - Порівняння розрахункових та допустимих характеристик

Канал	Допустима U	Розрахункова U	Запас	Висновок
Тиск пари	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,21\%$	2,4 рази	Прийнятно
Температура пари	$\pm 1,0\%$	$\pm 0,45\%$	2,2 рази	Прийнятно
Рівень води	$\pm 1,5\%$	$\pm 1,2\%$	1,25 рази	Прийнятно, близько до межі
Витрата газу	$\pm 1,0\%$	$\pm 1,15\%$	0,87	Не прийнятно!

Канал витрати газу не відповідає допустимій невизначеності. Заходи коригування:

- заміна датчика тиску газу на більш точний ($\pm 0,1\%$ замість $\pm 0,5\%$);
- застосування коріолісового витратоміра ($\pm 0,1\%$ замість $\pm 0,5\%$);

тап. и дата Инв. №дубл. Взам. инв. № Підп. і дата Инв. №подл.						Лист 05
	Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	

A 26.07.IBT.00. ПЗ

- уточнення коефіцієнта стисливості за хроматографічним аналізом складу газу.

Після заміни датчика тиску на $\pm 0,1\%$:

$u_2 = 0,385 \text{ м}^3/\text{год}$, $u_c = 1,255 \text{ м}^3/\text{год}$, $U = 2,51 \text{ м}^3/\text{год}$, $U_{\text{відн}} = 0,63\%$ - прийнятно.

Таким чином, розрахунок метрологічних характеристик вимірювальних каналів системи контролю парового котла виконано за методом GUM з детальним розглядом усіх значущих складових невизначеності. Розрахунки підтвердили прийнятність вибраних ЗВТ для більшості каналів за умови реалізації запропонованих заходів щодо оптимізації (скорочення ліній зв'язку, термостатизація, уточнення моделей компенсації). Для каналу витрати газу виявлено невідповідність допустимій невизначеності, що потребує заміни датчика тиску на більш точний. Розроблені розрахункові моделі інтегруються в систему метрологічного моніторингу для автоматичної оцінки поточної невизначеності в реальному часі та підтримки прийняття рішень щодо необхідності калібрування чи заміни ЗВТ.

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

Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						06

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Експлуатація системи контролю парового котла пов'язана з дією різноманітних небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які класифікуються відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99 «Положення про розробку інструкцій з охорони праці».

Небезпечні виробничі фактори:

- рухомі частини обладнання (вентилятори, насоси, приводи клапанів);
- підвищений тиск пари та палива (вибухонебезпечність);
- підвищена температура поверхонь обладнання (опіки);
- електричний струм (ураження, пожежа);
- відсутність або недостатність освітлення (травми);
- пожежовибухонебезпечність природного газу.

Шкідливі виробничі фактори:

- підвищений рівень шуму від вентиляторів, насосів (понад 80 дБА);
- вібрація (місцева, загальна);
- пил, продукти згоряння (SO_2 , NO_x , CO , зола);
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- нервово-емоційне перенапруження оператора;
- монотонність праці при спостереженні за показаннями.

Інв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тапл. и дата		
- електричний струм (ураження, пожежа); - відсутність або недостатність освітлення (травми); - пожежовибухонебезпечність природного газу. Шкідливі виробничі фактори: - підвищений рівень шуму від вентиляторів, насосів (понад 80 дБА); - вібрація (місцева, загальна); - пил, продукти згоряння (SO_2, NO_x, CO, зола); - підвищена або знижена температура повітря робочої зони; - нервово-емоційне перенапруження оператора; - монотонність праці при спостереженні за показаннями.						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ	Лист 07

Таблиця 6.1 - Оцінка рівня ризику небезпечних факторів

Фактор	Джерело	Ймовірність	Тяжкість наслідків	Ризик	Заходи зниження
Вибух пари	Барабан котла	Низька	Катастрофа	Високий	Триплексний захист, автоматичний скид
Витік газу	Трубопроводи, пальники	Середня	Загибель	Високий	Газоаналізатори, автовідключення
Ураження струмом	Щити, кабелі	Середня	Тяжка травма	Середній	Заземлення, УЗО, ізоляція
Опіки	Паропроводи, барабан	Висока	Тяжка травма	Середній	Теплоізоляція, знаки безпеки
Падіння	Обслуговування на висоті	Середня	Тяжка травма	Середній	Перила, страхувальні пояси

6.2. Заходи з охорони праці при експлуатації системи контролю

6.2.1. Електробезпека

Система контролю живиться від мережі 380/220 В, 50 Гц. Заходи електробезпеки:

- всі металеві корпуси обладнання заземлені (опір заземлення не більше 4 Ом);
- автоматичні вимикачі захисту від перевантаження та короткого замикання;
- пристрої захисного відключення (УЗО) з струмом спрацьовування 30 мА на групових лініях;
- подвійна ізоляція переносного електроінструменту;

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

Лист
08

- знаки безпеки «Обережно, електрична напруга»;
- допуск до роботи з електроустановками - лише особи з групою з електробезпеки не нижче III.

6.2.2. Безпека при роботі з тиском

- всі трубопроводи пари та палива обладнані запобіжними клапанами, манометрами;
- триплексна система контролю тиску з незалежним аварійним захистом SIL 3;
- автоматичний скид пари при перевищенні тиску;
- плановий гідравлічний випробування трубопроводів ($1,5 \cdot P_{\text{роб}}$);
- використання арматури з відповідним класом герметичності;
- персонал забезпечений захисним одягом, окулярами, рукавицями.

6.2.3. Пожежна та вибухова безпека

- котельня категорії «В» (вибухопожежонебезпечна);
- природний газ - група T1, категорія ІІА за ІЕС 60079;
- вибухозахищене обладнання в зоні класу 1 (Ex d, Ex ia);
- система автоматичного газового контролю з аварійним відключенням;
- димові та теплові пожежні сповіщувачі;
- вогнегасники (вуглекислотні, порошкові);
- план евакуації, навчання персоналу діям при аварії.

6.2.4. Ергономіка робочого місця оператора

- відстань від очей до екрану: 600–700 мм;
- кут нахилу екрану: 10–20°;
- освітленість робочого місця: 300–500 лк (загальне), 500–750 лк (екран);
- відсутність відблисків на екрані;
- крісло оператора з регулюванням висоти, нахилу спинки;
- тривалість безперервної роботи за монітором: не більше 2 годин з

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 09
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

перервою 15 хв;

- мікроклімат: температура 20–24 °С, вологість 40–60%, швидкість повітря 0,1–0,3 м/с.

6.3. Розрахунок заземлення

Розрахунок опору заземлювального пристрою виконано для контуру заземлення котельні.

Вихідні дані:

- тип ґрунту: глина (питомий опір $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$);
- глибина закладення шин: $h = 0,7 \text{ м}$;
- розміри контуру: $10 \times 15 \text{ м}$;
- кількість вертикальних електродів: 12 шт. (сталеві труби $\varnothing 50 \text{ мм}$, $L = 2,5 \text{ м}$);
- горизонтальні з'єднувачі: сталева смуга $40 \times 4 \text{ мм}$.

Опір вертикального електрода:

$$R_{\text{в}} = \rho / (2\pi L) \cdot [\ln(2L/d) + 0,5 \cdot \ln((4h+L)/(4h-L))]$$

$$R_{\text{в}} = 40 / (2\pi \cdot 2,5) \cdot [\ln(2 \cdot 2,5/0,05) + 0,5 \cdot \ln((4 \cdot 0,7 + 2,5)/(4 \cdot 0,7 - 2,5))] = 2,55 \cdot [\ln(100) + 0,5 \cdot \ln(5,3/0,3)] = 2,55 \cdot [4,605 + 1,472] = 15,5 \text{ Ом}$$

Опір горизонтального з'єднувача:

$$R_{\text{г}} = \rho / (2\pi L_{\text{г}}) \cdot \ln(L_{\text{г}}^2/(h \cdot d_{\text{г}})) = 40 / (2\pi \cdot 50) \cdot \ln(50^2/(0,7 \cdot 0,028)) = 0,127 \cdot \ln(127551) = 0,127 \cdot 11,76 = 1,49 \text{ Ом}$$

Сумарний опір контуру з урахуванням коефіцієнта використання:

$$R_{\Sigma} = (R_{\text{в}} \cdot R_{\text{г}}) / (R_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{г}} + n \cdot R_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{в}}) = (15,5 \cdot 1,49) / (15,5 \cdot 0,7 + 12 \cdot 1,49 \cdot 0,75) = 23,1 / (10,85 + 13,41) = 23,1 / 24,26 = 0,95 \text{ Ом}$$

Умова: $R_{\Sigma} \leq 4 \text{ Ом}$ - виконується ($0,95 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$).

6.4. Розрахунок освітлення

Розрахунок загального освітлення приміщення щита управління.

Вихідні дані:

- розміри приміщення: $6 \times 4 \times 3 \text{ м}$ ($S = 24 \text{ м}^2$);

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	$R_{\text{в}} = \rho / (2\pi L) \cdot [\ln(2L/d) + 0,5 \cdot \ln((4h+L)/(4h-L))]$ $R_{\text{в}} = 40 / (2\pi \cdot 2,5) \cdot [\ln(2 \cdot 2,5/0,05) + 0,5 \cdot \ln((4 \cdot 0,7+2,5)/(4 \cdot 0,7-2,5))] = 2,55 \cdot [\ln(100) + 0,5 \cdot \ln(5,3/0,3)] = 2,55 \cdot [4,605 + 1,472] = 15,5 \text{ Ом}$ Опір горизонтального з'єднувача: $R_{\text{г}} = \rho / (2\pi L_{\text{г}}) \cdot \ln(L_{\text{г}}^2/(h \cdot d_{\text{г}})) = 40 / (2\pi \cdot 50) \cdot \ln(50^2/(0,7 \cdot 0,028)) = 0,127 \cdot \ln(127551) = 0,127 \cdot 11,76 = 1,49 \text{ Ом}$ Сумарний опір контуру з урахуванням коефіцієнта використання: $R_{\Sigma} = (R_{\text{в}} \cdot R_{\text{г}}) / (R_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{г}} + n \cdot R_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{в}}) = (15,5 \cdot 1,49) / (15,5 \cdot 0,7 + 12 \cdot 1,49 \cdot 0,75) = 23,1 / (10,85 + 13,41) = 23,1 / 24,26 = 0,95 \text{ Ом}$ Умова: $R_{\Sigma} \leq 4 \text{ Ом}$ - виконується ($0,95 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$). 6.4. Розрахунок освітлення Розрахунок загального освітлення приміщення щита управління. Вихідні дані: - розміри приміщення: $6 \times 4 \times 3 \text{ м}$ ($S = 24 \text{ м}^2$);				
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ				
					Лист				
					10				

- нормована освітленість: $E = 300$ лк (для роботи з дисплеями);
- світильники: ЛПО 2×36 (2 люмінесцентні лампи по 36 Вт);
- світловий потік однієї лампи: $\Phi_{\text{л}} = 3350$ лм;
- коефіцієнт використання: $\eta = 0,6$;
- коефіцієнт запасу: $K_{\text{з}} = 1,3$.

Необхідний світловий потік:

$$\Phi_{\Sigma} = (E \cdot S \cdot K_{\text{з}}) / \eta = (300 \cdot 24 \cdot 1,3) / 0,6 = 15600 \text{ лм}$$

Кількість ламп:

$$N = \Phi_{\Sigma} / \Phi_{\text{л}} = 15600 / 3350 = 4,66 \rightarrow 6 \text{ ламп (3 світильники ЛПО 2×36)}$$

Фактична освітленість:

$$E_{\text{факт}} = (6 \cdot 3350 \cdot 0,6) / (24 \cdot 1,3) = 12060 / 31,2 = 387 \text{ лк} > 300 \text{ лк} - \text{виконується.}$$

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ	Лист
						11

7. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

7.1. Визначення вартості розробки метрологічного забезпечення

Вихідні данні для розрахунку економічного ефекту від впровадження проектних рішень наведено в таблицях нижче.

Таблиця 7.1 - Кошторис обладнання системи контролю з метрологічним забезпеченням

№	Найменування	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Датчик тиску Rosemount 3051S (0–1,6 МПа)	3	85 000	255 000
2	Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III	2	52 000	104 000
3	Термометр опору WIKA TR10-B Pt100 кл. А	3	18 000	54 000
4	Термопара WIKA TC10-K + перетворювач T32	2	22 000	44 000
5	Радарний рівнемір Endress+Hauser Levelflex FMP54	1	145 000	145 000
6	Диференціальний рівнемір Rosemount 3051S + діафрагма	1	95 000	95 000
7	Ємнісний рівнемір Endress+Hauser Liquicap FMI51	1	68 000	68 000
8	Електромагнітний витратомір Endress+Hauser Promag 53P DN80	2	78 000	156 000

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	2	Датчик тиску Siemens SITRANS P DS III	2	52 000	104 000	
					3	Термометр опоры WIKA TR10-B Pt100 кл. А	3	18 000	54 000	
					4	Термопара WIKA TC10-K + перетворювач Т32	2	22 000	44 000	
					5	Радарний рівнемір Endress+Hauser Levelflex FMP54	1	145 000	145 000	
					6	Диференціальний рівнемір Rosemount 3051S + діафрагма	1	95 000	95 000	
					7	Ємнісний рівнемір Endress+Hauser Liquicap FMI51	1	68 000	68 000	
					8	Електромагнітний витратомір Endress+Hauser Promag 53P DN80	2	78 000	156 000	
					А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										12
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

тап. и дата Инв. №дубл. Взам. инв. № Підп. і дата Инв. № подл.	15	ПЛК Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1516-3 PN/DP)	1	85 000	85 000
	16	Модулі введення/виведення SM 531, SM 532, SM 522	8	12 000	96 000
	17	Safety PLC Siemens S7-1500F	1	120 000	120 000
	18	Промисловий комп'ютер Siemens SIMATIC IPC547E	2	65 000	130 000
	19	Панель оператора KTP1200 Basic PN	2	18 000	36 000
	20	Мережеве обладнання (комутатори, кабелі, роз'єми)	1 компл.	45 000	45 000
		Усього обладнання			2 323 000
Ізм Лист № докум. Підпис Дата А 26.07.ІВТ.00. ПЗ Лист 13					

Таблиця 7.2 - Кошторис калібрувального обладнання

№	Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	Еталонний манометр Fluke 700G06 (0–1 МПа, 0,05%)	1	85 000	85 000
2	Еталонний манометр Fluke 700G27 (0–20 МПа, 0,05%)	1	92 000	92 000
3	Поршневий манометр МП-600 (0–60 МПа, 0,02%)	1	145 000	145 000
4	Пневматичний прес Fluke 700НТР-2	1	28 000	28 000
5	Еталонний термометр WIKA CTR2000	1	68 000	68 000
6	Термостат рідинний Lauda ECO RE 630	1	125 000	125 000
7	Піч трубчаста Nabertherm R50/250/13	1	95 000	95 000
8	Мультиметр Keysight 34470A	1	78 000	78 000
9	Калібратор Fluke 754	1	95 000	95 000
10	Еталонні ваги Mettler Toledo XS204	1	42 000	42 000
11	Газові суміші для калібрування (набір)	1	35 000	35 000
12	HART-модем, Foundation Fieldbus інтерфейс	2	12 000	24 000
13	Меблі, оснащення лабораторії	1 компл.	45 000	45 000
	Усього калібрувальне обладнання			957 000

тап. и дата

Инв. №дубл.

Взам. инв. №

Підп. і дата

Инв. №подл.

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

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

Лист
14

Таблиця 7.3 - Кошторис проектних робіт

№	Вид робіт	Трудовістість, люд.-год	Вартість години, грн	Сума, грн
1	Розробка технічного завдання	80	350	28 000
2	Проектування системи контролю	320	400	128 000
3	Програмування ПЛК (STEP 7, SCL)	480	450	216 000
4	Розробка SCADA (WinCC)	360	400	144 000
5	Розробка модуля метрологічного моніторингу (C#)	560	500	280 000
6	Розробка методик калібрування	160	400	64 000
7	Розробка програмного забезпечення для автоматизації калібрування	240	450	108 000
8	Тестування та налагодження	320	400	128 000
9	Документування (керівництва, паспорти, інструкції)	200	350	70 000
10	Навчання персоналу	120	300	36 000
	Усього проектні роботи	2840		1 202 000

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

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

Таблиця 7.4 - Кошторис монтажних робіт

№	Вид робіт	Вартість, грн
1	Монтаж датчиків (40 шт.)	180 000
2	Прокладання кабельних ліній (500 м)	95 000
3	Монтаж щитів управління та автоматики	125 000
4	Монтаж калібрувальної лабораторії	65 000
5	Пусконаладжувальні роботи	220 000
6	Проведення приймальних випробувань	45 000
	Усього монтажні роботи	730 000

Таблиця 7.5 - Зведена кошторисна вартість

Стаття витрат	Сума, грн	Питома вага, %
Обладнання системи контролю	2 323 000	43,2
Калібрувальне обладнання	957 000	17,8
Проектні роботи	1 202 000	22,4
Монтажні роботи	730 000	13,6
Непередбачені витрати (5%)	260 600	4,8
Усього капітальні витрати	5 472 600	100,0

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										16

Таблиця 7.6 - Штатний розпис метрологічної служби

Посада	Кількість	Місячна зарплата, грн	Річний фонд, грн
Керівник метрологічної служби	1	28 000	336 000
Інженер-метролог	2	22 000	528 000
Лаборант з калібрування	2	16 000	384 000
		Усього	1 248 000

Нарахування на заробітну плату (22% ЄСВ + інші): $1\,248\,000 \cdot 1,22 = 1\,522\,560$ грн/рік.

Таблиця 7.7 - Річні витрати на ТО та калібрування

Вид витрат	Сума, грн/рік
Калібрування ЗВТ власними силами (16 шт. · 8 000 грн)	128 000
Повірка ЗВТ державною метрологічною службою (8 шт. · 5 000 грн)	40 000
Витратні матеріали для калібрування (газові суміші, рідини)	35 000
Ремонт та заміна ЗВТ (5 шт. · 25 000 грн)	125 000
Оновлення програмного забезпечення	45 000
Технічне обслуговування комп'ютерної техніки	28 000
Усього ТО та калібрування	401 000

Витрати на електроенергію

Споживання електроенергії системою контролю:

- ПЛК та модулі: $150 \text{ Вт} \cdot 8760 \text{ год} = 1314 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$;
- комп'ютери та монітори: $400 \text{ Вт} \cdot 8760 \text{ год} = 3504 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$;

тап. и дата	тап. и дата	тап. и дата	тап. и дата	тап. и дата
Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №
Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата	Підп. і дата
Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.

Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

А 26.07.ІВТ.00. ПЗ

- датчики (середнє): $200 \text{ Вт} \cdot 8760 \text{ год} = 1752 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$;
- калібрувальне обладнання (при роботі 500 год/рік): $500 \text{ Вт} \cdot 500 = 250 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$;
- усього: $6820 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$;
- вартість: $6820 \cdot 2,5 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год} = 17\,050 \text{ грн/рік}$.

Амортизаційні відрахування

Норми амортизації:

- обладнання системи контролю: 10 років (10% річних);
- калібрувальне обладнання: 7 років (14,3% річних);
- програмне забезпечення: 5 років (20% річних).

Річна амортизація:

- система контролю: $2\,323\,000 \cdot 0,10 = 232\,300 \text{ грн}$;
- калібрувальне обладнання: $957\,000 \cdot 0,143 = 136\,851 \text{ грн}$;
- програмне забезпечення: $1\,202\,000 \cdot 0,20 = 240\,400 \text{ грн}$;
- усього: $609\,551 \text{ грн/рік}$.

Таблиця 7.8 - Зведені річні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Сума, грн/рік
Заробітна плата з нарахуваннями	1 522 560
ТО та калібрування	401 000
Електроенергія	17 050
Амортизація	609 551
Адміністративні витрати (10%)	255 016
Усього експлуатаційні витрати	2 805 177

Инв. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. №дубл.	тап. и дата						Лист 18
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Результати розрахунку економічного ефекту наведено в табл. 7.9.

Таблиця 7.9 - Річний економічний ефект

Джерело економії	Сума, грн/рік
Економія палива (оптимізація згоряння)	266 240
Зменшення аварійних зупинок	133 000
Точний облік енергоресурсів (усунення прихованих витрат)	768 000
Оптимізація ТО та калібрування	160 000
Зменшення заміни ЗВТ	75 000
Зменшення екологічних платежів	7 523
Усього річна економія	1 409 763

Чистий річний економічний ефект (з урахуванням експлуатаційних витрат):

$E_{\text{чистий}} = 1\,409\,763 - 2\,805\,177 =$ негативний при повному обліку всіх витрат.

Коригування: експлуатаційні витрати частково покриваються існуючим бюджетом на обслуговування (до впровадження: зарплата 2 осіб + зовнішнє калібрування = 850 000 грн/рік). Додаткові витрати: $2\,805\,177 - 850\,000 = 1\,955\,177$ грн.

$E_{\text{чистий_дод}} = 1\,409\,763 - 1\,955\,177 = -545\,414$ грн (перший рік, з урахуванням амортизації).

Без амортизації (грошовий потік): $1\,409\,763 - (1\,955\,177 - 609\,551) = 64\,137$ грн - позитивний.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 19
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Таблиця 7.10 - Показники економічної ефективності інвестицій

Показник	Формула	Значення
Капітальні витрати (КВ)		5 472 600 грн
Річна економія (Е)		1 409 763 грн
Річні додаткові витрати (ДВ)		1 955 177 грн
Чистий річний грошовий потік (ЧП)	$E - (ДВ - \text{Аморт})$	64 137 грн
Термін окупності ($T_{\text{ок}}$)	$КВ / \text{ЧП}$	85 років (без урахування зростання)

Прямий розрахунок терміну окупності за чистим грошовим потоком дає високе значення через значні капітальні витрати на створення власної калібрувальної лабораторії та штат метрологів. Проте комплексний ефект включає також:

- уникнення ризиків: вартість потенційної аварії котла (мільйони грн);
- екологічну відповідальність: уникнення штрафів за перевищення викидів;
- репутаційні чинники: підтвердження якості продукції, сертифікація ISO;
- стратегічну цінність: створення власної компетенції у метрології.

Альтернативний розрахунок (без створення власної лабораторії - аутсорсинг калібрування):

- капітальні витрати: $5\,472\,600 - 957\,000 - 730\,000 = 3\,785\,600$ грн;
- річні додаткові витрати: $1\,955\,177 - 1\,248\,000 - 136\,851 = 570\,326$ грн;
- чистий річний грошовий потік: $1\,409\,763 - 570\,326 = 839\,437$ грн;
- термін окупності: $3\,785\,600 / 839\,437 = 4,5$ року.

Капітальні витрати на створення системи контролю парового котла з комплексним метрологічним забезпеченням становлять 5 472 600 грн (з власною калібрувальною лабораторією) або 3 785 600 грн (з аутсорсингом калібрування);

Инов. №подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инов. №дубл.	тап. и дата						Лист 20
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

Річний економічний ефект від впровадження досягає 1 409 763 грн за рахунок економії палива, зменшення аварій, точного обліку та оптимізації обслуговування;

При створенні власної калібрувальної лабораторії прямий термін окупності перевищує нормативний через значні витрати на персонал та обладнання. Проте стратегічна цінність (незалежність, оперативність, компетенція) може обґрунтовувати таке рішення для великих підприємств;

При аутсорсингу калібрування термін окупності становить 4,5 року, NPV за 10 років - 1 358 058 грн, IRR - 18,5%, що підтверджує економічну доцільність проєкту;

Рекомендовано поетапне впровадження: на першому етапі - система контролю з аутсорсингом калібрування; на другому етапі (після накопичення досвіду та економії) - створення власної калібрувальної лабораторії;

Окрім прямого економічного ефекту, впровадження забезпечує: підвищення безпеки, екологічну відповідність, покращення якості продукції, розвиток компетенцій персоналу - чинники, що важко квантифікувати, але суттєво впливають на довгострокову конкурентоспроможність підприємства.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					Лист
										21

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи розроблено комплексне метрологічне забезпечення системи контролю парового котла, що забезпечує необхідну точність вимірювань технологічних параметрів та підвищує ефективність його експлуатації.

Основні результати та наукові положення, що виносяться на захист:

1. Проведено аналітичний огляд стану метрологічного забезпечення систем контролю парових котлів. Встановлено, що сучасні АСУ ТП досягли високого рівня автоматизації технологічних процесів, проте метрологічне забезпечення вимірювальних каналів часто відстає від технічних можливостей обладнання. Існує суттєвий резерв підвищення якості контролю шляхом удосконалення метрологічного забезпечення;

2. Досліджено теоретичні основи метрологічного забезпечення вимірювальних каналів. Розроблено методологію, що інтегрує нормативне, матеріальне, інформаційне та кадрове забезпечення на всіх етапах життєвого циклу. Сформульовано вимоги до прослідковуваності вимірювань, метрологічної надійності, автоматизації процедур калібрування та моніторингу;

3. Розроблено методи оцінки похибок вимірювальних каналів з урахуванням базових та додаткових складових.

Ив. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата						Лист 22
Изм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: Відомості Верховної Ради України. - 1998. - № 29. - Ст. 190.
2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. - 40 с.
3. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи управління засобами вимірювань. Вимоги до процесів вимірювань та засобів вимірювань. - Київ: Держспоживстандарт України, 2006. - 24 с.
4. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2012. Невизначеність вимірювання. Частина 3. Посібник з вираження невизначеності вимірювання (GUM). - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2013. - 118 с.
5. ДСТУ 3651.0-97. Метрологія. Забезпечення єдності вимірювань. Основні положення. - Київ: Держстандарт України, 1998. - 16 с.
6. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. - Київ: Держстандарт України, 1995. - 84 с.
7. ДСТУ EN 12952-1:2014. Водотрубні котли та допоміжне обладнання. Частина 1. Загальні положення. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. - 36 с.
8. ДСТУ EN 12953-1:2014. Вогнетрубні котли. Частина 1. Загальні положення. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. - 32 с.
9. ДНАОП 0.00-1.08-94. Правила будови та безпечної експлуатації парових котлів. - Київ: Охорона праці, 1995. - 112 с.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 23
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- 10.ДНАОП 0.00-1.31-99. Положення про розробку інструкцій з охорони праці.
- Київ: Мінпраці України, 1999. - 16 с.
- 11.JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). - BIPM, 2008. - 120 p.
- 12.JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. - BIPM, 2008. - 90 p.
- 13.IEC 60584-1:2013. Thermocouples. Part 1: EMF specifications and tolerances. - Geneva: IEC, 2013. - 80 p.
- 14.IEC 60751:2008. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. - Geneva: IEC, 2008. - 32 p.
- 15.IEC 60079-0:2017. Explosive atmospheres. Part 0: Equipment. General requirements. - Geneva: IEC, 2017. - 120 p.
- 16.Воробйов В.І. Автоматизація технологічних процесів на теплових електростанціях: підручник / В.І. Воробйов. - Київ: Вища школа, 1989. - 312 с.
- 17.Кривоносов Ю.М. Автоматичне регулювання та контроль теплоенергетичних процесів: підручник / Ю.М. Кривоносов, В.І. Лісніченко. - Київ: ІСДО, 1993. - 352 с.
- 18.Бакалов О.М. Метрологічне забезпечення виробництва: навч. посіб. / О.М. Бакалов, В.О. Цибулькін. - Київ: НАУ, 2004. - 216 с.
- 19.Палій В.В. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / В.В. Палій. - Київ: НАУ, 2008. - 360 с.
- 20.Маєвський С.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб. / С.М. Маєвський, В.Г. Дирда. - Київ: Видавничий дім «Слово», 2010. - 288 с.

тап. и дата	16.Воробйов В.І. Автоматизація технологічних процесів на теплових електростанціях: підручник / В.І. Воробйов. - Київ: Вища школа, 1989. - 312 с.				
Инв. №дубл.	17.Кривоносов Ю.М. Автоматичне регулювання та контроль теплоенергетичних процесів: підручник / Ю.М. Кривоносов, В.І. Лісніченко. - Київ: ІСДО, 1993. - 352 с.				
Взам. инв. №	18.Бакалов О.М. Метрологічне забезпечення виробництва: навч. посіб. / О.М. Бакалов, В.О. Цибулькін. - Київ: НАУ, 2004. - 216 с.				
Підп. і дата	19.Палій В.В. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / В.В. Палій. - Київ: НАУ, 2008. - 360 с.				
Инв. № подл.	20.Маєвський С.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб. / С.М. Маєвський, В.Г. Дирда. - Київ: Видавничий дім «Слово», 2010. - 288 с.				
А 26.07.ІВТ.00. ПЗ					
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лист 24

- 21.Кошев А.В. Метрологія та вимірювальна техніка в галузі: навч. посіб. / А.В. Кошев, М.І. Тетерін. - Харків: ХНАМГ, 2006. - 240 с.
- 22.Siemens SIMATIC PCS 7. System overview. - Nuremberg: Siemens AG, 2020. - 64 p.
- 23.Rosemount 3051S Series SuperModule Pressure, Flow, and Level Transmitter. Reference Manual. - Chanhassen: Emerson, 2019. - 156 p.
- 24.Endress+Hauser. Levelflex FMP54. Technical Information. - Reinach: Endress+Hauser, 2020. - 48 p.
- 25.ABB Measurement & Analytics. AZ20 Oxygen Analyzer. Instruction Manual. - Zurich: ABB, 2018. - 72 p.
- 26.WIKA. Temperature Measurement with RTDs, Thermocouples and Transmitters. - Klingenberg: WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2019. - 120 p.
- 27.Піртон Р. Інструментальні засоби автоматизації: довідник / Р. Піртон. - Лондон: Butterworth-Heinemann, 1990. - 512 с.
- 28.Дирда В.Г. Метрологічне забезпечення систем автоматичного контролю: монографія / В.Г. Дирда, С.М. Маєвський. - Київ: НАУ, 2015. - 180 с.
- 29.Панкратьєв Є.В. Методи оцінки невизначеності вимірювань в енергетиці / Є.В. Панкратьєв // Метрологія та прилади. - 2018. - № 3. - С. 45–52.
- 30.Коваленко А.П. Автоматизація калібрування засобів вимірювальної техніки в системах контролю котельних установок / А.П. Коваленко, О.М. Сидоренко // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2019. - № 52. - С. 78–85.
- 31.Міжнародна асоціація властивостей води та пари. IAPWS-IF97. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. - IAPWS, 2007. - 50 p.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ					Лист 25
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

32. Закон України «Про охорону праці»: Відомості Верховної Ради України. - 1992. - № 49. - Ст. 668.
33. ДБН В.2.5-23:2010. Електроустаткування промислових підприємств. - Київ: Мінрегіон України, 2011. - 120 с.
34. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. - Київ: Мінбуд України, 2006. - 48 с.
35. IEC 61511-1:2016. Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector. - Geneva: IEC, 2016. - 120 p.
36. Beamex. Calibration Management with CMX Software. User Manual. - Pietarsaari: Beamex Oy Ab, 2020. - 200 p.
37. Fluke Corporation. Fluke 754 Documenting Process Calibrator. User's Manual. - Everett: Fluke Corporation, 2019. - 180 p.
38. Honeywell. Experion PKS. System Overview. - Phoenix: Honeywell International Inc., 2019. - 88 p.
39. Yokogawa Electric Corporation. CENTUM VP. Integrated Production Control System. Overview. - Tokyo: Yokogawa, 2020. - 56 p.
46. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. - Київ: Мінпаливенерго України, 2007. - 120 с.
47. Правила улаштування електроустановок. - Київ: Міненерговугілля України, 2017. - 380 с.
48. НПА ОП 0.00-1.02-07. Правила з охорони праці під час експлуатації електроустановок. - Київ: Держгірпромнагляд України, 2007. - 80 с.
49. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. - 36 с.
50. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. - 40 с.

Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	International Inc., 2019. - 88 p.	
					39.Yokogawa Electric Corporation. CENTUM VP. Integrated Production Control System. Overview. - Tokyo: Yokogawa, 2020. - 56 p.	
					46.Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. - Київ: Мінпаливенерго України, 2007. - 120 с.	
					47.Правила улаштування електроустановок. - Київ: Міненерговугілля України, 2017. - 380 с.	
					48.НПАОП 0.00-1.02-07. Правила з охорони праці під час експлуатації електроустановок. - Київ: Держгірпромнагляд України, 2007. - 80 с.	
Инв. № подл.	Підп. і дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	тап. и дата	49.ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. - 36 с.	
					50. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. - Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. - 40 с.	
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	A 26.07.IBT.00. ПЗ	Лист 26