

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет
Кафедра метрології та БЖД

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістра

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНОСТІ
ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ В ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНІЙ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ТИСКУ

Завідувач кафедри, канд. техн. наук, доц.



О. І. Богатов

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц



І. В. Грайворонська

Керівник, канд. техн. наук, доц



О. А. Коваль

Студент гр. ММ-61-22



Д. С. Боровіков

Харків – 2023

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет механічний
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності
Освітній рівень другий (магістерський)
Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітня програма «Інтелектуальні інформаційно-вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. І. Богатов **О. І. Богатов**

«11» жовтня 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Боровікову Дмитру Сергійовичу

1. Тема роботи: "Дослідження методів оцінювання інерційності вимірювальних каналів в просторово розподіленій інтелектуальній вимірювальній системі тиску".

Керівник роботи Коваль Олександр Андрійович, канд. техн. наук, доц.

Затверджені наказом Вченої ради механічного факультету від "11" жовтня 2023р. № 130.

2. Строк подання студентом роботи 30.11.2023 р.



3. Вхідні дані до роботи: 1) Параметри технологічного процесу системи охолодження; 2) Режими роботи стенду діагностування вимірювального каналу тиску; 3) Вимірюваний параметр – тиск.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1. Вступ; 2. Аналіз методів визначення перехідної характеристики датчика тиску; 3. Аналіз методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску; 4. Розробка вимог до метрологічних характеристик вимірювального каналу тиску; 5. Охорона праці і навколишнього середовища; 6. Висновок;

7. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): плакати (слайди); 1 Результати досліджень у вигляді схем та графіків.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів проекту, що їх стосуються:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
4	Богатов О. І.		

7. Дата видачі завдання «13» вересня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення літератури	20.09.2023	виконано
2	Аналіз методів визначення перехідної характеристики датчика тиску.	30.09.2023	виконано
3	Аналіз методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску.	01.10.2023	виконано
4	Розробка вимог до метрологічних характеристик вимірювального каналу тиску.	20.10.2023	виконано
5	Охорона праці і навколишнього середовища	01.11.2023	виконано
8	Формулювання висновків	10.11.2023	виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2023	виконано
10	Створення презентації на Power Point	27.11.2023	виконано
11	Подання роботи керівнику.	30.11.2023	виконано
12	Подання роботи на рецензію.	01.12.2023	виконано
13	Допуск до захисту.	05.12.2023	виконано

Студент 

Боровіков Д. С.

Керівник роботи 

Коваль О. А.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота бакалавра: 77 с., 25 рис., 13 джерел, 2 додатки.

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛУ ТИСКУ, ДАТЧИК ТИСКУ,
ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ,
ПЕРЕХІДНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

Об'єкт дослідження – вимірювальний каналу інтелектуальної вимірювальної інформаційної системи тиску.

Мета роботи – дослідити методи оцінювання інерційності вимірювальних каналів в просторово розподіленій інтелектуальній вимірювальній системі тиску.

Методи дослідження – статистичний, часовий та спектральний аналіз часових вибірок.

Розглянуто методи визначення сталих часу вимірювальних каналів у просторово-розподілених інтелектуальних системах вимірювання тиску. Розроблено вимоги до нормування метрологічних характеристик діагностичних стендів вимірювальних каналів.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Аналіз методів визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску.....	9
1.1 Методика та результати досліджень статичних та динамічних характеристик каналів вимірювання тиску.....	16
1.2 Визначення динамічних характеристик вимірювальних ліній вимірювального каналу тиску.....	18
1.3 Висновки до розділу.....	20
2 Аналіз методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску.....	21
2.1 Дослідження перехідної характеристики вимірювальної лінії.....	21
2.2 Висновки до розділу.....	30
3 Розробка вимог до метрологічних характеристик вимірювального каналу тиску.....	33
3.1 Стандартизація та динамічна характеристика каналів вимірювання тиску.....	34
3.2 Аналіз точності блоків вимірювання параметрів вихідного сигналу каналів вимірювання тиску.....	36
3.3 Встановлення вимог до точності методів визначення динамічних характеристик каналів вимірювання тиску.....	41
3.4 Висновки до розділу.....	45
4 Охорона праці і навколишнього середовища.....	47
4.1 Висновки до розділу.....	57
Висновки.....	59
Перелік посилань.....	60
Додаток А Графіки залежності ентропійного коефіцієнта від співвідношення сумованих складових і їх ентропійних коефіцієнтів.....	62
Додаток Б Ілюстративний матеріал до дипломної роботи.....	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
ВЛ	Вимірювальна лінія
ВІС	Вимірювальна інформаційна система
ВКТ	Вимірювальний канал тиску
ДСТУ	Державний стандарт України
ДХ	Динамічна характеристика
ЕОМ	Електронно-обчислювальна машина
ЗВТ	Засоби вимірювальної техніки
МХ	Метрологічні характеристики
НМ	Нейронна мережа
ПФ	Перехідна функція
ПХ	Перехідна характеристика
САУ	Система автоматичного управління
СКВ	Середньоквадратичне відхилення
СЦП	Спектральна щільність потужності
ТСО	Технічно складний об'єкт
ТУ	Технічні умови
ФП	Функція перетворення
ФЧХ	Фазо-частотна характеристика

ВСТУП

Динамічні вимірювання займають важливе місце в метрологічній практиці завдяки розширенню сфери застосування точних вимірювань, зростанню швидкодії та підвищенню точності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). При цьому важливим є вивчення динамічних властивостей засобів вимірювальної техніки, які описуються і нормуються їх динамічними характеристиками (ДХ). Це дозволяє вирішувати проблеми організації процесу вимірювання змінних величин (вибір та проектування засобів вимірювань), динамічного вимірювання фізичних величин, оцінки та корекції динамічних похибок засобів вимірювань при роботі в динамічному режимі (відновлення вхідного сигналу).

Вирішення цих проблем відбувається в рамках теорії динамічних вимірювань, яка сформувалася на стику метрології та теорії систем автоматичного керування у 80-90-х роках минулого століття. Вчені М. Пейн, Б. Малхолл, Д. Фанг, Х. Чже, Т. Мачер, Д. Моуері, К. К. Маклеод, К. Р. Джеймс, Б. Кейн, Е. Грелліан, Я. Салмі, Дж. Д. Коллер, Д. Д. Шернофф, М. Д. Вайсбанд, В. А. Грановський, В. І. Губар, П. П. Орнатський, Г. Н. Солопченко, Ю. М. Туз, В. М. Чінков, С. І. Кондрашов, І. П. Захаров, П. Ф. Щапов, Б. Ю. Захаров та ін. Аналіз робіт цих та інших вчених показує, що існує широкий спектр досліджень, спрямованих на вдосконалення прямих та непрямих методів визначення постійного струму з використанням експериментальних даних та методів математичного моделювання сенсорів.

Всі ці дослідження спрямовані на оцінку та визначення постійного струму сенсорів з використанням спеціальних стендів та тестових сигналів. Отриманий таким чином постійний струм відрізняється від постійного струму датчика в реальних умовах експлуатації. Це було доведено багаторічними дослідженнями технологічних датчиків на атомних електростанціях доктором О. М. Ашем'яном. Було виявлено, що тестові сигнали не можуть повністю відновити виміряні характеристики процесу. Крім того, необхідно

враховувати, що датчик використовується разом з вимірною лінією і її параметри також можуть змінюватися в процесі експлуатації. Це призводить до зміни постійного струму у вимірній установці "вимірня лінія + датчик". Необхідно також враховувати, що вимірні лінії на атомних електростанціях виготовляються безпосередньо на об'єкті для кожного місця вимірювання. Тому ці лінії мають індивідуальні параметри. Як наслідок, для кожної точки вимірювання технологічних параметрів функція перетворення вимірної установки та її постійний струм будуть індивідуальними. Під час роботи інформаційно-вимірної системи функція перетворення контролюється із заданою частотою шляхом калібрування всього вимірної блоку за допомогою контрольних точок. Під час роботи не оцінюється і не контролюється ні ДХ датчиків, ні ДХ вимірної каналу.

Тому виникає проблема метрологічного контролю як ДХ окремих датчиків, так і ДХ вимірної системи в цілому під час роботи. Це особливо важливо для технічно небезпечних установок, таких як атомні електростанції (АЕС). Враховуючи той факт, що вимірня інформація на АЕС завжди документується, цю проблему можна вирішити двома способами:

- Неруйнівний контроль;
- Онлайн-діагностика.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ

Сьогодні оцінка стаціонарності здійснюється за допомогою статистичних пакетів, які зосереджені на класичних методах математичної статистики, таких як кореляційний, регресійний та факторний аналіз. Однак ці методи не можуть бути ефективно застосовані для безперервного (автоматичного, без участі експертів) аналізу даних. Крім того, системи, засновані на статистичній обробці інформації, вимагають від аналітика апріорних припущень щодо моделі, спеціальної підготовки вихідних даних (наприклад, вибірки), певного відбору з прийнятого набору моделей (для перевірки валідності опису даних) і, нарешті, експертної інтерпретації результатів. Традиційні методи математичної статистики, які складають основу статистичних пакетів, в основному корисні для перевірки апріорних гіпотез і попереднього аналізу як основи для оперативної аналітичної обробки даних [1,2], і зовсім не підходять для автоматичного аналізу поточних даних вимірювань.

Тому в цьому дослідженні для обробки даних вимірювань було використано інтелектуальну систему аналізу даних з нейронними мережами на основі методів інтелектуального аналізу даних. Інтелектуальний аналіз даних - це метод пошуку нетривіальних об'єктивних закономірностей, періодичності, трендів і стаціонарних інтервалів у великих обсягах даних і перевірки їх на нових зразках вимірювань. Знайдені закономірності не вважаються апріорі очевидними, оскільки їх не можна виявити стандартними статистичними методами або навіть досвідченими експертами, які обробляють вимірювальну інформацію. Наприклад, вони повністю узгоджуються з реальністю, на відміну від експертної думки, яка ґрунтується на суб'єктивних і обмежених поглядах.

Попередні статистичні оцінки показали, що більшість часових рядів вимірюваних тисків мають систематичні компоненти (включаючи кратні

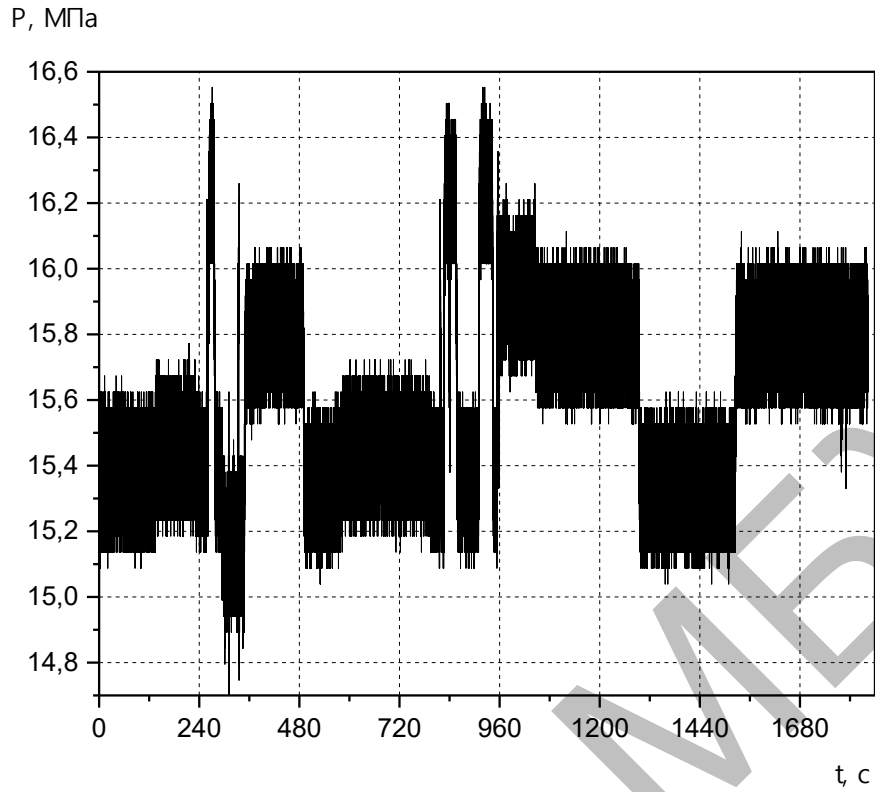
компоненти) і випадкові помилки (залишки, шум), що ускладнює ідентифікацію регулярних компонентів. В принципі, тренд – це загальна систематична лінійна або нелінійна складова, яка змінюється з часом. Інерційність технологічного процесу реалізується через цей еволюційний компонент часового ряду.

У певних технологічних процесах можна виділити специфічні цикли. Сезонний компонент є циклічно повторюваним компонентом. Його зміна зазвичай описується двома моделями: адитивною та мультиплікативною; більшість систематичних складових вихідного сигналу ГХТ складаються з тренду, більш-менш регулярної циклічної варіації відносно тренду та циклічної складової.

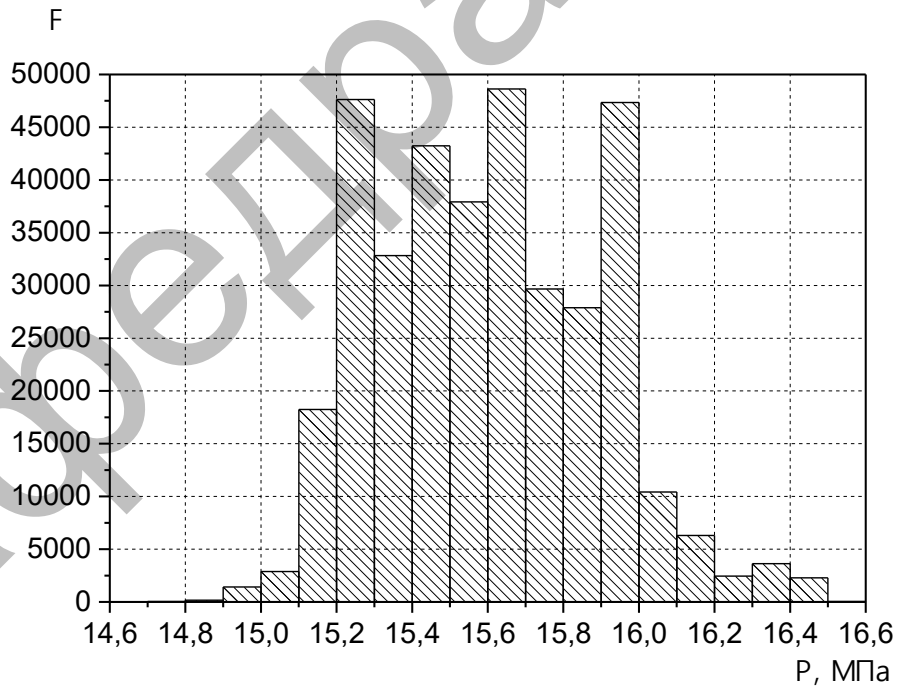
Для визначення тренду використовуються два основні підходи: оцінка регресії в часі та обчислення впорядкованих різниць (диференціювання). Для оцінки часової залежності регресії використовувалися лінійні, квадратичні (параболічні) та експоненціальні тренди. Також оцінювалося послідовне диференціювання в процесі аналізу переривань вимірювань частин вихідного сигналу вимірювального каналу. Застосування цих підходів дозволило виділити тренд з даних вимірювань, тобто отримати стаціонарні залишки за відсутності періодичної та циклічної складових. При використанні процедури вилучення тренду важливо розрізнити природу тренду, що вилучається. Тренди можуть бути детермінованими або стохастичними (випадковими). Результати дослідження показали, що близько 97 % часових рядів, отриманих в якості експериментальних результатів, були стаціонарними відносно заданого детермінованого тренду-TS ряду (TS-тренд стаціонарний). Лише 3% часових рядів мали стохастичний тренд, який можна було усунути лише шляхом диференціювання. Результати дослідження нестационарності вхідного сигналу каналу тиску представлені на рис. 1.1-1.3. Результати дослідження показують, що вхідний сигнал є нестационарним. Він має закон розподілу, близький до нормального, і містить декілька складових, середнє та дисперсія яких змінюються з часом. Кількість компонент та їх параметри змінюються з часом під час роботи оператора ТСО. Наприклад, на рис 1.1 а показано 30-хвилинну часову вибірку вихідного сигналу ВКТ, яка характеризується

кількома стаціонарними режимами, кількість яких залежить від режиму роботи оператора ТСО. Також видно, що вихідний сигнал містить декілька складових, параметри яких (середнє значення та тренд) змінюються з часом. Однак на гістограмі (рис. 1.1 б) ці складові не розрізняються, що свідчить про те, що складові вихідного сигналу мають змінні в часі середнє та дисперсію, тобто сигнал не є стаціонарним. Тому для визначення ДХ ВКТ необхідно виконувати статистичну обробку на дискретних часових відрізках вихідного сигналу, щоб використовувати тільки стаціонарний режим процесу ТСО. Як приклад, на рис. 1.2 а наведено фрагмент часової вибірки вихідного сигналу ТКД тривалістю 12 хвилин (720 с). Гістограма сигналу цього відрізу показана на рис. 1.2 б. Відповідно, цей вихідний сигнал є випадковим процесом, розподілений за близьким до нормального законом із середнім значенням 16 МПа. Однак гістограма цього процесу, зображена на рис. 1.2 б, показує, що це випадковий процес з розподілом, близьким до нормального, із середнім значенням 16 МПа. Рисунок 1.2 б показує, що в сигналі присутні дві складові із середніми значеннями, близькими до 15,98 МПа і 16,045 МПа. Графік автокореляційної функції (рис. 1.2 в) містить періодичні сплески, що свідчить про наявність періодичних складових у вибраних часових сегментах.

Оскільки характер тренду невідомий, то найпростішим способом оцінити тренд і періодичну складову є використання ковзних середніх. Графік ковзного середнього показано на рис. 1.2 д, який являє собою графік вихідного сигналу цього треку, згладженого ковзним середнім по прямокутному вікну в 10 секунд (2000 вимірювань). Тут вже можна виділити періодичні складові і приблизно оцінити тренд. Оцінка періоду варіації згладженого сигналу (рис. 1.2 д), як видно з гістограми (рис. 1.2 д) та спектру (рис. 1.3 с) цього сигналу, які показують наявність двох періодичних складових. Автокореляційна функція скоригованого сигналу показана на рис. 1.2 і має вигляд трендового часового ряду. Автокореляційна функція не наближається до нуля зі збільшенням затримки (затримка – це кількість інтервалів аналізу для даної вибірки часу). Для оцінки та виділення тренду з часових вибірок вихідного сигналу ВКТ було використано метод найменших квадратів.



a)



б)

Рисунок 1.1 – Вихідний сигнал ВКТ а) і його гістограма б) до його обробки

Візуальний огляд графіка показує, що тренд ряду є лінійним. Виявлений тренд (рис. 1.2d) описується наступним рівнянням.:

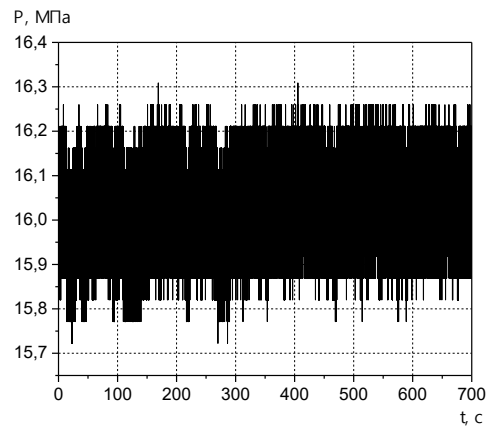
$$P(t) = t \cdot 5.7 \cdot 10^5. \quad (1.1)$$

Тому необхідно виділити тренд (1.1) з вибраних часових сегментів вихідного сигналу ВКТ. На рис. 1.3 а показано графік вихідного сигналу аналізованого треку, з якого було вилучено тренд. Автокореляційна функція цього сигналу (рис. 1.3 б) змінюється від 1 до 0,985 протягом 12-хвилинного фрагмента, що свідчить про наявність нестационарних залишків. Подальший аналіз показав, що нестационарні залишки становлять 0,15 % для зміни середнього значення та дисперсії і 0,3 % для зміни амплітуди.

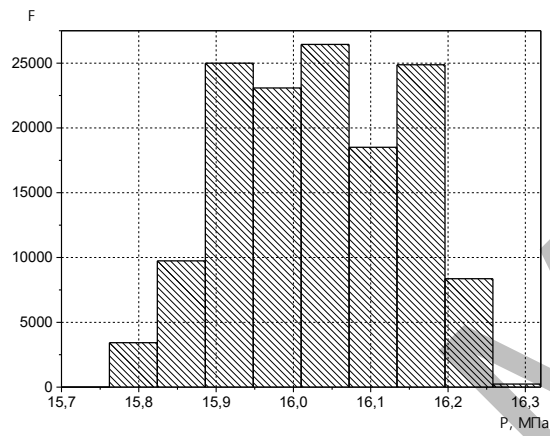
Загалом, вихідний сигнал вибраної частини вимірної часової вибірки після процесу усунення нестационарності можна вважати квазістационарним. Це можна побачити на спектрі сигналу після обробки, де кількість складових не змінюється, а лише незначно зсувається (рис. 1.3).

Отже, стаціонарність вихідного сигналу ТСО виявляється в наступному.

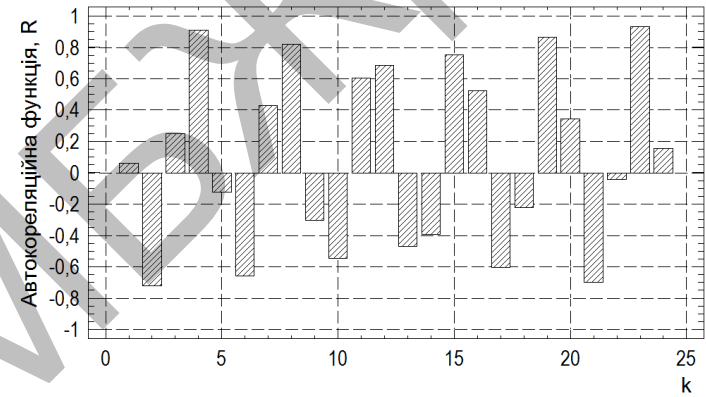
- вихідний сигнал ВКТ є нестационарним флуктуаційним процесом;
- причина нестационарності вихідного сигналу обумовлена особливостями роботи ТСО;
- вихідний сигнал ВКТ складається з багатьох часових відрізків постійної амплітуди, тривалість яких є різною і коливається від декількох секунд до 30 хвилин;
- нестационарність вихідного сигналу ВКТ усувається на всьому періоді вимірної вибірки за допомогою згладжування ковзного середнього та методу найменших квадратів (але цей метод призводить до втрати інформації про сигнал і збільшення похибки вимірювання тиску), або за тривалістю окремих часових відрізків, вирізаних з вимірних зразків;



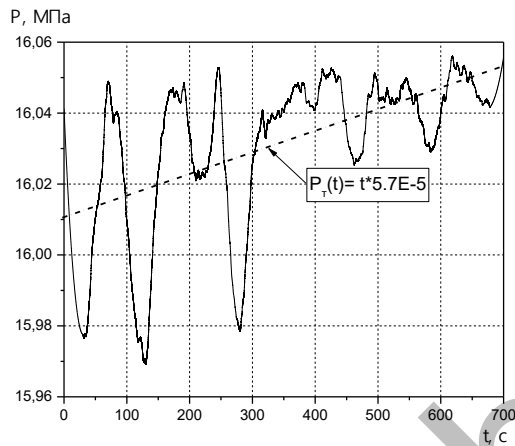
а)



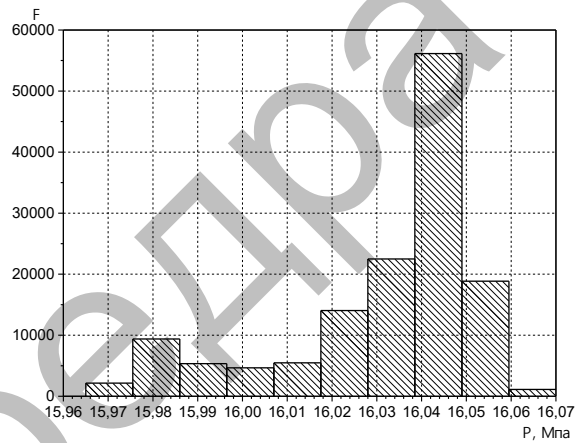
б)



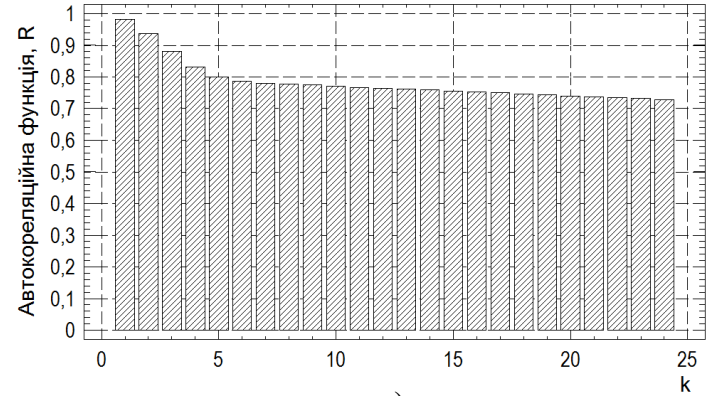
в)



г)

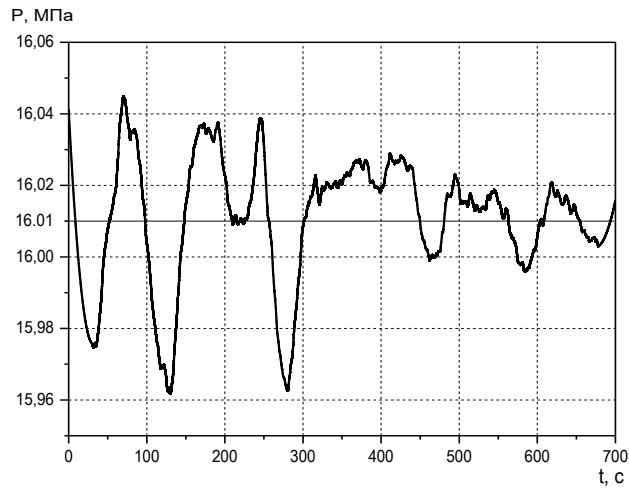


д)

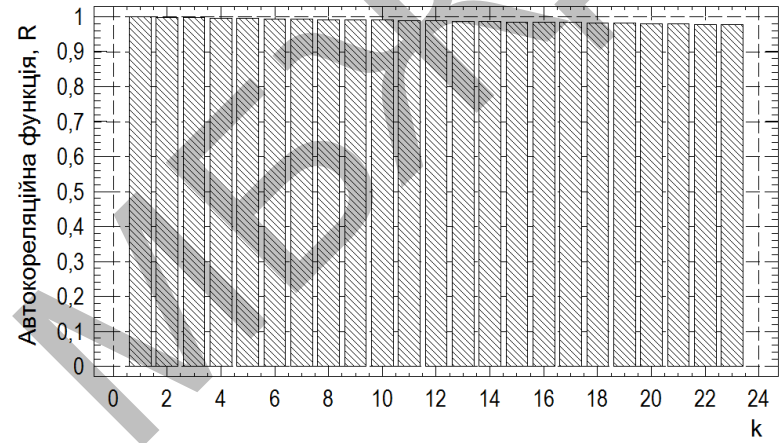


е)

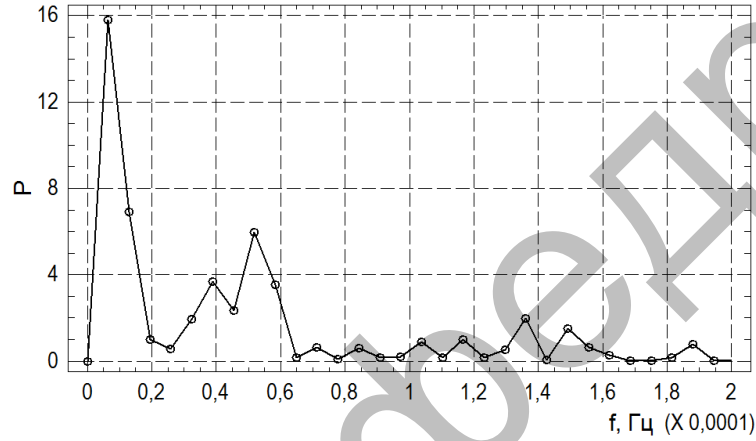
Рисунок 1.2 – Графіки результатів досліджень на стаціонарність фрагменту часової вибірки вихідного сигналу ВКТ тривалістю 12 хвилин



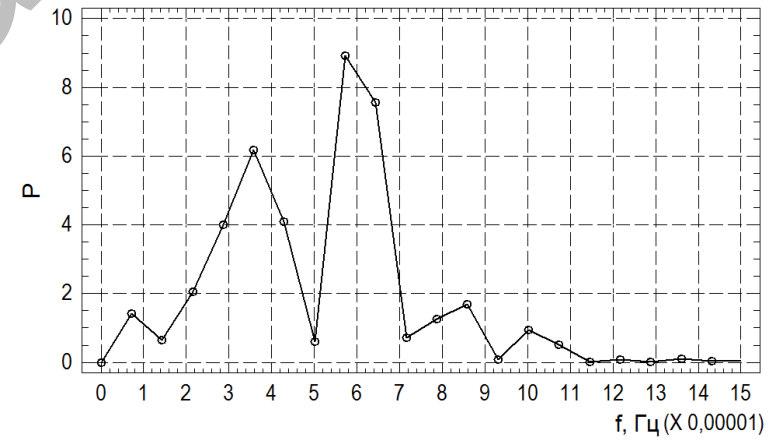
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Графіки результатів видалення нестационарності фрагменту часової вибірки вихідного сигналу ВКТ тривалістю 12 хв

— повністю усунути стаціонарність вихідного сигналу ДКТ неможливо, а рівень залишків має як суб'єктивний, так і об'єктивний характер: (від 0,3 % до 0,7 %) і визначається як рівнем підготовки дослідника, так і можливостями використовуваного програмного забезпечення;

— за результатами дослідження встановлено, що діапазон стаціонарності вихідного сигналу ВКТ визначається тривалістю відрізків часу з постійною амплітудою, яка знаходиться в межах від 5 с до 25 хв;

— подальший розвиток алгоритмів нечітких вимірювань необхідний для автоматизації обробки постійних за амплітудою часових відрізків та усунення стаціонарності вихідного сигналу ВКТ.

— Тому в подальшому для визначення ДХ ЗВТ будуть використовуватися стаціонарні відліки сигналу, отримані після операцій, описаних в цьому розділі. При цьому слід дотримуватися наступної методики.

1.1 Методика та результати досліджень статичних та динамічних характеристик каналів вимірювання тиску

Перед початком дослідження було перевірено технічний стан і справність вимірювальних ліній та відкалібровано датчики тиску.

Для підвищення надійності дослідження 15 датчиків тиску були розділені на три групи по п'ять датчиків у кожній (термін експлуатації: 1, 5 і 10 років). Всі датчики були однотипні та з однієї партії. Експерименти проводилися окремо для кожної групи, а результати усереднювалися. Для експериментів використовувалася вимірювальна лінія, а також моделювалося штучне тривала експлуатація шляхом створення відповідних завалів, витоків і повітряних пробок.

Спочатку було проаналізовано статичні властивості трубки без вимірювальної лінії, а потім властивості всієї трубки.

Всі вимірювання проводилися одночасно в єдиній часовій шкалі: 30 хвилин – частота кожного вимірювання в кожній з 10 серій, а тривалість

часової вибірки в кожній серії становила 1 хвилину. Інтервал у 30 хвилин визначався необхідністю зниження тиску до постійного атмосферного та однократної заміни піропатрона. Роздільна здатність вимірювань у вибірці становила 5 мкс. Отримана таким чином послідовність даних, що складалася з 1х вибірок часу вимірювання, зберігалася на жорсткому диску для подальшої обробки. Обробка часових вибірок імпульсного відгуку, отриманих з серії експериментів, проводилася за допомогою пакету Origin Pro. Дані для кожного датчика були усереднені за 10 експериментів.

В результаті експериментальних випробувань були ідентифіковані датчики тиску:

- перехідна характеристика датчика $G(t)$;
- постійна часу датчика тиску τ_{δ} ;
- час затримки датчика t_3 ;
- імпульсна характеристика датчика $H(t)$;
- ширина імпульсної характеристики τ_{ix} .

Середні перехідні та імпульсні характеристики датчиків тиску з терміном служби один рік, визначені за результатами експериментів, наведені на рисунку 1.5 а та рисунку 1.5 б. Визначено такі параметри перехідної характеристики датчиків, як постійна часу τ_{δ} та час затримки t_3 . Середнє значення сталої часу датчика становило $\tau_{\delta} = 77 \pm 1$ мс. Варіація τ_{δ} в 1 мс була зумовлена неідентичним зарядженням піропатронів і, як наслідок, різними інтерференційними процесами перед хвилею тиску, що падає на датчик в ударній трубі. Час затримки t_3 був постійним і становив 20 мс. Експериментально визначена перехідна характеристика дала імпульсну характеристику датчика тиску (рис. 1.5 б). Оскільки імпульсна характеристика має дзвоноподібну форму, то її ширина становить E/e . Амплітудне значення нормованої імпульсної характеристики становить $E=1$, а рівень $E/e = 0.366$, а $\tau_{ix} = 76$ мс. При цьому на перехідній характеристиці спостерігаються невеликі перехідні процеси на рівні максимального амплітудного значення вихідного сигналу датчика тиску (0,9-1,0) (рис. 1.5 а).

Результати експерименту показують, що функція перетворення є лінійною і може бути апроксимована рівнянням:

$$U = 0.098 + 0.184 \cdot P. \quad (1.2)$$

Відносна похибка δ_U апроксимації експериментально отриманої ФП $U(P)$ не перевищує $\delta_U \leq \pm 0.3\%$ (рис. 1.7) і повністю відповідає вимогам технічних умов ДК ПП 33.20.52.830 для досліджуваних датчиків тиску – $\delta_{TV} \leq \pm 0.5\%$.

1.2 Визначення динамічних характеристик вимірювальних ліній вимірювального каналу тиску

Лінії вимірювання тиску використовуються в ТСО, де датчики тиску розміщені подалі від технологічного середовища, щоб зменшити вплив температури навколишнього середовища на продуктивність і номінальний термін служби датчика тиску. Високі температури навколишнього середовища негативно впливають на механічні компоненти датчика і скорочують термін служби напівпровідникової електроніки.

Ще однією причиною розміщення датчиків подалі від технологічної зони є зменшення вібрації та полегшення доступу для заміни та обслуговування. В даному випадку були використані нові, справні та сертифіковані датчики тиску із заздалегідь визначеними статичними та динамічними характеристиками. Структурна схема вимірювального комплексу наведена на рис. 1.2-1.3.

Під час дослідження використовувалася водонаповнена вимірювальна лінія. Вона складалася з суцільної труби малого діаметру (20 мм), виготовленої з вуглецевої сталі з товщиною стінки 1,5 мм. Безпосередній підвід до датчика тиску був виконаний з металопластикової труби. Довжина труби повинна бути невеликою, оскільки вона впливає на загальний час реакції потоку на вимірювання тиску.

На практиці, залежно від призначення, довжина вимірювальної лінії може значно варіюватися від кількох метрів до 200 м та до 300 м, середнє значення становить від 10 м та до 50 м. Для того, щоб задовольнити вимогу ідентичності досліджуваної вимірювальної лінії з аналогічними, для дослідження було обрано вимірювальну лінію довжиною 25 метрів.

Методика визначення постійного струму вимірювальної лінії напірного каналу повністю аналогічна методиці визначення постійного струму датчика тиску. В основному визначаються динамічні характеристики існуючої нової (еталонної) трубки. Оскільки динамічні характеристики датчика тиску, що використовується в експерименті, відомі, то постійна часу вимірювальної лінії може бути визначена наступним чином:

$$\tau_{вл} = \tau_{ек} - \tau_{\delta}, \quad (1.3)$$

де $\tau_{вл}$ – постійна часу вимірювальної лінії тиску;

$\tau_{ек}$ – постійна часу ВКТ.

Час реакції вимірювальної лінії, що заповнена рідиною, має два головні компоненти: звукову затримку і гідравлічну затримку. Звукова затримка відповідає часу, який потрібно сигналу тиску, щоб зі швидкістю звуку пройти по повністю заповненій вимірювальній лінії від зони процесу до датчика. При довжині лінії 25 м цей час складає приблизно 20 мс.

В результаті роботи з вимірювальним комплексом (рис. 1.2-1.3) були визначені перехідні характеристики трубки, які наведені на рис. 1.2. Аналіз отриманої ПХ трубки (рис. 1.2 а) та раніше визначеної ПХ датчика тиску (рис. 1.2 б) показав, що ПХ трубки практично повторює ПХ датчика. При цьому час затримки t_3 ПХ ВКТ збільшився з 20 мс до 40 мс, а постійна часу залишилася незмінною – $\tau_{ек} = \tau_{\delta} = 74$ мс. Загальний час затримки ВКТ визначається наступним чином:

$$t_3 = t_{3\text{вл}} + t_{3\text{д}}, \quad (1.4)$$

де $t_{3\text{вл}}$ – час затримки вимірювальної лінії тиску;

$t_{3\text{д}}$ – час затримки датчика тиску.

Враховуючи співвідношення (1.4), а також те, що $t_{3\text{д}} \approx 20$ мс, визначимо затримку лінії вимірювання тиску – $t_{3\text{вл}} = 20$ мс.

1.3 Висновки до розділу

Таким чином, експериментально доведено, що нова справна вимірювальна лінія без засмічень і витоків передає вхідний сигнал з виходу на вхід без спотворень із затримкою, яка визначається її довжиною.

Виходячи з лінійності вимірювальної лінії, можна визначити її ПХ безпосередньо з експериментальних даних, отриманих як різниця між ПХ трубки і ПХ датчика тиску. Визначена таким чином ПХ вимірювальної лінії показано на рисунку 1.2 а, а імпульсну характеристику – на рисунку 1.2 б. Як видно з рисунка 1.2 а, реакція вимірювальної лінії на коливання тиску має постійну тривалість (приблизно 1 мс). Це пояснюється двома причинами:

— у трубі довжиною 25 м практично неможливо миттєво відбити вхідний сигнал тиску;

— вимірювальна лінія насправді є строго нелінійною, якщо тільки немає викривлень або нерівностей у клапанах, фітінгах, з'єднувачах тощо.

Зрозуміло, що відгук вимірювальної лінії дорівнює тривалості вхідного процесу (часу поширення хвилі тиску повітря після вибуху пірчастинки). Тривалість імпульсної характеристики нової вимірювальної лінії (рис. 1.2 б) становить близько 1 мс, що свідчить про те, що вимірювальна лінія має широку частотну смугу пропускання. Під час експлуатації характеристики вимірювальної лінії змінюються.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ

2.1 Дослідження перехідної характеристики вимірювальної лінії

Під час експлуатації вимірювальні лінії, заповнені технологічною рідиною, не можуть бути використані так само, як датчики тиску, для визначення впливу тривала експлуатація вимірювальної лінії на постійний струм шланга, оскільки в результаті їх тривала експлуатація виникають закупорки, зазори, повітряні пробки і витоки, а також втрачається лінійність лінії. Крім того, в цьому випадку неможливо визначити окремо постійний струм вимірювальної лінії та датчика тиску через нелінійну взаємодію між вимірювальною лінією та датчиком. Це можна зробити за допомогою методів аналізу шумів. Насправді, однією з головних переваг використання аналізу шуму для тестування часу відгуку є те, що результати обов'язково включають вплив вимірювальної лінії. Це означає, що результати каналу тиску, отримані за допомогою аналізу шуму, враховують довжину і діаметр вимірювальних ліній, а також будь-які закупорки, зазори або витоки, які можуть бути присутніми в цих лініях.

У цьому дослідженні проаналізовано вплив кожного фактора на падіння тиску у вимірювальній лінії. Вплив пустот у лініях вимірювання тиску зумовлений наявністю в них повітря або газу. Цей фактор призводить до додаткових похибок вимірювання тиску, зниження чутливості каналу тиску та виникнення сторонніх шумів внаслідок акустичного резонансу. Повітря у вимірювальній лінії робить рідину більш стисливою і уповільнює передачу сигналу тиску від входу до виходу вимірювальної лінії. При високих тисках, характерних для промислових вимірювань, очікується, що бульбашки повітря розчиняться в рідині, але зазори у вимірювальній системі важко усунути. Наявність повітря або пустот у лінії вимірювання тиску впливає на форму графіка спектральної щільності потужності (PSD) шумового сигналу. На рисунку 2.2 показані експериментальні результати, що ілюструють вплив

повітря на ПХ трубки. Як і очікувалося, присутність повітря призводить до збільшення постійної часу ВКТ $\tau_{вк}$. Аналіз результатів дослідження з використанням методу шумового аналізу показав, що наявність повітря зміщує резонанс СЩП в бік нижчих частот, а постійна часу каналу зростає зі збільшенням кількості повітря в лінії. Було встановлено, що залежність сталої часу каналу від об'єму повітря може бути описана аналітичним рівнянням:

$$\tau_{вк} = 106 + 1664 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V}{251}\right) \right). \quad (2.1)$$

Графік залежності $\tau_{вк}$ від об'єму V повітря у трубі показано на рис. 2.3. Проаналізовано вплив засмічення ліній ВКТ на його ДХ. Виявлено, що засмічення в лініях обліку спричинені затвердінням хімічних речовин, що використовуються для очищення води, та їхніх осадів, а також накопиченням інших забруднювачів.

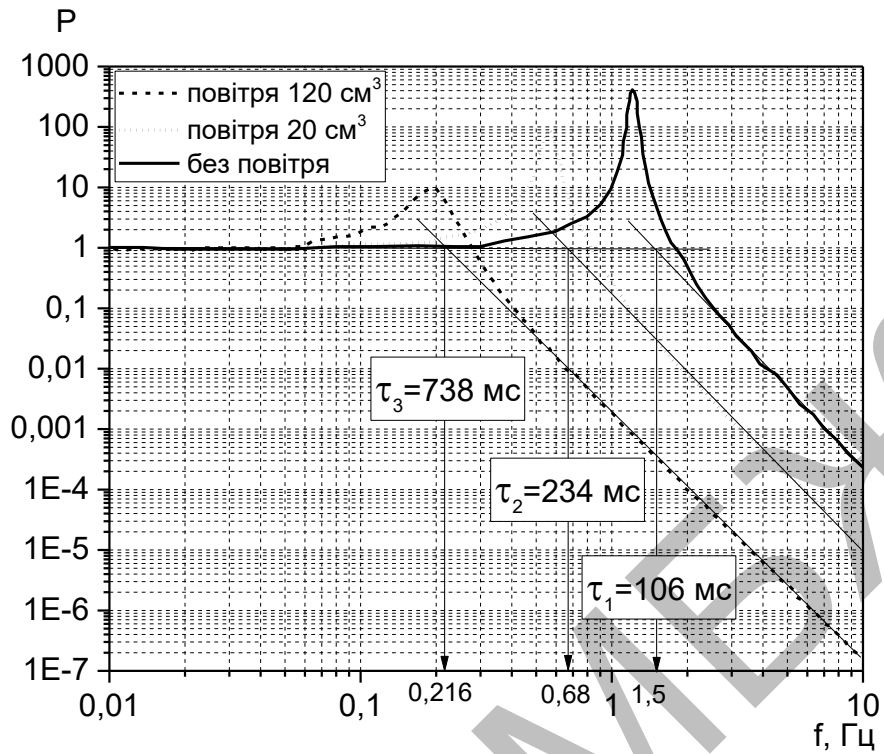


Рисунок 2.2 – Графіки потужності спектру при наявності повітря в каналі вимірювання тиску $\tau_{вк}$

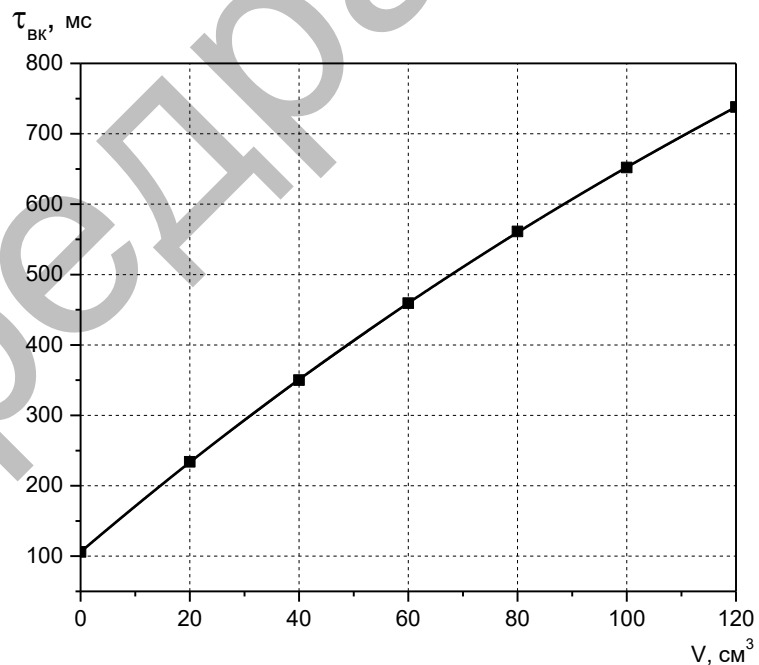


Рисунок 2.3 – Залежність постійної часу $\tau_{вк}$ ВКТ від об'єму V повітря у трубопроводі

Це також може бути викликано перешкодами у вимірювальній лінії, неправильним монтажем або регулюванням зрівняльних або запірних клапанів або перегином вимірювальної труби. Часткові засмічення негативно впливають лише на динамічну характеристику каналу вимірювання тиску, але не погіршують його статичних властивостей, тоді як повне засмічення лінії призводить до повної втрати інформації про тиск.

Дослідження проводилося з використанням аналога засмічення: відносного перекриття діаметрів трубопроводів вимірювальної лінії кульовими кранами. Відносний рівень перекриття використовувався як критерій для оцінки рівня засміченості вимірювальної лінії d :

$$d = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де α – кут повороту рукоятки кульового крана (градус);

$\alpha_{\max} = 90^0$ – максимальний кут повороту, при якому кран повністю блокується.

Відносні оклюзії від 0 % до 50 % були проаналізовані з дискретністю 5 % . В результаті було отримано СЩП вихідного сигналу ВКТ з оклюзією та без оклюзії в лінії вимірювання (рис. 2.4) та апроксимаційну функцію залежності від постійної часу $\tau_{\text{вк}}$ ВКТ від відносного засмічування d трубопроводу (рис. 2.5):

$$\tau_{\text{вк}} = 97 + 1664 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V}{680}\right) \right), \quad (2.3)$$

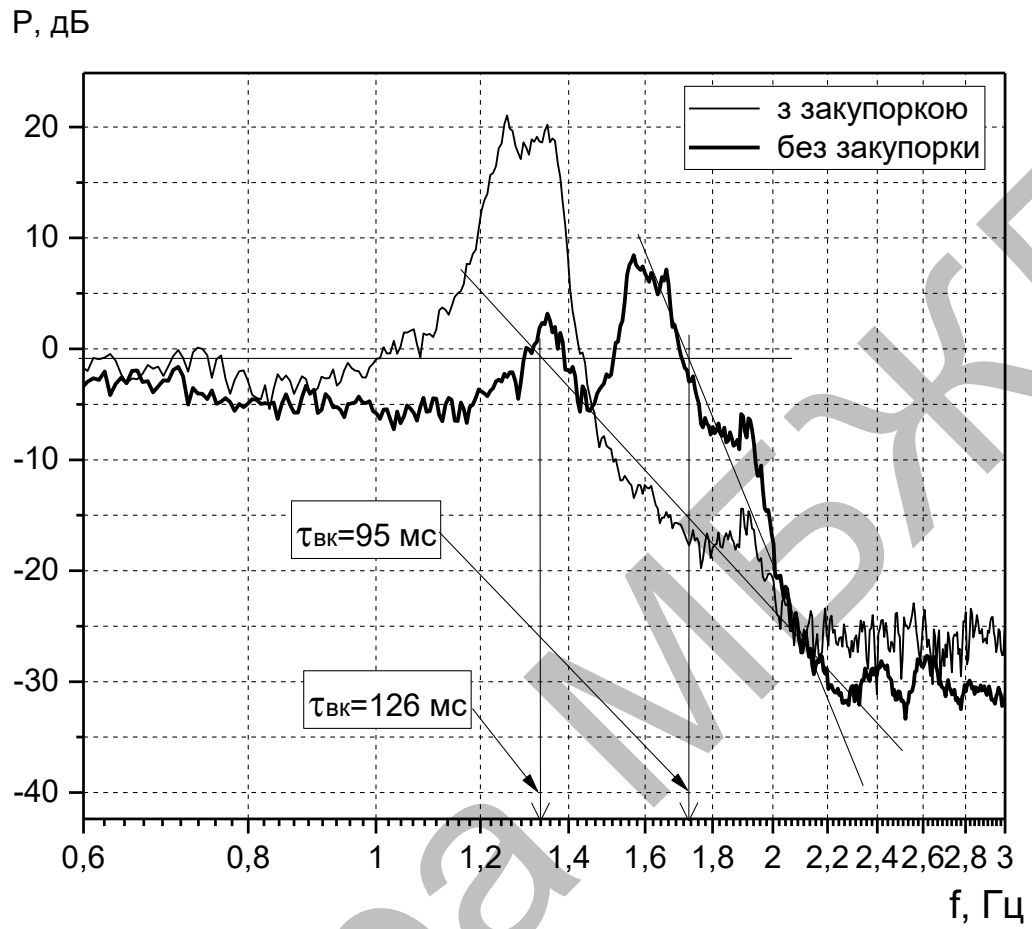


Рисунок 2.4 – СЦП сигналу для каналу вимірювання тиску при наявності та при відсутності закупорок у вимірювальній лінії

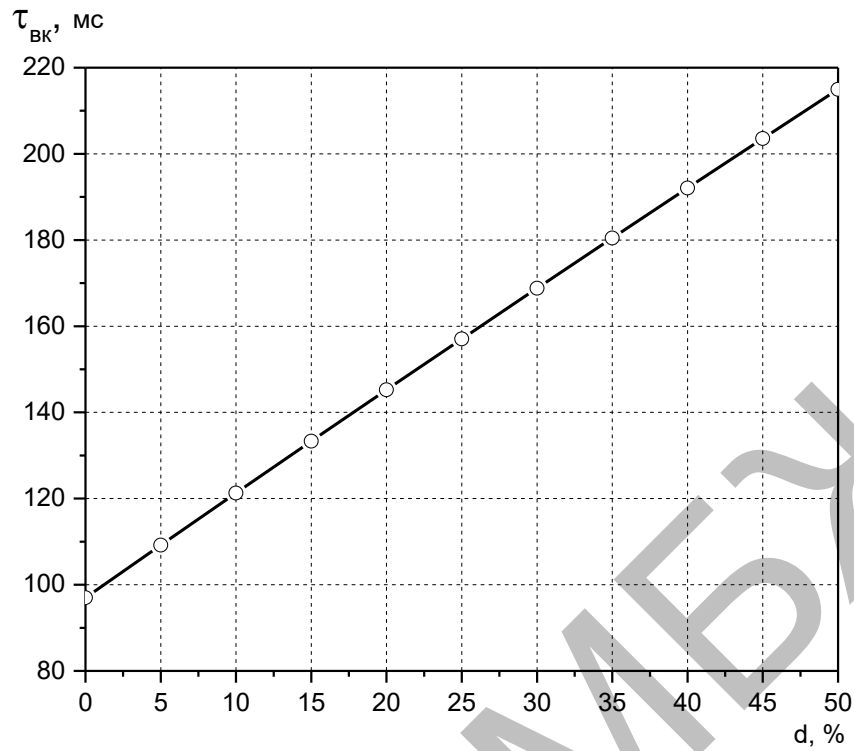


Рисунок 2.5 – Залежність постійної часу $\tau_{ВК}$ ВКТ від відносної закупорки d вимірювальної лінії



Рисунок 2.6 – Сигнал шуму на виході стенду каналу тиску при відсутності і наявності витокм у вимірювальній лінії

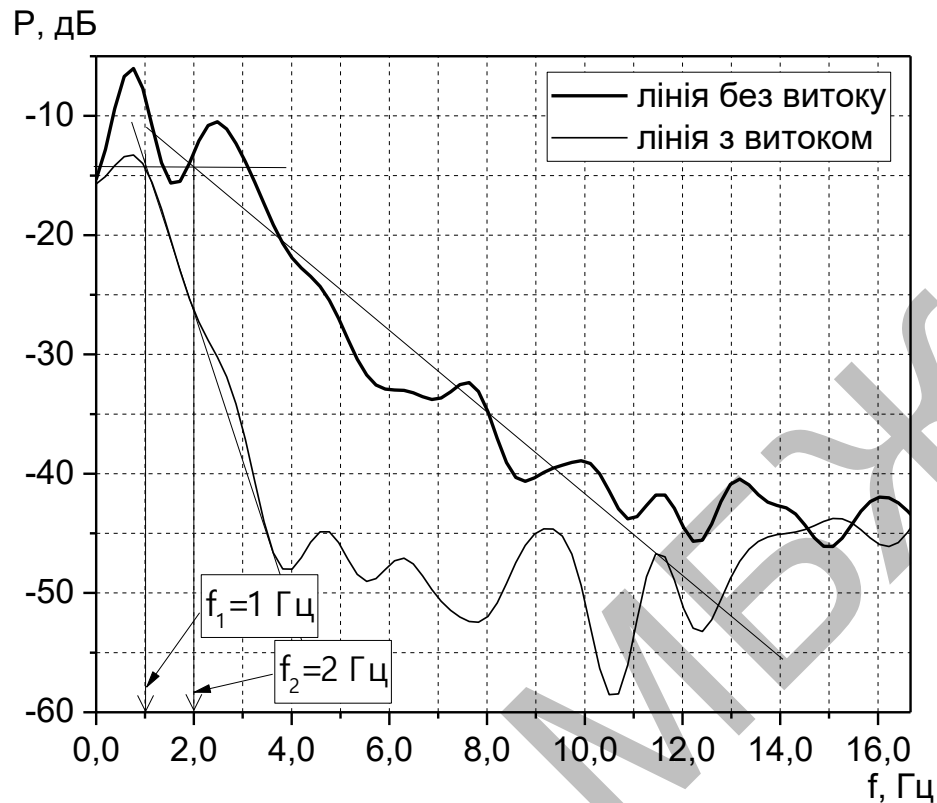


Рисунок 2.7 – Спектр сигналу на виході стенду каналу тиску при відсутності і наявності витоків у вимірювальній лінії

Витоки у лініях вимірювання тиску є поширеним явищем і призводять до дрейфу сигналу на виході трубки. Для дослідження впливу витоків у вимірювальній лінії на постійний струм трубки було використано випробувальний стенд і проведено аналіз методом аналізу шумів; на рис. 2.6 показано шумовий сигнал на виході екранованого каналу тиску і на виході каналу з витком у вимірювальній лінії.

Видно, що витік зменшує амплітуду вихідного сигналу трубки; на рис. 2.7 наведено СЦП вихідного сигналу такого каналу тиску. Аналіз графіка СЦП вихідного сигналу трубки (рис. 2.7) показує, що спектр вихідного сигналу трубки звужується при наявності витоків у вимірювальній лінії. При цьому додаткові резонанси не виникають. Відносний рівень витоків використовувався як критерій для оцінки витоків q :

$$q = \left(1 - \frac{Q_1}{Q}\right) \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де Q_1 – споживання води після точки витоку., л/год.;

Q – потік води до місць протікання, л/год..

Витрати води вимірювалися за допомогою двох витратомірів, розміщених до і після модельованого просочування. На основі узагальнення результатів дослідження були отримані наступні залежності постійної часу. $\tau_{ек}$ ВКТ від відносного витоку q рідини в трубі (рис. 2.8), яка відповідає формулі:

$$\tau_{ек} = 30 + 60 \cdot e^{\left(\frac{5 \cdot Q_1}{Q}\right)}. \quad (2.5)$$

Аналіз експериментальних результатів досліджень впливу факторів тривала експлуатація у вимірювальній лінії на КХ трубок та досліджень з досвіду експлуатації трубок в ТСО показав, що ці фактори можна класифікувати. Критеріями класифікації є можливість виявлення під час щоденної експлуатації (при візуальному огляді) та ступінь впливу на КХ трубки.

До першої групи факторів належать ті, які можна виявити візуально і негайно усунути, зокрема, витоки рідини з ліній вимірювання тиску. Однак, невеликі витоки (до 10 %), які здебільшого спостерігаються в ТСО, мають незначний вплив на постійну часу трубки (рис. 2.8). В цьому випадку постійна часу ВКТ збільшується на 23 % (в 1.2 рази) і $\tau_{ек} \leq 120$ мс, тобто знаходиться в межах допуску. До другої групи, фактори якої є латентними і не можуть бути візуально виявлені та негайно усунені, відносяться наявність повітря у вимірювальній лінії та засмічення. Присутність повітря у вимірювальній лінії має найбільший вплив на постійну часу ВКТ. Наприклад, наявність лише 20 см³ повітря у вимірювальній лінії збільшує постійну часу ВКТ більш ніж

удвічі – на 137 %, тоді як наявність 30 см^3 повітря збільшує її на 205 %. Тому цей фактор є дуже важливим для зміни постійної часу TCD. Засмічення є типовим фактором для вимірювальних ліній, що працюють протягом тривалого часу. Невеликі засмічення (до 10 відсотків) мало впливають на постійну часу. Вона збільшується лише на 23 %.

Слід зазначити, що всі фактори, проаналізовані в цьому дослідженні, впливають на лінію обліку одночасно і їх сумарний вплив є значним. Наприклад, якщо аналізувати негерметичну вимірювальну лінію з 10 см^3 повітря і відносною засміченістю 2,5 %, то її тривала експлуатація призводить до збільшення сталої часу ВКТ на 220 % до 310 мс, що більш ніж удвічі перевищує допустиму межу.

З отриманих експериментальних результатів можна певною мірою оцінити стан каналу вимірювання тиску за ступенем тривалої експлуатації вимірювальної лінії. Так, якщо припустити, що в лінії відсутні витоки і об'єм повітря в ній становить лише 10 см^3 (за умови, що відносна переповненість за 10 років експлуатації не перевищує 20 %), постійна часу ВКТ збільшується з 97 мс до 480 мс, що на 300 % перевищує допустиму межу.

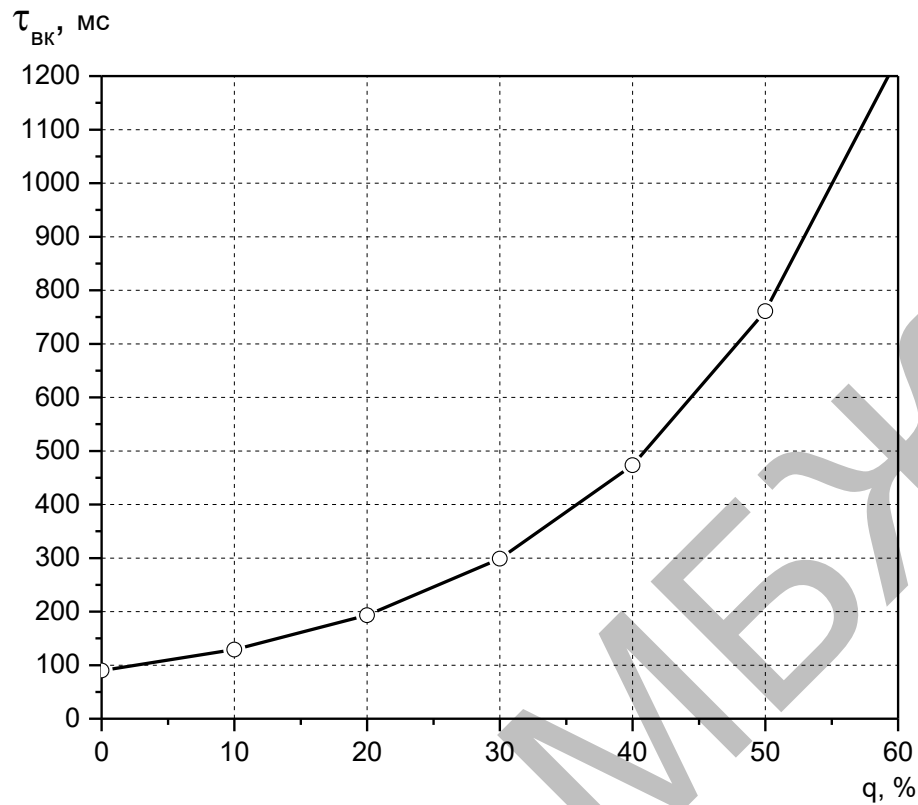


Рисунок 2.8 – Залежність постійної часу τ_{BK} ВКТ від відносного витoku q рідини в вимірювальній лінії

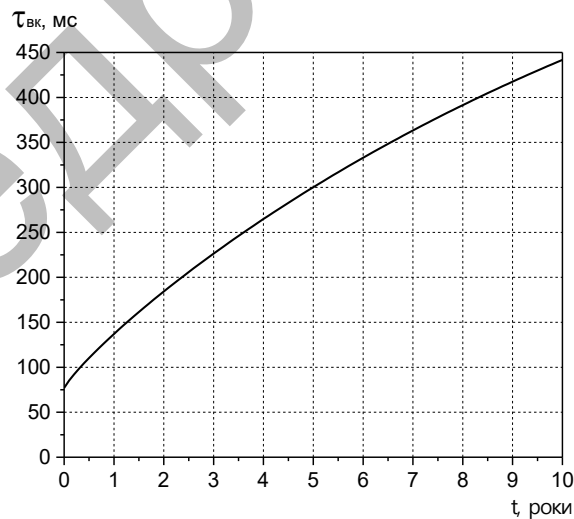


Рисунок 2.9 – Залежність постійної часу τ_{BK} ВКТ від тривала експлуатація вимірювальної лінії

Залежність сталої часу трубки від терміну служби показана на рисунку 2.9 і виражена рівнянням 2.6:

$$\tau_{ек}(t) = 78 + 49 \cdot t^{0.84} - 0.6 \cdot \left(\frac{t}{0.81} \right)^{1.67}, \quad (2.6)$$

При усуненні нестаціонарності вихідного сигналу трубки необхідно враховувати вплив тривалої експлуатації трубки.

На рис. 2.10 показано вихідні сигнали двох резервних датчиків одного і того ж ТХД для різного часу роботи (1 і 10 років). Видно відмінності як в амплітудній, так і в частотній складовій. Це пов'язано зі зміною постійних часу цих датчиків внаслідок тривалої експлуатації. На рис. 2.11 показано вихідний сигнал ВКТ з датчиком з терміном експлуатації 10 років після дестабілізації за допомогою адаптивних цифрових фільтрів (ЦФ) ЦФ1 і ЦФ2. ЦФ1 ($\tau_{цф} = 10$ мс) зменшує як флуктуації сигналу, так і його схильність до флуктуацій, зберігаючи при цьому інформативність сигналу. ЦФ2 ($\tau_{цф} = 80$ мс), має більшу постійну часу. Сигнал досить сильно згладжується, і будь-яка тенденція не усувається. Це вказує на те, що при виборі постійної часу ЦФ слід враховувати постійну часу ВКТ, яка змінюється при тривалій експлуатації.

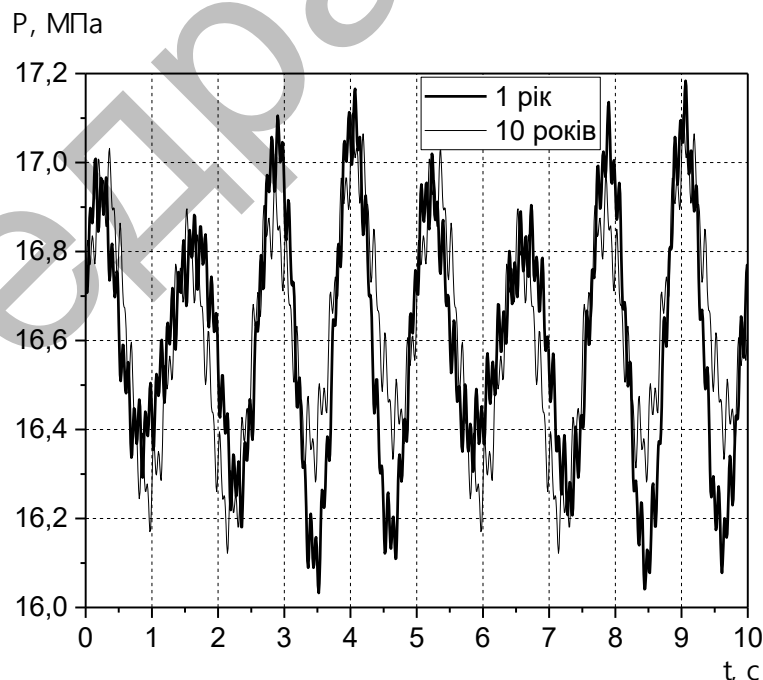


Рисунок 2.10 – Вихідні сигнали ВКТ з двох взаємодублюємих датчиків тиску з терміном роботи 1 та 10 років

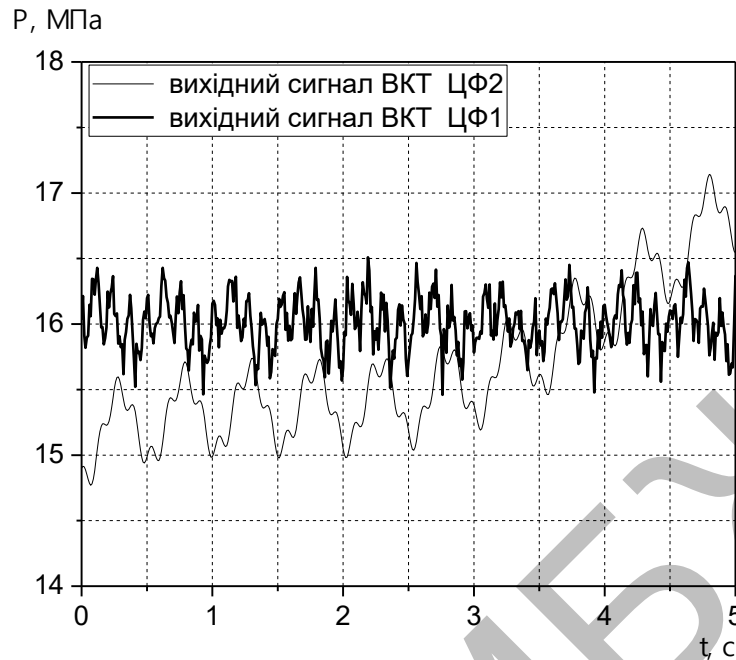


Рисунок 2.11– Вихідні квазістаціонарні сигнали ВКТ на виході, ЦФ1 з $\tau_{\text{цф}} = 10$ мс, та ЦФ2 з $\tau_{\text{цф}} = 80$ мс

Таким чином, експериментальні дослідження показали, що

- довготривала експлуатація вимірювальної лінії має більший вплив на ДХ трубок, ніж довготривала експлуатація датчиків тиску;
- всі фактори, пов'язані з довготривалою експлуатацією вимірювальної лінії, не можуть бути повністю усунені в процесі експлуатації і їх вплив може зростати з кожним роком;
- через складність довготривалої експлуатації трубки, до визначення її ДХ потрібно підходити з точки зору системного аналізу.

2.2 Висновки до розділу

Динамічні характеристики є важливими для оцінки ефективності роботи каналів вимірювання тиску. Існуючі методи визначення динамічних характеристик мають обмеження і не враховують належним чином довготривалу експлуатацію елементів каналу.

За результатами досліджень вихідного сигналу каналів вимірювання тиску, статичних і динамічних характеристик елементів каналу та впливу тривалої експлуатації на динамічні характеристики каналу отримано:

— вихідний сигнал каналу вимірювання тиску є нестационарним коливальним процесом;

— вихідний сигнал каналу вимірювання тиску складається з декількох часових відрізків постійної амплітуди, тривалістю від секунд до 30 хвилин;

— для усунення нестационарної флуктуації вихідного сигналу каналу вимірювання тиску слід використовувати методи згладжування ковзного середнього та найменших квадратів на тривалості всієї вибірки вимірювання вихідного сигналу (при цьому втрачається інформативність сигналу та з'являються додаткові похибки вимірювання тиску), або використовувати методи згладжування ковзного середнього та найменших квадратів на тривалості окремих часових відрізків, вирізаних з вибірки вимірювання;

— повністю усунути стаціонарність вихідного сигналу каналу вимірювання тиску неможливо, рівень залишків має суб'єктивний та об'єктивний характер;

— інтервал стаціонарності вихідного сигналу каналу вимірювання тиску визначається тривалістю відрізків часу з постійною амплітудою і знаходиться в діапазоні (від 5 с до 25 хв);

— лінії вимірювання тиску є лінійними та інерційними, за умови відсутності повітря, витоків та засмічень;

— внаслідок тривалої експлуатації динамічні характеристики каналу вимірювання тиску суттєво змінюються під час роботи вимірювальної лінії та перетворювача тиску;

— тривала експлуатація датчика спричиняє зміщення відносної похибки вимірювання тиску, яка може перевищувати границю відносної похибки вимірювання протягом перших 10 років експлуатації.

Отримані результати показують, що при застосуванні методів визначення динамічних характеристик каналів вимірювання тиску існує ряд обмежень та припущень. Основні з них полягають у наступному:

1. Після усунення нестационарності вихідного сигналу каналу вимірювання тиску цей сигнал перетворюється у квазістационарний
2. З метою збереження інформативності вихідного сигналу каналу вимірювання тиску слід використовувати метод визначення його динамічних характеристик лише на нестационарному часовому відрізку (від 10 хвилин до 15 хвилин) вимірювального сигналу
3. Відношення сигнал/шум на виході каналу вимірювання тиску має бути не менше 10 дБ.
4. Датчик тиску є лінійним інерційним з'єднанням. Це ж з'єднання є новою, ремонтпридатною вимірювальною лінією, яка в деяких випадках може бути практично безінерційною.

3 РОЗРОБКА ВИМОГ ДО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ

Метод визначення постійного струму трубки є прийнятним, якщо виконується низка вимог до застосування. Такі вимоги мають бути обґрунтовані для конкретних практичних ситуацій. Така ситуація ставить нові завдання щодо метрологічного забезпечення удосконалених методів визначення постійного струму каналів вимірювання тиску у засобах вимірювальної техніки, які наразі відсутні на практиці. Тому завданням є розроблення основних положень метрологічного забезпечення (МЗ) приладів при визначенні постійної складової каналів у засобах вимірювальної техніки (ЗВТ).

Основним завданням є досягнення єдності та точності вимірювань. Методики, розроблені в цій статті, мають загальний характер і не застосовуються лише до конкретних ЗВТ. Для порівняння метрологічних властивостей методів необхідні відповідні еталони, зокрема еталони ВКТ. Однак канали вимірювання тиску у вимірювальному приладі за своєю суттю є унікальними об'єктами і розробляти еталони для них складно та економічно недоцільно; можлива розробка еталонів для окремих елементів ЗВТ, зокрема датчиків тиску. Якщо вимірювальна лінія повністю заповнена водою і немає неоднорідностей, описаних вище, можна вважати, що датчик тиску близький до еталона ЗВТ за значенням ДХ. У цьому випадку вимірювальна лінія є інерційною і постійна часу ВКТ визначається майже постійною постійною часу датчика. Оскільки суть методу, розробленого в даній роботі, поширюється не тільки на вимірювальну лінію і датчик тиску, але і на весь вимірювальний канал, можна очікувати, що метрологічні властивості ВКТ можуть бути визначені аналогічним чином. З іншого боку, динамічні характеристики датчика і ЗВТ не завжди можуть збігатися. Тому необхідно визначати постійний струм як всієї ВС, так і її компонентів.

В наявних на сьогоднішній день ЗВТ визначаються лише статичні властивості датчика тиску на спеціальному стенді, регулювання якого не

призводить до зміни ДХ. Як свідчить аналіз нормативно-правової бази з метрологічного забезпечення, національні стандарти та інші документи національної системи забезпечення єдності вимірювань при визначенні ДХ трубопроводів та засобів вимірювальної техніки не розроблені, а нові експлуатаційні вимоги вже вимагають їх розробки. У цьому контексті ключовими питаннями є стандартизація та визначення динамічних характеристик труб і оцінка похибок визначення ДХ труб. Розглянемо їх більш детально нижче.

3.1 Стандартизація та динамічна характеристика каналів вимірювання тиску

Одним з основних завдань метрологічного забезпечення є нормування та визначення динамічних характеристик труб та обладнання.

Для нормування всього ДХТ встановлюються вимоги до залежності цих характеристик від входної дії, наявності різних дестабілізуючих факторів, які неможливо розрахувати, зміни ДХТ внаслідок старіння елементів ДХТ тощо. Для нормування всіх динамічних характеристик необхідний кількісний опис параметрів, що нормуються. У цій роботі буде перевірено лише вимоги до часткових ДХ, зокрема до сталої часу трубки, але також буде проведено аналіз повних ДХ. Для останнього були розроблені моделі для різних термінів служби трубчастих виробів на основі експериментів зі штучного старіння. Безсумнівно, існують відмінності між цими моделями і реальними ВКТ. Запропонований метод використовується для корекції моделей для різних термінів служби.

У цьому дослідженні для визначення повних динамічних (імпульсних або перехідних) характеристик використовується розкладання в ряд. Тому для отримання загальної характеристики необхідно визначити, серед іншого, такі типи коефіцієнтів a_i , U_0 , $\tau_{ек}$. Якщо імпульсна характеристика визначається як функція кількох невідомих, можуть виникнути помилки у визначенні

коефіцієнтів a_i , U_0 і $\tau_{ек}$. Тому виникає задача нормалізації динамічних характеристик каналу шляхом встановлення вимог до точності визначення цих коефіцієнтів. Як показує аналіз подібних задач, похибка у визначенні цих коефіцієнтів не повинна перевищувати від 10 % до 20 %. Статистичне моделювання, проведене в цій роботі, показує, що похибка у визначенні цих коефіцієнтів не повинна перевищувати декількох відсотків, а отже, ці вимоги виконуються. У загальному випадку чисельні вимоги слід задавати окремо для кожної ВКТ, щоб апріорне знання ДХ ВКТ було завжди відомим і можна було уникнути появи "фіктивних" розв'язків, навіть якщо генетичний алгоритм погано налаштований.

Оскільки результати розв'язання оберненої задачі вимірювання використовуються для створення бази даних еталонних поведінок входів, особливі вимоги ставляться до точності відновленого вхідного сигналу ВКТ. Як зазначено в дослідженні, кількість послідовних елементів не повинна перевищувати 40, але, як показують результати виконаного автором моделювання, для окремих вихідних сигналів ця кількість може перевищувати 50. В умовах експлуатації трубопроводу, де зміни тиску відбуваються повільно, кількість послідовних елементів, як правило, зменшується до декількох. Збільшення кількості коефіцієнтів ряду збільшує час розрахунку. Збільшення часу спостереження на певний проміжок часу не призводить до суттєвого зниження точності відновлення, але збільшує час розрахунку. Похибки, пов'язані з налаштуванням генетичних алгоритмів, вважаються методичними і не перевищують близько 5 %. Якщо при навчанні нейронної мережі якісним вважається відновлення вхідної поведінки з похибкою менше 10% і кореляцією більше 0,9, то відносні систематичні і випадкові похибки вимірювання вихідного сигналу для відновлення вхідної поведінки не повинні перевищувати близько 20 %. Моделювання наближеного розв'язку оберненої задачі вимірювання показує, що точність відновлення поведінки вхідного сигналу складним чином залежить від точності представлення імпульсної характеристики.

Основною рекомендацією для зменшення залежності параметрів імпульсної характеристики ВКТ від коефіцієнтів ряду Карнена-Лу є використання достовірної апріорної інформації про сталу часу ВКТ та діапазон зміни поведінки вхідного сигналу. Це зменшує діапазон пошуку генетичного алгоритму, підвищує точність визначення постійної часу ВКТ і зменшує час обчислень.

Особливу увагу слід звернути на ситуації, коли відбувається раптова зміна стаціонарної поведінки вхідних параметрів і така зміна є корисною. У таких випадках бажано використовувати метод виявлення та вимірювання раптових змін параметрів, розглянутий авторами, які запропонували адаптивне керування смугою пропускання вимірювальної системи при раптових змінах статистичних характеристик вхідного процесу.

Тепер оцінимо похибку визначення постійної напруги ВКТ. Порівняємо отримані результати з результатами експерименту, в якому автор також брав участь. Важливо знати похибки, які вносять реальні канали вимірювання тиску.

3.2 Аналіз точності блоків вимірювання параметрів вихідного сигналу каналів вимірювання тиску

У технічно складних установках канали вимірювання тиску складаються з 2-6 резервних датчиків тиску для забезпечення необхідної надійності вимірювання. Вихідні сигнали з усіх датчиків подаються на технічну розподільну шафу, зазвичай розташовану в диспетчерській. Технічна контактна колодка виконана у вигляді еластичного самозатискного пристрою. Для простоти, надійності і наочності кріплення шафи виконані зі стандартних перемичок.

Таким чином, спосіб підключення та конструкція технологічної шафи дозволяє підключати вимірювальну апаратуру до диспетчерського пункту центру управління.

В ході досліджень автором було розроблено чотириканальну вимірювальну інформаційну систему та побудовано її як окремий блок для вимірювання сигналів датчиків. Схема з'єднання цього блоку з технічною планкою кабіни показана на рисунку 3.3.2.

Вхідні значення опору та ємності для уникнення шунтування вихідних сигналів датчиків вхідним колом вимірювального блоку $R_{вх} \geq 300 \text{ кОм}$ і $C_{вх} \leq 40 \text{ пФ}$. Для вимірювання кожного технологічного параметра ТСО використовують від двох до чотирьох датчиків, розміщених поруч у вимірювальній рамці. Таке резервування датчиків підвищує продуктивність ТСО і дозволяє уникнути проблем з експлуатацією та безпекою в разі виходу датчика з ладу. Цей тип резервування датчиків використовується в схемі вимірювальної системи ТСО для підвищення безпеки та ефективності роботи станції. Якщо відомий постійний струм одного з датчиків, то в деяких випадках канал з цим датчиком можна використовувати як опорний.

Оскільки вимірювання параметрів технологічних процесів на ТСО виконується безперервно цілодобово з документуванням результатів вимірювань, пропонується використовувати це дуплексування для виконання інших завдань метрологічного забезпечення. До таких задач можна віднести набір вимірювальних сигналів для бази даних, що використовується для навчання нейронної мережі.

Проведемо метрологічний аналіз ВКТ. При проектуванні вимірювального каналу необхідно враховувати похибки всіх складових, таких як датчики, перетворювачі (АЦП), інформаційні процесори та пристрої відображення. Оскільки найбільші похибки у вимірювальному каналі спричинені первинним вимірювальним перетворювачем, то основні похибки ВКТ в основному визначаються похибками датчика. Помилки в інших компонентах вимірювального каналу:

- помилка контролера $\varepsilon_k = 0,3 \%$;
- помилка шлюзу $\varepsilon_{ш} = 0,05 \%$;

- помилка ПЕОМ $\varepsilon_{\text{пеом}} = 10^{-6} \%$;
- похибка давача тиску $\varepsilon_p = 0,5 \%$;
- несправності блоку перетворення сигналу (БПС) в каналах тиску $\varepsilon_{\text{БПС}} = 0,5 \%$.

Наведемо приклад використання ентропійних коефіцієнтів для розрахунку результуючих похибок системи контролю для довільного значення довірчої ймовірності. Перевагою цього методу розрахунку результуючої похибки вимірювального каналу є те, що він дає уявлення про закон розподілу цих похибок і дозволяє оцінити довірчу ймовірність і, відповідно, визначити діапазон невизначеності. Похибка датчика тиску нормується до максимального значення згідно з технічним паспортом $\gamma_p = 0,5 \%$. Щоб перетворити це значення в середньоквадратичне відхилення (СКВ), необхідно знати тип закону розподілу похибки.

Похибки датчиків тиску є мультиплікативними і розподілені за нормальним законом розподілу. Якщо значення ймовірності дорівнює 0,98, таблиця нормального розподілу показує, що цій ймовірності відповідають такі межі в $\pm 2.3\sigma$. Отримаємо, що $\sigma_p = 0,5/2,3 = 0,218 \%$, а закон розподілу має наступні параметри – $k = 2,066\varepsilon = 3\chi = 0,577$.

Помилки контролера вказані в специфікації пристрою і здебільшого спричинені помилками АЦП. Ця похибка має значення $\gamma_k = 0,3 \%$, та розподілена за законом рівномірного розподілу. А це значить, що $\gamma_k = 0,3 \%$ приймається за половину ширини рівномірного розподілу, а СКВ визначається як $\sigma_k = \gamma_k / \sqrt{3} = 0,3 / \sqrt{3} = 0,173 \%$. Для рівномірного розподілу $k = 1,73\varepsilon = 1,8$ і $\chi = 0,745$.

Помилка шлюзу $\gamma_{\text{ш}} = 0,05 \%$ адитивна. Вона має трикутний, це пояснюється тим, що вона не залежить від величини вимірюваного сигналу.

Стандартне відхилення трикутного розподілу $\sigma = \gamma_{\text{max}}/\sqrt{6}$, тому $\sigma_{\text{ш}} = \gamma_{\text{ш}}/\sqrt{6} = 0,05/\sqrt{6} = 0,02 \%$. Параметри трикутного розподілу мають наступні значення: $k = 2,02$, $\varepsilon = 2,4$, $\chi = 0,65$.

Припустимо, що похибка комп'ютера, як і похибка контролера ($\gamma_{\text{ПЕОМ}}$), є адитивною і має рівномірний закон розподілу з шириною $\pm 10^{-6}$ %. Тоді середньоквадратичне відхилення цієї похибки становить $\sigma_{\text{ПЕОМ}} = \gamma_{\text{ПЕОМ}} / \sqrt{3} = 10^{-6} \sqrt{3} = 5,78 \times 10^{-6}$ %. Параметри рівномірного розподілу: $k = 1,73$, $\varepsilon = 1,8$ і $\chi = 0,745$.

Таким чином, визначаються всі складові похибки (адитивна та мультиплікативна), закони їх розподілу та СКВ. Визначення сумарної похибки як функції зміни значення самої величини вимірювання здійснюється шляхом ділення всіх складових похибки (адитивної та мультиплікативної). Потім отримують суму адитивних складових, яка є значенням адитивної частини результуючої похибки, і суму мультиплікативних складових.

Для усунення ефекту деформації форми закону розподілу при підсумовуванні похибок всі складові, що підсумовуються, представлені їхніми СКВ. Підсумовування СКВ вихідних компонент дає СКВ адитивної та мультиплікативної складових результуючої похибки.

Обчислення результуючої похибки зводиться до обчислення похибки з урахуванням усіх складових. Вибір методу підсумовування залежить від того, чи є похибки, які підсумовуються, корельованими або незалежними. Переважно відразу визначати корельовані похибки і виконувати їх алгебраїчне підсумовування. Для алгебраїчного підсумовування корельованих похибок необхідно визначити їх знак. Після врахування кореляцій всі похибки можна підсумовувати як незалежні похибки.

Оскільки канал вимірювання тиску не має кореляційної похибки, то результуючу похибку потрібно обчислювати як суму середніх квадратів усіх складових. Похибка для цього каналу містить чотири складові: $\sigma_p = 0,218$ %, $\sigma_k = 0,173$ %, $\sigma_{\text{Ш}} = 0,02$ %, $\sigma_{\text{ПЕОМ}} = 5,78 \times 10^{-6}$ %.

Отже, СКВ похибки ВКТ визначається як:

$$\sigma_p = (\sigma_p^2 + \sigma_k^2)^{1/2} = (0,218^2 + 0,173^2)^{1/2} = 0,278 \approx 0,3 \text{ \%}$$

Одна з компонент сумарної похибки (σ_p) розподілена нормально, а всі інші компоненти (σ_k) – рівномірно. Для визначення коефіцієнта ексцесу та ентропії отриманого розподілу необхідно обчислити вагу дисперсії рівномірної складової від суми всіх дисперсій:

$$p = \sigma_k^2 / (\sigma_p^2 + \sigma_k^2) = \sigma_k^2 / \sigma_p^2 = 0,173^2 / 0,3^2 = 0,33$$

Ексцес цього розподілу визначається наступним чином:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_k p^2 + 6p(1-p) + \varepsilon_p (1-p^2) = 1,8 \cdot 0,33^2 + 6 \cdot 0,33 \cdot (1-0,33) + 3 \cdot (1-0,33^2) = 4,19,$$

а контрексцес $\chi_p = 1/\sqrt{\varepsilon_p} = 1/(4,19)^{1/2} = 0,5$.

Коефіцієнт ентропії композиції нормального та рівномірного розподілів можна також отримати аналітично, використовуючи апроксимацію, яка апроксимує цю криву:

$$k_\Sigma = k_H - p^{1,4(5,7-k)} [0,14 + 0,4(k_H - k)^2],$$

де p – вага компоненти з ентропійним коефіцієнтом. k ;

k_H – коефіцієнт ентропії нормального розподілу ($k_H = 2,066$).

Отже, згідно з цією формулою, значення k_T буде наступним:

$$k_T = 2,066 - 0,33^{1,4(5,7-1,8)} (0,14 + 0,4(2,066 - 1,8)^2) = 2,0656 \approx 2,066.$$

Значення $k_T = 2,066$ відповідає нормальному закону розподілу, тому сума нормального та рівномірного розподілів у нашому випадку дає значення похибки, які розподілені за нормальним законом.

Однак слід зазначити, що через неточність оцінки середньоквадратичного відхилення, яку ми використовуємо – σ_Σ або коефіцієнта ентропії k_Σ , довірча оцінка P_d також має відповідний інтервал невизначеності. Залежність коефіцієнта ентропії k_Σ від співвідношення сум компонент та їхніх ентропійних коефіцієнтів показано в Додатку А. Тому результати P_d округлено до найближчих двох цифр. Так, $P_d = 0,899 + 0,1818/4,19 = 0,95$, тобто $\gamma_T = 0,62\%$ відповідає $\gamma_{0,95}$.

Підхід до економетричного аналізу на основі коефіцієнта ентропії дозволяє

- не задавати значення ймовірностей на основі довільних рішень;
- приймати інтервали довірчих значень, а також визначати точність вимірювання відповідно до концепції невизначеності вимірювання, оскільки коефіцієнт ентропії використовується при обчисленні стандартної невизначеності кожної складової сумарної невизначеності, розрахованої за типом В (за відсутності множинних спостережень, що дозволяють визначити вплив цієї складової) Точність вимірювання може бути визначена відповідно до концепції невизначеності вимірювання.

Похибка вимірювання, отримана за допомогою експериментальної установки, є значно меншою, ніж похибка, отримана за допомогою самого методу. Оцінимо точність, отриману за допомогою самого методу.

3.3 Встановлення вимог до точності методів визначення динамічних характеристик каналів вимірювання тиску

Методи визначення ДХ каналу вимірювання тиску є ефективними за наявності адекватного метрологічного забезпечення для задоволення вимог до точності: просторової та часової нестабільності роботи ЗВТ, наявності засмічень або повітря у вимірювальній лінії, нестационарності процесу вимірювання тиску в трубці, похибок вимірювання тиску в трубці, при розв'язанні обернених задач вимірювання. Аналіз джерел похибок, які найбільше впливають на точність визначення ДХ, таких як похибки відновлення вхідного сигналу тиску, неточності визначення еталонного ДХ трубки та ін.

Просторово-часова нестабільність роботи ВКТ та наявність шкідливих неоднорідностей у вимірювальній лінії спричиняють нестационарність вихідного сигналу ВКТ. У розділі 2 показано, як можна усунути цю нестационарність без суттєвого погіршення інформації про сталу часу ВКТ. Таким чином, метод працює зі стаціонарними вихідними сигналами. З іншого боку, час реалізації вихідного сигналу може бути коротким (до десятків секунд), що є достатнім для визначення сталої часу ВКТ шляхом розв'язання оберненої задачі вимірювання

за допомогою функції (2.5). Рациональна кількість доданків у (2.5) повинна бути визначена раніше (рис. 3.3 а). З іншого боку, час такої реалізації має бути тривалим (до 10 хвилин), щоб забезпечити базу даних вхідними сигналами для навчання нейронної мережі.

Цей час забезпечить усунення нестационарності вихідного сигналу. Таким чином, для того, щоб гарантувати похибку визначення сталої часу ТСД шляхом розв'язання оберненої задачі вимірювання алгоритмом нейронної мережі під час навчання, інтервал спостереження за вихідним сигналом ТСД повинен бути не менше 10 хвилин. Цей час дозволяє мінімізувати похибку визначення постійної часу нейронною мережею (рис. 3.3 б). На точність визначення сталої часу впливає рівень похибки вимірювання вихідного сигналу ТХД. Чутливість удосконаленого методу до систематичних та випадкових похибок вимірювання вихідного сигналу є різною (рис. 3.4).

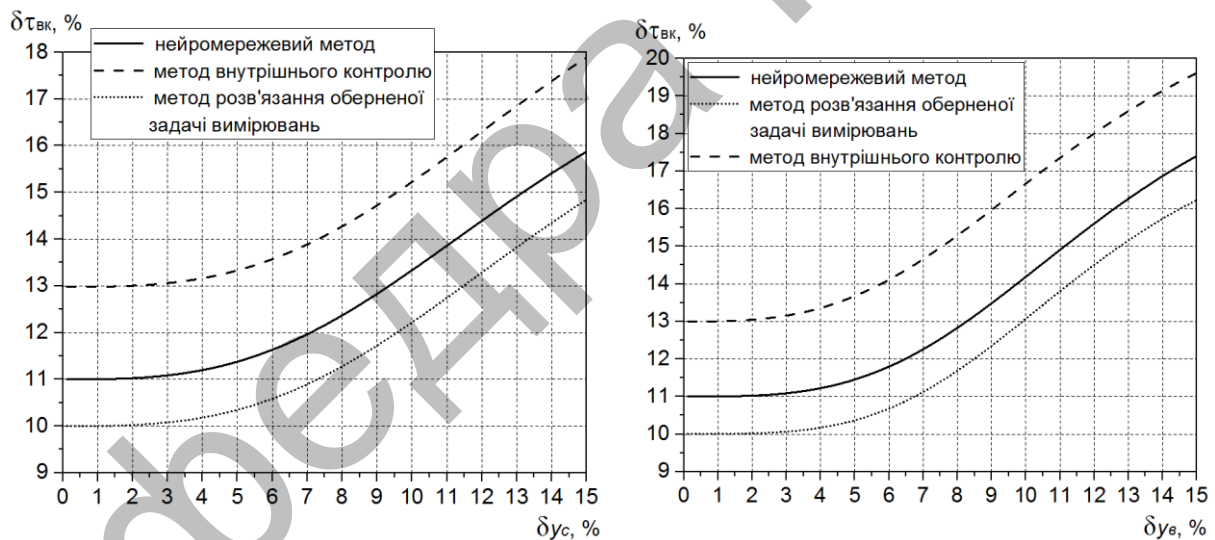


Рисунок 3.4 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\Delta\tau_{вк}$ від величини відносних випадкової $\Delta y_{в}$ (а) та систематичної $\Delta y_{с}$ (б) похибок вимірювання вихідного сигналу ВКТ

За наявності достовірних апріорних даних найменші похибки у визначенні сталих часу мають метод оберненої задачі вимірювання та метод нейронних мереж, про що свідчать результати математичного моделювання на основі 50 вибірок вихідного сигналу. Допустимий рівень цих похибок залежить від

відповідного методу. Наприклад, у випадку методу розв'язання оберненої задачі вимірювання систематична похибка вимірювання вихідного сигналу не повинна перевищувати 3,5 %, а випадкова похибка – близько 1 %, щоб похибка визначення сталої часу ВКТ не перевищувала 10 %. У випадку з внутрішнім контролем ці цифри виглядають наступним чином: $\delta\tau_{вк} = 13\%$, $\delta y_c = 3\%$, $\delta y_g = 3\%$, для нейромеревих методів: $\delta\tau_{вк} = 11\%$, $\delta y_c = 3.7\%$, $\delta y_g = 5\%$.

Рівень цих похибок сильно залежить від співвідношення сигнал/шум на виході TCD (рис. 3.5 а). Для того, щоб задовольнити вимоги до похибки $\delta\tau_{вк} = 10\%$ всіх методів, що розглядаються в цій роботі, мінімально допустиме відношення сигнал/шум повинно перевищувати 10 дБ. Оскільки основою для визначення сталої часу ВКТ є наявність бази даних відновлених вхідних сигналів, необхідно ставити вимоги до точності їх відновлення, залежність похибки визначення сталої часу ВКТ від похибки відновлення вхідного сигналу була визначена шляхом математичного моделювання і показана на рисунку 3.5 б. При досягненні похибки 10 % похибка визначення сталої часу ВКТ зростає приблизно на 50 % (рис. 3.5 б). Для забезпечення похибки визначення сталої часу ВКТ $\delta\tau_{вк} \pm 1.5\%$ похибка відновлення вхідного сигналу δx не повинна бути гіршою $\pm 2.5\%$ як у методі внутрішнього контролю, $\pm 3\%$ так і в методі нейронної мережі.

Всі вимоги щодо метрологічного забезпечення визначення сталої часу ВКТ повністю застосовні до визначення інших характеристик постійного струму, зокрема перехідних та імпульсних. Графіки на рис. 3.3-3.5 можуть бути використані для визначення границь похибки вимірювання вихідного сигналу та відновлення вхідної характеристики, а також для оцінки впливу відношення сигнал/шум на точність визначення сталої часу ВКТ. Крім того, в умовах, коли випадковий процес тиску є нестационарним, необхідно визначити якість усунення певних нестационарностей, які можуть впливати на точність визначення постійної часу. Критерій залишкової нестационарності визначається у відсотках наступним чином: $\xi = \eta_{mp} + \eta_{nep}$, де η_{mp} – некомпенсована трендова

складова нестационарного процесу; $\eta_{пер}$ – некомпенсована періодична складова нестационарного процесу. Залежність відносної похибки визначення сталої часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від остатків нестационарності ξ приведена на рис. 3.6.

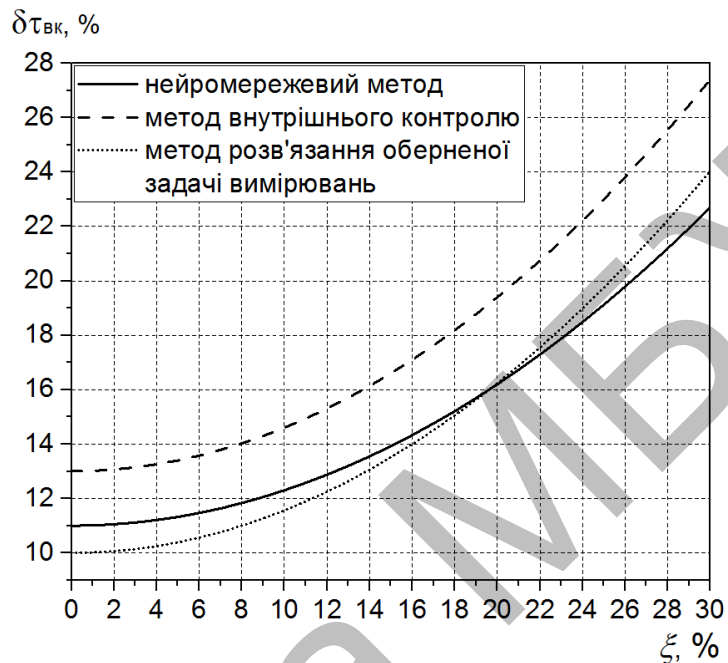


Рисунок 3.6 – Залежність відносної похибки визначення сталої часу ВКТ від нестационарності технологічного процесу

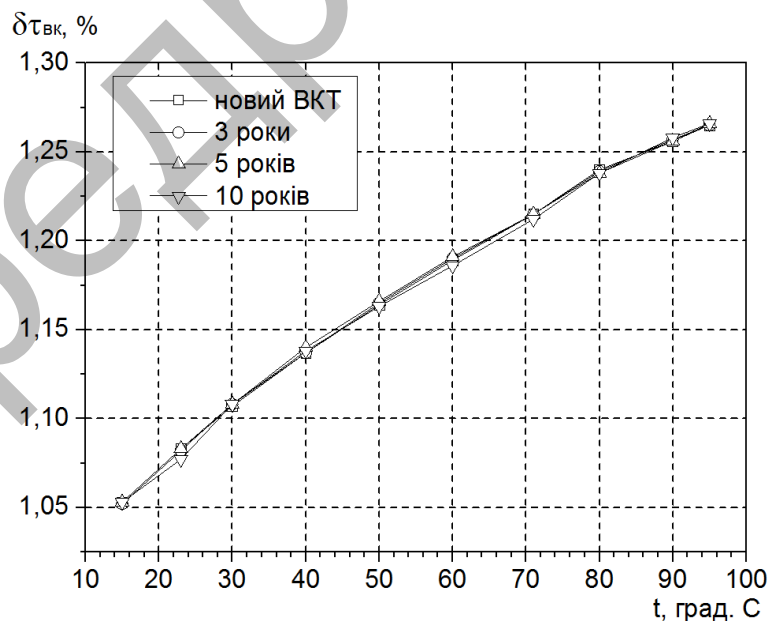


Рисунок 3.7 – Залежність відносної похибки визначення сталих часу методом нейронної мережі від температури на вході та тривалості експлуатації трубки

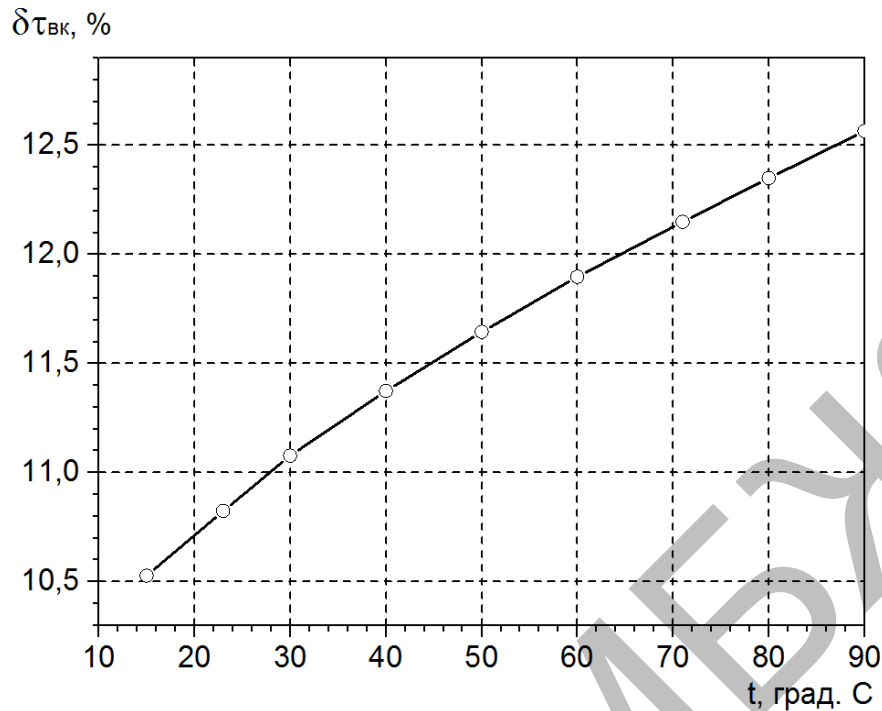


Рисунок 3.8 – Залежність середньої відносної похибки від температури на вході при визначенні сталої часу ВКТ з оберненою задачею вимірювання

Дослідження показало, що критерій нестационарності не повинен перевищувати 8 % для методу оберненої задачі вимірювання і 6 % для методів внутрішнього контролю та нейронної мережі. Також визначено залежність відносної похибки визначення сталої часу вдосконаленим методом від температури на вході (температури охолоджувальної води) та тривалості роботи трубки. Незалежно від тривалого робочого рівня константа часу може бути точно визначена нейромережовим методом – $\delta\tau_{вк} \leq 1.3\%$ (рис.3.7). Метод оберненої задачі вимірювання дозволяє визначити постійні часу з відносними похибками $\delta\tau_{вк} \leq 12.5\%$ у всьому діапазоні температур охолоджувальної води (рис.3.8).

3.4 Висновки до розділу

1 Для нормалізації динамічних характеристик каналу вимірювання тиску необхідно оцінити вплив різних дестабілізуючих факторів та визначити вимоги до факторів, що впливають на точність визначення сталої часу удосконаленим методом.

2 Похибка визначення сталої часу каналу вимірювання тиску залежить від трьох удосконалених методів, описаних в даній роботі. Для забезпечення допустимої похибки 10 % у визначенні сталої часу каналу вихідний сигнал повинен вимірюватися з систематичною похибкою, що не перевищує 3,5 % для методу розв'язання оберненої задачі вимірювання, 3 % для методу внутрішнього контролю та 3,7 % для методу нейронної мережі. Отже, випадкові похибки цих методів не повинні перевищувати 1 %, 3 % і 5 %.

3 Точність трьох методів сильно залежить від відношення сигнал/шум, але якщо відношення сигнал/шум більше 10 дБ, то похибка вимірювання постійної часу каналу не повинна перевищувати 10 % при врахуванні інших факторів впливу.

4 Методи внутрішнього контролю та нейронних мереж використовують реконструйовані вхідні сигнали в базах даних. Похибка відновлення таких сигналів не повинна перевищувати 3 %.

5 Всі методи, що розглядаються в цій статті, базуються на використанні стаціонарних сигналів. Для цього нестаціонарність усувається протягом від 10 хвилин до 15 хвилин шляхом статистичної обробки. Залишкова нестаціонарність повинна бути в межах від 6 % до 8 %.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

На сьогодні ситуація у сфері охорони праці є досить складною в частині проведення атестації робочих місць за умовами праці, від якої залежить реалізація прав працівників на здорові та безпечні умови праці, пільгове пенсійне забезпечення, пільги та компенсації за роботу в несприятливих умовах.

Наприклад, відповідно до Закону України "Про охорону праці" № 2694-ХІІ від 14 жовтня 1992 року (Закон № 2694), роботодавці зобов'язані проводити атестацію робочих місць і за її результатами вживати заходів щодо усунення небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Вони також зобов'язані забезпечити проведення медичних оглядів працівників, зайнятих на важких роботах та роботах зі шкідливими і небезпечними умовами праці. Також, відповідно до Закону України від 5 листопада 1991 року № 1788-ХІІ "Про пенсійне забезпечення" (далі – Закон № 1788), результати атестації робочих місць використовуються для складання списків виробництв, робіт, професій, посад і показників для призначення пенсій за віком на пільгових умовах.

Згідно з Положенням про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці, однією з найактуальніших проблем сучасної промислової гігієни є комплексний контроль за умовами праці, профілактика травматизму, професійних і загальних захворювань, підтримка вагомості служб охорони праці та організаційних структур з оцінки умов праці на робочих місцях [1]. Вирішення проблем комплексного контролю гігієнічних і санітарно-гігієнічних умов на робочих місцях та автоматизація процесу розрахунку оцінок вимірювань національних лабораторій дозволить прискорити їх впровадження як основних факторів, що впливають на порівнянність результатів випробувань.

Атестація робочих місць включає, серед іншого, гігієнічні дослідження факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудових

процесів на робочих місцях. Ці дослідження нерозривно пов'язані з вимірюванням.

Гігієнічні та санітарно-гігієнічні фактори визначаються на основі інструментальних вимірювань відповідних показників. При цьому комплексний контроль ускладнюється тим, що всі вимірювання, пов'язані з атестацією робочих місць, повинні проводитися під час роботи, тобто в процесі виробництва відповідно до технічних регламентів, з використанням справних і ефективно функціонуючих засобів індивідуального та колективного захисту і засобів вимірювальної техніки, що зазначені у відповідних нормативних документах з методик виконання вимірювань.

Діяльність, пов'язана з безпечним управлінням вимірюваннями та умовами праці, входить до сфери законодавчо регульованої метрології.

Атестація випробувального обладнання проводиться з метою визначення нормованих характеристик випробувального обладнання, його відповідності вимогам нормативних документів та придатності до застосування.

До нормованих характеристик точності випробувального засобу належать встановлені нормативними документами (у тому числі методами випробувань, методиками виконання вимірювань та експлуатаційними документами) характеристики, що визначають здатність засобу відтворювати та підтримувати режим і умови випробувань з необхідною точністю та стабільністю протягом заданого часу і в заданому діапазоні.

Сертифікації підлягає випробувальне обладнання, яке відтворює умови випробувань (нормовані зовнішні фактори впливу та/або навантаження):

- під час експлуатації.
- під час введення в експлуатацію випробувального обладнання після транспортування та тривалого зберігання;
- після ремонту, модернізації або капітального ремонту стаціонарно встановлених базових засобів, якщо нормовані характеристики точності можуть змінитися в результаті вищевказаних операцій;
- у разі погіршення якості продукції, що випускається.

Повірка засобу вимірювальної техніки – це комплекс робіт з повірки, маркування та/або видачі свідоцтва про повірку засобу вимірювальної техніки, що визначає та підтверджує відповідність засобу вимірювальної техніки встановленим вимогам.

Повірка проводиться відповідно до вимог Порядку проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів (затверджений наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 8 лютого 2016 року № 193).

Періодичній повірці підлягають законодавчо регульовані засоби вимірювальної техніки, визначені Переліком категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці (постанова Кабінету Міністрів України від 04 червня 2015 р. № 374), тобто засоби вимірювальної техніки, що застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології, тобто засоби вимірювальної техніки, що застосовуються у наступних видах діяльності. Необхідно виконати наступні роботи:

- 1) захист життя та здоров'я цивільного населення;
- 2) контроль якості та безпеки харчових продуктів і лікарських засобів
- 3) моніторинг стану навколишнього середовища
- 4) управління безпекою умов праці
- 5) управління безпекою дорожнього руху та технічним станом транспортних засобів
- 6) геоморфологія, геодезія, картографія, гідрометеорологія та землевпорядні послуги
- 7) комерційні операції та договори між покупцями (споживачами) та продавцями (постачальниками, виробниками, підрядниками), у тому числі транспортні, побутові, комунальні, телекомунікаційні послуги, послуги поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електроенергії, тепла, газу, води, нафтопродуктів тощо)
- 8) обчислення податків і зборів та адміністрування податків і зборів

9) завдання, пов'язані з визначенням параметрів будівель, споруд та зон забудови

10) завдання, пов'язані із забезпеченням технічного захисту інформації відповідно до законодавства

11) завдання, пов'язані з управлінням інформаційними системами

12) роботи з використання глобальної супутникової навігаційної системи

13) завдання, пов'язані з використанням глобальних супутникових навігаційних систем

14) роботи, що проводяться за дорученням органів досудового розслідування, прокуратури та суду

15) роботи, пов'язані з реєстрацією національних та міжнародних спортивних рекордів

16) реєстрація національних та міжнародних спортивних рекордів.

Види повірки:

— Періодична повірка засобів вимірювальної техніки – повірка, що проводиться через певні проміжки часу (міжповірочні інтервали) протягом терміну експлуатації засобу вимірювальної техніки

— Експертна повірка засобів вимірювальної техніки – повірка, що проводиться у разі виникнення спірних питань щодо метрологічних характеристик, придатності до застосування та правильності експлуатації засобу вимірювальної техніки.

— Інспекційна повірка засобів вимірювальної техніки – повірка засобів вимірювальної техніки, що виконується під час проведення метрологічного нагляду

— Тимчасова повірка засобів вимірювальної техніки – повірка засобів вимірювальної техніки, що проводиться у таких випадках:

— коли заявнику необхідно переконатися, що засіб вимірювальної техніки придатний до застосування:

— пошкоджено відбиток повірочного тавра або відсутнє таке тавро;

— втрачено свідоцтво про повірку.

Персонал, відповідальний за виконання завдань з повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації [2] повинен:

- мати документально підтверджену професійно-технічну підготовку з повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки відповідно до заявленої сфери застосування, освітньо-кваліфікаційні рівні молодшого спеціаліста, бакалавра та магістра за інженерно-технічними спеціальностями

- володіти необхідними знаннями для організації та проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки та вміти складати свідоцтва про повірку законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки та сертифікати невідповідності законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, протоколи та звіти про проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки;

- дотримуватися вимог конфіденційності в установленому законодавством порядку та зберігати комерційну таємницю щодо всієї інформації, отриманої під час виконання робіт з повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки на підприємстві;

- забезпечувати збереження законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки в робочому стані, що подаються на повірку.

Персонал, відповідальний за виконання робіт з повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки на підприємстві, повинен знати:

- законодавство України та інші нормативно-правові акти у сфері метрології та метрологічної діяльності

- нормативні документи у сфері метрології та метрологічної діяльності

- основи метрології, основні принципи та методи виконання вимірювань і методи отримання результатів

- методи повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються стосовно категорій законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, зазначених у сфері заявленої компетентності

— принципи функціонування та побудови робочих еталонів, що використовуються під час повірки, а також принципи функціонування та побудови законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються у сфері застосування, яка підлягає повірці.

Персонал, відповідальний за виконання завдань з повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, повинен бути здатним:

— виконувати завдання з повірки відповідно до методики повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації

— оцінювати границі похибки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації

— виконувати необхідні роботи для забезпечення належного функціонування робочих еталонів, допоміжних засобів вимірювальної техніки та допоміжного обладнання, що застосовуються під час повірки

— оцінювати обґрунтованість зв'язку між розширеною невизначеністю робочих еталонів, що застосовуються під час повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та встановленими границями допустимої похибки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, які підлягають повірці;

— точно представляти результати повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації;

— не менше половини персоналу заявника, відповідального за проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки в установі, повинні мати досвід роботи в галузі метрології та метрологічної діяльності не менше одного року;

— персонал, відповідальний за повірку законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки на підприємстві, повинен не рідше одного разу

на п'ять років проходити підвищення кваліфікації з питань повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки на підприємстві, яке він повіряє.

Одним з основних шляхів поліпшення умов праці на промислових підприємствах є впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами. Автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) на промислових підприємствах є необхідною умовою функціонування підприємства в ринковому середовищі, нормальної роботи, запобігання аварійності та високої продуктивності праці. Сучасні АСУ ТП, розроблені з використанням програмованих мікропроцесорних контролерів, не тільки забезпечують виконання всіх необхідних функцій, але і надають широкий спектр додаткових функцій, забезпечують високий ступінь надійності, мають високорозвинену, гнучку структуру і високоефективні людино-машинні інтерфейси. Оснастити підприємство такою системою управління можна двома способами: 1) шляхом проектування та встановлення АСУ ТП безпосередньо під час будівництва нового підприємства, або 2) шляхом реконфігурації існуючої АСУ ТП шляхом заміни основного обладнання (вимірювальних приладів, виконавчих механізмів, логічних частин АСУ ТП).

Єдиний спосіб задовольнити сучасні вимоги до виробництва, енергопостачання та енергозбереження – встановити сучасні мікропроцесорні системи управління з високоточними і надійними датчиками і виконавчими механізмами.

Системи управління технологічними процесами проектуються як децентралізовані інформаційно-керовані людино-машинні системи, призначені для тривалої роботи в режимі реального часу і автоматичного управління будь-яким технологічним обладнанням, керованим системою управління.

Основними перевагами впровадження АСУ ТП є:

1. Підвищення надійності роботи обладнання та зниження ризику великих аварій.

2. Забезпечення автоматичного та ефективного управління технологічними процесами в нормальних, тимчасових і передаварійних режимах роботи з метою випуску продукції заданої якості та кількості.

3. Захист обладнання та персоналу в разі виникнення аварій.

4. Поліпшення умов праці операторів.

5. Забезпечення оперативного персоналу достовірною та своєчасною інформацією про технологічні процеси, обладнання та технічні засоби контролю.

6. Надання персоналу повної ретроспективної інформації для аналізу, оптимізації та планування роботи обладнання та його ремонту:

— при створенні АСУ ТП враховуються критерії ефективності АСУ ТП, які кількісно виражаються в наступних показниках:

— витрати на ремонт обладнання, залежать від надійності обладнання та ефективності ремонтної програми;

— витрати на технічну протидію АСУ ТП визначаються темпами впровадження та розвитку АСУ ТП;

— зменшення кількості пристроїв та кабелів АСУ ТП.

Висока продуктивність АСУ ТП досягається за рахунок використання сучасних програмних засобів, які обґрунтовують:

— реалізацію особливо складних алгоритмів управління та регулювання;

— оптимальний зв'язок (інтерфейс) «людина-машина»;

— розширені інформаційні функції АСУ ТП;

— адекватну діагностику технологічного обладнання та засобів АСУ ТП;

— високу живучість та надійність системи при відмові її окремих елементів;

— спрощення керування технологічним обладнанням.

Ці системи характеризуються наступними особливостями:

— застосування самостійних розробок і дослідницького досвіду у створенні заводських інформаційно-вимірювальних каналів для АСУ ТП на підприємствах;

— обов'язковий економічний аналіз шляхів оптимізації проектних рішень при створенні АСУ ТП та шляхів зменшення витрат замовника на постачання електротехнічного обладнання та матеріалів;

— досвід реконфігурації релейно-контактних систем управління (в тому числі на базі локальних апаратних засобів) і заміни їх на мікропроцесорні з мінімальними витратами і максимальною ефективністю (включаючи аналіз використання існуючої електропроводки);

— обов'язкове впровадження енергозберігаючих технологій шляхом поширення:

— пристроїв плавного пуску та частотного регулювання для живлення нових та модернізації існуючих електроприводів напругою 0,4 кВ та 6 (10) кВ;

— компенсаторів реактивної потужності;

— остаточне рішення про конфігурацію системи управління приймається компанією після комплексного, безпосереднього обстеження, детального аналізу особливостей експлуатації та обладнання;

— комплексне проектування, постачання обладнання та введення в експлуатацію від однієї компанії..

Основною відмінністю автоматизованих систем управління технологічними процесами є економічно прораховане поєднання високоякісного обладнання зарубіжних виробників і перевіреного вітчизняного обладнання, що дозволяє максимально оптимізувати витрати на систему автоматизації.

В результаті впровадження автоматизованої системи управління технологічним процесом було досягнуто наступне:

— стала безаварійна робота технологічного обладнання;

— підвищення оперативності та надійності роботи АСУ ТП

— значне поліпшення всіх економічних показників роботи заводу;

— продовження терміну служби обладнання; зниження трудовитрат і витрат на ремонт;

— значне поліпшення показників енергозбереження;

— відповідність вимогам національних та міжнародних стандартів виробництва.

Структура АСУ ТП заводу являє собою функціонально і територіально розподілену трирівневу багатоступінчасту систему, що включає в себе:

- 1) загальнозаводський рівень управління: виконує функції управління та відображення інформації про всі системи заводу (мікропроцесорні засоби);
- 2) нищий рівень (мікропроцесорні засоби), який виконує функції моніторингу та дистанційного керування роботою технічних засобів, а також запису, збереження та архівації інформації;
- 3) блоки нижнього рівня: збір та попередня обробка інформації, автоматичне керування виконавчими механізмами (мікропроцесорні прилади, первинні датчики та виконавчі механізми і кабелі між ними).

Всі рівні з'єднані між собою локальними обчислювальними мережами (вита пара, оптоволокно). Нижній рівень управління АСУ ТП заводу складається з локальної системи автоматичного управління (АСУ), що складається з однієї (або декількох) шаф мікропроцесорних контролерів, призначених для виконання функцій моніторингу та управління обладнанням в межах визначеної технічної функціональної зони.

Технічні показники рівня є наступними:

1. Для загальнооб'єктного рівня та агрегатного верхнього рівня — загальнопромислові персональні комп'ютери, мережеві концентратори та засоби відображення колективного користування (супер-монітори чи проекційні екрани).
2. Для нижнього агрегатного рівня: високонадійні та гнучко-конфігуровані промислові контролери модульного виконання, інтегровані з відповідними модулями вводу/виводу; датчики та виконавчі механізми — вимірювальні перетворювачі тиску (різниці тисків), температури, хімічного контролю та газоаналізу, спеціалізовані датчики (контроль наявності полум'я, переміщення, вологості тощо), запірні та регулюючі арматура, приводи

агрегатів (у тому числі з пристроями плавного пуску та частотного регулювання).

4.1 Висновки до розділу

Основними шляхами покращення умов праці на промислових підприємствах, зниження ризику серйозних аварій та підвищення надійності інформаційно-вимірювальних систем є вдосконалення атестації робочих місць за умовами праці, вдосконалення сертифікації випробувального обладнання, підвищення вимог до персоналу щодо проведення законодавчо регламентованої повірки засобів вимірювальної техніки та впровадження нових технологій в автоматизованих системах управління технологічними процесами.

ВИСНОВКИ

В результаті вирішення науково-практичних завдань, визначених для даної роботи, розглянуто три різні, але тісно пов'язані між собою методи зменшення похибок при визначенні перехідних характеристик датчиків тиску в технічно складних об'єктах.

Основні висновки полягають у наступному:

1. Виявлено та встановлено наступні припущення та обмеження проаналізованих методів визначення динамічних характеристик каналів вимірювання тиску в технічно складних об'єктах:

- вхідний процес каналу вимірювання тиску є квазістаціонарним;
- вхідний шум в межах смуги пропускання каналу вимірювання тиску близький до "білого"; - канал вимірювання тиску має лінійну інерційність;
- канал вимірювання тиску є лінійно-інерційним.

2. Довготривала експлуатація каналу вимірювання тиску довела, що за 10 років експлуатації постійна часу збільшується в (1,5-2) рази і може перевищувати допустиме значення. Встановлено, що тривала експлуатація елементів каналу вимірювання тиску практично не змінює лінійність робочої ділянки функції перетворення.

3 метою нормалізації динамічних характеристик каналів вимірювання тиску слід оцінити вплив різних дестабілізуючих факторів та визначити вимоги до факторів, що впливають на точність визначення сталих часу сучасними методами.

3. Похибка визначення сталої часу каналу вимірювання тиску залежить від трьох методів, розглянутих у цій роботі. Для забезпечення допуску 10 % при визначенні сталої часу каналу вихідний сигнал повинен вимірюватися з систематичною похибкою, що не перевищує 3,5 % для методу розв'язання оберненої задачі вимірювання, 3 % для методу внутрішнього контролю та 3,7 % для методу нейронної мережі. Отже, випадкові похибки цих методів не повинні перевищувати 1 %, 3 % і 5 %.

4. Точність трьох методів сильно залежить від відношення сигнал/шум, але якщо відношення сигнал/шум більше 10 дБ, то похибка вимірювання постійної часу каналу не повинна перевищувати 10 %.

5. Методи внутрішнього контролю та нейронних мереж використовують реконструйовані вхідні сигнали для своїх баз даних. Похибка відновлення таких сигналів не повинна перевищувати 3 %.

6. Всі методи, що розглядаються в цій статті, базуються на використанні стаціонарних сигналів. Для цього нестаціонарність усувається протягом (10-15) хвилин шляхом статистичної обробки. Залишкова нестаціонарність повинна бути в межах (6-8) %.

Таким чином, на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-практичну задачу розробки вимог до метрологічного забезпечення методів визначення динамічних характеристик каналів вимірювання тиску в технічно складних об'єктах.

Результати досліджень можуть бути використані: у науково-дослідних інститутах для розроблення нормативних документів, що визначають зміст окремих етапів метрологічного забезпечення вимірювань на технічно складних об'єктах ; при проектуванні, випробуваннях та експлуатації каналів вимірювання тиску; для детального аналізу процесів функціонування каналів вимірювання тиску; для підвищення достовірності якості діагностики та випробувань каналів вимірювання тиску; в вищих навчальних закладах для підготовки фахівців у галузі метрології та вимірювальної техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Повірка засобів вимірювальної техніки : ДСТУ 2708:2006. – [Чинний від 03.02.2006] – Київ: ДП "УкрНДНЦ", –18 с. – (Національний стандарт України).
2. Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів ДСТУ 3989-2000 – [Чинний від 25.09.2000] – Київ: ДП "УкрНДНЦ", – 28 с. – (Національний стандарт України).
3. Коваль А. О., Коваль О. А. Просторово розподілені інтелектуальні вимірювальні інформаційні системи: монографія. Харків: Лідер, 2017. 146 с.
4. Коваль А. О. Динамічна нейромережева модель первинного перетворювача / А. О. Коваль, О. В. Полярус, А. О. Подорожняк // Вісник НТУ "ХПІ". – 2014. – №35. – С. 152-155.
5. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для оцінки адекватності моделі вимірювального перетворювача / А. О. Коваль // ІХ МНПК "Метрологія та вимірювальна техніка". – 2014. – С. 23-26.
6. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для досліджень перехідних характеристик давачів тиску / А. О. Коваль // Український метрологічний журнал. – 2015. – №1. – С. 64-67.
7. Полярус О. В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення / О. В. Полярус, Є. О. Поляков. – Харків: Лідер, 2014. – 120 с.
8. Коваль А. О. Вплив тривалої експлуатація датчиків температури на їх динамічні характеристики / А. О. Коваль, О. В. Полярус // ХУПС. – 2014. – № 6. – С. 123-126.
9. Коваль А. О. Прогнозування метрологічної надійності датчиків тиску на техногенно-небезпечних об'єктах / А. О. Коваль // І Всеукраїнська наук. -тех. конф. "Актуальні проблеми автоматики та приладобудування". – НТУ "КПІ", ХНУРЕ, ННЦ "Інститут метрології". – 2014. – С. 79-83.

10. Коваль А. О. Використання методу шумів та online діагностики для вдосконалення метрологічного забезпечення на техногенно небезпечних об'єктах / А. О. Коваль, О. В. Полярус, О. А. Коваль // Вісник НТУ "ХПІ". – 2015. – №35. – С. 152-156.

11. Ігнатов О. С. Прогнозування метрологічної надійності датчиків тиску. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених "Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах". – Харків: ХНАДУ, 2017. – С. 72-75.

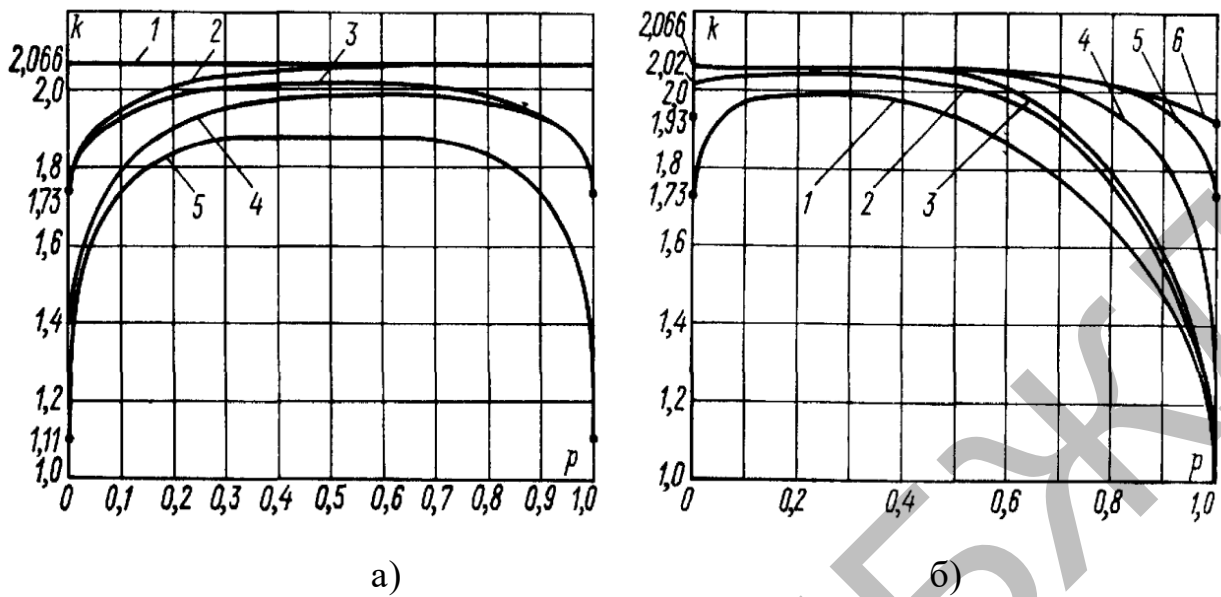
12. Положення про порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці. 2015. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/442-92-%D0%BF>;

13. Деякі питання щодо видачі свідоцтва про уповноваження на проведення повірки засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації та застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології. Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України
Наказ 30.06.2020 м. Київ N 1242. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0862-20#Text>

ДОДАТОК А

Графіки залежності ентропійного коефіцієнта від співвідношення сумованих складових і їх ентропійних коефіцієнтів

Кафедра МБЖД



- Рисунок А1 – Графіки залежності ентропійного коефіцієнта $k\Sigma$ від співвідношення сумованих складових і їх ентропійних коефіцієнтів:
- а) крива 1 – відповідає сумуванню двох складових розподілених нормально;
крива 2 – рівномірна з нормальною;
крива 3 – дві складові розподілені рівномірно;
крива 4 – арксинусоїдальна і рівномірна;
крива 5 – два арксинусоїдальних розподіли;
- б) криві 1-3 відповідають сумуванню рівномірного, трикутного і нормального розподілу з дискретним двохранним розподілом;
криві 4-6 – сумування нормального розподілу відповідно з арксинусоїдальним, рівномірним і експоненціальним.

ДОДАТОК Б
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Кафедра МБЖД

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Факультет механічний
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ
магістра

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ В ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ТИСКУ

Завідувач кафедри, канд. техн. наук, доц.

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц.

Керівник, канд. техн. наук, доц.

Студент гр. ММ-61-22



О. І. Богатов



І. В. Грайворонська



О. А. Коваль



Д. С. Боровіков

м. Харків – 2023

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єкт дослідження — вимірювальний каналу інтелектуальної вимірювальної інформаційної системи тиску.

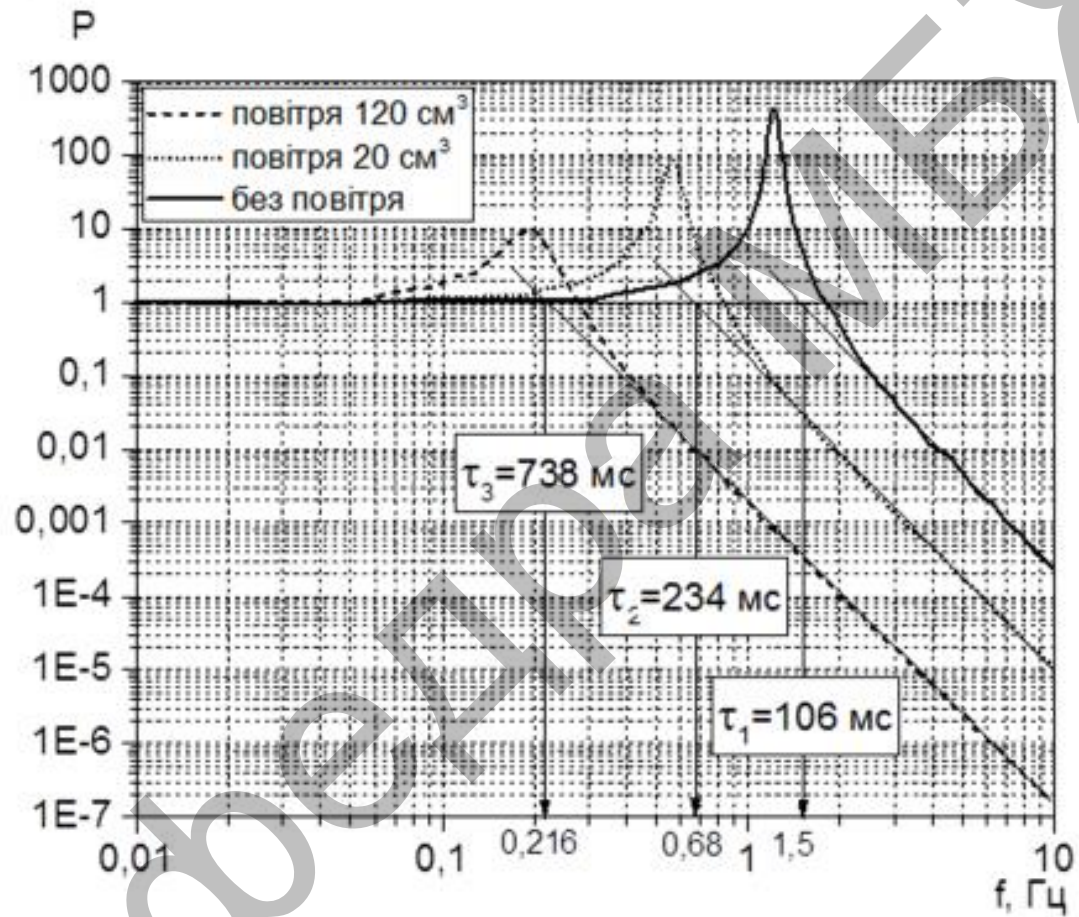
Мета роботи — дослідити методи оцінювання інерційності вимірювальних каналів в просторово розподіленій інтелектуальній вимірювальній системі тиску.

Метод дослідження — спектрального, статистичного та часового аналізу даних вимірювань просторово розподіленої інтелектуальної вимірювальної інформаційної системи тиску.

Предмет дослідження — процес визначення сталих часу вимірювальних каналів у просторово-розподілених інтелектуальних системах вимірювання тиску.

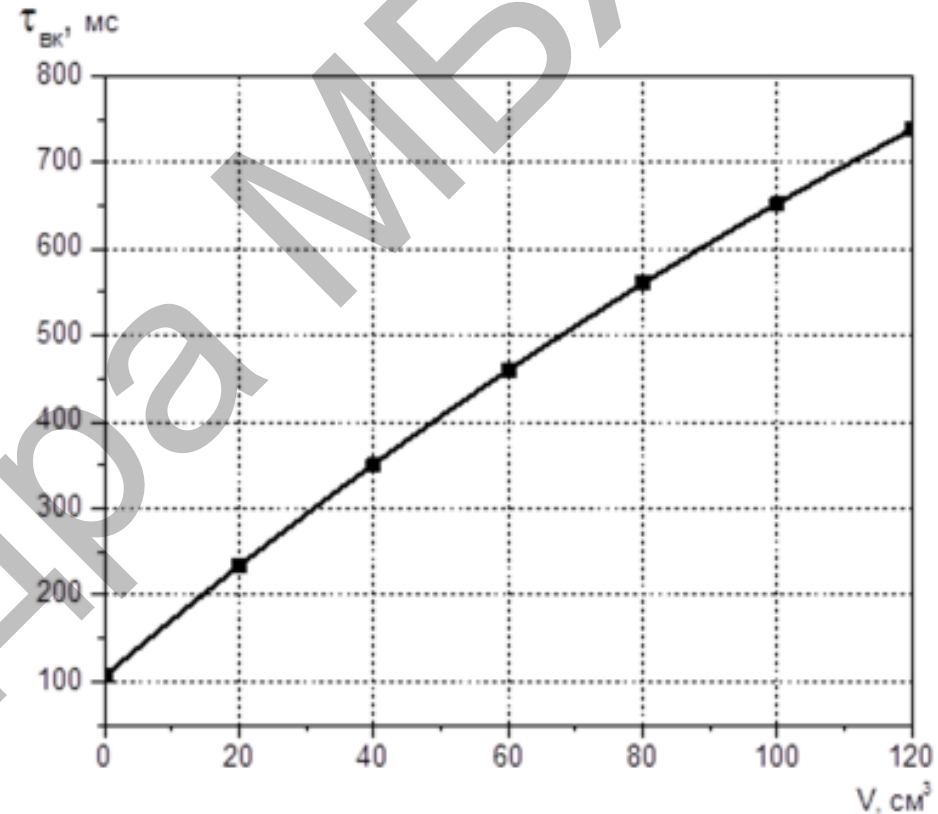
В магістерській роботі проведені дослідження методів визначення сталих часу вимірювальних каналів у просторово-розподілених інтелектуальних системах вимірювання тиску. Розроблено вимоги до нормування метрологічних характеристик діагностичних стендів вимірювальних каналів.

ГРАФІКИ СЩП ПРИ НАЯВНОСТІ ПОВІТРЯ В ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ЛІНІЇ

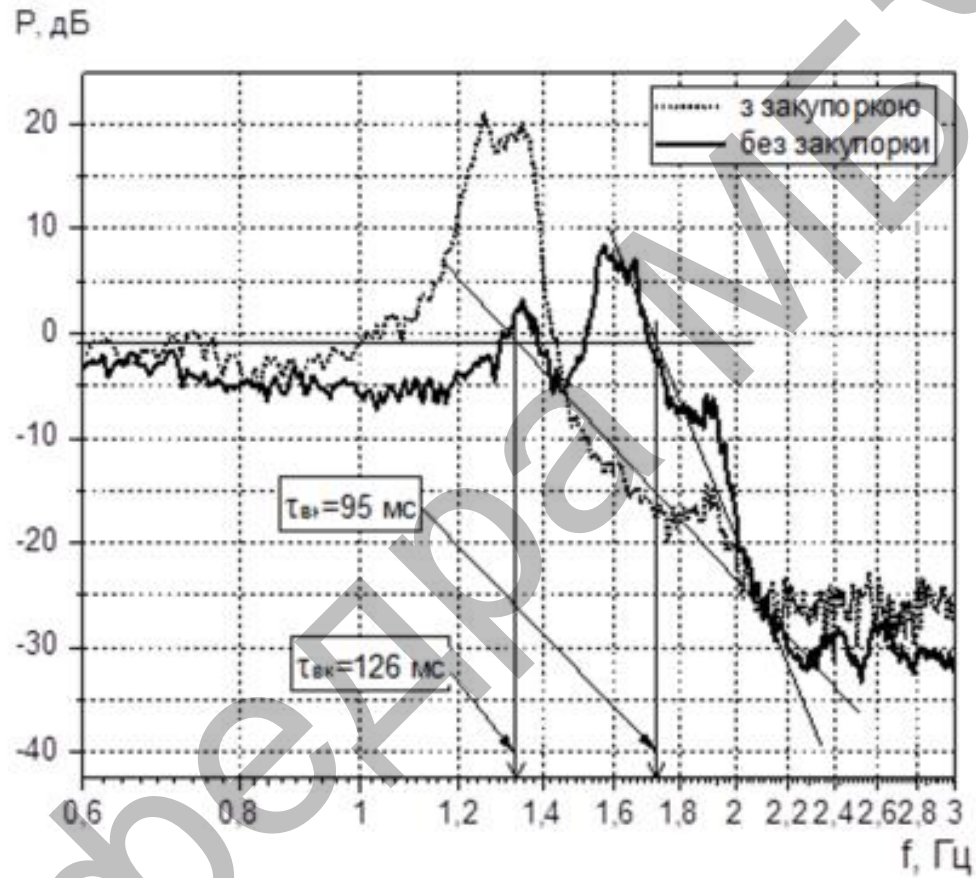


ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОСТІЙНОЇ ЧАСУ ВКТ ВІД ОБ'ЄМУ ПОВІТРЯ У ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ЛІНІЇ

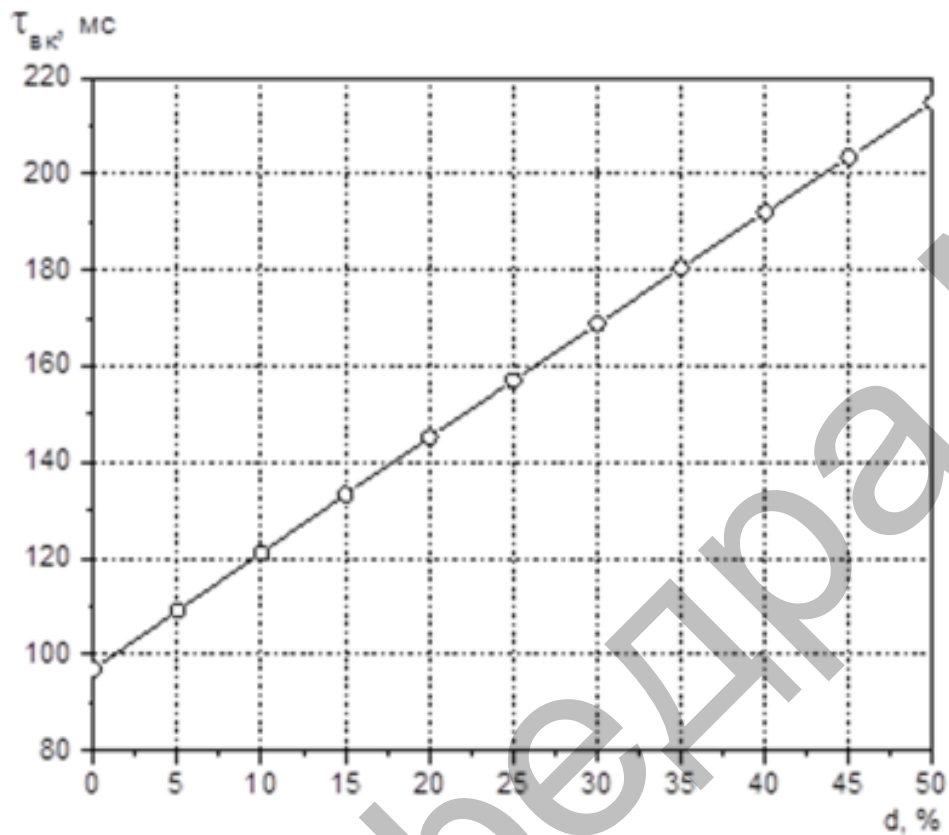
$$\tau_{ек} = 106 + 1664 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{V}{251}\right) \right)$$



СЦП СИГНАЛУ ДЛЯ КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ ПРИ НАЯВНОСТІ ТА ПРИ ВІДСУТНОСТІ ЗАКУПОРОК У ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ЛІНІЇ

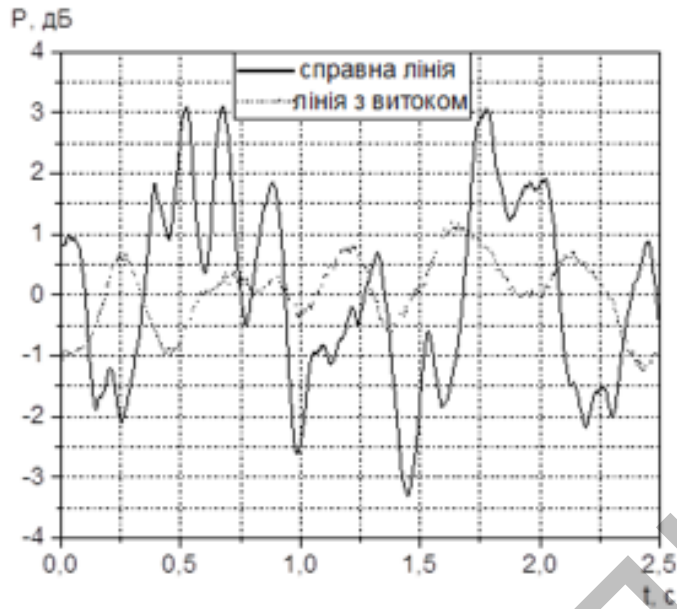


ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОСТІЙНОЇ ЧАСУ ВКТ ВІД ВІДНОСНОЇ ЗАКУПОРКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ

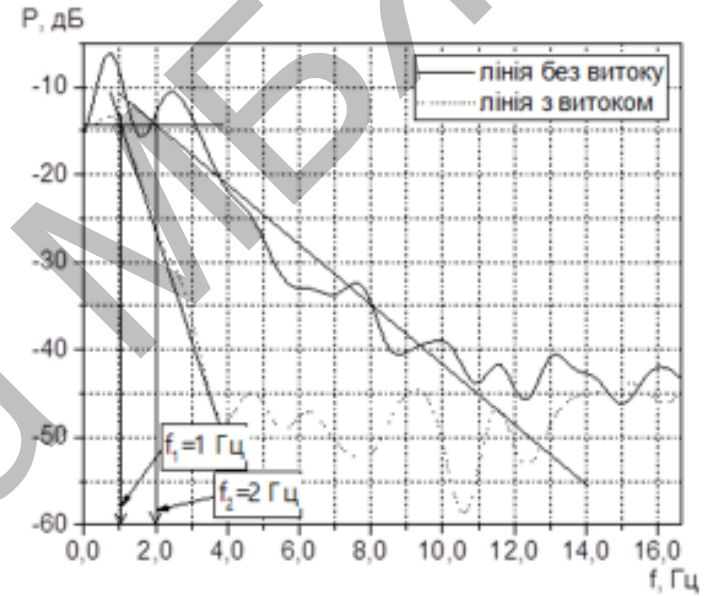


$$d = \frac{\alpha}{\alpha_{\text{макс}}} \cdot 100\%$$

ВПЛИВ ВИТОКУ В ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ЛІНІЇ НА СЦП СИГНАЛУ ВКТ



а)



б)

Рисунок 6 – Сигнал шуму а) та його СЦП б) на виході каналу тиску при відсутності і наявності витокм в вимірювальній лінії

ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВКТ

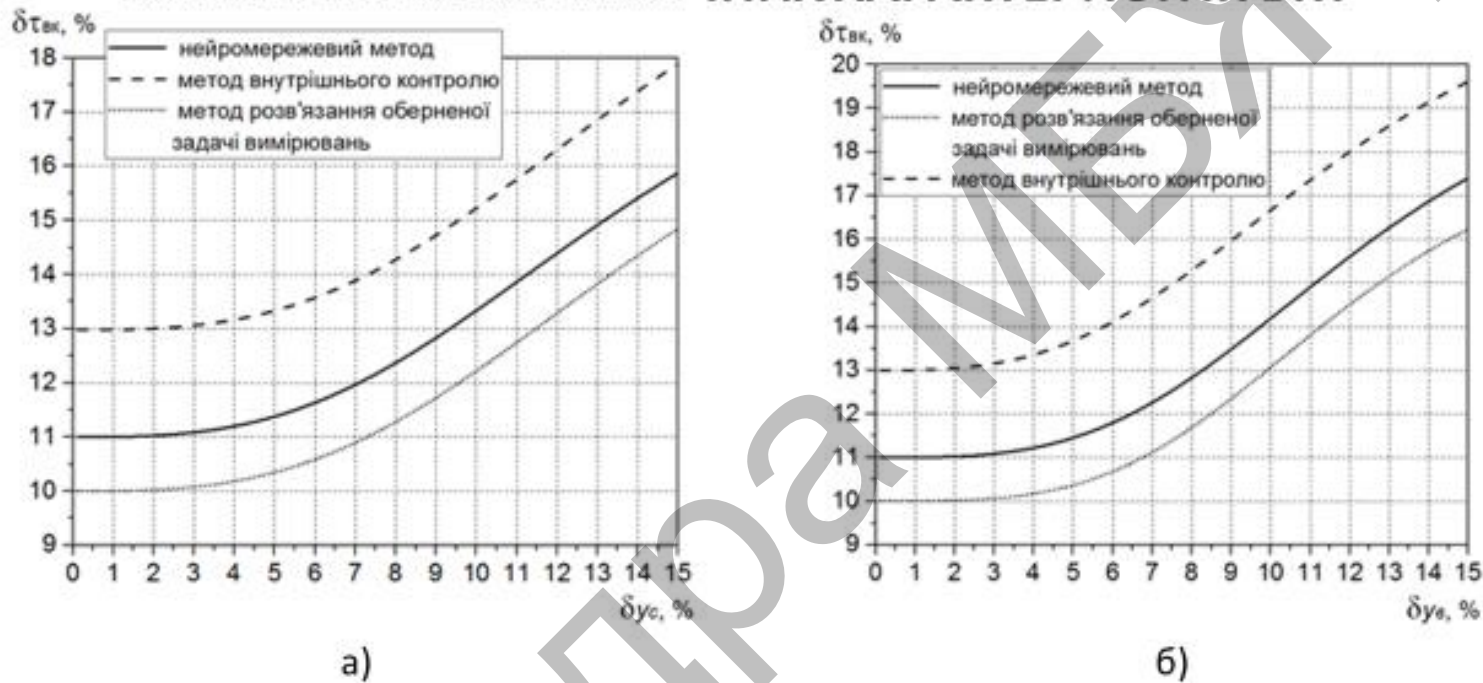


Рисунок 31 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ від величини відносних випадкової (а) та систематичної (б) похибок вимірювання вихідного сигналу ВКТ

ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВКТ

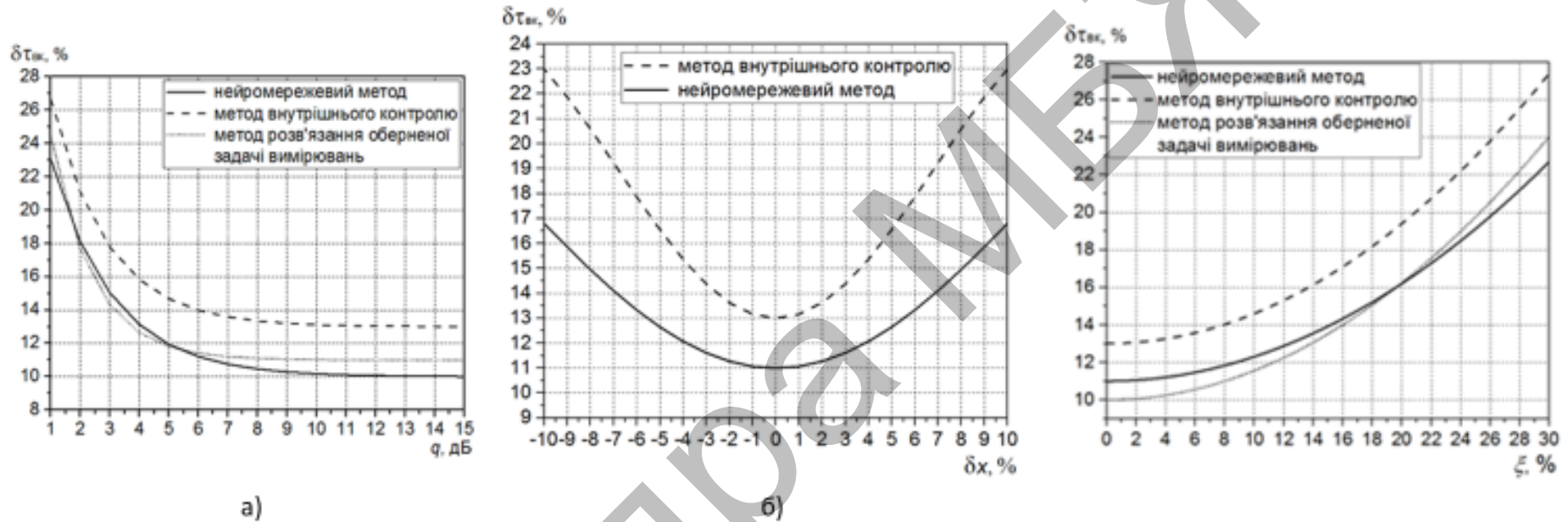


Рисунок 32 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ від величини відносних випадкової (а) та систематичної (б) похибок вимірювання вихідного сигналу ВКТ

Рисунок 33 - Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ від залишкової нестационарності технологічного процесу

ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВКТ

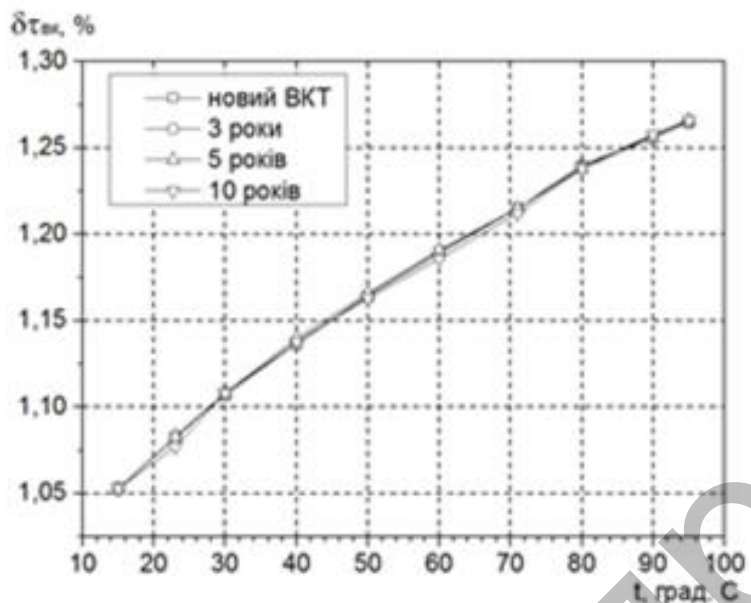


Рисунок 34 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ вимірювань нейронним методом від температури вхідної дії та "старіння" каналу тиску

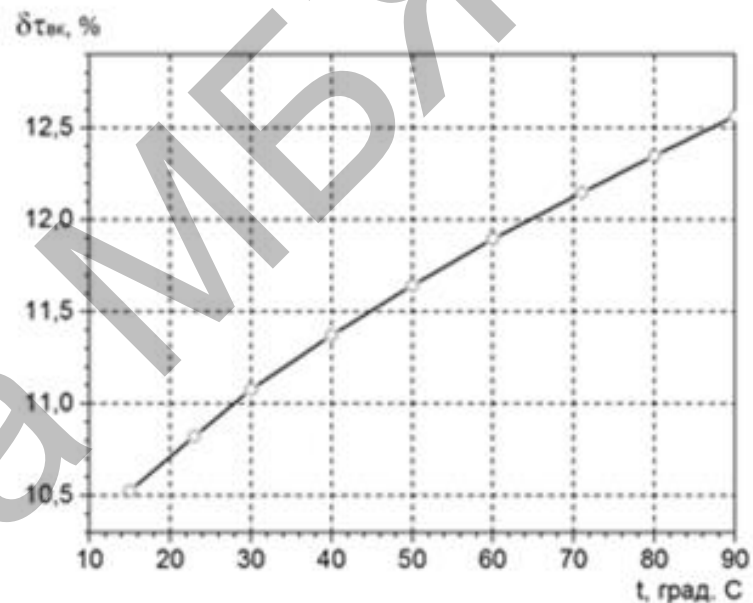


Рисунок 35 – Залежність усередненої відносної похибки визначення постійної часу ВКТ методом оберненої задачі вимірювань від температури вхідної дії

ВИСНОВКИ

1 Розроблено вимоги до метрологічного забезпечення запропонованих методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску. Встановлено основні джерела похибок, що виникають при їх використанні. Для забезпечення похибки визначення постійної часу ВКТ інтервал спостереження вихідного сигналу ВКТ повинен бути не менше 10 хвилин, систематичні та випадкові відносні похибки вимірювання вихідного сигналу ВКТ менше 2%...5%, мінімальне допустиме значення відношення сигнал/шум більше 10 дБ, залишкова нестационарність вихідного випадкового процесу не повинна перевищувати 6%...8%.

Отже, в дипломній роботі магістра на основі всебічних досліджень вирішена актуальна науково-практична задача обґрунтування вимог до метрологічного забезпечення методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску з використанням стенду їх діагностики.