

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри електронної техніки
_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)
« ____ » _____ 2021 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи
визначення температури холодного повітря в енергетичному котлі»

Виконав студент 2 курсу, групи ІВТм-20
(шифр групи)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Гурьянов Максим Євгенович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник проф. каф. ЕТ, д.т.н., професор _____ Анатолій ЗОПІ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2021 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____

(дата)

з оцінкою _____

Секретар ДЕК _____

(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота
_____магістра_____

Тема: «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи визначення температури холодного повітря в енергетичному котлі»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ІВТм – 20

_____Максим ГУРЬЯНОВ

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

_____Анатолій ЗОРІ

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____Олександр ВОВНА

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____Анатолій ЗОРІ

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____Іван ЛАКТІОНОВ

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтроль

_____Олександр ВОВНА

(підпис,

дата,

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Покровськ – 2021

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра Електронна техніка

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр

Галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

(шифр і назва)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр БОВНА

« 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Гурьянов Максим Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи визначення температури холодного повітря в енергетичному котлі

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 22.09.2021 року № 570

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз технічних характеристик об'єкту; математична модель вимірювального каналу; обґрунтування та розробка структури інформаційно-вимірювальної системи; розробка структурної та принципової схем інформаційно-вимірювальної системи

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
2	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
3	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
4	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз характеристик і параметрів енергетичного устаткування зі зміною показників точності вимірювачів робочих температур	27.09.2021 р – 15.10.2021 р	
2	Дослідження впливу джерел похибки вимірювання температури перетворювачів для енергетичних систем	16.10.2021 р – 29.10.2021 р.	
3	Розробка математичної моделі вимірювального перетворювача температури для технологічного обладнання теплоелектростанції	30.10.2021 р – 15.11.2021 р.	
4	Результати дослідження інформаційно-вимірювальної системи температури в устаткуванні теплоелектростанції	16.11.2021 р – 01.12.2021 р.	

Студент

(підпис)

Максим ГУРЬЯНОВ

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Анатолій ЗОРІ

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Гурьянов, М.Є. Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи визначення температури холодного повітря в енергетичному котлі / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2021.

Пояснювальна записка: 84 стор., 18 рис., 12 табл., 30 посилання.

Удосконалено підхід до підвищення показників надійності роботи, а також паркового ресурсу систем моніторингу та керування температурою на теплоелектростанціях за допомогою оптимізації роботи цих систем завдяки обліку реальних умов експлуатації.

Розроблено математичну модель перенесення теплоти в системах з типовими термopарами, що відповідають реальним умовам експлуатації базових блоків і вузлів теплоелектростанції.

Застосування розроблених моделей та алгоритмів оцінки похибок результатів вимірювання температури в базових блоках і вузлах технологічного обладнання теплоелектростанцій дозволить підвищити швидкодію регулювання температури.

Покращення метрологічних характеристик вимірювального контролю температури для умов теплоелектростанцій дозволить зменшити час роботи устаткування в умовах нерегламентованих температур та підвищити робочий ресурс обладнання.

Ключові слова: вимірювання, температура, термopара, точність, надійність, математична модель, теплоелектростанція

ABSTRACT

Hurianov, M.Ye. Development and research of the information-measuring system for determining the temperature of cold air in a power boiler / Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 152 'Metrology and information-measuring technique'. – SHEI 'DonNTU', Pokrovsk, 2021.

Explanatory note: 84 p., 18 fig., 12 tabl., 30 references.

The approach to increase of indicators of reliability of work, and also park resource of systems of monitoring and control of temperature at thermal power plants by optimization of work of these systems thanks to the account of real operating conditions is improved.

A mathematical model of heat transfer in systems with standard thermocouples that meet the real operating conditions of the base units and units of the thermal power plant has been developed.

Application of the developed models and algorithms of an estimation of errors of results of measurement of temperature in base blocks and knots of the technological equipment of thermal power plants will allow increasing speed of regulation of temperature.

Improving the metrological characteristics of temperature control for the conditions of thermal power plants will reduce the operating time of the equipment in conditions of unregulated temperatures and increase the service life of the equipment.

Key words: measurement, temperature, thermocouple, accuracy, reliability, mathematical model, thermal power plant

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ЗІ ЗМІНОЮ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЧІВ РОБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР.....	12
1.1 Характеристики та параметри надійності й робочого ресурсу блоків і систем теплоелектростанції.....	12
1.2 Вплив зміни температури на показники надійності робочого устаткування теплоелектростанції.....	14
1.3 Висновки.....	19
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	20
2.1 Аналіз основних джерел похибки вимірювання температури робочих засобів.....	20
2.2 Аналіз місць здійснення вимірювального контролю температури на робочому устаткуванні теплоелектростанції.....	27
2.3 Висновки.....	42
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	44
3.1 Модель вимірювача температури металів устаткування теплоелектростанції з малим повітряним зазором.....	44
3.2 Методи розв'язання рівнянь математичної моделі вимірювача температури.....	52
3.3 Алгоритм знаходження рішення математичної моделі вимірювача температури.....	53
3.4 Визначення достовірності результатів досліджень.....	57
3.5 Висновки.....	60

4 РЕЗУЛЬТАТИ	ДОСЛІДЖЕННЯ	ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	ТЕМПЕРАТУРИ	В УСТАТКУВАННІ
ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....		61
4.1 Дослідження	тривалості роботи перетворювача від значення	
вимірювальної температури.....		61
4.2 Використання	результатів роботи в системах теплового захисту	
теплоелектростанцій.....		66
4.3 Висновки.....		72
ВИСНОВКИ.....		73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		75
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій		
на підприємстві.....		78

ВСТУП

Актуальність теми. Вимірювання температури в електроенергетиці складає до 50% від загальної кількості вимірювань. Особливого значення набувають здійснення вимірювального контролю зміни температури у складі системи контролю та дистанційного й автоматичного керування технологічними процесами на тепловій електростанції. Регулятори температури в тепловій електроенергетиці складають до (30 – 40)% від загальної кількості регуляторів. Вимірювання значення температури здійснюється в пристроях і системах блокування та захисту. Високі значення інерційності систем регулювання температури може призводити до підвищення температурного режиму устаткування, блоків, систем і агрегатів теплоелектростанції, що має місце протягом реакції цих пристроїв під час формування реакції на регулювання. Це знижує показники надійності та зменшує загальний ресурс блоків і систем на теплоелектростанціях.

Вибір сенсорів під час проектуванні систем вимірювального контролю та керування на теплоелектростанціях обумовлено впливом низки дестабілізуючих факторів, серед яких вимоги до допустимого максимального значення похибок вимірювань, теплової постійної часу сенсорів, діапазону температур, що вимірюється, а також здійснення дистанційної передачі вимірювальних значень та/ або інших параметрів системи, що визначаються.

Достовірність вимірювання значення температури на теплоенергетичних станціях є умовою забезпечення ефективного функціонування процесу, а також економічної витрати води та палива. Підвищення точності вимірювання температури дозволить забезпечити високі показники надійності, а також безпеки під час генерування тепла й електроенергії на теплоелектростанціях.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності вимірювання температур під час експлуатації енергетичного устаткування, що дозволить підвищити його безпечність, надійність та суттєво збільшити

робочий ресурс.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні представлені **такі задачі**:

– виконати аналіз характеристик і параметрів енергетичного устаткування зі зміною показників точності вимірювачів робочих температур обладнання теплоелектростанції;

– дослідити вплив джерел похибки вимірювання температури перетворювачів для енергетичних систем;

– розробити математичну модель вимірювального перетворювача температури для технологічного обладнання теплоелектростанції;

– виконати дослідження показників точності інформаційно-вимірювальної системи температури в устаткуванні теплоелектростанції.

Об'єкт дослідження: процеси, що протікають у вимірювальних каналах температури холодного повітря в енергетичному котлі.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення точності вимірювання температури холодного повітря в енергетичному котлі.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії вірогідності та математичної статистики, теорії інформаційно-вимірювальних систем та систем, теорії випадкових процесів, теорії планування наукового експерименту, комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено підхід до підвищення показників надійності роботи, а також паркового ресурсу систем моніторингу та керування температурою на теплоелектростанціях за допомогою оптимізації роботи цих систем завдяки обліку реальних умов експлуатації.

2. Розроблено математичну модель перенесення теплоти в системах з типовими термопарами, що відповідають реальним умовам експлуатації базових блоків і вузлів теплоелектростанції.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Застосування розроблених моделей та алгоритмів оцінки похибок результатів вимірювання температури в базових блоках і вузлах технологічного

обладнання теплоелектростанцій дозволить підвищити швидкість регулювання температури.

2. Покращення метрологічних характеристик вимірювального контролю температури для умов теплоелектростанцій дозволить зменшити час роботи устаткування в умовах нерегламентованих температур та підвищити робочий ресурс обладнання.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи магістра одержані автором самостійно. Автором особисто: виконано аналіз характеристик і параметрів енергетичного устаткування зі зміною показників точності вимірювачів робочих температур обладнання теплоелектростанцій; досліджено вплив джерел похибки вимірювання температури перетворювачів для енергетичних систем; розроблено математичну модель вимірювального перетворювача температури для технологічного обладнання теплоелектростанцій; виконано дослідження показників точності інформаційно-вимірювальної системи температури в устаткуванні теплоелектростанцій.

Апробація результатів роботи. Основні розділи роботи пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Покровськ, 2020 – 2021 рр.).

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Структура кваліфікаційної роботи магістра визначена загальною схемою наукового дослідження, метою досліджень та шляхами її досягнення. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи містить 84 сторінки машинописного тексту, зокрема 77 сторінок основного тексту, 18 рисунків, 12 таблиць та список використаних джерел із 30 найменувань.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ЗІ ЗМІНОЮ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЧІВ РОБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

1.1 Характеристики та параметри надійності й робочого ресурсу блоків і систем теплоелектростанції

Надійність є комплексним показником [1], який характеризує властивості устаткування протягом певного часу зберігати та відтворювати параметри під час його експлуатації. Для якісного опису характеристик та параметрів об'єкта на основі його надійності застосовуються такі показники [1], як ремонтпридатність, безвідмовність роботи та інші.

Безвідмовністю технологічного устаткування – це властивість об'єкта зберігати свої працездатність протягом певного часу. Отже, ця характеристика показує можливість безвідмовної роботи технологічного об'єкта протягом тривалого часу напруження на відмову. Ймовірність відмови технологічного обладнання за одиницю часу має назву – інтенсивністю відмов [1]:

$$In(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot P(t_0 < t \leq (t_0 + \Delta t)),$$

де P – ймовірність відмови технологічного обладнання за певний період часу Δt , якщо устаткування проробило без відмов до такого часу t_0 .

Інтенсивність відмов показує ймовірність того, що один з блоків або елемент технологічного обладнання, яке проробило без відмов до моменту часу t , та це обладнання може відмовити в момент часу через доволі малий проміжок часу Δt [1].

Придатність технологічного обладнання до виконання функцій залежить від його властивості до відновлення або придатності до ремонту. Кількісно

показник придатності до ремонту оцінюється, як інтенсивність відновлення $\mu(t)$ та ймовірністю відновлення за певний інтервал часу $P(t_0, t_0 + \Delta t)$, ці характеристики пов'язано між собою таким співвідношенням [1]:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot P_B(t_0, t_0 + \Delta t).$$

Імовірність того, що технологічний об'єкт є працездатним у якийсь момент часу (крім періоду часу, коли технологічне устаткування не застосовується за прямим призначенням), визначається як коефіцієнт готовності технологічного обладнання [й]:

$$K_r(t) = \frac{\lambda}{In + \mu} \cdot e^{-(\mu + In)t} + \frac{\mu}{In + \mu},$$

де μ – інтенсивність відновлення обладнання;

In – інтенсивність відмов обладнання;

Основними кількісними показниками довготривалої роботи технологічного обладнання є його середній термін служби T_c та середній ресурс обладнання T_p . Середній термін служби об'єктів, що можуть бути відновленими, має в своєму складі період його відновлення та роботи, які можуть чергуватися. Середній ресурс технологічного об'єкта визначається як середнє значення напрацюванням, що має місце від початку експлуатації об'єкта до моменту часу, коли має місце граничний стан [1, 2].

Однією з базових характеристик технологічного обладнання теплоелектростанцій є парковий ресурс. Значення цього показника розраховується за періоду роботи цього технологічного обладнання, якщо повністю виконується вимог до експлуатації, монтажу та ремонту [1].

1.2 Вплив зміни температури на показники надійності робочого устаткування теплоелектростанції

Показники надійності технологічного устаткування (довговічність, готовність, безвідмовність та ін.) зазвичай визначаються режимами роботи цього устаткування, а саме інтенсивністю та характеристикою процесів горіння, теплообміну та корозії, що істотно залежить від відкладеного шару на поверхні металів [1, 2].

Під час функціонування технологічного устаткування на теплоелектростанціях до пошкоджень зазвичай схильні пароперегрівачі, водяні економайзери, а також топкові екрани [1, 2]. У таблиці 1.1 наведено типові відкази обладнання котлів, які застосовуються в енергетичних блоках теплоелектростанцій потужністю 300 МВт [1, 2].

Таблиця 1.1 – Величина відказів під час роботи блоків та вузлів теплоелектростанції

№	Тип технологічного устаткування	Величина відказів, %
1	Поверхні, що нагріваються	79,2
1.1	Пароперегрівач	27,3
1.2	Економайзер	21,7
1.3	Випарні екрани	19,8
1.4	Труби, що не обігріваються	6,5
1.5	інші блоки	3,9
2	Засоби автоматизації	7,4
3	Арматура	4,9
4	Допоміжне обладнання	3,5
5	Газопроводи, система подачі палива, нагрівачі повітря, які є регенеративні	0,4

На труби топкових екранів під час роботи вливає корозія продуктів згоряння, вплив дії променистої енергії та ін. середовищ [2, 3].

У котлах, які працюють під час дії критичних параметрів, на труби радіаторних пароперегрівачів впливає високотемпературна корозія. Цей процес впливає на зміну структури сталі, а також зменшенню міцності до жару, що призводить до зменшення труби та з'явленню поривів [2, 3]. Виникнення поривів трубопроводів є небезпечним явищем, що призводить до зупинки котельного устаткування або зменшенню навантаження. Це призводить до зменшення тиску, що обумовлено розгерметизацією трубопроводу. Внаслідок розгерметизації може бути пошкодження суміжних трубопроводів, що є причиною заміни як пошкодженої ділянки трубопроводу, так і цілого ступеня пароперегрівача [1].

До однієї з особливостей пошкодження деталей турбінного устаткування є те, що наявність серйозних дефектів не завжди може призвести до виникнення відмов турбінного устаткування [1]. Це, зазвичай, відноситься до пошкоджень корпусів циліндрів турбін, а також стопорних і регулюючих клапанів. Дефекти, які утворюються в металі під час експлуатації, виникають з руйнуванням або виникнення тріщини в корпусах деталей. Ці дефекти виникають під час впливу вібрації (циклічних навантажень). Руйнування лопаткового апарату може мати під час втоми. До основних факторів виникнення цих дефектів є ерозійне зношування та наявність конструктивних недоробок [1, 2].

Отже, під час експлуатації для збільшення ресурсу роботи технологічного устаткування та зменшення інтенсивності відмов необхідно дотримуватися регламентної експлуатації, яка має базовий зв'язок з температурним режимом роботи обладнання. Зв'язок між температурним режимом роботи устаткування та надійністю його роботи можна визначити під час аналізу та обліку даних з нормативних документів [4 – 6]. Основні залежності зміни паркового ресурсу технологічного обладнання теплоелектростанцій та його температурного режиму наведено на рис. 1.1, 1.2 та 1.3.

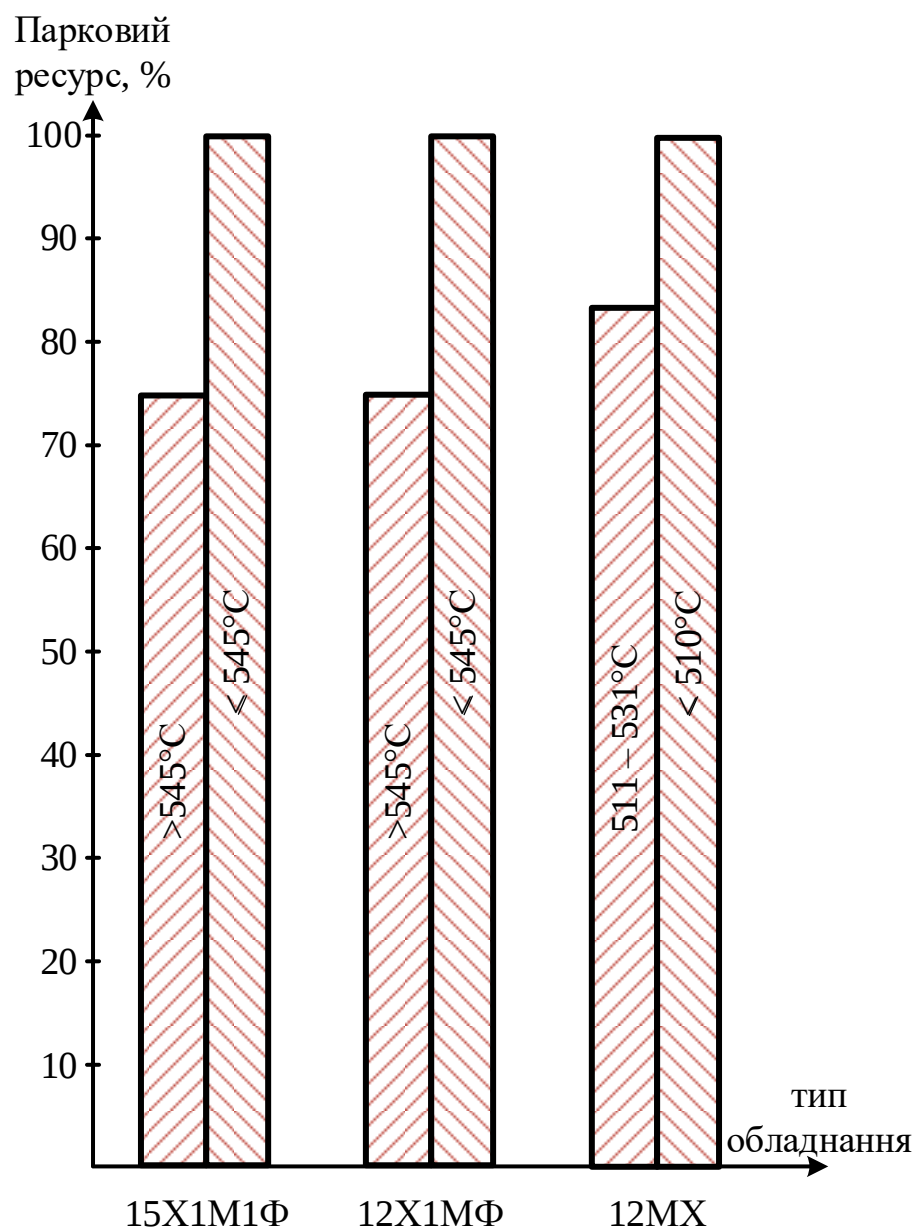


Рисунок 1.1 – Зменшення паркового ресурсу колекторів парового котла теплоелектростанції з підвищенням робочої температури (аналіз здійснено в залежності від типу сталі)

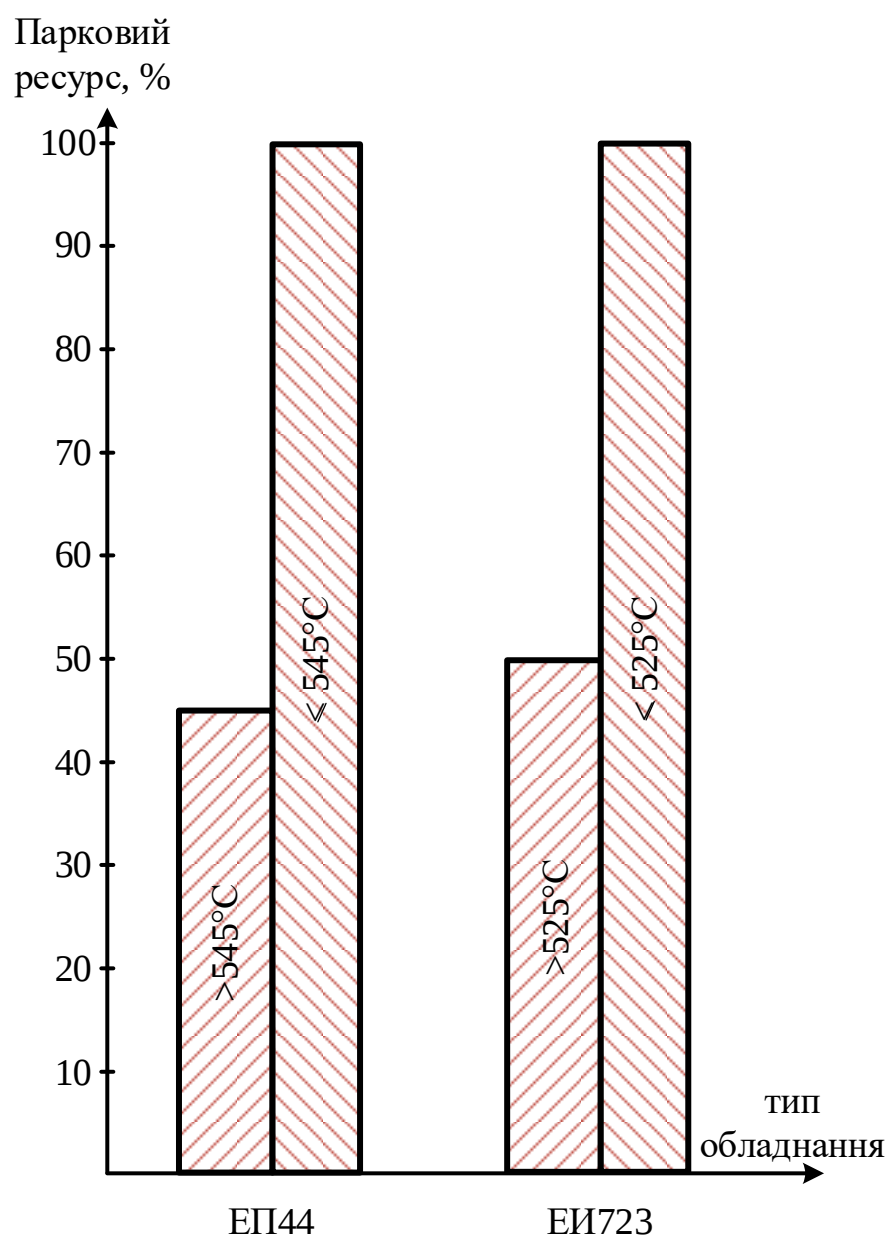


Рисунок 1.2 – Зменшення паркового ресурсу кріплення арматури та роз'єднань турбін теплоелектростанції з підвищенням робочої температури (аналіз здійснено в залежності від типу сталі)

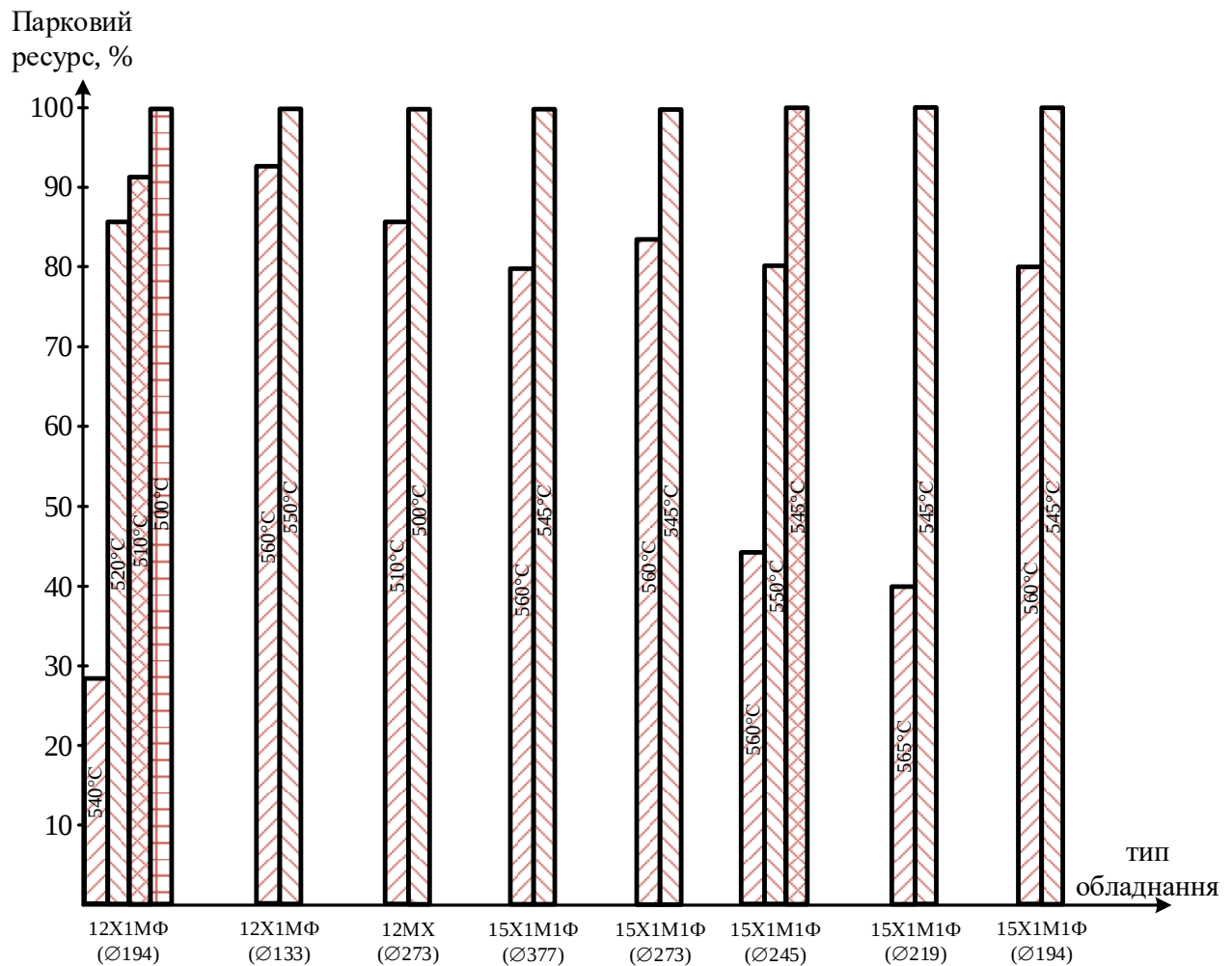


Рисунок 1.3 – Зменшення паркового ресурсу паропроводів з підвищенням робочої температури (аналіз здійснено в залежності від типу сталі)

З аналізу залежності, що наведено на рис. 1.1 – 1.2 можна зробити висновок, що температурний режим роботи устаткування суттєво впливає на надійність технологічного обладнання теплоелектростанції.

Надійність технологічного устаткування визначається такими показниками як готовність обладнання, напрацювання на відмову, інтенсивність відмов, придатність до ремонту та ін. Методи розрахунку показників надійності, які застосовуються в теперішній час, базуються на методах математичного моделюванні цих показників від зміни дестабілізуючих факторів. Температурний режим обладнання впливає на значення показників надійності технологічного обладнання, а його руйнування обумовлено втомною деформацією, то значення інтенсивності відмов можна розрахувати під час

застосування однофакторної математичної моделі [7, 8]:

$$\ln(T) = V \cdot T^m, \quad (1.1)$$

де V та m – постійні величини;

T – значення робочої абсолютної температури технологічного обладнання, К.

Постійні величини V та m визначаються експериментальним шляхом, їх значення залежить від типу матеріалу, з якого виготовлено устаткування, а також інших параметрів.

Постійні у співвідношенні (1.1) визначаються за допомогою емпіричних методів. Визначених кількісних значень постійних величин V та m для конкретного типу технологічного обладнання досить мало. Для окремих блоків і вузлів цих відомостей взагалі немає, а лише визначено діапазони зміни. Якість роботи систем керування температурним режимом для основного технологічного обладнання теплоелектростанцій визначає достовірність вимірювальних значень інформаційно-вимірювальних системи температури, що впливає на показники надійності як основного, так і допоміжного технологічного обладнання теплоелектростанцій.

1.3 Висновки

Виконано якісний та кількісний аналіз факторів, зміна яких впливає на показники надійності та безпеку функціонування технологічного обладнання теплоелектростанції.

На базі аналізу нормативних документів встановлено функціональний взаємний зв'язок між парковим ресурсом технологічного обладнання та температурним режимом його експлуатації.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Аналіз основних джерел похибки вимірювання температури робочих засобів

Під час застосування термоелектричних перетворювачів (термометрів опору або термопар) кількість джерел похибок вимірювань перевищує аналогічні показники для інших типів сенсорів температури. Це обумовлено тим, що крім джерел похибок вимірювання, які характеризують всі засоби вимірювального контролю температури, а саме характеристики матеріалів базових елементів, а також контактом з середовищем сенсора, виникають такі фактори, які базуються на електричних характеристиках термоелектричних контактах та загалом сенсора [9].

До основних факторів, зміна яких обумовлено виникненням похибок вимірювання температури термопарами для умов функціонування на теплоелектростанції, можна віднести наступні:

1. Наявність зовнішніх перешкод, сторонніх струмів і наведень (див. рис. 2.1), низьке значення електричної опору ізоляцію кола термопари.

Під час наявності статичних магнітних полів виникає суттєве значення похибки (див. рис. 2.2) [10].

Під час застосування термопари в технологічному, який має великі теплові потоки, виникають значні похибки результату вимірювання. Якщо застосовувати в цьому випадку сенсори, що розміщено на симетричній осі нагрівачів в зонах, які не мають нагріву або з малим значенням градієнта температур, то можна отримати достатньо високі показники точності результату вимірювання [10].

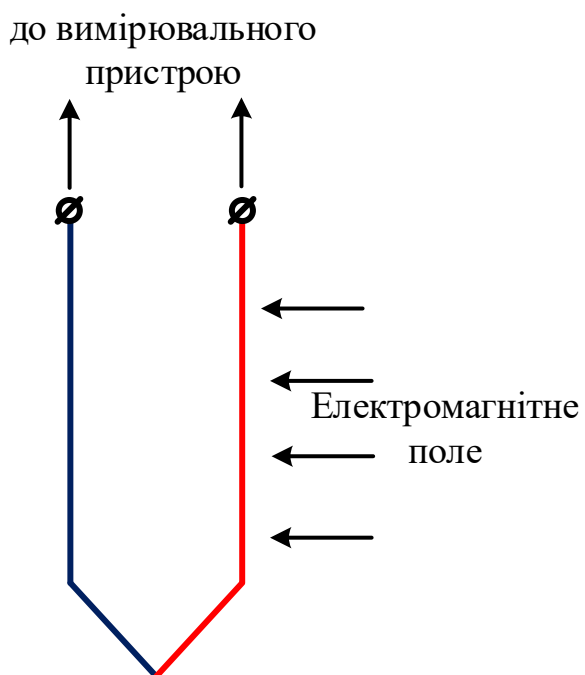


Рисунок 2.1 – Вплив електромагнітного поля на термопару

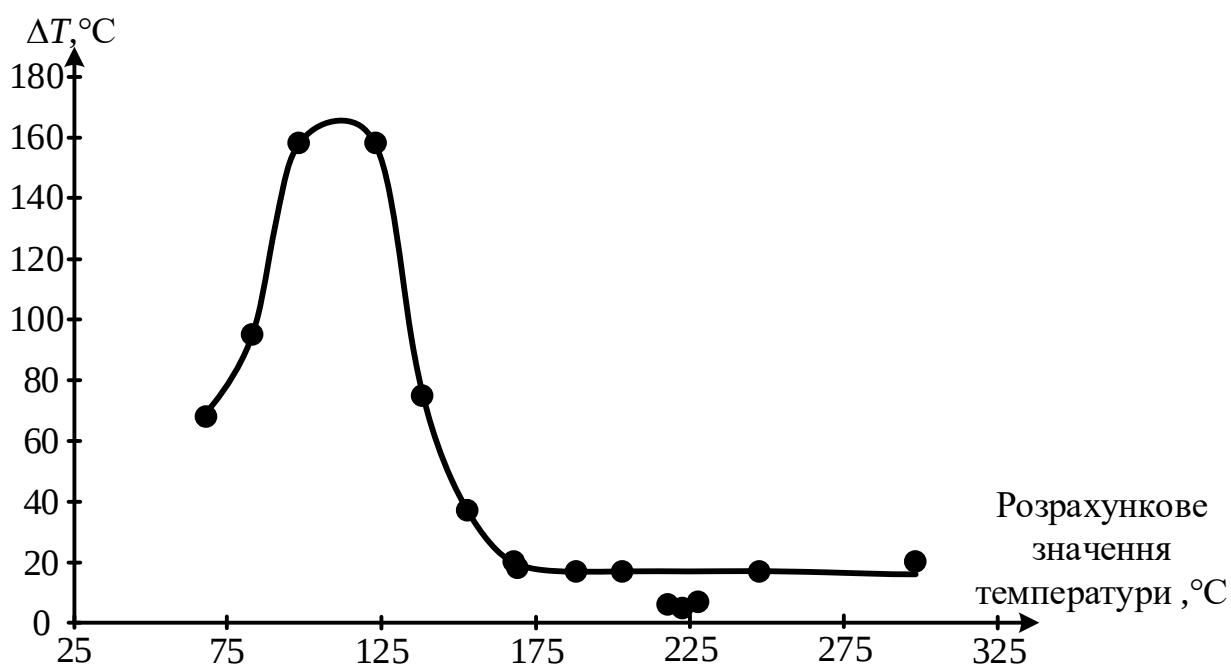


Рисунок 2.2 – Залежність різниці між розрахунковим значенням температури та результатом вимірювання термопарою типу К (ХА)

Для отримання показників точності робочих засобів вимірювання необхідне мати високі показники міцності ізоляції, а також ізотермічності контакту клем проводів підключення до термопари. Це обумовлено тим, що невелика величина теплового впливу, наприклад, сонячне світло призводять до спотворень термо-е.р.с. [9].

2. Неоднорідність матеріалу, з якого виготовлено термоелектроди, що має місце під час їх нерегламентного виготовлення, а також старінні термоелектричних перетворювачів та вплив інших факторів.

Існують декілька причин, що призводить до виникнення гетерогенної структури термоелектродів. Однією з причин є утворення міжкристалічних ліквідацій, які мають нерівномірний розподіл за структурою термоелектродів [11]. Похибки, які мають місце під час наявності неоднорідності термоелектродів, зазвичай не можливо усунути завдяки впливу на сенсор безпосередньо, проте розроблено та застосовуються методики, реалізація яких дозволяє здійснити компенсацію зазначеного дестабілізуючого фактору [11]. Високі значення однорідності термоелектродів можна досягти під час застосування платинових і мідних дротів високої чистоти. У інших матеріалів величина гомогенності є пропорційною від вкладу основного компоненти, проте в стандартних термоелектродах показник однорідності матеріалу в декілька разів менший від чистих металів [12]. Значення ймовірності виникнення похибки вимірювання термопарою в залежності від причин виникнення неоднорідності термоелектродів [12] наведено в табл. 2.1, де позначено: 1,00 – основна причина виникнення похибки; 0,75 – відносно більша причина виникнення похибки; 0,50 – помітне значення похибки; 0,25 – похибка може виникнути; 0 – похибка зі зазначеної причини практично не виникає.

З аналізу даних, які наведено в табл. 2.1 можна зробити висновок, що в кожній термопарі похибка, яка обумовлена нестабільністю вимірювальних значень термопари, виникає під час впливу сукупності дестабілізуючих факторів, один з яких зазвичай грає основну роль.

3. Схильність металів, що застосовуються під час виготовлення термопар,

до сублімації. Під час виникнення зазначеного ефекту продукти сублімації першого електродів осаджуються на другому електроді та формується на нього вплив легування. У процесі сублімації поглинається теплота (див. табл. 2.2), що призводить до появи ефекту відведення тепла.

Таблиця 2.1 – Причини виникнення похибки під час вимірювання температури термопарами

Причина виникнення похибки результату вимірювання	Тип термопари			
	A (XK)	K (XA)	B (BP)	A1 (BP)
Селективне окислення	1,00	1,00	0,75	0
Хімічні перетворення термоелектродів	0,75	0,75	0	0
Структурні зміни	0,75	0,75	0,50	1,00
Забруднення неорганічними або органічними домішками, які виникають на поверхні	0,50	0,50	0,50	0,50
Ефекти наклепу та залишкової напруги	0,50	0,50	0,50	0,50
Реакція з матеріалом чохла	0,25	0,25	0,25	0,75
Реакція з керамікою ізоляції	0,25	0,25	1,00	0,75
Взаємодія термоелектродів	0,25	0,25	0,75	0,50

Таблиця 2.2 – Питома теплота сублімації металів, що застосовуються під час виготовлення термопар

№	Метал	Теплота сублімації, кДж/моль
1	Алюміній	230,3
2	Мідь	340,0
3	Залізо	393,6
4	Платина	531,7
5	Молібден	669,9
6	Вольфрам	879,3

4. Одним з основних зовнішніх дестабілізуючих факторів, зміна якого впливає на величину похибку вимірювання температури під час застосування сенсорів на базі термопар, є тепловий контакт сенсора з поверхнею вимірювального середовища [13]. Зміна зазначеного дестабілізуючого фактору має місце на всіх поверхнях вимірювального середовища та не залежить від виду технологічного обладнання [13]. Базові варіанти, які застосовуються під час вимірювань температури на поверхні наведено на рис. 2.3, де позначено: а – спай, що ізольований емаллю термоелектродів, припаяний до поверхні об'єкту вимірювання; б – що ізольований емаллю термоелектродів, припаяний до поверхні контактної пластини; в – спай, що ізольовано намістом електродів, здійснено його зачekanення до отвору пластини, який до поверхні приварений; г – поверхнева термопара, яку закріплено під час застосування приварених затискачів; д – застосування поверхневого термоелектричного перетворювача, який виготовлено промисловим шляхом.

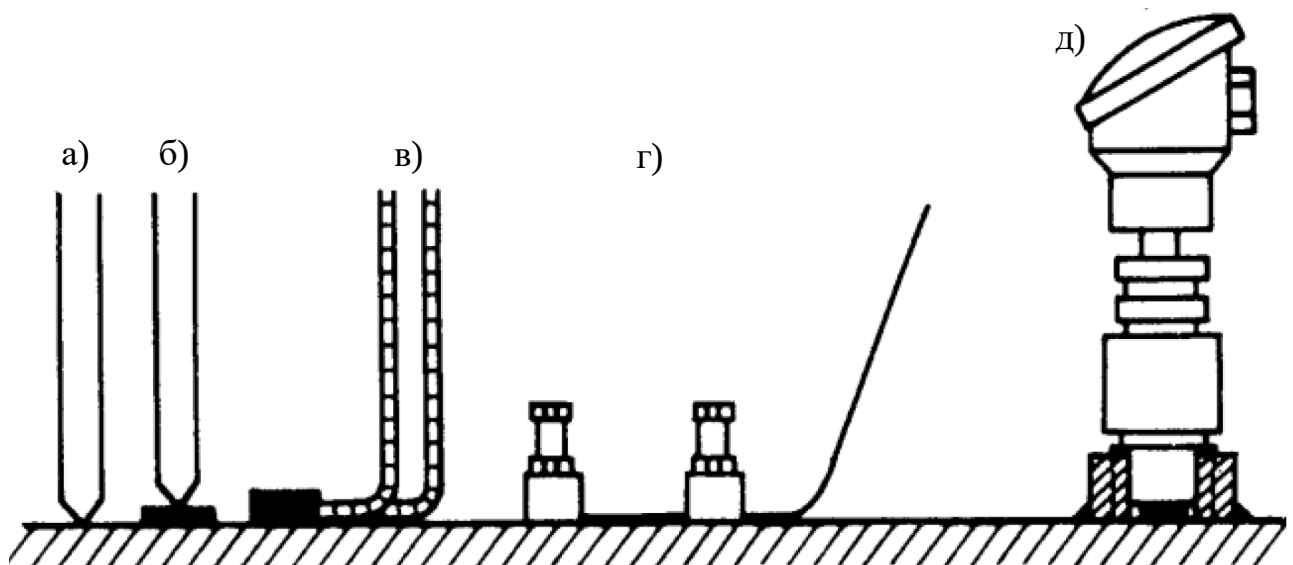


Рисунок 2.3 – Застосування різних типів кріплення перетворювачів температури на технологічному устаткуванні

Наявність неповного контакту може призвести до встановлення термоелектричного перетворювача до захисної гільзи, що наведено на рис. 2.4, де позначено: 1 – спай термопар; 2 – термоелектроди; 3 – кераміка, що

виконує ізоляційну функцію; 4 – порошок з окислу алюмінію; 5 – захисний чохол, що виготовлено з металу; 6 – матеріал, яким заповнено гільзу; 7 – гільза захисту.

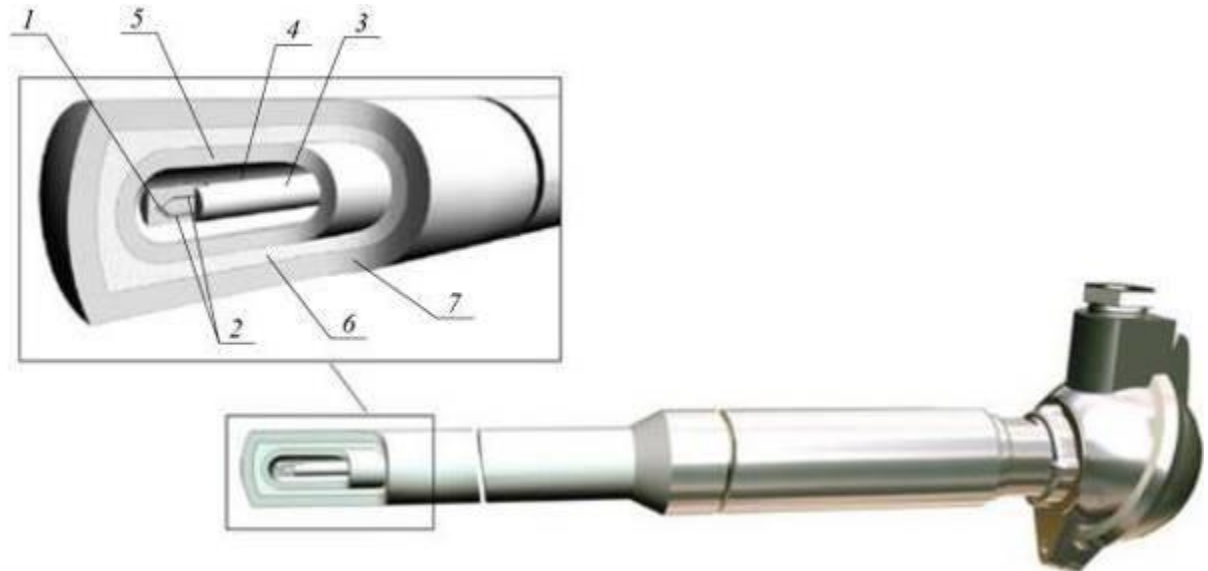


Рисунок 2.4 – Спосіб кріплення термопар до гільзи, що виконує функцію захисту

Типові приклади застосування сенсорів температури для умовах Карахівської теплоелектростанції наведено на рис. 2.5.

Вплив неповного контакту немає змоги компенсувати після здійснення результатів вимірювань. Отже, необхідно мінімізувати його вплив під час здійснення вимірювання. Вплив наявності неповного контакту буде мінімальним під час дії термодинамічної рівноваги між термопарою та об'єктом вимірювання. Отже, для мінімізації впливу цієї похибки необхідно збільшити тривалість вимірювання.

5. Ще одним фактором, наявність якого впливає на точність результату вимірювання під час застосування різних конструкцій сенсора та різних умов проведення вимірювання, є відведення тепла від спаю термопар. Відведення теплоти може бути завдяки електродам. Це може мати ефект, якщо довжина електродів буде більше ніж діаметр спаю (чутливого елемента).

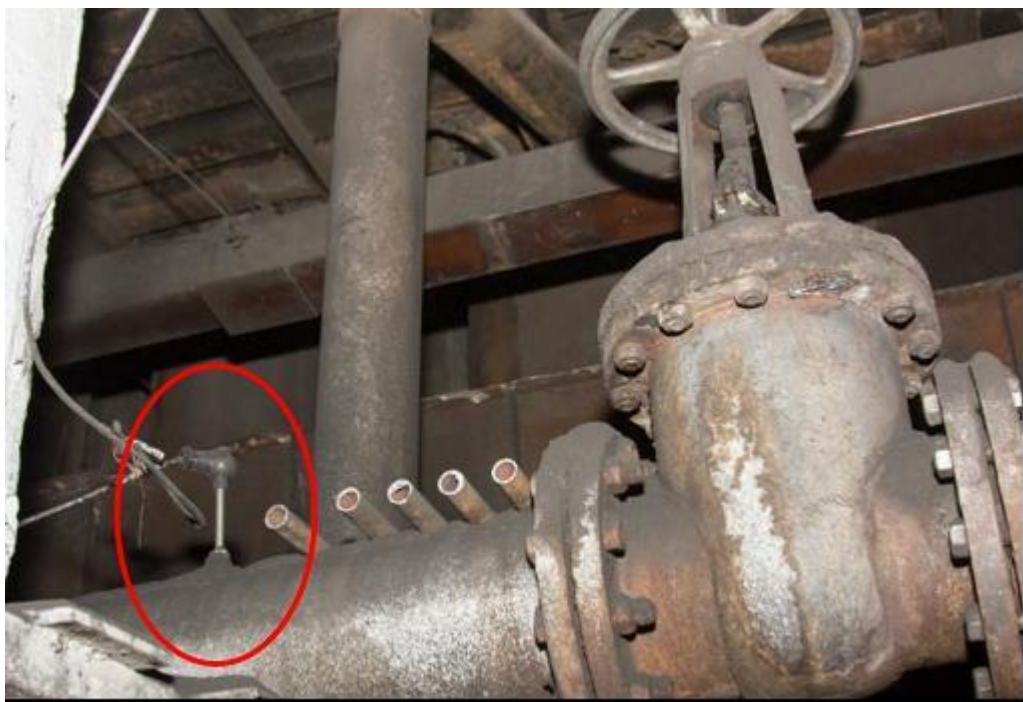


Рисунок 2.5 – Фотографії встановлених сенсорів температури на Курахівській теплоелектростанції

Гradient температури швидко зменшується, а температура спаю термоперетворювача дорівнює температурі, що вимірюється, за корпусом термopари, за захисною гільзою та матеріалом, яким заповнено гільзу захисту. Приділяти увагу слід похибці під час інтенсивного відведення теплоти від спаю термоперетворювача. Це має місце, коли довжина електродів термopари не зрівнює значення температури спаю та температури, що вимірюється, зі застосуванням гільз захисту.

2.2 Аналіз місць здійснення вимірювального контролю температури на робочому устаткуванні теплоелектростанції

Для здійснення мінімізації похибок результатів вимірювання температури термopарами необхідно здійснювати облік конструкції сенсора, який застосовується, умови здійснення вимірювань, а саме умови монтажу, абсолютну величину температури та ін. фактори [14 – 16]. У кваліфікаційній роботі здійснено дослідження похибок термоелектронних перетворювачів під час застосування їх на теплоелектростанціях.

Функціонування теплоелектростанцій у складі систем теплопостачання у багатьох країнах і, зокрема, в Україні, є базовим компонентом забезпечення виробництв і соціальної сфери. Одна з головних умов забезпечення надійної та безпечної роботи теплоелектростанцій, а також системи теплопостачання, є безперебійне функціонування автоматизованих систем керування технологічними процесами, а також блокування та захисту на об'єктах електроенергетики.

Під час аналізу нормативних документів виявлено параметри, що зазвичай застосовуються системах автоматизованого керування: температура (більш ніж 40 %), витрати, тиск, механічні величини. Перелік місць здійснення вимірювального контролю температури на робочому устаткуванні теплоелектростанції наведено [17] наведено у табл. 2.3 – 2.7.

Таблиця 2.3 – Перелік місць здійснення вимірювального контролю температури на газотурбінному обладнанні теплоелектростанцій

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
1	Газотурбінний двигун конверсійний багатовальний	
1.1	Температура рідкого палива на вході до двигуна	від 310 до 340
1.2	Температура паливного газу на вході двигуна	від 290 до 420
1.3	Температура газів за вільною турбіною	від 570 до 720
1.4	Температура газів перед вільною турбіною	від 1400 до 1900
1.5	Температура мастила на виході з опори вільної турбіни	від 380 до 400
1.6	Температура мастила на вході до двигуна	від 280 до 330
1.7	Температура мастила в основному баку	менш 340
1.8	Температура повітря перед компресором	від 220 до 330
1.9	Температура бабіту підшипників двигуна	від 330 до 340
1.10	Температура води, що охолоджує, за охолоджувачем мастила двигуна	від 305 до 320
1.11	Температура повітря в відсіках двигуна	від 520 до 620
2	Газотурбінний двигун енергетичний одновальний	
2.1	Температура повітря перед компресором	від 220 до 330
2.2	Температура повітря після компресора	від 650 до 700
2.3	Температура бабіту підшипників, компресора турбіни, редуктора	від 330 до 340
2.4	Температура газів за турбіною	від 570 до 720
2.5	Температура повітря, що подається до вузлів охолодження проточної частини турбіни	від 370 до 720
2.6	Температура мастила на лінії злива з підшипників компресора, турбіни та редуктора	від 310 до 325
2.7	Температура мастила після охолоджувача	від 300 до 320

Продовження таблиці 2.3

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
2.9	Температура повітря під кожухом двигуна	від 350 до 400
2.8	Температура води, що охолоджує, охолоджувача мастила	від 305 до 310

Таблиця 2.4 – Перелік місць здійснення вимірювального контролю температур на парових котлах утилізаторах теплоелектростанцій

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
1	Температура води, що живить	від 500 до 550
2	Температура середовища після чистого та солоного відсіків	від 600 до 830
3	Температура середовища за економайзером	від 560 до 600
4	Температура пари в трубах барабана, що відводять та підводять	від 720 до 880
5	Температура метала барабана, вихідної камери пароперегрівача та паропроводів	від 740 до 840
6	Температура пари за пароперегрівачем	від 800 до 840
7	Температура метала на виході окремих змійовиків у зоні без обігріву пароперегрівача високого тиску	від 770 до 870
8	Температура свіжої пари за байпасом пароперегрівача після впорскування середовища, що охолоджує	від 800 до 840
9	Температура конденсату на виході газового підігрівача	від 420 до 450
10	Температура конденсату на вході газового підігрівача	від 350 до 400

Продовження таблиці 2.4

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
11	Температура димових газів на виході з котла	від 410 до 440
12	Температура димових газів на вході до котла	від 970 до 1320
13	Температура конденсату після введення байпаса газового підігрівача	від 430 до 470
14	Температура палива перед котлом	від 400 до 450
15	Температура димових газів за поверхнями нагрівача котла	від 1170 до 1570

Таблиця 2.5 – Перелік місць здійснення вимірювального контролю температури парового турбоустановок теплоелектростанцій

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
1	Температура бабіту опорних підшипників генератора	від 330 до 360
2	Температура бабіту опорних підшипників турбіни	від 330 до 360
3	Температура металу паропроводів свіжої пари	від 810 до 830
4	Температура бабіту упорного підшипника	від 330 до 360
5	Температура пари високого тиску	від 800 до 840
6	Температура пари в стопорних клапанах циліндру високого тиску	від 790 до 830
7	Поверхнева температура металу в стопорних клапанах циліндру високого тиску	від 680 до 840
8	Глибинна температура металу в стопорних клапанах циліндру високого тиску	від 680 до 840
9	Температура металу перепускної труби	від 680 до 840

Продовження таблиці 2.5

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
10	Поверхнева температура металу клапана регулювання	від 680 до 840
11	Температура пари в просторі між циліндрами високого тиску	від 550 до 800
12	Температура в ступені регулювання впуску пари циліндру високого тиску	від 750 до 830
13	Температура пари після зсуву потоків в циліндрах високого тиску	від 550 до 800
14	Глибинна температура металу зліва фланцю циліндру високого тиску	від 680 до 780
15	Глибинна температура металу справа фланцю циліндру високого тиску	від 680 до 830
16	Поверхнева температура металу зверху циліндру високого тиску в перетині впуску пари	від 680 до 780
17	Поверхнева температура металу зліва фланцю циліндру високого тиску	від 680 до 780
18	Поверхнева температура металу знизу циліндру високого тиску в перетині впуску пари	від 680 до 780
19	Поверхнева температура металу справа фланцю циліндру високого тиску	від 680 до 780
20	Температура пари сепаратора за циліндром високого тиску	від 530 до 600
21	Температура металу внутрішнього циліндра високого тиску	від 680 до 830
22	Температура пари на вихлопі циліндра високого тиску	від 540 до 750
23	Температура пари низького тиску	від 540 до 600

Продовження таблиці 2.5

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
24	Температура металу паропроводів пари низького тиску	від 690 до 790
25	Поверхнева температура металу стопорних кранів циліндру середнього тиску	від 530 до 740
26	Температура пара в стопорних кранах циліндра середнього тиску	від 570 до 670
27	Температура металу перепускної труби циліндра середнього тиску	від 500 до 710
28	Глибинна температура металу стопорних кранів циліндру середнього тиску	від 525 до 735
29	Поверхнева (знизу) температура металу циліндра середнього тиску в зоні впуску пари	від 500 до 710
30	Поверхнева (зверху) температура металу циліндра середнього тиску в зоні впуску пари	від 500 до 710
31	Температура пари на вихлопі циліндра низького тиску	від 320 до 340
32	Температура пара на вихлопі циліндра високого тиску	від 430 до 500
33	Температура пари в колекторі обігріву фланців і шпильок	від 330 до 380
34	Температура мастила на лінії зливання від підшипників турбіни	від 310 до 325
35	Температура мастила після охолоджувача мастила	від 300 до 320
36	Температура мастила на змазування	від 305 до 315
37	Температура мастила на лінії зліва від підшипників генератора	від 310 до 325

Продовження таблиці 2.5

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
38	Температура конденсату перед конденсатним електричним насосом	від 290 до 320
39	Температура пара на ущільнення в гарячому колекторі	від 440 до 470
40	Температура бабіту підшипників конденсатного електричного насосу	від 350 до 375
41	Температура конденсату після підігрівача низького тиску сепаратора пари	від 305 до 315
42	Температура мережевої води перед горизонтальним мережевим підігрівачем	від 330 до 350
43	Температура мережевої води за горизонтальним мережевим підігрівачем	від 370 до 423
44	Температура конденсату після конденсатора пари ущільненого	від 295 до 305
45	Температура конденсату на лінії звила від горизонтального мережевого підігрівача	від 330 до 360
46	Температура води охолодження після конденсатора	від 298 до 316
47	Температура води охолодження перед конденсатором	від 273 до 306
48	Температура води охолодження після охолоджувача мастила	від 315 до 330
49	Температура води охолодження перед охолоджувачем мастила	від 305 до 310
50	Температура бабіту підшипників зливного насоса горизонтального мережевого підігрівача	від 350 до 375

Таблиця 2.6 – Перелік місць здійснення вимірювального контролю температури загальних блоків теплоелектростанції

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
1	Температура пари високого тиску перед головною засувкою пари	від 800 до 840
2	Температура пара низького тиску головною засувкою пари	від 750 до 790
3	Температура пара за швидкодіючою редуційною охолоджувальною установкою	від 480 до 650
4	Температура в колекторі, що всмоктує, для живлення електричного насоса	від 420 до 450
5	Температура в блочному колекторі власних потреб	від 350 до 400
6	Температура мастила на змазування живлення електричного насоса високого тиску	від 300 до 320
7	Температура пара за редуційною охолоджувальною установкою для власних потреб	від 550 до 580
8	Температура конденсату, що ущільнює, живлення електричного насоса високого тиску	від 420 до 450
9	Температура підшипників живлення електричного насоса високого тиску високого тиску	від 335 до 340
10	Температура підшипників живлення електричного насоса низького тиску	від 335 до 340

Таблиця 2.7 – Перелік місць здійснення вимірювального контролю температури в паливній частині теплоелектростанції

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
1	Рідке паливо	
1.1	Температура рідкого палива до підігрівача рідкого палива	від 340 до 400
1.2	Температура рідкого палива на виході з кожного резервуара складу рідкого палива	від 340 до 360
1.3	Температура рідкого палива на стороні нагнітача кожного насоса, що перекачує	від 350 до 410
1.4	Температура рідкого палива після підігрівача рідкого палива	від 350 до 410
1.5	Температура рідкого палива в кожному резервуарі складу на трьох рівнях	від 310 до 370
1.6	Температура рідкого палива в напірних проводах палива	від 350 до 410
1.7	Температура пара, що підігріває, та подається на паливне господарство	від 410 до 470
1.8	Температура рідкого палива в приймальній ємності на трьох рівнях	від 310 до 370
1.10	Температура палива в ємності присадки	від 350 до 410
1.1	Температура підшипників електричних двигунів насосів	від 340 до 360
2	Газоподібне паливо	
2.1	Температура газу	від 290 до 295
2.2	Температура підшипників мультиплікатора	від 340 до 360
2.3	Температура підшипників компресора	від 340 до 360
2.4	Температура повітря на вході до компресора	від 300 до 400

Продовження таблиці 2.7

№	Місце здійснення вимірювального контролю	Діапазон температур , що вимірюється, К
2.5	Температура мастила в колекторі змазки	від 310 до 325
2.6	Температура газу після холодильника	від 270 до 295
2.7	Температура повітря в блок-контейнере	від 230 до 330
2.8	Температура повітря в блок-контейнере компресорного агрегату	від 230 до 330
2.9	Температура на лінії відбирання затворного газу	від 270 до 300
2.10	Температура масла в баки з мастилом	від 310 до 325
2.11	Температура газу на стороні нагнітача компресора	від 270 до 295
2.12	Температура підшипників головного електричного двигуна	від 340 до 360

Вимірювальний контроль температури також виконується на обладнанні електростанції в системі підготовки води. Також обов'язковим є не тільки моніторинг (вимірювальний контроль) температури на теплоелектростанціях, а й регулювання температури технологічного обладнання та середовищ (див. рис. 2.6).

Під час здійснення аналіз розглянутої інформації можна зробити висновок, що процент здійснення вимірювального контролю температури в системах моніторингу та керування складає не менше 30 % від загального числа регульованих і вимірюваних параметрів. У окремих випадках зазначений показник може знаходитися в межах від 40 до 50 %. Число місць відбору інформації щодо зміни температури напряду залежить від достатньо великої кількості факторів, а також від конкретного типу теплоелектростанції, технологічній схемі, обладнання та палива та, що використовується застосовується [18]. Температура є базовим параметром, за зміною якого можна здійснювати моніторинг характеристик технологічних процесів. Також

температура є основним показником стану технологічного обладнання та базовою основою для забезпечення безпеки функціонування теплоелектростанції. Необхідність здійснення достовірного вимірювального контролю, а також з максимальною швидкістю й точністю регулювання, ставить вимоги до вибору, монтажу та експлуатації вимірювальних сенсорів температури.

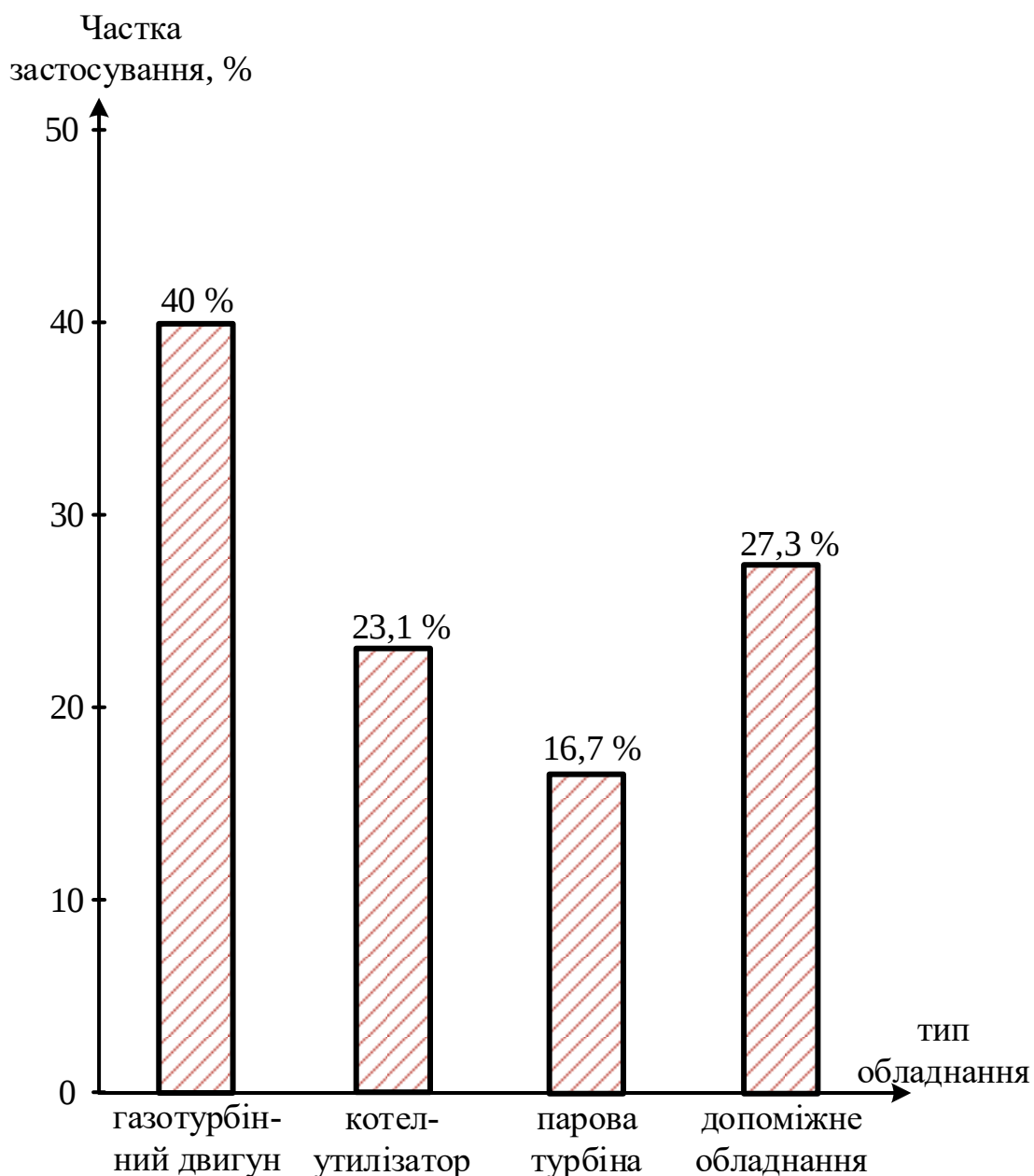


Рисунок 2.6 – Кількість автоматизованих систем регулювання, що застосовуються на теплоелектростанціях

З базових основ надійності автоматизованих систем керування технологічними процесами термопари є складовою частиною систем. Відмова цих пристроїв призведе до повної відмови або виникнення помилок або збільшення похибок автоматизованих систем [19]. Найбільш важливими та небезпечними є помилки термоперетворювачів, а також їх відмови в тих випадках, коли не здійснюється резервування сенсорів.

На базі аналізу статистичних даних [19] можна зробити висновок, що до 15% аварій на теплоелектростанціях має місце через виходу з ладу термоперетворювачів, у тому числі сенсорів температури. Також необхідно відмітити, що до 90 % відмов термоперетворювачів базуються на зміні структури, а також стану сенсора [12].

Вибір сенсора температури базується на таких факторах: дистанційна передачі вимірювальної інформації, величина похибки вимірювання, діапазон вимірювальних температур. Термоелектричні перетворювачі мають просту конструкцію, достатньо високі показники надійності, а також широкий діапазоні температур, що вимірюється. На базі аналізу наведених факторів необхідно виконати дослідження джерел похибок під час вимірювання температури термопарами та розробка способі мінімізації цих похибок.

До рішення завдання щодо вимірювання температури відносять як кількісну оцінку цього параметру, так і оцінку значення похибки, що виникає під час здійснення вимірювання. У відповідно зі загальноприйнятою класифікацією похибок вимірювання, вона є сумою систематичних та випадкових складових. Значення систематичної похибки вимірювання температури є незмінними або змінюються за певним законом під час виконання серії експериментів досліджень. Як причини виникнення цих похибок є недосконалість способу вимірювання, неправильний монтаж робочих засобів вимірювання, старіння або зношення сенсорів, а також вплив зміни дестабілізуючих факторів, що змінюються від конкретних умов експлуатації. Систематичні похибки відрізняються від випадкових тим, що джерела систематичних похибок є відомі, а вплив цих похибок можна усунути під час

здійснення вимірювання або на підготовчому етапі. Явища з'явлення випадкових похибок є практично невідомі, а вплив цих похибок можна мінімізуються. Так, наявність промахів різко спотворює результати досліджень, що необхідно виключити з результату вимірювання. Випадкові похибки мінімізуються під час багаторазових вимірювань або під час застосування інших методів. Під час вимірювання температури у виробничих умовах здійснюються багаторазові вимірювання та подальша обробка зазвичай є неможливими. Отже, зменшення похибки вимірювання температури необхідно завдяки зменшенню систематичної складової похибки результату вимірювання. Для впливу на систематичну похибку необхідно вивчити природу появи цих похибок й оцінити вплив основних дестабілізуючих факторів.

Розробкою методів оцінки та мінімізації величини похибки вимірювання температури за допомогою термоперетворювачів присвячено доволі велика кількість робіт. Так, у роботі [20] розглядається питання перенесення тепла від об'єкту вимірювання до спаю термопар. Область розв'язання цієї задачі має в своєму складі поверхню об'єкта вимірювання, спай термопар, повітряний зазор та термоелектроди. У цій роботі запропоновано використання двовимірної моделі перенесення тепла від об'єкта вимірювання до спаю термопар, яку описано таким диференціальним рівнянням:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2.1)$$

$$t > 0; \quad 0 < x < L; \quad 0 < y < d,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

ρ – щільність;

L, d – межі області розв'язання задачі.

Незважаючи на доволі велику кількість наукових робіт у цій галузі, до теперішнього часу не виконано дослідження всі джерела похибок під час вимірювання температури. Не розроблений математичний апарат, який має можливість здійснювати прогнозування похибок вимірювань з використанням термоелектричних перетворювачів з обліком конструктивних особливостей сенсора, матеріалів і базових елементів, а також умов експлуатації в базових блоках і пристроях теплоелектростанцій.

Усі наукові роботи, які спрямовано на покращення показників точності вимірювання температури термопар через специфіку цих сенсорів умовно поділяються на дві базові групи. Перша група робіт передбачає рівність вимірюваної температури та температури спаю термоперетворювача. Похибка результату вимірювання визначається, як відхиленням значення вихідного значення термо-е.р.с. під час дії заданої температури, це значення визначається за статичною характеристикою термопари. Фактори, що викликають цю похибку вимірювання, зазвичай базуються на внутрішній недосконалості сенсора. Як дестабілізуючі фактори, які негативно впливають розглядаються: неоднорідність матеріалів електродів термоперетворювача, старіння вимірювального перетворювача, що обумовлено зміною хімічного складу матеріалів електродів, вплив зовнішніх електромагнітних полів. До другої групи робіт, яка передбачає справність вимірювального перетворювача температури, тобто відсутність сторонніх струмів у колі термопари, нормальний стан електродів та спаю термоперетворювача та інших факторів, що спотворюють значення вихідної термо-е.р.с. У цій групі здійснюється дослідження причини, коли значення вимірюваної температури відповідає температурі спаю термопари. Доволі велика кількість, а також різноманіття проведених досліджень обумовлено такими причинами:

- 1) розповсюдженість застосування термоелектричних перетворювачів у таких галузях промисловості, як машинобудування, авіабудування, атомна енергетика, виробництво твердого палива та ін.;

- 2) різні умов та конфігурації сенсорів температури;

3) можливість здійснення корекції умов вимірювання для компенсації похибок результату вимірювання.

Остання причина є особливо важливою з обліком того, що вимірювання температури здійснюється не тільки в системах моніторингу та керування, а ще в системах блокування та захисту технологічного устаткування, що є одним з головних показників безпеки під час експлуатації енергетичних установок.

У блоках технічного водопостачання потрібно здійснювати вимірювальний контроль температури води, що охолоджує, в зимовий період, для уникнути зледеніння зрошувачів градирень. Абсолютне значення температури води, що охолоджує, суттєво впливає на техніко-економічні показники функціонування турбоагрегатів теплоелектростанції. Збільшення величини температури призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії, та збільшення температури води, що охолоджує. Це потребує проведення технологічних робіт для з'ясування причин недостатнього охолодження та усунення цих наслідків.

У системах керування, блокування та захисту водонагрівальних та парових котлів теплоелектростанції необхідно здійснювати вимірювальний контроль температури режиму роботи барабана котла під час дії перехідних режимів роботи агрегатів під час розпалювання та (або) його зупинка. Це необхідно для уникнення пошкодження матеріалу, з якого виготовлено барабана. Для забезпечення нормативного стану матеріалів, з якого виготовлено перегрівач, необхідно здійснювати точний вимірювальний контроль та забезпечення підтримку температури пари для кожної ступені пароперегрівача. Також, під час перевищення значення температури води на виході з котла або температури поверхонь, що нагріваються, необхідно здійснювати зупинку котла. До складу систем керування, блокування та захисту паротурбінних установок теплоелектростанції входять системи вимірювального контролю температури: для уникнення загоряння мастила застосовується система підтримки температури в блоках, що здійснюють постачання мастила, для здійснення ефективного охолодження конденсату використовується

контроль температури напорів у конденсаторі, для забезпечення якості регенеративного підігрівання води перед її подачею до котла необхідно забезпечити визначення нормативних значень температури основного конденсату та води регенеративного перегріву. Збільшення величини похибки вимірювання температури або відмова сенсорів температури у зазначених системах можуть призвести до суттєвих наслідків.

2.3 Висновки

1. Виконано аналіз основних причин виникнення похибок під час вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. До таких факторів відносяться неоднорідність матеріалів вимірювальних термоелектродів, схильність металу термоперетворювача до сублімації та наявності сторонніх струмів у колі вимірювального перетворювача. Зазначені фактори є внутрішніми, зміну яких не можна оцінити та компенсувати під час вимірювання. Ефект теплового контакту, а також похибку, яку обумовлено виникненням ефекту відведення тепла від спаю термоперетворювача можна компенсувати під час проведення вимірювання.

2. Похибки сенсорів температури, які застосовуються в системах керування, блокування та захисту є базовими причинами, внаслідок яких виникають до 15 % усіх позаштатних ситуацій та аварій на теплоелектростанціях. Це може призвести до істотних наслідків, які можуть бути причинами відсутності сигналів керування щодо зупинку блоків і вузлів теплоелектростанції під час виникнення аварійних ситуацій.

3. Для формування потрібних корекцій під час вимірювання необхідно здійснити попередню оцінку зміни зазначеного фактор, який потрібно компенсувати. Здійснити цю оцінку необхідно за допомогою методів математичного моделювання, які описують процеси перенесення тепла в первинному чутливому термоперетворювачі.

4. Виконано аналіз науково-практичних робіт, які базуються на визначенні похибки вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів. У цих роботах виконується аналіз впливу різних джерел похибки, у тому числі недосконалість сенсора та теплового контакту сенсора з вимірювальним середовищем. Розроблені раніше методики не дозволяють здійснити оцінку впливу конструктивних параметрів і характеристик термоелектричних перетворювачів на зміну зовнішніх умов.

5. Застосування термоелектричних перетворювачів у системах моніторингу та керування температурою для умов теплоелектростанцій пов'язано з суттєвим навантаженнями на первинний вимірювальний перетворювач. Це потребує застосування захисного чохла, а також захисних гільз під час експлуатації сенсорів датчиків. Отже, застосування математичних моделей, які описують тільки характеристики спаю термопари та електродів є ускладнено. Тому існує необхідність розробки більш повних математичних моделей перенесення тепла для термоелектричних перетворювачів з гільзами захисту, які застосовуються в блоках та пристроях теплоелектростанцій.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Залежно від технологічного об'єкта, де здійснюється тепловий контроль, або середовища, де виконується вимірювальний контроль температури, застосовуються термоелектричні перетворювачі двох типів [21]: ті, що занурюються, та поверхневі. Зазначені термоелектричні перетворювачі отримали широке використання на теплоелектростанціях, блоки та агрегати яких мають велику кількість систем моніторингу, керування, захисту та блокування. Сенсори температури, що занурюються, застосовуються на теплоелектростанціях для вимірювального контролю температури технологічного середовища всередині трубопроводів та обладнання. До цих параметрів відносять зміну температури повітря, димових газів парогенератора, пари на виході котлів, конденсату від конденсаторів турбоустановок та ін. Поверхневі сенсори температури застосовуються для здійснення вимірювального контролю поверхні обладнання: турбін, колекторів парогенератора, металевих поверхонь стопорних клапанів у циліндрах високого тиску. Під час вимірювального контролю температури поверхні та зі зануренням виникають деякі особливості, що необхідно виконувати облік під час планування та виконання вимірювань, що дозволить здійснити мінімізацію похибки результату вимірювання.

3.1 Модель вимірювача температури металів устаткування теплоелектростанції з малим повітряним зазором

Аналіз видів термопар, що випускаються промисловістю, дозволив виявити ряд найрозповсюджених конструкцій, які використовуються для

здійснення вимірювального контролю температури технологічних середовищ, а також поверхонь апаратів і блоків теплоелектростанцій. Здійснення вимірювального контролю температури на поверхні застосовується в умовах теплоелектростанцій під час вимірювання абсолютного значення температури парових турбін, бабїтів підшипників газотурбінних установок, опорних підшипників генераторів, підшипників електронасосів та ін. Діапазон зміни температури в цих пристроях змінюється в діапазоні від 290 до 340 К. Встановлення вимірювальних термоперетворювачів температури здійснюється зі застосуванням спеціальних затискачів, що призводить виникнення неідеального контакту між поверхнею сенсора та металу. Для здійснення моніторингу температури в зазначеному діапазоні застосовуються термopари з одним чутливим елементом [22] та не ізольованим спаєм, схему якої наведено на рис. 3.1, де позначено: 1 – спай термopари; 2 – термічні електроди; 3 – порошок на основі оксиду алюмінію; 4 – захисний чохол металевий.

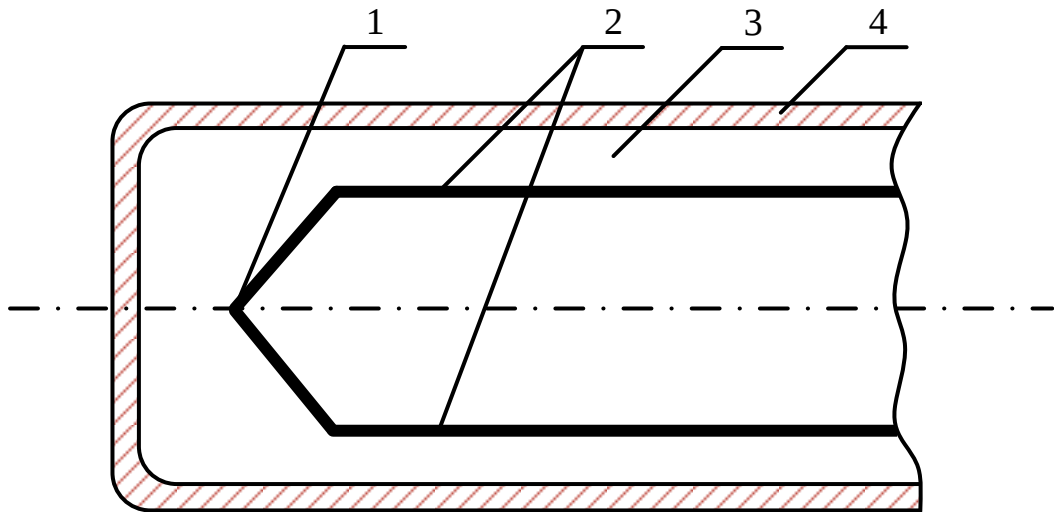


Рисунок 3.1 – Схема чутливого вимірювального елемента термоелектричного перетворювача

Під час здійснення вимірювального контролю температури поверхні обладнання теплоелектростанції термopари можна розташовувати на поверхні зі закріпленням завдяки приклеюванню, припаюванню або встановлення зі

застосуванням спеціальних затискачів. Під час цього з'являється зазор між поверхнею термопари та матеріалом. Схему розташування термопари в нагрівачі, якщо має місце повітряний зазор, наведено на рис. 3.2.

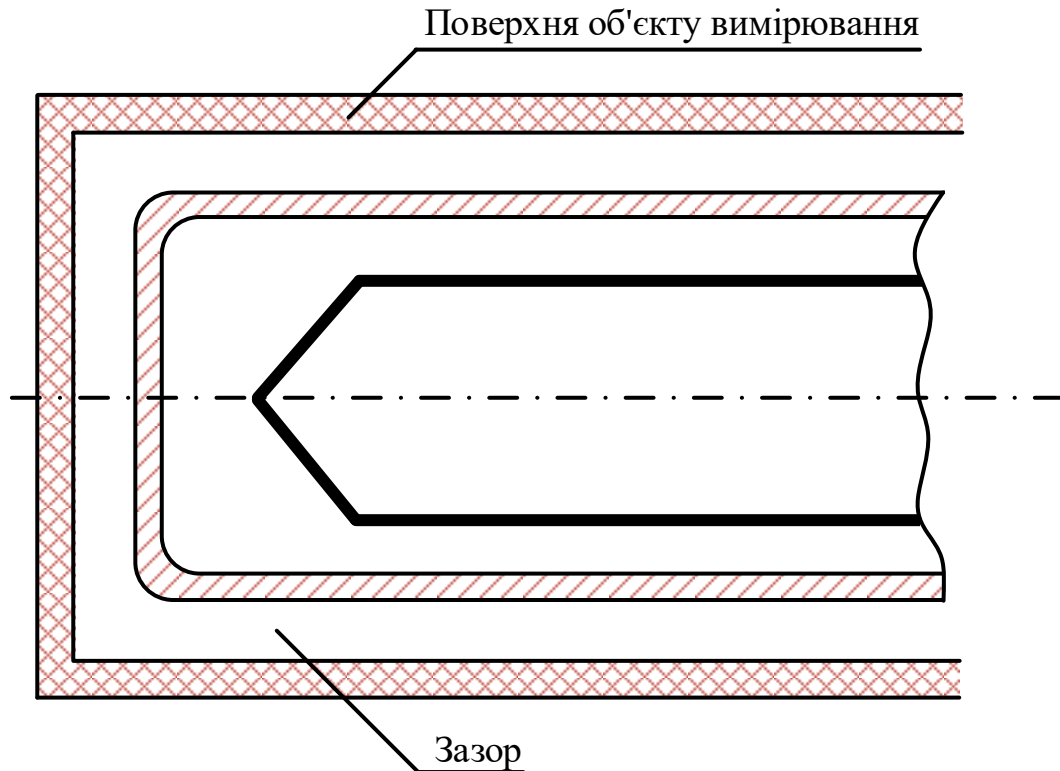


Рисунок 3.2 – Схема розташування термопари в нагрівачі, якщо має місце повітряний зазор

Зміна вихідного сигналу термопари характеризує значення вимірювальної температури, де основний вплив має зміна температури спаю цього термоперетворювача, тому необхідно подати як перше наближення область розв'язання задачі перенесення тепла, як наведено на рис. 3.3, де позначено: 1 – місце спаю термоперетворювача; 2 – порошок на основі оксиду алюмінію; 3 – чохол захисту; 4 – повітряний зазор. До складу чутливого елемента термопари входить спай термоперетворювача 1, чохол металевий для захисту 3, а також порошок на основі оксиду алюмінію, яким заповнено вільний простір термопари. Процес нагрівання термопари здійснюється від її нагрівальної поверхні, а саме від чутливого елемента термоперетворювача.

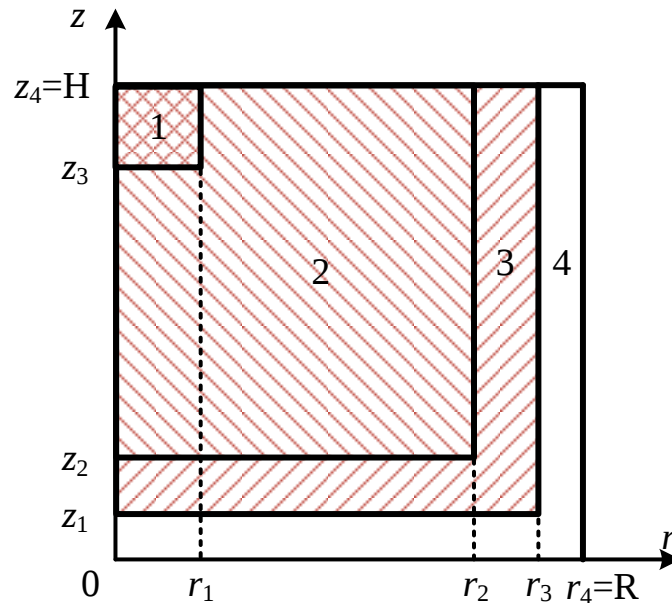


Рисунок 3.3 – Область визначення задачі перенесення тепла

Початкове значення температура чутливого елемента термопарі відповідає нормальним умовам 20°C (293 K). Необхідний час здійснення вимірювання визначається через значення температури, коли вона буде дорівнювати значенню температури спаю термопарі та знаходиться в межах похибки, що допускається (див. табл. 3.1) [23].

Таблиця 3.1 – Межі допустимої похибки термопар

Тип термопар	Межі допустимого відхилення від номінальної характеристики перетворення, K
K (ХА) (1 кл. дод.)	$\pm 1,5$ у діапазоні температур від 233 до 648 K; $\pm 0,004 \cdot T - 273 $ у діапазоні температур від 648 до 1273 K
S (ПП) (2 кл. дод.)	$\pm 1,5$ у діапазоні температур від 273 до 873 K
L (ХК) (2 кл. дод.)	$\pm 2,5$ у діапазоні температур від 233 до 573 K; $\pm 0,0075 \cdot T - 273 $ у діапазоні температур від 573 до 1073 K
K (ХА) (2 кл. дод.)	$\pm 2,5$ у діапазоні температур від 233 до 606 K;
E (ХКн) (2 кл. дод.)	$\pm 0,0075 \cdot T - 273 $ у діапазоні температур від 606 до 1473 K

Чутливий елемент термопарі має форму циліндра, тому математичне моделювання здійснено в циліндричній системі координат. Рішення задачі виконано за симетричною схемою. Для області визначення задачі перенесення тепла (див. рис. 3.3) математична модель складається з таких диференціальних рівняння:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right), \quad (3.1)$$

$$t > 0; \quad 0 < r < r_1; \quad z_3 < z < H;$$

$$c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad (3.2)$$

$$t > 0; \quad 0 < r < r_2; \quad z_2 < z < z_3;$$

$$t > 0; \quad r_1 < r < r_2; \quad z_3 < z < H;$$

$$c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right), \quad (3.3)$$

$$t > 0; \quad 0 < r < r_3; \quad z_1 < z < z_2;$$

$$t > 0; \quad r_2 < r < r_3; \quad z_2 < z < H;$$

$$c_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right), \quad (3.4)$$

$$t > 0; \quad 0 < r < L; \quad 0 < z < z_1;$$

$$t > 0; \quad r_3 < r < r_4; \quad z_1 < z < H,$$

де z – осьова координата, м;

r – радіальна координата, м;

ρ – щільність, кг/м³;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

1 – спай термопари;

2 – порошок на основі оксиду алюмінію;

3 – чохол захисту;

4 – повітря.

Початкові умови визначаються розподілом температури за чутливим елементом термопари, що має місце в початковий момент часу:

$$t = 0; \quad T = T_0; \quad 0 < z < H,$$

$$t = 0; \quad T = T_0; \quad 0 < r < R;$$

де $T_0 = 293 \text{ К}$ – значення температури, що відповідає нормальним умовам.

Умови на межах розділу середовищ:

– між спаєм термопари та порошком на основі оксиду алюмінію ($r = r_3$, $z = z_1$);

– між порошком на основі оксиду алюмінію та чохлом захисту ($r = r_2$, $z = z_2$);

– між чохлом захисту та повітряним зазором ($r = r_3$, $z = z_1$), $r = R$, $r = 0$, $z = 0$, $z = H$ наведено в табл. 3.2.

Під час здійснення математичного моделювання в області задач, що наведено на рис. 3.3, використовуються такі допущення, що не мають істотних обмежень під час спільної постановки задач:

1. Термопара має правильну форму циліндра.

2. Термопара є справною, тобто відсутні внутрішні дестабілізуючі

фактори, зміна яких викликає істотні похибки результату вимірювання.

3. Теплофізичні характеристики та параметри матеріалів чутливого елемента термопары та повітря залежить від зміни температури.

Таблиця 3.2 – Граничні умови для системи диференціальних рівнянь (3.1) – (3.4)

Крайові умови	Межа області рішення	Крайові умови	Межа області рішення
$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big _{r=r_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_1} ;$ $T_1(r_1, z) = T_2(r_1, z)$	$z_3 < z < H$	$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big _{z=z_3} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{z=z_3} ;$ $T_1(r, z_3) = T_2(r, z_3)$	$0 < r < r_1$
$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big _{r=r_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_2} ;$ $T_2(r_2, z) = T_3(r_3, z)$	$z_2 < z < H$	$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big _{z=z_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{z=z_2} ;$ $T_2(r, z_2) = T_3(r, z_2)$	$0 < r < r_2$
$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big _{r=r_3} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{r=r_3} ;$ $T_3(r_3, z) = T_4(r_3, z)$	$z_1 < z < H$	$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big _{z=z_1} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big _{z=z_1} ;$ $T_3(r, z_1) = T_4(r, z_1)$	$0 < r < r_3$
$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$z = H$	$T = T_r$	$r = R$
$T = T_r$	$z = 0$	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$	$r = 0$

Теплофізичні характеристики та параметри матеріалів, що застосовуються під час розв'язання задачі перенесення теплоти наведено в табл. 3.3 [12].

Таблиця 3.3 – Теплофізичні та параметри матеріалів, що застосовуються під час розв’язання задачі перенесення теплоти

№	Найменування елемента	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність c , Дж/(кг·К)	Щільність ρ , кг/м ³
1	Спай термопар типу L (ХК)	24,75	713	8920
1	Спай термопар типу К (ХА)	33,1	768	8825
1	Спай термопар типу S (ПП)	50,4	139	20710
1	Спай термопар типу Е (ХКн)	22,5	435	8815
2	Порошок на основі оксиду алюмінію	16,57	1031	2765
3	Чохол захисний сталь 12Х18Н10Т	15	462	7900
4	Повітря	0,026	1190	1,161

Діаметр чутливого елемента типової термопар складає 5 мм [22]. Висоту чутливого елемента термопар обмежено від нижньої межі до 5 мм. Товщина повітряного зазору між поверхнею технологічного обладнання теплоелектростанції та чутливим елементом може змінюватися під час проведення математичного моделювання в діапазоні від 1 мм до 20 мм.

3.2 Методи розв'язання рівнянь математичної моделі вимірювача температури

Розв'язання системи нестационарних диференціальних рівнянь з крайовими умовами здійснено методом кінцевих різниць [24]. Наведені диференціальні рівняння розв'язано локальним одномірним методом [24]. Розв'язання нелінійних рівнянь здійснено методом простих ітерацій [24]. Різницеві одновимірні рівняння розв'язано методом прогонки на базі неявної різницевої схеми на основі чотирьох точок.

Диференціальні оператори замінено в цих рівняннях кінцево-різницевиими аналогами виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau}, \quad (3.5)$$

де τ – шаг за часом.

Отже, диференціальні рівняння за координатою r перетворено до різницевої форми наступного вигляду [24]:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \frac{\lambda}{r_i \cdot h^2} \cdot \left(r_{i+\frac{1}{2}} \cdot T_{i+1}^{n+1} - \left(r_{i-\frac{1}{2}} + r_{i+\frac{1}{2}} \right) \cdot T_i^{n+1} + r_{i-\frac{1}{2}} \cdot T_{i-1}^{n+1} \right), \quad (3.6)$$

де n – кількість кроків за часовою сіткою;

i – кількість кроків, що необхідно за просторовою координатною сіткою.

Диференціальне рівняння за координатою z приймає такий вигляд:

$$c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), \quad (3.7)$$

Одержану систему рівнянь зведено до трьох діагонального вигляду та розв'язано за допомогою методу прогонки:

$$A \cdot T_{i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_i^{n+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (3.8)$$

$$\text{де } A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2};$$

$$B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau};$$

$$F_i = -\frac{\rho \cdot c}{\tau} \cdot T_i^n.$$

Для підвищення точності розрахунків число просторових вузлів для розв'язання наведених завдань вибрано не менше 200 за кожною з координатною сіткою.

3.3 Алгоритм знаходження рішення математичної моделі вимірювача температури

Алгоритми розв'язана завдань визначається для перенесення тепла на базі математичної моделі термопари, яка має неізолюваний спай та повітряний зазор. Усі розглянуті математичні моделі є двовимірними завданнями теплопровідності, тому перехід до різницевих рівнянь здійснюється я локальним одномірним методом. Область розв'язання розбивається на базі просторової сітки, яку наведено на рис. 3.4, а.

У відповідності з локальною одномірною схемою крок за часом визначається послідовно в два етапи. На кожному з проміжних етапів здійснюється дискретизація рівнянь (3.1) – (3.4) у двох вимірах за напрямом осі r . Отже, здійснюється перехід до рівнянь з одним виміром у радіальних

координатах (див. рис. 3.4, б). Далі виконується дискретизація рівнянь (3.1) – (3.4) за напрямом координати z (див. рис.3.4).

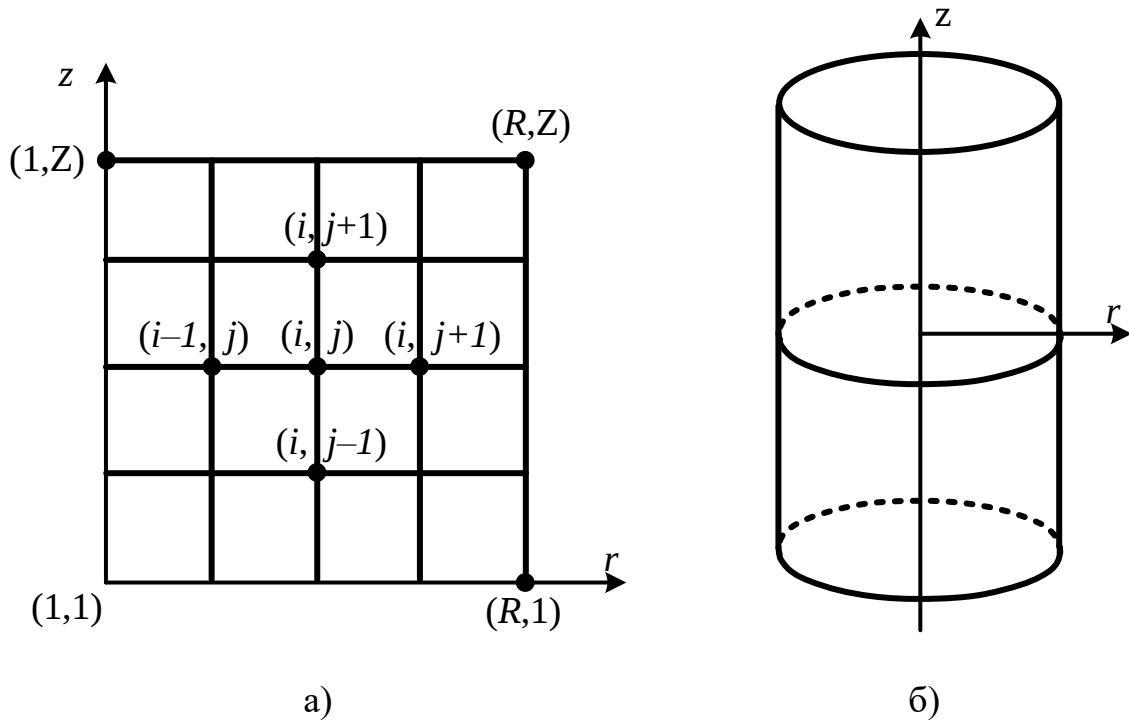


Рисунок 3.4 – Різницева сітка для області розв'язання задачі перенесення теплоти (а) та геометричне представлення задачі за радіальною координатою (б)

Початкові значення коефіцієнти прогонки визначаються від лівої граничної умови до умови симетрії:

$$\alpha_1 = 1; \quad \beta_1 = 0.$$

Значення коефіцієнтів прогонки в кожній з областей визначається на базі характеристик матеріалів, що наведено в табл. 3.3.

На межі r_1 для визначення значень коефіцієнтів прогонки застосовуються граничні умови (див. табл. 3.2):

$$\alpha_i^* = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot \lambda_2}{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot (\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{i-1})) + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}; \quad (3.9)$$

$$\beta_i^* = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot \lambda_1 \cdot \beta_{i-1} + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1) \cdot T_i^n}{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \tau \cdot (\lambda_2 + \lambda_1 \cdot (1 - \alpha_{i-1})) + h^2 \cdot (\lambda_1 \cdot a_2 + \lambda_2 \cdot a_1)}, \quad (3.10)$$

де a_1 та a_2 – коефіцієнти провідності за температурою 1 та 2 матеріалів.

На межах r_2 та r_3 для визначення значень коефіцієнтів прогонки застосовано аналогічні співвідношення.

Значення температури на нижній та правій межах області розв'язання рівнянь визначалось зі застосуванням таких граничних умов:

– під час дії заданого значення температури на межі:

$$T(r = R) = T(z = 0) = T_r;$$

– під час дії відомого значення теплового потоку на межі:

$$-\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial z} = -\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial r} = q;$$

– під час дії заданого значення теплообміну між металевим чохлом і середовищем:

$$-\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial z} = \kappa \cdot (T^e - T).$$

Блок-схема алгоритму розв'язання задачі визначення теплопровідності наведено на рис. 3.5.

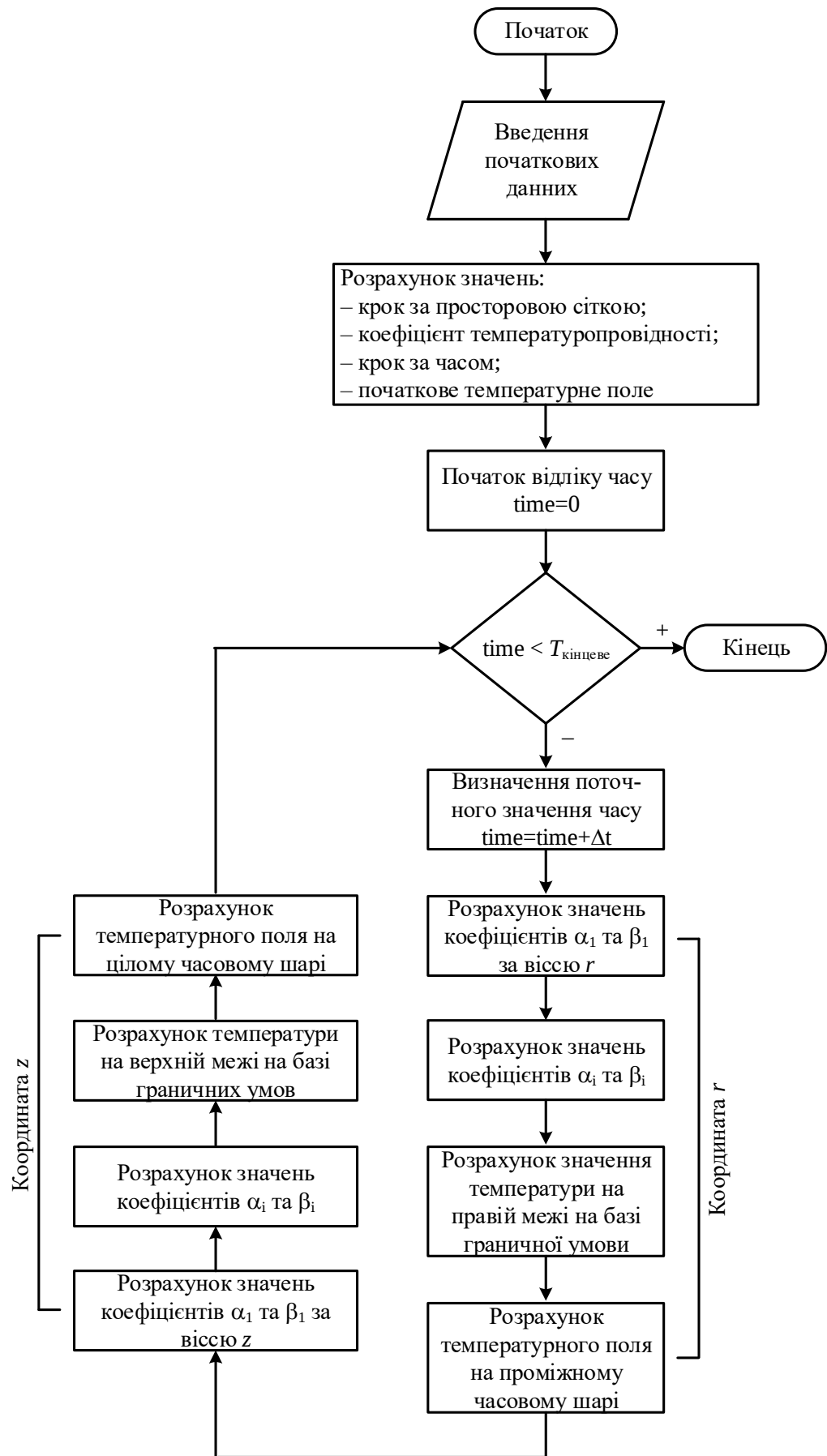


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму розв'язання задачі визначення теплопровідності

Розв'язання рівнянь здійснювалось послідовно за двома напрямками системи координат, до того моменту коли поточне значення часу не стає більше, ніж максимальна величини регламентованої тривалості роботи термопар. Як критерій закінчення розрахунку використано досягнення максимальної тривалості роботи термопар, а саме температури спаю термоперетворювача. Розрахунок виконано з обліком допустимого значення регламентованого відхилення, величина якого складає 1 %.

3.4 Визначення достовірності результатів досліджень

Для визначення адекватності розроблених математичних моделей нестационарного перенесення теплоти, а також одержаних теоретичних результатів на кожній ітерації за часом здійснено перевірку консервативності зазначених різницевих схем. Розроблено алгоритм перевірки консервативності різницевої схеми, що застосовується, для розв'язання задачі теплопровідності, який виконує оцінку точності закону збереження енергії.

Значення похибки за балансом енергії (%) визначається на основі співвідношення (див. рис. 3.6):

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{сер}} - Q_{\text{пов}} - Q_{\text{зч}} - Q_{\text{пор}} - Q_{\text{сп}}}{Q_{\text{сер}}} \cdot 100 \%, \quad (3.11)$$

де $Q_{\text{сер}}$ – кількість теплоти, що підводиться до чутливого елемента від середовища, вимірювання температури якого здійснюється;

$Q_{\text{пов}}$, $Q_{\text{зч}}$, $Q_{\text{пор}}$, $Q_{\text{сп}}$ – кількість теплоти, що поглинається повітрям, чохлом захисту, порошку на базі оксиду алюмінію, спаю термопар.

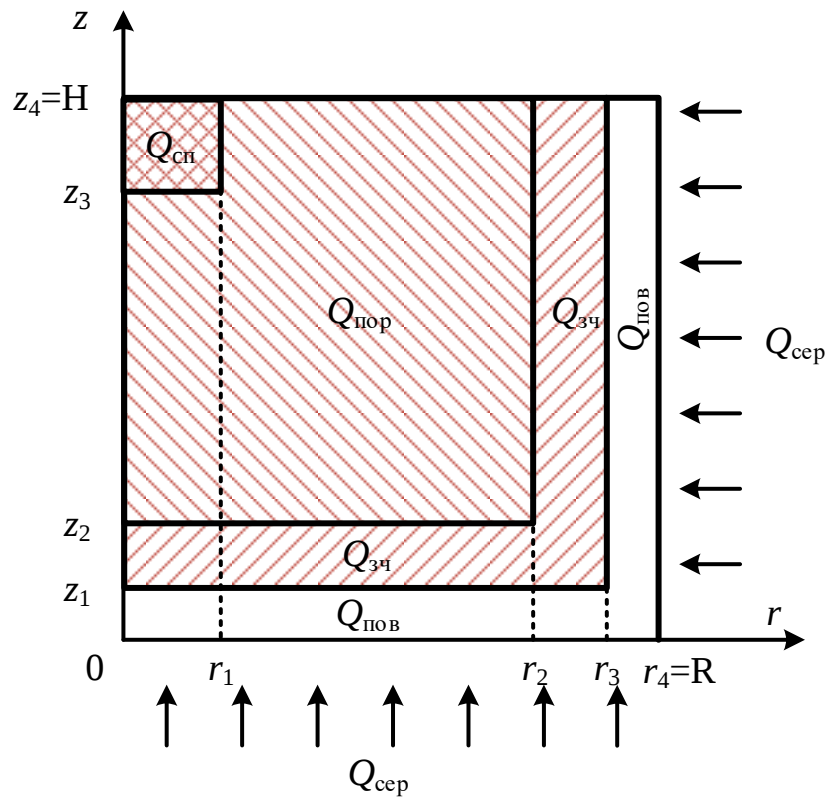


Рисунок 3.6 – Область розрахунку величини похибки на основі балансу енергії

Кількість теплоти, що підведено до чутливого елементу термопарі під часу нагрівання $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{\text{сер}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_R} \Delta t \cdot \lambda_4 \cdot h_r \cdot (T(i, 0) - T_4) + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_H} \Delta t \cdot \lambda_4 \cdot h_z \cdot (T(R, j) - T_4), \quad (3.12)$$

де h_z – крок сітки за вертикальною координатою;

h_r – крок сітки за радіальною координатою;

Кількість теплоти, що поглинається повітрям за проміжок часу $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{\text{пов}} = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{z_1} C_4 \cdot h_z \cdot h_r^2 \cdot \rho_4 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)) + \sum_{i=r_3+1}^R \sum_{j=z_1+1}^{N_H} C_4 \cdot h_z \cdot h_r^2 \cdot \rho_4 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)). \quad (3.13)$$

Кількість теплоти, що поглинається чохлом захисту за проміжок часу $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{\text{зч}} = \sum_{i=1}^{r_3} \sum_{j=1}^{z_2} C_3 \cdot h_z \cdot h_r^2 \cdot \rho_3 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)) + \\ + \sum_{i=r_2+1}^{r_3} \sum_{j=z_2+1}^{N_H} C_3 \cdot h_z \cdot h_r^2 \cdot \rho_3 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)). \quad (3.14)$$

Кількість теплоти, що поглинається порошком на основі оксиду алюмінію за проміжок часу $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^{r_2} \sum_{j=1}^{z_3} C_2 \cdot h_r^2 \cdot h_z \cdot \rho_2 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)) + \\ + \sum_{i=r_1+1}^{r_2} \sum_{j=z_3+1}^{N_H} C_2 \cdot h_r^2 \cdot h_z \cdot \rho_2 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)). \quad (3.15)$$

Кількість теплоти, що накопичується спаєм термопар за проміжок часу $K \cdot \Delta t$:

$$Q_{\text{сп}} = \sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=z_3}^{N_H} C_1 \cdot h_r^2 \cdot h_z \cdot \rho_1 (T(i, j, k) - T(i, j, k-1)), \quad (3.16)$$

де $T(i, j, k-1)$ – температура за $(k-1)$ -м часовим інтервалом;

$T(i, j, k)$ – температура за k -м часовим інтервалом;

i та j – номери вузла координатної сітки за осями r та z ;

N_R та N_H – кількість вузлів координатної сітки за осями r та z ;

K – кількість кроків за часом;

Δt – крок за часом.

За результатами здійснених розрахунків визначено, що значення похибки за балансом енергії істотно зменшується під час зменшення кроку за часом. Для

одержання потрібної точності розрахунків необхідно, щоб крок за часом $\Delta t = 0,001$ с під час тривалості вимірювань не більше 1000 с.

3.5 Висновки

1. Розроблено модель перенесення тепла в чутливому елементі термопари для типового варіанту застосування термоелектричних перетворювачів у вузлах та блоках теплоелектростанції.

2. Розроблено алгоритм рішення системи диференціальних рівнянь, які мають початкові та граничні умови.

3. Розроблено алгоритм для визначення достовірності отриманих результатів досліджень. На кожному кроці алгоритму необхідно здійснювати перевірку умови виконання закону збереження енергії.

4. Виконано визначення достовірності результатів математичного моделювання. Під час аналізу отриманих результатів визначено достовірність результатів розрахунку та надійності запропонованих алгоритмів та методів.

5. Розроблена математичні модель дозволяє виконувати дослідження зміни впливу основних дестабілізуючих факторів на результат вимірювання температури термопарами, які застосовуються в складі систем моніторингу та керування технологічними процесами на теплоелектростанції.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТЕМПЕРАТУРИ В УСТАТКУВАННІ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

4.1 Дослідження тривалості роботи перетворювача від значення вимірювальної температури

Для оцінки адекватності результатів математичного моделювання в лабораторних умовах Курахівської теплоелектростанції виконані експериментальні дослідження. Визначення часу роботи термopар здійснювалось на стенді, схему якого наведено на рис. 4.1, де позначено: 1 – термopар; 2 – калібратор температури; 3 – багатофункціональний калібратор; 4 – секундомір.



Рисунок 4.1 – Стенд для експериментального дослідження термopар

Калібратор 2 виконано у викладі моноблок, до складу якого входить термостат і прецизійний вимірювач температури, який має функцію регулятора. Термостат виготовлено з бронзи та має циліндричну форму, він закритий знизу та зверху охоронними дисками. Ці диски виконують функцію теплових екранів. Для зменшення величини градієнтів температури охоронні диски та термостат загорнуто до матеріалу, який має теплоізоляційні властивості. Діапазон зміни величини основної абсолютної похибки встановлення та відтворення значення температури калібратором визначається за співвідношенням [25]:

$$\pm\Delta = \left(0,05 + 0,06 \cdot \frac{T - 273}{100} \right), \quad (4.1)$$

де T – температура, що відтворюється, К.

Калібратор 3, який наведено на рис. 4.1, застосовується для вимірювання та відтворення сигналів напруги за постійним струмом, а також електричних сигналів від термопари. Калібратор використовується як еталон для вимірювання під час калібрування, перевірки та налаштуванні інформаційно-вимірювальних пристроїв. Діапазон зміни основної похибки вимірювання калібратора під час визначення вихідного сигналу від термопари типу L (ХК) у діапазоні від 273 до 1063 К складає 0,3 К [26].

Визначення під час експериментальних досліджень часу потрібно для досягнення спаєм термопари температури, величина якої є необхідною для одержання задовільної похибки, що здійснюється в межах від 400 до 800 К. Для зменшення величини випадкової складової похибки здійснюється серії, які мають 10 експериментальних точок, що виконано в однакових умовах експерименту. Результати експериментальних й теоретичних досліджень термопари типу L (ХК) наведено на рис. 4.2, де позначено: 1 – теоретична залежність, що отримано під час математичного моделювання, ● – експериментальні дослідження часу тривалості роботи термопари типу L (ХК).

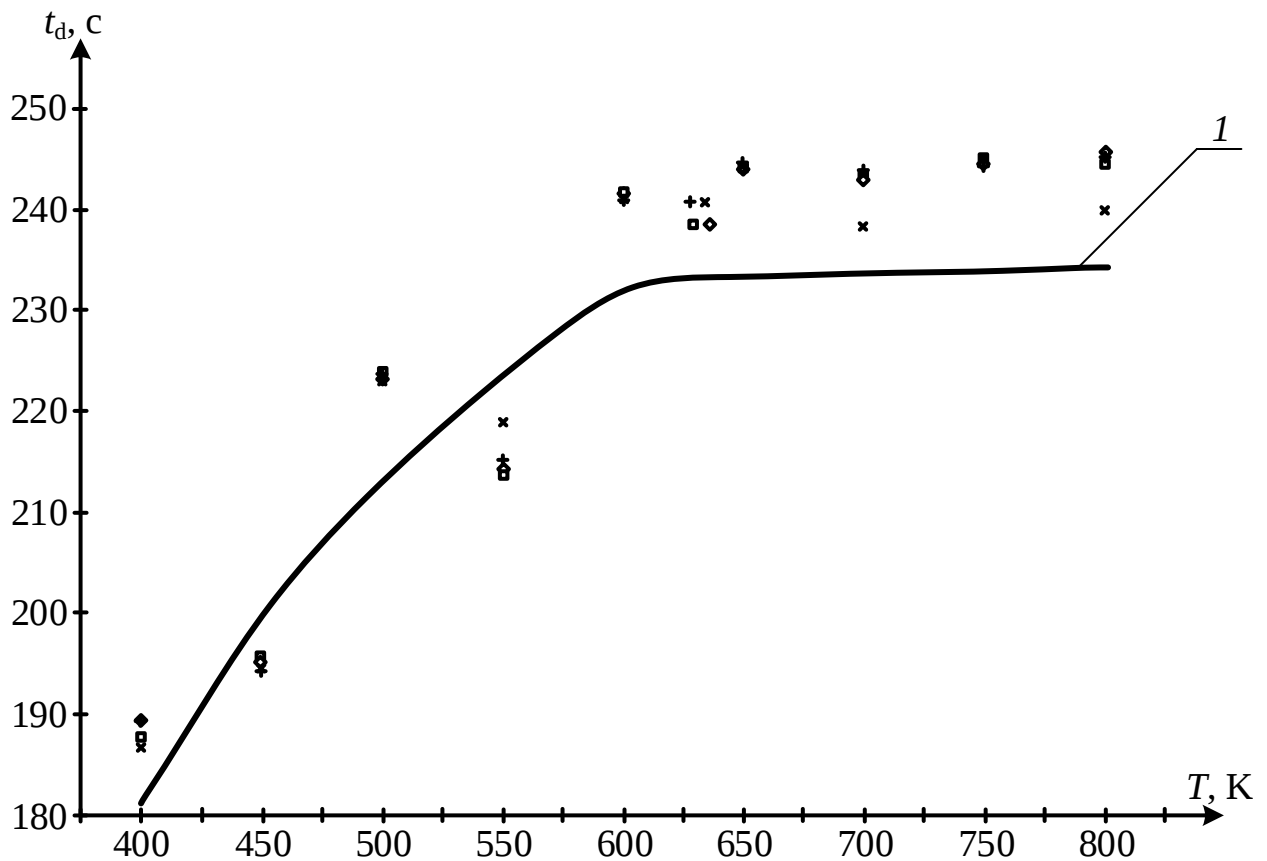


Рисунок 4.2 – Залежність зміни тривалості роботи термопар типу L (ХК) від величини температури, що вимірюється

Під час аналізу результатів досліджень встановлено, що величина відносного відхилення теоретичних t_d від експериментальних значень не більше 5% у повному діапазоні зміни температури, що вимірюється.

Верифікація відповідності розробленої математичної моделі експериментальним даним здійснено зі застосуванням критерію Фішера [27]. Під час застосування критерію Фішера розраховано експериментальне значення K_{FE} , а теоретичне значення (K_{FT}) визначено з довірчою ймовірністю $P_d = 0,95$. Експериментальне значення критерію Фішера визначається за такою формулою:

$$K_{\text{FE}} = \frac{D_a}{D_{\text{cp}}}, \quad (4.2)$$

де D_{cp} – середнє значення дисперсії експерименту;

D_a – значення дисперсії адекватності.

Величина дисперсії адекватності або залишкова дисперсія визначається за такою формулою:

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{iT} - \bar{Y}_{iE})^2}{n - d}, \quad (4.3)$$

де Y_{iT} – теоретичне значення Y_i , яке отримано зі застосуванням розробленої математичної моделі;

$\mathcal{G}_1 = n - d$ – число ступенів свободи;

$n = 6$ – кількість дослідів;

$d = 4$ – число коефіцієнтів у математичній моделі;

$\bar{Y}_{iE}$ – середнє значення в серії з $m=2$ вимірювань, що може бути визначено за такою формулою:

$$\bar{Y}_{iE} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m Y_{ij}. \quad (4.4)$$

Значення середньої дисперсії розраховується за формулою:

$$D_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (Y_{ij} - \bar{Y}_{iE})^2}{(m - 1) \cdot n}. \quad (4.5)$$

Результати розрахунку величини дослідного критерію Фішера з обліком результатів експериментальних досліджень (див. рис. 4.2) зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Перевірка адекватності математичної моделі перенесення теплоти в чутливому елементі термопар

Температура, що вимірювалась, К	Мінімальне значення тривалості роботи сенсора, с		$(Y_{ij} - \bar{Y}_{iE})^2$
	Y_{ij}	$\bar{Y}_{iE}$	
800	234,3	244,3	99,1
750	233,9	243,0	81,8
700	233,7	242,6	80,0
650	233,4	242,2	78,7
600	232,0	239,8	61,7
550	223,5	216,0	55,9
500	213,1	222,0	79,1
450	199,7	195,5	18,1
400	181,3	188,6	53,0
Значення дисперсії адекватності, D_a			303,690
Значення середньої дисперсії, D_{cp}			121,476
Величина дослідного критерію Фішера, K_{FE}			2,5

За таблицею критеріїв Фішера [27] під час дії рівня значимості 5 % та числа ступенів свободи меншій та більшій табличному значенню критерія Фішера: $K_{FT} = 5,14$. Отримано значення $2,5 < 5,14$, отже. $K_{FE} < K_{FT}$, то розроблена математична модель є адекватною під час дії рівня значимості 0,05 з довірчою ймовірністю 95 %.

На базі аналізу отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі.

4.2 Використання результатів роботи в системах теплового захисту теплоелектростанцій

Практичне застосування результатів теоретичних і експериментальних досліджень може підвищити якість та надійність функціонування технологічного обладнання теплоелектростанцій, а також здійснити оптимізацію показників роботи блоків і вузлів теплоелектростанції.

Автоматизовані системи керування характеристиками та параметрами технологічного процесу мають важливу для забезпечення безпечного функціонування та високої надійності обладнання теплоелектростанцій. Безпечне функціонування має важливу роль тому, що виникнення аварійних ситуацій на теплоелектростанціях може призвести як до пошкодження технологічного обладнання, так і до травмування персоналу, а також до істотних матеріальних втрат, які пов'язано з призупиненням тепло- та електропостачання житлових районів, державних установ, й навіть міст і селищ.

Для здійснення вимірювального контролю важливих параметрів технологічних процесів: частота обертання турбіни, температура пари, рівень у барабані котла, застосовуються системи автоматичного блокування та захисту, що є актуальною задачею підвищення надійності роботи турбін, парових котлів, а також допоміжного обладнання теплоелектростанції.

Під час реалізації систем блокування та захисту вводяться різні логічні схеми роботи:

1. Застосування двох сенсорів з однаковими рівнями уставками («АБО»). Контакти цих сенсорів підключаються паралельно, що відповідає схемі «один з двох» чи функції «АБО». Ця схема застосовується у тих випадках, коли теплове устаткування теплоелектростанції потребує підвищення надійності систем, а малоімовірними є помилкові спрацьовування систем захисту.

2. Застосування двох сенсорів з однаковими уставками («І»). Контакти цих сенсорів підключаються за схемою «два з двох» чи функцією «І».

Використання цієї схема дозволяє зменшити ймовірності виникнення помилки в системі захисту.

3. Застосування двох сенсорів з різними уставками («І»). Цю схему використовують під час реалізації двох ступінчастої системи захисту: контактний пристрій другого сенсора настраюється на спрацювання під час досягнення зміни параметрів першої уставки. Захист на зупинку устаткування спрацює тільки під час при замикання двох контактів.

Розглянемо систему захисту парового котла за змінами сигналів температури.

Залежно від типу пошкодження система автоматичного блокування та захисту викликає:

- а) зниження навантаження на 40%;
- б) зупинку котла;
- в) здійснення локальних операцій, які наведено на див. рис. 4.3.

Після спрацювання захисту виключається можливість скасування його персоналом, дія захисних заходів повинна закінчитися після здійснення всіх заходів.

Значне зниження значення температури пари під час функціонування сенсорів за логікою «І» є небезпечним для роботи турбіни. Під час цього є ймовірність потрапляння частинок води до паропроводів, а також до проточної частини турбіни, що може призвести до таких наслідків:

- процес випаровування води збільшить тиск в турбіні, що призведе до збільшення навантаження на підшипник та спричинить його руйнування;
- потрапляння води до лопаток турбіни призведе до пошкодження її, а також її зриву.

Також, наявність води в турбіну може призвести до виникнення осьового зусилля [28].

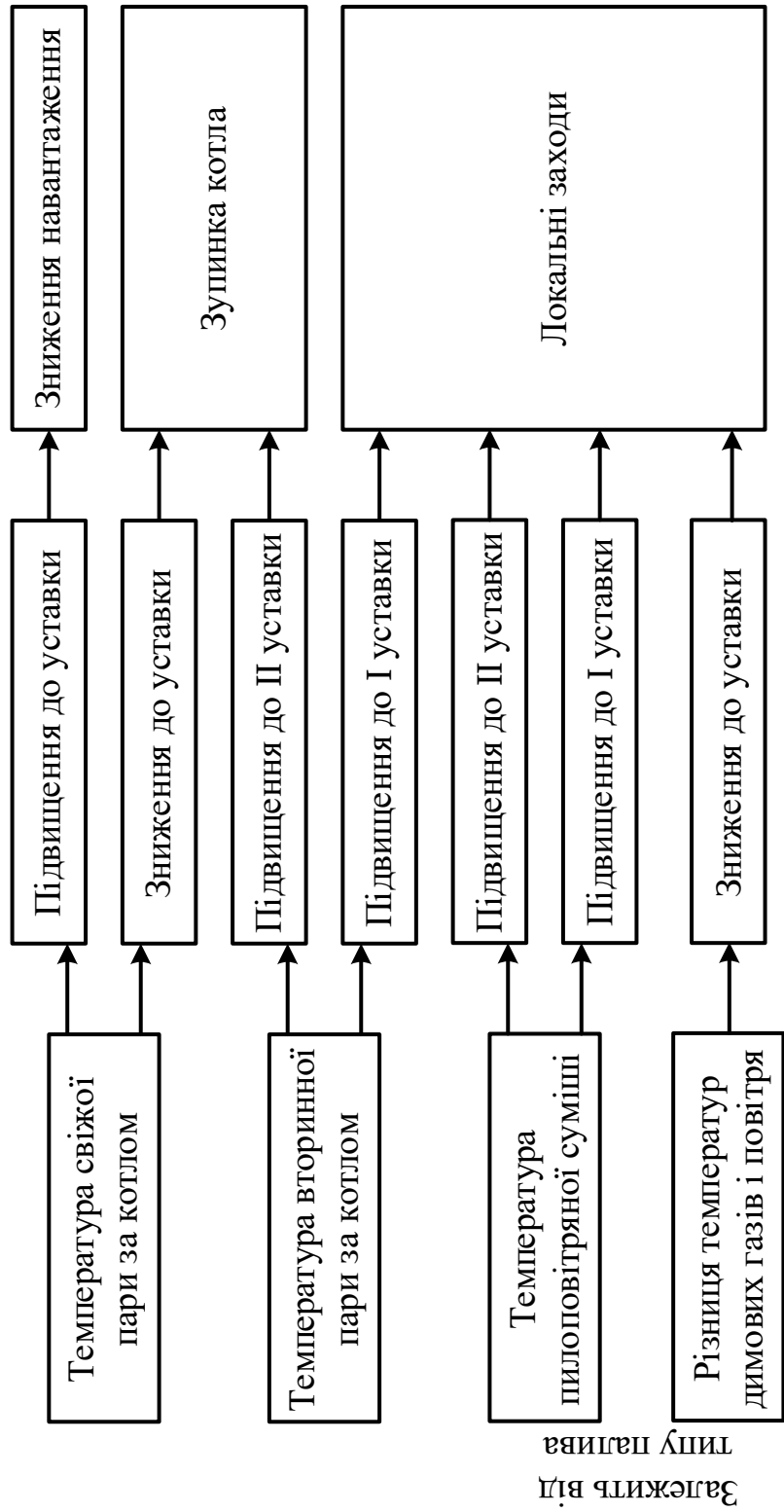


Рисунок 4.3 – Заходи в системах захисту парових котлів під час зміни температури

Отже, необхідно передбачити захист, який дозволить здійснити зупинку парогенератор під час зменшення температури пари до регламентованої межі. Під час функціонування парогенератора в моноблоці з турбіною захисті заходи щодо зниження температури пари застосовуються в турбіні, це має місце в газових та пиловугільних блоках. Захист повинен спрацювати миттєво без затримки за часом тому, що спрацювання здійснюється під час дії температури, величина якої менше ніж номінальне значення. Захист повинен спрацювати під час відключення парогенератора від турбіни. Пара, що виробляється, повинна скидатися до конденсатор турбіни.

Під час зупинки газового котла системою захисту одночасно здійснюються наступні операції, причому вони не залежать від типу палива, що застосовується:

- здійснюється закриття засувки на провід мазуту від і до котла, накладається подальша заборона для відкриття;
- вимикається вплив регулятора на блоки, що спрямовують дії димососів і вентиляторів;
- перекриття вентилів мазутних форсунок, а також заборона на відкриття;
- перекриття газового клапана, який є швидкодіючим відсічним;
- перекриваються відсічні клапани на проводах, що підводять мазут як до, так і від котлів, накладається подальша заборона для відкриття;
- перекриття загальної засувки;
- перекриття засувки на заведення газу до котла;
- перекриття засувки на підведення газу до пальників котла;
- відкриття в імпульсному режимі продування нагрівачів пари;
- відкриття в імпульсному режимі вентиля, який відповідає за охолодження води пароперегрівача й аварійного зливання;
- заборона на перекриття клапана, який знаходиться на вторинному повітрі до пальників.

Під час спрацювання захисту для зупинки котла, що має місце під час роботи на кам'яному вугіллі, додатково здійснюється автоматичне відключення

вентилятори через проміжок часу в діапазоні від 2 до 3 хвилини після його зупинки. Якщо здійснюється робота теплоелектростанції на газі, то вентилятор не відключають.

Після зупинки котла здійснюється включення автоматичної вентиляції топки, що має місце протягом від 10 до 15 хвилин. Коли включається система вентиляції топки, то має місце заборона на відкриття:

- запірних органів, що на підводять до та від котла мазут;
- запірних органів, що підводять газ до котла;
- запірних органів, що підводять газ до запальників.

Підвищення величини за допустимі межі температури пари на виході з генератора, де має місце схема включення сенсорів за логікою «І», є небезпечним для трубопроводів. Якщо система захисту не спрацює своєчасно, то це призведе до виникнення перепалу поверхонь на нагрівання. Суттєвий вплив зміни температури на металеві поверхні змінює структуру металу та знижує його механічні властивості. Цей ефект призводить до виникнення поривів, а під час утворення досить великих розмірі можливо в топці заливання факела. Під час цього мають місце захисти, що спрацьовують коли здійснюється підвищення до заданих уставок температура пари, що викликає переведення до зниженого навантаження парогенератор. Для уникнення зазначеного ефекту виконується зниження навантаження на парогенератора, що приводить до збереження його роботи. Для цього випадку здійснюється така послідовність дій:

1. Відключається вплив головного регулятора на паливний регулятор;
2. Підключається до паливного регулятора пристрій задавання, який розраховано на навантаження від 56 до 60 %;
3. Здійснюється значне зменшення навантаження парогенератора, що порушує стійкість горіння. Отже, зі зменшенням навантаження необхідно для газових і пиловугільних котлів включити мазутні форсунки [29].

Захист під час підвищення величини температури пари має доволі велике значення постійної часу, тому це є достатньої для виконання заходів щодо

зменшення величини температури [202].

Автоматизована система захисту за температурою вторинної пари є двоступінчастою. Під час підвищення значення температури вторинної пари до першої уставки здійснюється відкриття засувка на лінії вприскування. Підвищення значення температури вторинної пари на другій уставки може призвести до зупинки котла. Якщо застосовуються газові та мазутні парогенератори, то використовується ще один захист за температурою, це повинна виконувати локальна операція. У газових і мазутних парогенераторах під час функціонування в деяких режимах роботи на поверхнях підігрівача повітря накопичуються відкладення. Ці відкладення можуть спалахувати, а також вивести з ладу підігрівач повітря. Як інформаційний сигнал для роботи системи захисту застосовується сигнал щодо зменшення різниці температур димових газів до підігрівача повітря та після нього.

У генераторах, які працюють на вугільному пилу, застосовується захист від підвищення значення температури суміші повітря та пилу. Під час підвищення значення температури повітряної та пилової суміші до 343 К формується команда керування на відкриття клапана холодного повітря.

Визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів температури дозволить сформувати динамічні уставки. Для систем технологічного захисту на базі двох ступінчастих уставок здійснюється зміна від швидкості параметра. Для забезпечення високих показників надійної функціонування системи необхідно точно знати показники швидкодії термоелектричних перетворювачів, значення яких залежить від умов функціонування сенсорів. Розроблені математичні моделі дозволяють розрахувати точні значення показника швидкодії технічних засобів вимірювання температури. Якщо має місце менше значення швидкодії під час вимірювання параметра, то система захисту включається під час спрацьовування верхньої уставки. Під час збільшення швидкодії вимірювального параметра величину верхньої уставку може зменшити для своєчасного спрацьовування системи захисту.

4.3 Висновки

Проведені дослідження дозволили визначити залежності зміни показників надійності під час функціонування блоків теплоелектростанцій. Проведено математичне моделювання умов здійснення вимірювального контролю температури термопарами, що працюють у складі систем моніторингу, керування та захисту устаткування теплоелектростанцій.

Розроблена у кваліфікаційній роботі методика оцінки достовірності результатів вимірювального контролю на базі термопар дозволяє здійснювати прогнозування зміни характеристик і параметрів процесу вимірювання. Розроблену методику можна застосовувати для визначення характеристик і параметрів поверхневих термопар та тих, що занурюються.

Розроблена математична модель охоплює переважну більшість варіантів застосування сенсорів температури на теплоелектростанціях: для здійснення вимірювального контролю температури поверхонь технологічного обладнання, а також тих, що розташовано в трубопроводах зі застосуванням гільз захисту.

ВИСНОВКИ

Виконано якісний та кількісний аналіз факторів, зміна яких впливає на показники надійності та безпеку функціонування технологічного обладнання теплоелектростанції.

На базі аналізу нормативних документів встановлено функціональний взаємний зв'язок між парковим ресурсом технологічного обладнання та температурним режимом його експлуатації.

Виконано аналіз основних причин виникнення похибок під час вимірювання температури термоелектричними перетворювачами. До таких факторів відносяться неоднорідність матеріалів вимірювальних термоелектродів, схильність металу термоперетворювача до сублімації та наявності сторонніх струмів у колі вимірювального перетворювача. Зазначені фактори є внутрішніми, зміну яких не можна оцінити та компенсувати під час вимірювання. Ефект теплового контакту, а також похибку, яку обумовлено виникненням ефекту відведення тепла від спаю термоперетворювача можна компенсувати під час проведення вимірювання.

Похибки сенсорів температури, які застосовуються в системах керування, блокування та захисту є базовими причинами, внаслідок яких виникають до 15 % усіх позаштатних ситуацій та аварій на теплоелектростанціях. Це може призвести до істотних наслідків, які можуть бути причинами відсутності сигналів керування щодо зупинку блоків і вузлів теплоелектростанції під час виникнення аварійних ситуацій.

Для формування потрібних корекцій під час вимірювання необхідно здійснити попередню оцінку зміни зазначеного фактор, який потрібно компенсувати. Здійснити цю оцінку необхідно за допомогою методів математичного моделювання, які описують процеси перенесення тепла в первинному чутливому термоперетворювачі.

Виконано аналіз науково-практичних робіт, які базуються на визначенні

похибки вимірювання температури за допомогою термоелектричних перетворювачів. У цих роботах виконується аналіз впливу різних джерел похибки, у тому числі недосконалість сенсора та теплового контакту сенсора з вимірювальним середовищем. Розроблені раніше методики не дозволяють здійснити оцінку впливу конструктивних параметрів і характеристик термоелектричних перетворювачів на зміну зовнішніх умов.

Застосування термоелектричних перетворювачів у системах моніторингу та керування температурою для умов теплоелектростанцій пов'язано з суттєвим навантаженнями на первинний вимірювальний перетворювач. Це потребує застосування захисного чохла, а також захисних гільз під час експлуатації сенсорів датчиків. Отже, застосування математичних моделей, які описують тільки характеристики спаю термопар та електродів є ускладнено. Тому існує необхідність розробки більш повних математичних моделей перенесення тепла для термоелектричних перетворювачів з гільзами захисту, які застосовуються в блоках та пристроях теплоелектростанцій.

Проведені дослідження дозволили визначити залежності зміни показників надійності під час функціонування блоків теплоелектростанцій. Проведено математичне моделювання умов здійснення вимірювального контролю температури термопарами, що працюють у складі систем моніторингу, керування та захисту устаткування теплоелектростанцій.

Розроблена у кваліфікаційній роботі методика оцінки достовірності результатів вимірювального контролю на базі термопар дозволяє здійснювати прогнозування зміни характеристик і параметрів процесу вимірювання. Розроблену методику можна застосовувати для визначення характеристик і параметрів поверхневих термопар та тих, що занурюються.

Розроблена математична модель охоплює переважну більшість варіантів застосування сенсорів температури на теплоелектростанціях: для здійснення вимірювального контролю температури поверхонь технологічного обладнання, а також тих, що розташовано в трубопроводах зі застосуванням гільз захисту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гладышв, Г.П Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / Г.П Гладышв, Р.З. Аминов, В.З. Гуревич и др.; под. ред. А.И. Андриященко. – М.: Высш. шк., 1991. – 303 с.
2. Беляев, С.А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС / С.А. Беляев, В.В. Литвак, С.С. Солод. – Томск: Издательство НТЛ, 2008. – 218 с.
3. Brundage A.L. Thermocouple Response in Fires, Part 2: Validation of Virtual Thermocouple Model for Fire Codes / A.L. Brundage, A.B. Donaldson, W. Gill etc // Journal of Fire Sciences. – 2011. – № 29 (213). – P. 213 – 226.
4. ГОСТ 28269-89 Котлы паровые стационарные большой мощности. Общие технические требования. – М.: Стандартиформ, 2005. – 23 с.
5. РД 34.30.507-92. Методические указания по предотвращению коррозионных повреждений дисков и лопаточного аппарата паровых турбин в зоне фазового перехода. – М.: ВТИ, 1992. – 42 с.
6. РД 34.17.417. Положения об оценке ресурса, порядке контроля и замены гибов необогреваемых труб котлов с рабочим давлением 10 и 14 МПа (П 34-70-005-85). – М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.
7. Металловедение и термическая обработка стали: справ. изд. в 3 т., Т. 1. Методы испытаний и исследования / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
8. Москвичев, В.В. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, А.П. Черняев и др. – Новосибирск: Наука, 2002. – 334 с.
9. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения: справочное руководство / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – К.: Наукова думка, 1965. – 304 с.
10. Kollie, T. Large thermocouple thermometry errors caused by magnetic

fields / T. Kollie, R. Anderson, J.L. Horton // Review of Scientific Instruments. – 1977. – Vol. 48, № 5. – P. 501 – 511.

11. Су, Ц. Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры / Ц. Су, О.В. Кочан, В.С. Йоцов // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 52 – 55.

12. Рогельберг, И.Л. Сплавы для термопар: справочник / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.

13. Васильева Н.Л. Проблема теплового контакта в реакторной термометрии / Н.Л. Васильева, С.В. Приймак, А.Б. Кичигин и др. // Ядерные измерительно-информационные технологии, 2010. – № 4. – С. 26 – 37.

14. Боровкова, Т.В. Оценка точности измерения температуры термопарами при различных способах их размещения в объекте испытания / Т.В. Боровкова, В.А. Товстоног, В.Н. Елисеев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 7(19). – С. 19;

15. Eti, M.C. Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station / M.C. Eti, S.O.T. Ogaji, S.D. Probert // Applied Energy. – 2007. – V. 84, Is. 2. – P. 202 – 221.

16. Borovkova, T.V. Mathematical modeling of contact thermocouple / T.V. Borovkova, V.N. Yeliseev, I.I. Lopukhov // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». – 2008. – № 3, Т. 5. – С. 466 – 472.

17. Доброхотов, В.И. Эксплуатация энергетических блоков / В.И. Доброхотов, Г.В. Жгулев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

18. Sami, I.A. The influence of condenser cooling water temperature on the thermal efficiency of a nuclear power plant / I.A. Sami // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 80. – P. 371 – 378.

19. Кузнецов, П.А. Опасные отказы в АСУ ТП / П.А. Кузнецов // Научные исследования и разработки молодых ученых. – 2015. – № 4. – С. 97 – 100.

20. Kuznetsov, G.V. Numerical estimation of errors of temperature measurements by thermocouples using special glues and pastes / G.V. Kuznetsov,

К.М. Mukhammadeev // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – Vol. 19, № 1. – P. 17 – 22.

21. Крамарухин, Ю.Ф. Приборы для измерения температуры / Ю.Ф. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990. – 202 с.

22. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – изд. 3-е, стер. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – 458 с.

23. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические: общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 15 с.

24. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 227 с.

25. Atroshenko, Y.K. Numerical evaluation of the measurement error of temperature by surface thermocouples in the conditions of incomplete thermal contact with object of measurement / Y.K. Atroshenko, P.A. Strizhak // EPJ Web of Conferences. – 2014. – Vol. 76, 01034.

26. Многофункциональный калибратор «Метран-510-ПКМ». Инструкция по эксплуатации. – Челябинск: Метран, 2010. – 54 с.

27. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. Пособие / В.Е. Гмурман. – изд. 12-е, перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2011. – 479 с.

28. Плетнев, Г.П. Автоматические системы управления и защиты ТЭС / Г.П. Плетнев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.

29. Кузьменко, Д.Я. Регулирование и автоматизация паровых котлов / Д.Я. Кузьменко. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.

30. Жидецкий, В.Ц. Практикум із охорони праці / В.Ц. Жидецкий та ін. – Л.: Афіша, 2000 – 349 с.

ДОДАТОК А

Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу й організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення в якому знаходиться робоче місце з ПК повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світопрорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світопрорізами. Віконні прорізи в приміщенні з ПК повинні мати регульовані жалюзі чи занавеси або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць із ПК у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з ПК рекомендується розміщати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з ПК повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування ПК, при якому працюючий звернений обличчям, або спиною до вікон чи кімнати задньої частини ПК, у яку монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень із ПК полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені в «Перелік дозволених», МЗ» 1977-1985 р.

В лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з ПК розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами складає 3 м. Екрани відеомоніторів ПК знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення (S=21 м², V=73,5 м³) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 метрів від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650,

глибина 550, ширина 450 міліметрів відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотнім пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння і спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрату повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаємо за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – обсягова вага повітря (1,226 кг/м³);

t_B – температура витяжного повітря (30°C);

t_H – температура приточного повітря (20°C).

Розрахуємо надлишкове надходження тепла за наступною формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{УСТ}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{ПЕР}}$ – виділення тепла робітниками;

$Q_{\text{ОСВ}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{СР}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначимо виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{уст} = P \cdot K_a \cdot K_{\sigma} \cdot 860, \quad (A.3)$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_{σ} – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{уст} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_{\sigma} \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год} \end{aligned}$$

Визначимо виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою наступної формули:

$$Q_{пер} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год}, \quad (A.4)$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{осв} = E_M \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год}, \quad (A.5)$$

де E_M – нормована освітленість для цієї зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питоме тепловиділення на 1 м² підлоги при 1 лк освітленості (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.)

S – площа приміщення, м².

Визначимо надходження тепла від сонячної радіації через вікна за наступною формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{ocл} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (\text{A.6})$$

де F – площа віконних прорізів ($3 \times 2,5 = 7,5 \text{ м}^2$);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м^2 віконного прорізу (65 ккал/год.);

$K_{ocл}$ – коефіцієнт ослаблення, приймаємо 0,4.

Визначимо кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAD} = Q_{уст} + Q_{пер} + Q_{ocв} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначимо витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAD}}{c \cdot \rho \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 куб. м./годину, що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати (22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та 40-60 % відповідно. При збереженні всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, рухливість повітря (0,1 – 0,2) метрів секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія при збереженні всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($h=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{стелі} = 70 \%$, $P_{стін} = 50 \%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, які підвищуються до стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначимо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути у межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. В лабораторії виміральної техніки та науково-дослідному відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначимо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,5 - 0,4 = 2,8 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,8 = 2,0 \text{ м.}$$

4) Розрахуємо необхідну кількість світильників

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{2^2} = 6.$$

Приймаємо 6 світильників, враховуючи розміри приміщення розміщуємо їх у два ряди по 3 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк; K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп; S – площа приміщення, що освітлюється, м²; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15); N – кількість світильників; n – кількість ламп у світильнику; η – коефіцієнт використання світового потоку, який визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін та стелі.

6) Визначимо показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 (при $i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 18% більше розрахованого, однак не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{CB} = P \cdot N = 150 \cdot 6 = 900 \text{ Вт.}$$