



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Коваль А. О.**

# **ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

**Підручник**

Харків  
2019

## ЗМІСТ

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,<br>СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....                                                 | 5  |
| ВСТУП.....                                                                                                                 | 6  |
| РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ЕТАПИ НАУКОВОЇ ДУМКИ З МЕТОДІВ<br>ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК<br>ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ..... | 13 |
| 1.1 Аналіз використання методу бездемонтажного контролю<br>вимірювальних каналів тиску.....                                | 15 |
| 1.2 Аналіз використання методу online діагностики.....                                                                     | 16 |
| 1.3 Аналіз методів моделювання динамічних хактеристик<br>вимірювальних каналів тиску.....                                  | 17 |
| 1.4 Аналіз аналітичних методів моделювання ДХ вимірювальних<br>каналів тиску.....                                          | 21 |
| 1.5 Аналіз методів моделювання вимірювальних каналів тиску з<br>використанням нейронних мереж.....                         | 31 |
| 1.6 Висновки до розділу.....                                                                                               | 36 |
| РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ<br>ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....                                              | 38 |
| 2.1 Результати досліджень вихідного сигналу вимірювального<br>каналу тиску на стаціонарність.....                          | 39 |
| 2.2 Методика та результати досліджень статичних та динамічних<br>характеристик вимірювальних каналів тиску.....            | 47 |
| 2.3 Дослідження впливу "старіння" датчиків тиску на їх статичні<br>та динамічні характеристики.....                        | 53 |
| 2.3.1 Результати досліджень впливу "старіння" датчиків тиску<br>на їх динамічні характеристики.....                        | 60 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4 Визначення динамічних характеристик вимірювальних ліній<br>вимірювального каналу тиску.....                           | 72  |
| 2.5 Дослідження впливу "старіння" вимірювальної лінії на<br>динамічні характеристики вимірювальних каналів тиску.....     | 76  |
| 2.6 Висновки до розділу.....                                                                                              | 87  |
| РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ<br>ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ.....                                   |     |
| 3.1 Метод визначення постійної часу вимірювального каналу<br>тиску на основі розв'язання оберненої задачі вимірювань..... | 89  |
| 3.2 Визначення динамічних характеристик вимірювального<br>каналу тиску з використанням методу внутрішнього контролю.....  | 102 |
| 3.2.1 Розробка базової моделі вимірювального каналу тиску....                                                             | 104 |
| 3.3 Метод визначення динамічних характеристик на основі<br>нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску.....         | 117 |
| 3.3.1 Нейромережева модель вимірювального каналу тиску.....                                                               | 120 |
| 3.3.2 Критерій і схема навчання нейромережевої моделі<br>вимірювального каналу тиску.....                                 | 125 |
| 3.3.3 Формування послідовностей для навчання<br>нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску.....                    | 128 |
| 3.3.4 Результати математичного моделювання.....                                                                           | 133 |
| 3.3.5 Інверсна нейромережева модель вимірювального каналу<br>тиску.....                                                   | 141 |
| 3.3.6 Критерій зупинки навчання нейронної мережі.....                                                                     | 144 |
| 3.4 Висновки до розділу.....                                                                                              | 161 |
| РОЗДІЛ 4 МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ<br>ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ<br>ЙОГО ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....    |     |
|                                                                                                                           | 162 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Нормування і визначення динамічних характеристик<br>вимірювального каналу тиску.....                                             | 163 |
| 4.2 Аналіз точності блоку вимірювання параметрів вихідного<br>сигналу вимірювального каналу тиску.....                               | 165 |
| 4.3 Обґрунтування вимог до точності вдосконалених методів<br>визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів<br>тиску..... | 172 |
| 4.3 Висновки до розділу.....                                                                                                         | 179 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                        | 180 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                      | 184 |
| Додаток А.....                                                                                                                       | 200 |
| Додаток Б.....                                                                                                                       | 201 |
| Додаток В.....                                                                                                                       | 204 |
| Додаток Г.....                                                                                                                       | 217 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

| Скорочення, термін,<br>позначення | Пояснення                          |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| АЦП                               | Аналогово-цифровий перетворювач    |
| АЧХ                               | Амплітудно-частотна характеристика |
| БПС                               | Блок перетворення сигналів         |
| 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           |
| РЙА                               | Розподіл ймовірностей амплітуд     |
| 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       |
| ЦФ                                | Цифровий фільтр                    |

## ВСТУП

Розвиток сучасних технологій побудови та експлуатації технічно складних об'єктів, в яких істотно підвищується швидкодія окремих систем, потребує нових підходів до вимірювання динамічних характеристик систем, зокрема, вимірювальних каналів тиску. З одного боку, зростають вимоги до методів визначення динамічних характеристик, а, з іншого боку, надійних методів визначення таких характеристик для вимірювальних каналів тиску не існує. Це пов'язано не з технологічними проблемами, а, головним чином, з відсутністю загальновизнаних наукових методів визначення динамічних характеристик подібних каналів. Вдосконаленню таких методів присвячена дана дисертація.

**Актуальність теми.** В Україні експлуатується багато технічно складних об'єктів (ТСО). Їх безпечна експлуатація залежить від ефективного використання автоматичних систем управління технологічними процесами. Якість роботи таких систем, в значній мірі, визначається динамічними характеристиками (ДХ) вимірювальних каналів тиску (ВКТ), до складу яких входять вимірювальні лінії, датчики тиску і лінії зв'язку та живлення. Одним з важливих параметрів, який описує ДХ ВКТ, є його постійна часу. Вона згідно з сучасними вимогами не повинна перевищувати сотні мілісекунд. Це вимагає проведення періодичного контролю ДХ ВКТ, але на практиці подібний контроль відсутній. Реально на ТСО здійснюється тільки калібрування датчиків тиску, яке вимагає великих затрат внаслідок складності демонтажу і монтажу датчиків на об'єкті, а ДХ ВКТ взагалі не визначаються, що, з урахуванням сучасних вимог до постійної часу, є недоліком. Поряд з цим світові тенденції свідчать, що в перспективі велику роль буде грати online діагностика ВКТ в цілому, а не окремих їх елементів. На цей час основним методом визначення постійної часу ВКТ є метод аналізу шумів. Цей метод можна використовувати лише для стаціонарних процесів, оскільки в його

основі лежить лінійна операція перетворення Фур'є. В основі визначення постійної часу методом аналізу шумів лежить графоаналітичний метод, точність якого залежить від відношення сигнал/шум. Зазначений метод реалізується в лабораторних умовах і потребує багато часу (тижні...місяці) для визначення постійної часу ВКТ. Всі операції проводяться в ручному режимі з використанням спеціалізованих програм і статистичних пакетів, що в свою чергу вимагає високої кваліфікації фахівців. Оскільки визначення постійної часу проводиться експертом, то цьому методу властива суб'єктивна похибка. Метод є строго справедливим для лінійних систем, а вимірювальна лінія, яка є елементом вимірювального каналу тиску, при наявності в ній, наприклад, повітря, не завжди може вважатись лінійною. Обробка інформації в зазначеному методі припускає, що закон розподілу вихідних сигналів є нормальний, що на практиці не завжди виконується. Отже, метод аналізу шумів не може без обмежень застосовуватись для вимірювання постійної часу вимірювального каналу тиску.

Звідси випливає необхідність визначення ДХ ВКТ без демонтажу їх складових з об'єкта і такими методами, які б за деякими важливими для практики показниками були кращі, ніж метод аналізу шумів.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ОСНОВНІ ЕТАПИ НАУКОВОЇ ДУМКИ З МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ**

Динамічні вимірювання посідають чільне місце в метрологічній практиці в зв'язку з розширенням областей застосування точних вимірювань, підвищенням швидкодії та точності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). При цьому важливим є дослідження динамічних властивостей ЗВТ, які описуються та нормуються динамічними характеристиками (ДХ), що дозволяє розв'язувати задачі організації процесу вимірювання (вибір та проектування ЗВТ) змінних величин, динамічних вимірювань фізичних величин, оцінювання та корекції (відновлення вхідного сигналу) динамічних похибок ЗВТ при роботі в динамічному режимі.

Розв'язання зазначених задач здійснюється в рамках теорії динамічних вимірювань, що сформувалася в 80 – 90-х роках минулого століття на стику метрології та теорії систем автоматичного регулювання. Істотний внесок у розвиток теорії динамічних вимірювань зробили вчені M. Rayn, B. Mulhall, D. Fang, X. J. Zhe, T. Macher, D. Mowery, C. C. MacLeod, K. R. James, B. Kane, E. Glerean, J. Salmi, J. M. Lahnakoski, B. D. Coller, D. J. Shernoff, М. Д. Вайсбанд, В. А. Грановський, В. І. Губар, П. П. Орнатський, Г. Н. Солопченко, Ю. М. Туз, В. М. Чинков, С. І. Кондрашов, І. П. Захаров, П. Ф. Щапов, Б. Ю. Цветков, Г. Г. Чуновкіна, Ю. С. Етингер та ін. Аналіз робіт цих та інших вчених показав наявність широкого кола досліджень, спрямованих на вдосконалення прямих та непрямих методів визначення ДХ за експериментальними даними та методами математичного моделювання датчиків.

Всі ці дослідження були спрямовані на оцінку та визначення ДХ тільки датчиків тиску з використанням спеціальних стендів та тестових сигналів.



Крім того, слід зазначити, що отримані таким чином ДХ відрізняються від реальних ДХ датчиків в процесі експлуатації – вони не враховують "старіння" датчика. Про це свідчать багаторічні дослідження датчиків технологічних процесів на атомних електростанціях, що проведені доктором Х. М. Хашеміаном [1]. Було виявлено, що тестові сигнали не дають можливості в повній мірі відновити характеристики вимірюваного технологічного процесу. Крім того, слід мати на увазі, що датчик використовується разом з вимірювальною лінією, параметри якої в процесі експлуатації також можуть змінюватися [2]. А це в свою чергу приводить до зміни ДХ вимірювального каналу тиску – "вимірювальна лінія + датчик" [1, 2]. Слід також приймати до уваги те, що вимірювальні лінії на ТСО виготовляються безпосередньо на об'єкті для кожного місця проведення вимірювань індивідуально. Отже, ці лінії мають індивідуальні параметри. Як наслідок, для кожної точки вимірювань параметрів технологічного процесу будуть індивідуальні як функція перетворення вимірювального каналу, так і його ДХ. В процесі експлуатації об'єктових вимірювальних інформаційних систем з заданою періодичністю здійснюється контроль функції перетворення шляхом калібрування датчика тиску по контрольним точкам. ДХ ні датчика, ні вимірювального каналу в процесі експлуатації не оцінюються і не контролюються.

Таким чином, виникає завдання метрологічного контролю як ДХ окремих датчиків, так і ДХ вимірювальних каналів тиску в цілому в процесі експлуатації. Особливо це важливо для технічно складних об'єктів. Враховуючи, те що вимірювальна інформація на них постійно документується, це завдання можна вирішити двома способами:

- методом бездемонтажного контролю;
- методом online діагностики.

### **1.1 Аналіз використання методу бездемонтажного контролю вимірювальних каналів тиску**

Значний вклад в розвиток теорії бездемонтажного контролю внесли такі вчені як Р. G. Armour, J. H. Pollard, Бромберг Е. М., В. П. Малайчук, Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк, С. І. Кондрашов, П. Ф. Щапов, Ю. М. Туз, В. І. Губар та інші. Аналіз наукових досліджень проведених в даному напрямку показав наступне.

В роботі П. Ф. Щапова та ін. [3] розглянуті питання використання статистичних інформаційних технологій обробки апіорі нестационарних вимірювальних сигналів, що дозволяє контролювати метрологічні характеристики термоперетворювачів. Наведена схемна реалізація приладу бездемонтажного контролю метрологічних характеристик термоперетворювачів та принцип його роботи. Розроблений прилад для вимірювання температури дає можливість визначати аварійне відхилення функції перетворення первинного перетворювача датчика температури від номінальної (паспортної) без вилучення його з приладу, тобто здійснювати бездемонтажний контроль (півірку) первинного термоперетворювача, що дозволить підвищити метрологічну надійність приладу вимірювання температури. Даний прилад вбудовується в датчик. Такий підхід не дозволяє прогнозувати та оцінювати метрологічну надійність та ДХ однотипних датчиків як всередині одного ТСО, так і на однакових точках вимірювання на різних ТСО.

В роботах С. І. Кондрашова та ін. [4, 5] розроблено спосіб формування тестового сигналу для контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів з метою визначення динамічних характеристик (ДХ) аналогової частини вимірювальних каналів систем, сформованих на основі нормуючих перетворювачів з статичною характеристикою або перетворювачів з силовою компенсацією, які мають у своєму складі нормуючий підсилювач. Але даний

спосіб може бути реалізований лише на випробувальних стендах.

Таким чином, метод бездемонтажного контролю не дозволяє в повній мірі контролювати ДХ вимірювальних каналів тиску в процесі експлуатації їх на ТСО.

## **1.2 Аналіз використання методу online діагностики**

Метод online діагностики порівняно молодий. Його запропонував використовувати для діагностування справності вимірювальних інформаційних систем та систем управління технологічними процесами Х. М. Хашеміан [2] у 2008 році. Сутність методу online діагностики полягає в тому, що через мережу Internet на віддалений центр обробки передається отримана за певний проміжок часу (місяць, квартал) вимірювальна інформація з кожного вимірювального каналу. В центрі обробки з використанням методів статистичного оцінювання вивчається та прогнозується хід тренду похибок вимірювань як вимірювального каналу так і кожного окремого датчика в процесі безперервної експлуатації без їх демонтажу. За результатами аналізу вимірювальної інформації для кожного датчика розробляються рекомендації щодо доцільності повірки датчика та дається прогноз його метрологічної надійності. Крім того, за характерними спектрограмами оцінюється технічний стан як вимірювальних каналів так і окремих датчиків [1, 2]. Динамічні характеристики вимірювальних каналів оцінюються лише за постійними часу. Постійні часу датчиків оцінюються наближено за крутизною спаду обвідної спектру виміряного сигналу на виході датчика. Слід зазначити, що оцінюється сумарна постійна часу вимірювальної лінії і датчика. Важливим є те, що отримані постійні часу датчиків порівнюються з опорними даними з експертної бази знань. Експертна база знань формується за багаторічними вимірювальними даними по кожному типу датчика з прив'язкою до конкретної точки вимірювань, тобто в експертну базу знань закладаються дані не постійних часу датчиків, а сумарних постійних часу вимірювальних ліній і

датчиків (вимірювальних каналів). При заміні датчика або вимірювальної лінії буде мати невідповідність опорних даних, що потребує корекції експертної бази знань. Крім того, неможливо оцінити яку частку в сумарну постійну часу вимірювального каналу вносить вимірювальна лінія, а яку безпосередньо сам датчик. Завдання ще ускладнюється тим, що на одній вимірювальній лінії встановлюється кілька датчиків (від 3 до 6).

Таким чином, на сьогоднішній день, метод online діагностики не дозволяє оцінити в повній мірі ДХ вимірювальних каналів тиску (ВКТ). Виходом із даного становища може бути зміна методики формування експертної бази знань. В експертній базі знань повинні бути такі опорні дані як ДХ вимірювального каналу, що отримані за результатами тестових випробовувань в точці вимірювань, так і ДХ каналів, які отримані за результатами математичного моделювання передаточної функції каналу з урахуванням його "старіння".

### **1.3 Аналіз методів моделювання динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску**

Методам моделювання ДХ датчиків в рамках теорії динамічних вимірювань присвячено багато робіт. Істотний внесок у розвиток цих методів внесли, зокрема: J. Korbicz, D. Materassi, Tan P. V., G. Millérioux, J. Daafouz, Є. Т. Володарський, Є. Ф. Долинський, М. А. Земельман, О. С. Клейман, Ж. Ф. Кудряшова, В. А. Кузнєцов, М. Ф. Маліков, П. В. Новицький, П. П. Орнатський, В. І. Проненко, С. Г. Рабінович, В. Я. Розенберг, Л. З. Румшиський, Ю. М. Туз, В. М. Чинков, Л. М. Щербак, Г. І. Солопченко, В. В. Леонов, В. А. Грановський, Г. І. Василенко, А. М. Тихонов, А. Ф. Верлань, Ю. Е. Воскобойніков та інші вчені. Методи відновлення динамічно спотвореного сигналу на основі регуляризації А. М. Тихонова [6] представлені, наприклад, у роботах Г. І. Василенко [7], Г. І. Солопченко [8]. Однак ці методи не дозволяють одержати необхідну точність вимірювань у

вимірювальних системах через труднощі одержання імпульсної характеристики датчика.

Окремі методи моделювання перехідних функцій датчиків як елементів ВКТ, наведені у роботах В. А. Грановського [9, 10]. Питання визначення коефіцієнтів перехідних функцій засобу вимірювання за експериментальними даними і зниження порядку передаточної функції розглядається в роботі В. В. Леонова [11]. Завдання визначення вагової та перехідної функції вирішується також у роботах Г. М. Солопченко [8].

Всі розглянуті в [6-11] методи моделювання перехідних функцій (ПФ) датчиків були розроблені в минулому столітті, крім того, вони застосовувались лише стосовно датчика тиску, а ПФ всього вимірювального каналу не моделювалась. Сьогодні технологічні процеси характеризуються великою швидкоплинністю, а вимоги до часу реакції вимірювальних інформаційних систем зросли. Так, постійна часу вимірювального каналу тиску на ТСО не повинна перевищувати 180 мс ( $\tau_{\text{вк}} \leq 180$  мс). Сучасні вимоги, що встановлені американським науково-дослідним інститутом Electric Power Research Institute, ще більш жорсткі ( $\tau_{\text{вк}} \leq 100$  мс). Кількість параметрів, які істотно впливають на роботу ВКТ, також значно збільшилась. В цих умовах моделі каналів тиску повинні бути не тільки повними і достовірними, а і інтелектуальними по відношенню як до вимірюваного процесу і свого технічного стану та алгоритму вимірювання, так і до навколишнього середовища. З урахування сучасних вимог методи моделювання передаточних функцій, що розглянуті в [6-11], не можуть забезпечити повноту моделі ВКТ і її роботу в масштабі часу близькому до реального.

В роботах О. М. Крюкова та ін. [12, 13, 14, 15] запропоновано узагальнену математичну модель датчика тиску у вигляді передатної функції. Встановлено взаємозв'язки між параметрами такої математичної моделі і фізичними параметрами датчику тиску. Розроблена модель може бути

уточнена шляхом урахування різних впливних величин та ефектів другого порядку (наприклад, змінювання температури), але в цій моделі не враховується "старіння датчика".

У роботах О. Г. Олександрова, О. О. Єгоршина, О. О. Костоглотова та О. В. Крузнера [16, 17, 18, 19] розглянуті моделі вимірювальних перетворювачів, що дозволяють відновити спотворений сигнал і одержати оцінку похибки вимірювань. У таких моделях вимірювальних перетворювачів настроювані параметри суттєво зменшують динамічну похибку вимірювань. Однак лінійні методи управління настроюваними параметрами моделі перетворювача за своїми можливостями мають обмеження. Так, вони не дозволяють змінювати в процесі роботи моделі ні алгоритм вимірювання, ні структуру датчика, ні адаптуватися до зовнішніх впливових факторів та технічного стану датчика в масштабі часу близькому до реального. Отже, лінійні методи управління настроюваними параметрами моделі перетворювача не забезпечують інтелектуальність моделі. Використання більш ефективних методів моделювання датчиків вимагає комплексного підходу до вирішення поставлених проблемних питань. Одним із таких підходів є використання нейронних мереж для розробки динамічних моделей первинних вимірювальних перетворювачів та розв'язання оберненої задачі метрології.

На цей час нейронні мережі в метрології використовуються для вирішення завдань ідентифікації об'єктів вимірювання та діагностики і управління в розгалужених вимірювальних інформаційних системах. Цим напрямкам нейромережових технологій присвячені роботи J. Korbicz, D. Materassi, Tan P. V. [20, 21, 22]. Нейромережові технології стосовно розв'язання оберненої задачі в цих роботах досліджені досить детально. Розглянемо методи розв'язання оберненої задачі з використанням нейронних мереж.

Так у роботах J. Korbicz та D. Materassi [20, 21] обернена задача розв'язується як задача статистичного оцінювання, наприклад, за критерієм максимальної правдоподібності. У цій постановці безперервний оператор апроксимують дискретним оператором, а функціонал визначають на дискретній множині як функцію, що є оберненою до функції правдоподібності.

Також у роботах Tan P. V., G. Millérioux, J. Daafouz [22, 24] запропонований метод статистичної регуляризації при розв'язанні оберненої задачі. Метод вимагає знання законів розподілу вимірюваного сигналу та перешкод, що є досить жорстким обмеженням.

У роботі C. Gonzalez [25] обернена задача розглядається як компенсація динамічних складових похибки вимірювання. Розв'язується задача синтезу алгоритму визначення вимірюваного сигналу по зареєстрованій реалізації вихідного сигналу датчика. Синтез алгоритму зроблений, виходячи з умови мінімуму середнього квадрата сигналу похибки, спектральні щільності якого задаються своїми верхніми й нижніми межами на кожній частоті. Отримані і проаналізовані рішення задачі синтезу фільтра при нестационарному характері вхідного впливу й неточному завданні імпульсної характеристики. Однак, зменшення апріорної інформації й збільшення похибки приводить до того, що ступінь компенсації динамічної похибки зменшується.

Таким чином, існуючі методи моделювання елементів ВКТ можна розділити на дві групи:

- аналітичні методи, які ґрунтуються на розв'язанні інтегральних та диференціальних рівнянь;
- методи з використанням нейромережевих технологій.

Розглянемо більш детально кожну з груп цих методів.

#### 1.4 Аналіз аналітичних методів моделювання ДХ вимірювальних каналів тиску

При проведенні динамічних вимірювань, наприклад в бортових вимірювальних інформаційних системах, при вимірюванні імпульсних та інших швидкозмінних впливів, найбільший практичний інтерес становить випадок, коли суттєву частину основної похибки складає динамічна похибка. Внаслідок цього в теорії динамічних вимірювань найбільше значення мають дві проблеми: відновлення вимірюваного сигналу на вході ВКТ та аналіз динамічної похибки.

Виділення статичної й динамічної похибок ВКТ, як складових сумарної похибки, розглянемо у випадку, коли вимірювальний канал являє собою лінійне динамічне коло або сукупність лінійних динамічних кіл [26]. Тоді приведена до виходу похибка датчика при дії на його вхід змінного сигналу набуває вигляду:

$$\Delta_{вих} = \Delta_{ст} + \Delta_{дин}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta_{ст}$  - статична похибка перетворювача;

$\Delta_{дин}$  - динамічна похибка перетворювача.

Основною частиною структури вимірювальної інформаційної системи, в якій виникає динамічна похибка, є датчик. Датчик, що доповнений коригувальним пристроєм або алгоритмом обробки інформації динамічних вимірювань, утворює вимірювальну систему.

Будь-яка вимірювальна інформаційна система (ВІС), незалежно від конкретного призначення, структурно складається з трьох основних частин: первинного пристрою, призначеного для збору, підготовки й передачі вимірювальної інформації; ліній зв'язку - дротових або бездротових; комплексу агрегатних засобів.



На рис. 1.1 зображена типова структура ВІС, у якій блок обробки даних містить у собі комутатор вимірюваних сигналів, мікропроцесорний модуль, накопичувачі даних, алгоритми обробки динамічних вимірювань. Крім того, на рисунку присутні сигнали:  $x(t)$  - вимірюваний сигнал,  $e(t)$  – похибка, що обумовлена спотворенням вимірюваного сигналу вхідними перешкодами датчика, взаємодією датчика з вимірювальною лінією, адитивними погрішностями вимірювальної системи, інерційністю датчика.

Спрощена функціональна схема датчика приведена на рисунок 1.2. При цьому вхідні перешкоди й шуми приведені до виходу датчика.

Визначення вхідного сигналу, що спотворений засобом вимірювань, розглядається в загальному випадку як обернена задача вимірювальної техніки [8]. Термін «обернена задача» відноситься до задачі відновлення вхідного сигналу за відомою інформацією про оператор датчика, про відгук цього датчика на вхідний сигнал. Обернена задача є характерною і традиційною задачею вимірювальної техніки. У різних роботах обернену задачу визначають по різному. Так в роботах В. М. Чинкова [27] її розглядають як корекцію частотних характеристик засобу вимірювання, О. В. Поляруса та ін. [28, 29, 30] як відновлення вхідного сигналу, В. П. Захарова, О. М. Крюкова та ін. [31, 15, 13, 32] як корекцію сигналів, П. Ф. Щапова, С. І. Кондрашова [3, 33, 4] як компенсацію динамічних похибок.

Задача визначення миттєвих значень вхідного сигналу засобу вимірювань може бути проілюстрована ланцюгом перетворень, що зображений на рис. Рисунок 1.3 [8]. На виході засобу вимірювання спостерігається процес

$$y(t) = A[x(t) + \varepsilon(t) + \xi(t)] + \eta(t), \quad (1.2)$$

де  $x(t)$  - вхідний вимірюваний сигнал;

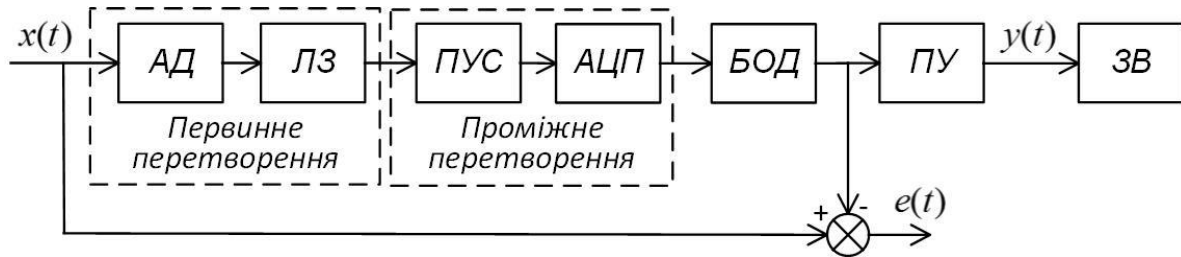


Рисунок 1.1 - Типова структура одноканальної виміральної інформаційної системи: АД - аналоговий датчик з уніфікованим вихідним сигналом напруги або струму; ЛЗ - лінії зв'язку; ПУС - перетворювач уніфікованих сигналів; АЦП - аналогово-цифровий перетворювач напруги в код; БОД - блок обробки даних; ПУ - пристрої узгодження; ЗВ - засоби відображення.

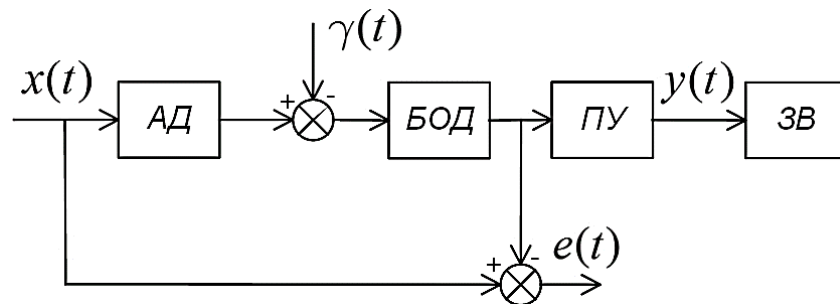


Рисунок 1.2 - Спрощена структура одноканальної виміральної інформаційної системи

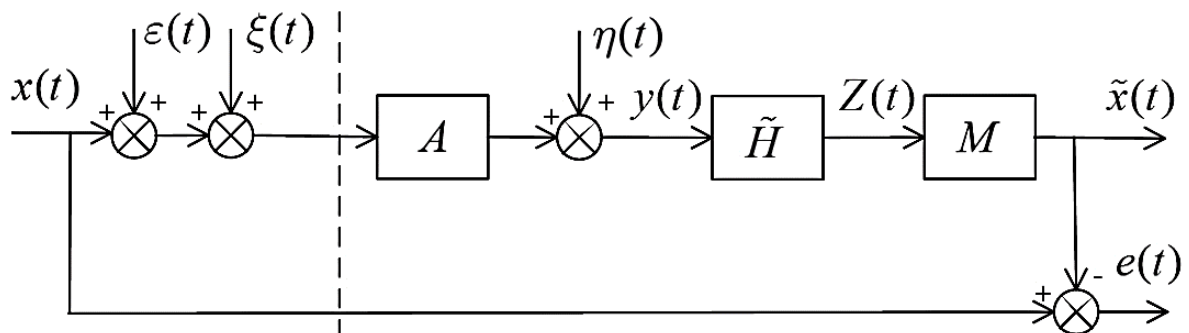


Рисунок 1.3 - Схема розв'язання оберненої задачі:  $\varepsilon(t)$  - перешкоди, джерелом яких є об'єкт вимірювань;  $\xi(t)$  - перешкода, яка викликана взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання;  $\eta(t)$  - адитивні похибки засобу вимірювання;  $A$  - оператор перетворення процесу  $x(t)$ ;  $y(t)$  - вихідний сигнал;  $\tilde{H}$  - приблизний обернений оператор для оператора  $A$ ;  $M$  - операція порівняння з одиницею вимірювання;  $\tilde{x}(t)$  - оцінка процесу  $x(t)$ ;  $e(t)$  - похибка розв'язання задачі.

$\varepsilon(t)$  - перешкоди, джерелом яких є об'єкт вимірювань;

$\xi(t)$  - перешкода, яка викликана взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання;

$\eta(t)$  - адитивні похибки засобу вимірювання.

Задачею вимірювання є визначення невідомого процесу  $x(t)$  по вихідному сигналу  $y(t)$  і операторові  $A$  з наступним порівнянням його значень із одиницею вимірювань, що відповідає за повірочною схемою еталону. Операція  $M$  (рис. 1.3) є безінерційною.

Розбіжності оператора  $\tilde{H}$  з точним оберненим оператором обумовлені наступними причинами:

- наявність похибок  $\varepsilon(t)$ ,  $\xi(t)$ ,  $\eta(t)$  змушує надавати операторові  $\tilde{H}$  фільтруючі властивості;
- оператор, точно обернений фізично реалізованому операторові, є фізично не реалізуємий.

Якщо прямий оператор – це оператор з післядією, тобто з пам'яттю, то обернений йому повинен бути оператором із передбаченням, що фізично реалізувати неможливо. Прямий оператор є безперервним, отже, обернений оператор не є безперервним і обмеженим [26]. У цьому полягає некоректність оберненої задачі. Якщо прямий оператор датчика є добре згладжуючим оператором, значить обернений оператор повинен мати зворотні властивості – підсилювати всі найменші швидкі процеси, які є у відновленому сигналі, у тому числі і адитивні похибки, властиві застосовуваному засобу вимірювання. Після приведення вхідних перешкод до виходу датчика схема, що зображена на рис. 1.3, набуває спрощеного виду, який представлений на рис. 1.4. Приведені похибки виражаються залежністю:

$$\gamma(t) = A[\varepsilon(t) + \xi(t)] + \eta(t). \quad (1.3)$$

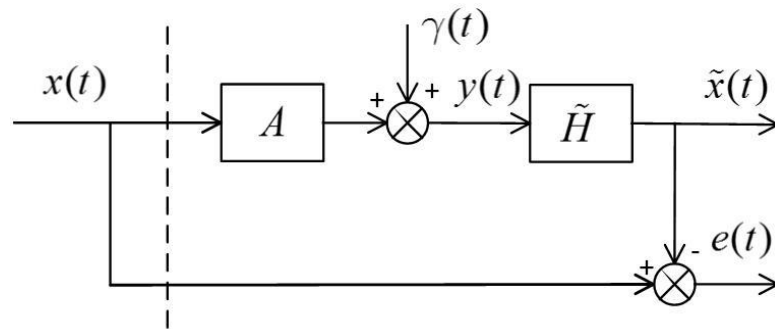


Рисунок 1. 4 - Спрощена схема розв'язання оберненої задачі вимірювань.

Відомі два варіанти формулювання оберненої задачі [8]. Перший варіант зводиться до задачі пошуку такого оператора  $\tilde{H}$ , який перетворить процес у вхідний процес  $\tilde{x}(t)$  за критерієм мінімуму опуклого функціонала від похибки  $e(t)$ :

$$\tilde{H} = \arg \min_H F \{ H \cdot y(t) - x(t) \}. \quad (1.4)$$

Якщо процеси  $x(t)$  і  $\gamma(t)$  - стаціонарні випадкові процеси, то в якості функціонала  $F \{ H \cdot y(t) - x(t) \}$  вибирають, наприклад дисперсію сигналу похибки -  $D_e$  [28], а якщо процеси нестаціонарні, то в якості функціоналу вибирають або норми функції  $e(t)$ , або її математичне очікування [34]. Однак коректність такої постановки задачі досягається при наявності значної апріорної інформації про вимірюваний процес  $x(t)$  і приведеної похибки  $\gamma(t)$ .

Другий варіант постановки оберненої задачі формулюється таким чином:

$$\tilde{x}(t) = \arg \min_{x(t) \in X} F \{ A \cdot x(t) - y(t) \}, \quad (1.5)$$

де  $X$  - простір функцій  $x(t)$ ;

$F\{A \cdot x(t) - y(t)\}$  - випуклий функціонал.

Іншими словами, обернена задача зводиться до розв'язання операторного рівняння

$$A \cdot x(t) = y(t) \quad (1.6)$$

з неточно заданою правою частиною, як наприклад у роботах [35, 36].

Відмінність (1.5) від (1.4) полягає в тому, що у виразі (1.4) рішення відшукується за критерієм мінімуму похибки, а у виразі (1.5) - за критерієм мінімуму нев'язки. Зважаючи на те, що точний обернений оператор необмежений і втрачає безперервність, малість нев'язки ніяк не гарантує малість похибки  $e(t)$ . Тому для рішення оберненої задачі у формулюванні (1.5) застосовують спеціальні методи регуляризації.

Розглянемо існуючі методи розв'язку оберненої задачі у формулюванні (1.4). В роботах [26, 37] обернена задача вирішується як задача статистичного оцінювання, наприклад, за критерієм максимальної правдоподібності. У цій постановці безперервний оператор  $H$  апроксимують дискретним оператором, а функціонал визначають на дискретній множині як функцію обернену функції правдоподібності.

В роботі [38] запропонований метод статистичної регуляризації при розв'язанні оберненої задачі. Метод вимагає знань законів розподілу вимірюваного сигналу та перешкод, що є досить жорстким обмеженням.

У цифрових методах обробки сигнали замінюються сукупностями дискретних відліків, які отримані на кінцевому інтервалі часу. У цьому випадку вплив похибок дискретизації і обмеженості часу спостереження

можна зменшити, збільшуючи частоту дискретизації та час спостереження так, що основний внесок у спотворення вносять похибки вимірювання [39].

У роботах [34, 40] і ряді інших обернена задача розв'язується як задача оптимальної фільтрації. У роботі [40] показана можливість побудови пристрою оптимальної обробки вихідного сигналу лінійного вимірювача і при цьому задача вирішувалася в термінах перетворення Лапласа і перехідних функцій. Був розроблений коригувальний фільтр. Однак даний метод визначення оптимальної перехідної функції опирається на припущення про шукану імпульсну перехідну функцію як елементу стаціонарного випадкового процесу, що не цілком коректно [8].

У роботі [41] обернена задача розглядається як компенсація динамічних складових похибки вимірювання. Розв'язується задача синтезу алгоритму визначення вимірюваного сигналу по зареєстрованій реалізації вихідного сигналу датчика. Синтез алгоритму зроблений, виходячи з умови мінімуму середнього квадрата сигналу похибки, спектральні щільності якого задаються своїми верхніми й нижніми межами на кожній частоті. Отримані й проаналізовані рішення задачі синтезу фільтра, при нестаціонарному характері вхідного впливу й неточному заданні імпульсної характеристики. Однак зменшення апіорної інформації та збільшення похибки приводить до того, що ступінь компенсації динамічної похибки зменшується.

Відомі роботи, у яких для оцінки і корекції динамічної похибки вимірювань використовують фільтр Калмана [42, 43]. Цей фільтр може здійснювати фільтрацію в темпі вимірювання для нестаціонарних вхідних впливів і нелінійних рівнянь вимірювальних перетворювачів. Однак при реалізації фільтра можлива його розбіжність. Основний спосіб боротьби із цим недоліком - загрублення фільтра.

Розглянемо методи розв'язання оберненої задачі в постановці (1.5). Як ми вже відзначали, з математичної точки зору така постановка є некоректною. Тому практичний розв'язок такої задачі відбувається із трансформацією її до

коректної постановки і знаходженню регулярних (стійких до перешкод) рішень. При цьому більшість регуляризованих рішень отримано на основі методу регуляризації А. Н. Тихонова [6], в якому використовуються при мінімізації функціоналу мінімізуючі добавки.

Результатом таких рішень є частотна характеристика фільтра, що має полюси в правій напівплощині. Тому реалізація коригувального фільтра у вигляді лінійної ланки неможлива.

Для поліпшення стійкості розв'язання задачі відновлення вхідного сигналу до перешкод у ряді робіт [4, 11, 28] використовується апріорна інформація про властивості вимірюваного сигналу, що служить додатковим регуляризуючим фактором. Крім того, у роботі [44] відновлення сигналу проводиться за допомогою розв'язання інтегрального рівняння з параметром регуляризації, який вибирається оптимальним способом за інформацією про статистичні характеристики перешкод.

У роботі [45] запропонований регуляризуючий метод компенсації впливу апаратної функції на результат вимірювання. Пропонований метод ґрунтується на спектральному представленні оператора згортки, є регуляризуючим і використовує інформацію про похибки ядра й правої частини, що представлені у вигляді замкнених еліпсоїдів. Разом з тим характеристики перешкод можуть бути відомі приблизно. Крім того, вони можуть змінюватися в процесі вимірювання. Це суттєво знижує точність відновлення вимірюваного сигналу.

Ще один широко розповсюджений підхід до відновлення вхідного сигналу засобів вимірювання ґрунтується на розв'язанні інтегрального рівняння

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau) \cdot x(\tau) \cdot d\tau, \quad (1.7)$$

де  $x(t)$  - вхідний сигнал;

$y(t)$  - відновлений сигнал;

$g(t-\tau)$  - імпульсна перехідна функція засобу вимірювання із уведенням параметра регуляризації.

У роботах [46, 47, 48] запропоновано алгоритм відновлення вхідного сигналу на основі структури з оберненою моделлю. Алгоритм має тенденцію до нагромадження похибок. Приведена модифікація алгоритму дозволила усунути цей недолік. Однак при обробці довгих реалізацій вхідних сигналів такі методи недостатньо ефективні через громіздкість рішення.

У роботах [49, 50, 19] відновлення вхідного сигналу відбувається на основі розв'язання рівняння (1.7). У даній роботі метод відновлення вхідного сигналу засобу вимірювання для випадку зв'язку вхідного й вихідного сигналів у формі оберненого оператора – лінійного диференційного рівняння з постійними коефіцієнтами. У цьому випадку апіорною інформацією служить повна нормована динамічна характеристика засобу вимірювання. Крім того, припускається наявність зареєстрованої реалізації вихідного сигналу достатньої тривалості. Запропонований алгоритм диференціювання має регуляризуючі властивості. Для вибору параметра регуляризації необхідно, щоб після відновлення вхідного сигналу дисперсія похибки результату, що обумовлена шумами у вихідному сигналі засобу вимірювання, не перевершувала вихідну дисперсію похибки. Метод ґрунтується на приблизному уявленні  $\delta$ -функції у вигляді експоненти й використанні її в інтегральному рівнянні. Метод вимагає знаходження інтеграла на кожному кроці  $i$ , отже, великого обсягу обчислювальних операцій.

У роботі [51] розглянутий метод корекції динамічної похибки інерційних вимірювальних перетворювачів з передаточною функцією першого порядку на основі параболічної сплайн-апроксимації дискретних значень вихідного сигналу перетворювача, а також його першої похідної. Однак запропонований метод не враховує присутність адитивного шуму на



виході вимірювального перетворювача в реальних умовах вимірювань, що може привести до значного підсилення даної складової динамічної похибки при апроксимації похідної вихідного сигналу перетворювача.

Розробка питань аналізу динамічної похибки і її корекції методами структурної теорії автоматичного керування наведена в роботах [52, 53, 17, 54], у яких на основі моделі датчика запропонована структура вимірювальної системи з модальним управлінням динамічними характеристиками.

В роботах О. В. Поляруса та ін. [28, 29, 30] розв'язання оберненої задачі вимірювань здійснюється на основі мінімізації функціоналу, який являє собою відстань у функціональному просторі з квадратичною метрикою між вихідним вже виміряним сигналом і цим же сигналом, але отриманим теоретично з урахуванням апріорних знань про імпульсну характеристику датчика. Реалізація вхідного сигналу записується у вигляді ряду Карунена-Лоева, що являє собою суму добутків невідомих випадкових коефіцієнтів на відомі ортогональні функції. На відміну від класичного методу розв'язання інтегрального рівняння згортки цей метод дає прийнятні результати при наявності визначених похибок вимірювання вихідного сигналу та при недостатньо високому відношенні сигнал/шум на вході датчика. Метод неможливо застосовувати в масштабі часу близькому до реального. Крім того, він вимагає наявності апріорних відомостей про імпульсну характеристику датчика та лінійності останнього.

Таким чином, аналітичним методам моделювання датчиків властиві певні обмеження:

1. Вони вимагають наявності апріорних відомостей про імпульсну характеристику датчика. В динамічному режимі роботи датчика це важко забезпечити, а в більшості випадків і неможливо.

2. Датчик повинен бути лінійним.

3. Вони забезпечують прийнятні результати тільки в досить вузькому частотному і динамічному діапазоні вхідного сигналу та при досить високому

відношенні сигнал/шум на вході датчика.

4. Аналітичні методи неможливо застосовувати в масштабі часу близькому до реального.

5. Аналітичні методи не дозволяють проводити корекцію параметрів моделі датчика в процесі її роботи в автоматизованому або автоматичному режимі.

### **1.5 Аналіз методів моделювання вимірювальних каналів тиску з використанням нейронних мереж.**

На цей час розроблено й досліджено кілька десятків штучних нейронних мереж які використовуються в методах математичного моделювання ВКТ. Базовими є три типи мереж, що відповідають трьом методам їх навчання: самоорганізуючі мережі Кохонена з навчанням без «учителя»; динамічні мережі Хопфільда з навчанням по методу послідовного підкріплення знань; мережі прямого розповсюдження (перцептронні) з навчанням з «учителем» [55, 20, 56, 57, 58, 59]. Для розв'язання задач ідентифікації, моделювання, регулювання, адаптивного управління, оптимізації застосовуються мережі Хопфільда, нелінійні багатошарові нейромережі прямого поширення з навчанням по методу зворотнього поширення похибки та двошарові нейромережі з радіально-базисними функціями [60, 61].

Управління на основі багатошарової нейронної мережі, поряд з експертними адаптивними регуляторами й системами з асоціативною пам'яттю, відноситься до інтелектуальних технологій управління і обробки інформації [56, 62, 63].

У роботі [55] розглянуті архітектури нейронних мереж для управління і прогнозування похибок від сенсорних пристроїв мобільних роботів. Відзначено, що використання нейромережевого підходу забезпечує стійкий рух роботів у незнайомому просторі при використанні різних видів перешкод,

а також робастне управління, незважаючи на неточну інформацію від сенсорних пристроїв.

У роботі [64] наведений систематичний виклад методів нейромережевого управління, заснованих на сучасних розробках в області нечіткої логіки і теорії нейронних мереж. Методологія нейромережевого управління порівнюється із традиційними методами теорії автоматичного управління. Розглянуті приклади застосування нейронних мереж у різних системах керування показали, що схема нейромережевого управління має кращі показники стійкості і якості перехідних процесів у порівнянні із трьома іншими традиційними схемами: управлінням на основі нечіткої логіки, узагальненим прогнозуючим управлінням і ПД-управлінням.

У роботі [63] викладені питання теорії й методи синтезу систем управління нелінійними багатомірними динамічними об'єктами на базі навчаємих багатошарових нейронних мереж. Наведені функціональні структури нейромережевих систем. Розглянуті проблеми стійкості процесу навчання по Ляпунову на основі еквівалентного представлення нейронних мереж нелінійною динамічною системою, а також структурний і алгоритмічний синтез нейромережевих систем, які базуються на положеннях синергетичної теорії управління. Введений і досліджений метод адаптивного управління на різноманіттях. Наведена велика кількість прикладів комп'ютерного моделювання нейромережевих систем управління, які забезпечують більш ефективне управління динамічними об'єктами в порівнянні із традиційними системами.

У роботі [65] розглядаються різні галузі науки й техніки, де знаходять застосування нейронні мережі. Дається опис моделі нейронних мереж, які найбільше часто застосовуються для розв'язання задач у області ідентифікації об'єкта управління, побудови систем з самонавчанням, обробки сенсорної інформації. Відзначається, що технологія нейромережевих структур відкриває

широкі перспективи для розв'язання багатьох прикладних задач обробки інформації й управління.

У роботі [66] показано, що для вимірювання швидкості руху плазми в каналі електродинамічного прискорювача перспективним є застосування штучних нейронних мереж, які дозволяють апроксимувати математичні функції при використанні методу координатної функції з мінімальною похибкою. Проведений порівняльний аналіз точності різних варіантів структури нейромережевої системи вимірювання швидкості методом обчислювального експерименту, результати якого показали помітне зменшення методичної похибки вимірювання із застосуванням нейромережевої модифікації методу координатної функції в порівнянні із традиційними модифікаціями даного методу.

У роботі [62] розглянута модель системи на основі штучної нейронної мережі для високоточних вимірювань температури з використанням різних типів термоелектричних перетворювачів. Використовувана в даній системі нейронна мережа у вигляді багатошарового персептрона призначена для оцінки значення вимірюваної температури за інформацією про тип термоперетворювача і його вихідній напрузі. При навчанні персептрона використовувалося 240 наборів даних з рівномірним законом розподілу в діапазоні від  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  для кожного із трьох обраних типів термоперетворювачів. Результати тестування навченої із застосуванням алгоритму Левенберга-Марквардта нейромережевої структури при використанні 60 наборів даних, рівномірно розподілених у тому ж діапазоні, показали, що середня похибка вимірювання температури склала  $0,1\%$  при максимальному значенні  $0,5\%$  для всіх трьох типів перетворювачів. Однак отримані в роботі результати відносяться до усталеного режиму вимірювань, а запропонована нейромережева модель вимірювальної системи не забезпечує корекцію динамічної похибки, обумовленою інерційністю первинного перетворювача.

У роботі [67] запропонований метод ідентифікації нелінійного динамічного вимірювального перетворювача за допомогою нейромережевої моделі на базі багат шарового персептрона, доповненого лініями затримок вхідних сигналів. Досліджені властивості запропонованої моделі шляхом імітаційного моделювання на ЕОМ з використанням різних видів каліброваних сигналів для процедури навчання штучної нейронної мережі. Навчальна вибірка для тренування мережі формувалася шляхом подачі на вхід об'єкта ідентифікації каліброваних сигналів різного виду (випадковий білий шум, синусоїдальний, сума двох синусоїдальних сигналів з різними частотами, періодичні послідовності прямокутних і трикутних імпульсів, частотно-модульований сигнал з лінійним законом зміни частоти) і реєстрації відповідних вихідних сигналів. Аналіз показує, що повної редукції до ідеального приладу досягти не вдається через неточне знання апаратної функції засобу вимірювання або іншого фізичного приладу, наявності похибки фіксації вихідного сигналу, похибки реалізації корегувального пристрою (фільтра) і некоректності оберненої задачі. З іншого боку, проведений аналіз робіт з теорії динамічних вимірювань показує, що досить добре розроблені методи корекції динамічної похибки на основі розв'язання інтегрального рівняння згортки, а також за допомогою одержання частотної характеристики фільтра з використанням параметра регуляризації й наступним застосуванням зворотнього перетворення Фур'є.

У роботах І. П. Іщука [68], О. В. Калача [69], П. В. Кобякова та ін. [70] і О. В. Дегтярева та ін. [71] розглянуто використання нейронних мереж для багат факторних вимірювань при ідентифікації змінних на лініях невизначеності та для обробки сигналів датчиків, ідентифікації нелінійних динамічних засобів вимірювань. Проаналізовано використання архітектур термопальних мереж в вимірювальних інформаційних системах. Розглянуті нейромережеві технології в даних роботах дозволяють проводити ідентифікацію та обробку вимірювальної інформації не в процесі вимірювань,

а в процесі подальшої обробки вимірювальної інформації в спеціалізованих інформаційних мережах.

Значний вклад в розробку методів нейромережевого управління в вимірювальних інформаційних системах внесли такі вчені як В. М. Чинков, В. І. Васильєв, О. В. Назаров. В роботі В. М. Чинкова та ін. [72] детально розглянуто питання аналітичного конструювання агрегованого нейромережевого регулятора в контурі управління підсистемою синхронізації системи передачі еталонних сигналів часу по каналах цифрового телебачення. Нейромережеві алгоритми прогнозування та оптимізації вимірювальних систем на етапі їх розробки досліджені О. В. Назаровим [73]. Методика вибору структури нейрорегулятора в динамічній вимірювальній системі розглянута в роботі В. І. Васильєва [74]. В цих роботах досліджено використання нейромережевих технологій лише в процесі розробки вимірювальних інформаційних систем.

Використання нейронних мереж у процесі калібрування датчиків детально досліджені у роботах Р. D. Wasserman [75], D. A. Khrobostov [76] та С. В. Водотики [77]. Ці дослідження проведені з використанням спеціалізованого стендового обладнання на якому калібруються датчики. При цьому не враховуються впливові фактори, які діють на датчик у процесі експлуатації.

Огляд літератури з методів моделювання датчиків з використанням нейронних мереж показав, що нейромережеві структури мають ряд важливих властивостей: здатність до гнучкого навчання, що позбавляє від необхідності використовувати складний математичний апарат на відміну від багатьох традиційних методів адаптивного й оптимального управління; високу динамічну точність і знижену чутливість до збурюючих впливів; здатність до узагальнення за прикладами; здатність функціонувати в масштабі часу близькому до реального. Однак такі структури не достатньо застосовувалися для побудови моделей всього вимірювального каналу тиску і визначення його

ДХ, а також для вимірювальних систем з відновленням динамічно спотворених сигналів. У зв'язку з цим перспективним напрямком в області теорії динамічних вимірювань є розробка нейромережових динамічних моделей вимірювальних каналів і на їхній основі алгоритмів визначення ДХ ВКТ, які зменшують похибку вимірювань тиску, що обумовлена інерційністю всього вимірювального каналу та аддитивними шумами на його виході.

### **1.6 Висновки до розділу**

1. Для визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску на цей час використовуються методи бездемонтажного контролю, online діагностики та методи моделювання.

2. Усі існуючі підходи проведення бездемонтажного контролю вимагають тестових впливів, що важко реалізувати на вимірювальних каналах тиску.

3. Метод online діагностики є чутливим до формування експертної бази знань, яка повинна містити опорні характеристики каналів з урахуванням "старіння" вимірювальних каналів тиску.

4. Існують декілька методів визначення динамічних характеристик окремих елементів вимірювальних каналів тиску шляхом моделювання. Серед аналітичних методів добре розробленим є метод розв'язання оберненої задачі вимірювань, який, однак, добре функціонує при малих похибках вимірювання вихідного сигналу датчика та при відсутності шумів. Метод не застосовується для всього вимірювального каналу тиску, а тільки для лінійних датчиків. Крім того, метод неможливо використовувати в часі близькому до реального. Для усунення останнього недоліку почали поширюватися нейромережові моделі, які, однак, не розроблені для всього вимірювального каналу тиску.

5. Найбільш придатним для використання у вимірювальному каналі тиску є метод аналізу шумів, який дає можливість визначити динамічні характеристики всього вимірювального каналу тиску, а не окремих його

частин. Однак, метод вимагає лінійності всього каналу, що не завжди витримується на практиці. Крім того, метод є затратним в часі обробки вимірювальної інформації.

6. Недоліки існуючих методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску створюють необхідність розробки більш ефективних, за деякими показниками, методів визначення цих характеристик.



## **РОЗДІЛ 2**

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Найбільш поширеними у складі вимірювальних інформаційних систем ТСО є вимірювальні канали тиску різного призначення, які потребують неперервного контролю їх метрологічних характеристик з високою достовірністю, зокрема, контролю ДХ ВКТ. В останній час велика увага приділяється бездемонтажному контролю, з допомогою якого оцінюються похибки вимірювань та їх тренд тільки датчиків тиску без зв'язку їх з вимірювальною лінією. Існуючі підходи не дають можливості прогнозувати та оцінювати метрологічні характеристики всього ВКТ з урахуванням взаємодії датчиків тиску та вимірювальної лінії і при цьому характеристики останніх вважаються незмінними в процесі експлуатації, тобто не враховується вплив "старіння" елементів ВКТ.

Отже, основним недоліком існуючих методів контролю метрологічних, в тому числі динамічних характеристик ВКТ на ТСО є їх локальність і відсутність прогнозування їхнього змінювання в процесі експлуатації. На цей час не існує єдиного підходу до побудови вимірювальних каналів тиску, які б визначали свої ДХ в автоматичному або автоматизованому режимах в масштабі часу близькому до реального.

Таким чином, виникає завдання вдосконалення методів визначення ДХ ВКТ на ТСО, насамперед, постійної часу ВКТ, які б переважали за деякими важливими показниками існуючі методи. Аналіз останніх вже проведений в першому розділі. Основним завданням другого розділу дисертації є обґрунтування припущень та обмежень, в рамках яких здійснюється аналіз ВКТ, і вибір напрямів дослідження. Класичний підхід вимагає дослідження характеристик технологічного процесу, що реалізується на об'єкті і створює вхідну дію для ВКТ. Вхідна дія буде розглядатись з точки зору особливостей

вимірювання тиску та визначення ДХ ВКТ. При цьому необхідно врахувати змінювання модельних характеристик ВКТ в процесі його експлуатації, тобто в результаті його "старіння". Характер роботи багатьох ТСО такий, що вхідна дія, яка поступає на вимірювальну лінію, є нестационарною. Інерційність існуючих ВКТ приводить до згладжування вихідного сигналу ВКТ, який використовується для обробки, але цей сигнал в багатьох випадках залишається нестационарним.

## **2.1 Результати досліджень вихідного сигналу вимірювального каналу тиску на стаціонарність**

Оцінка стаціонарності на сьогоднішній день здійснюється з допомогою статистичних пакетів, які основну увагу приділяють класичним методам математичної статистики - кореляційному, регресійному, факторному аналізу та іншим. Ці методи, однак, неможливо ефективно застосовувати для поточного (автоматичного, без участі експерта) аналізу даних. Крім того, системи, що ґрунтуються на статистичній обробці інформації, вимагають від аналітиків апріорних припущень про моделі та спеціальної підготовки вихідних даних (наприклад, формування вибірок), певний вибір моделей із сукупності допущених (для перевірки адекватності опису даних) і, нарешті, професійної інтерпретації результатів. Методи традиційної математичної статистики, що лежать в основі статистичних пакетів, корисні головним чином для перевірки заздалегідь сформульованих гіпотез і для попереднього аналізу, що становить основу оперативної аналітичної обробки даних (OLAP) [78] і зовсім не придатні для поточного автоматичного аналізу вимірювальних даних.

В дисертації для обробки вимірювальних даних використовувались інтелектуальна система аналізу даних на основі нейронних мереж [79, 80], в основу роботи якої покладено технології Data Mining [78, 81]. Data Mining – це технологія пошуку в великих об'ємах даних неочевидних, об'єктивних

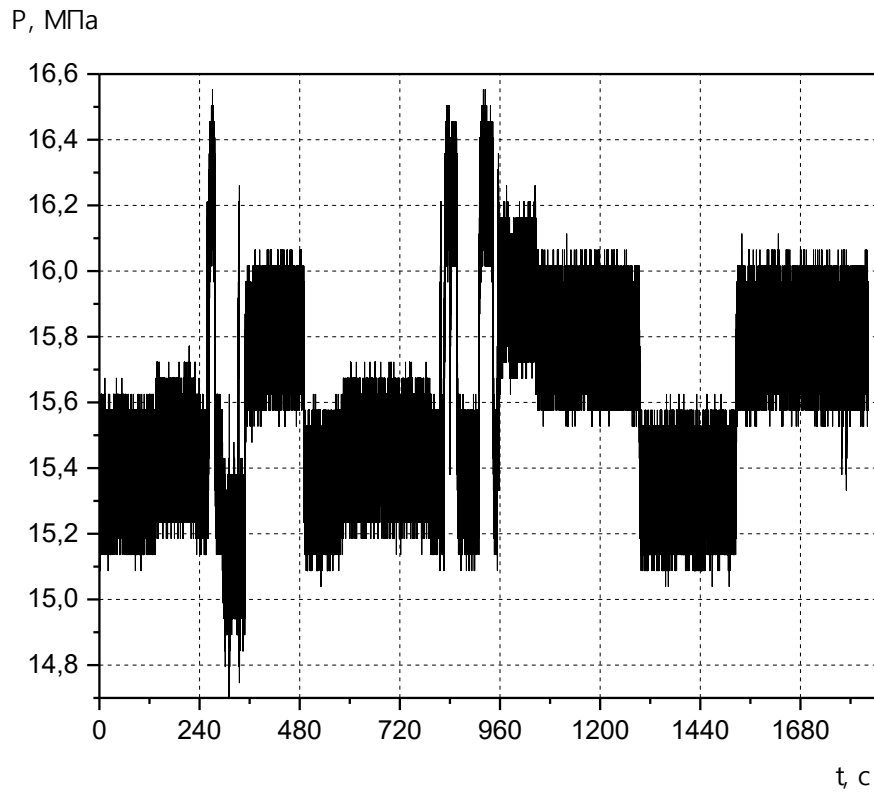
закономірностей, періодичностей, трендів, інтервалів стаціонарності, а також їх перевірки на нових вимірювальних вибірках. Знайдені закономірності не виявляються стандартними статистичними методами обробки вимірювальної інформації або навіть досвідченими експертами і тому наперед не можуть вважатись очевидними. Вони будуть цілком відповідати дійсності на відміну, наприклад, від висновку експерта, яке ґрунтується на суб'єктивному і, як наслідок, обмеженому баченні ситуації.

В результаті попередніх статистичних оцінювань було встановлено, що у більшості отриманих вимірних часових рядів тиску можна виділити систематичну складову (яка включає декілька компонент) і випадкову помилку (залишок, шум), яка утрудняє виявлення регулярних компонентів. Як правило, тренд являє собою загальну систематичну лінійну або нелінійну компоненту, яка змінюється в часі. Інерційність технологічних процесів реалізується через цей еволюторний елемент часового ряду.

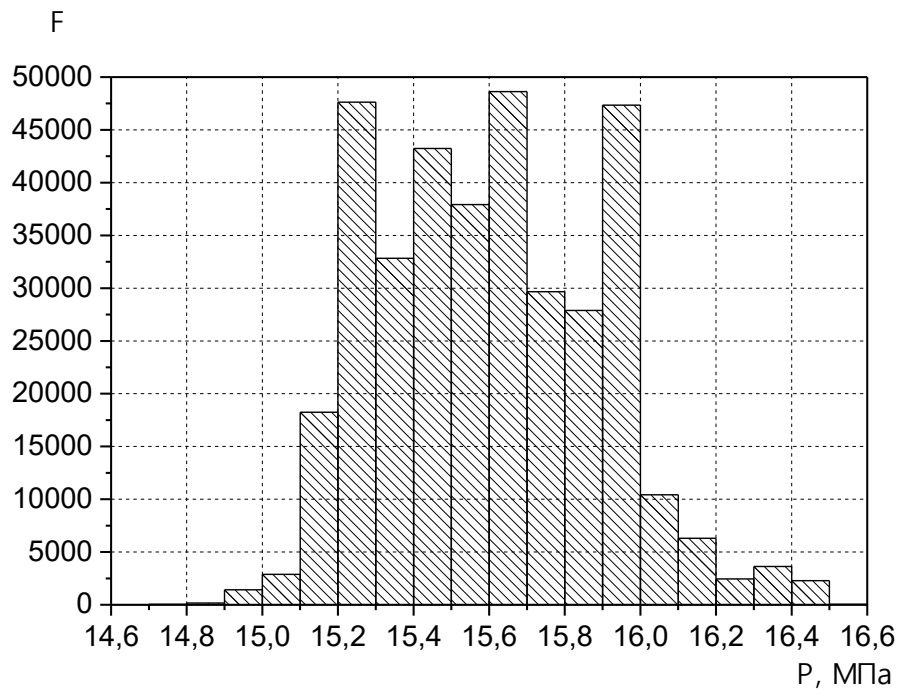
В окремих технологічних процесах можна виявити певні цикли. Сезонна складова – це періодично повторювана компонента. Її зміна описується, як правило, двома моделями: адитивною і мультиплікативною. Більшість систематичних складових вихідного сигналу ВКТ складаються із тренда, більш-менш регулярних циклічних коливань щодо тренда й періодичної компоненти.

Для виявлення тренду було використано два основні підходи: оцінювання регресії в часі та обчислення послідовних різниць (Differencing). При оцінюванні залежності регресії від часу використовувались лінійний, квадратичний (парабола) та експонентний тренди. Також в процесі досліджень отриманих вимірних вирізок фрагментів вихідного сигналу вимірювального каналу оцінювались послідовні різниці. Застосування цих підходів дозволило вилучити з вимірювальних даних тренд, тобто одержати стаціонарні залишки за умови відсутності періодичної й циклічної складових. При використанні процедур видалення тренда було важливо розрізняти

характер тренда, що видаляється. Він може бути детермінованим або стохастичним (випадковим). Дослідження показали, що близько 97% отриманих в результаті експериментів часових рядів є стаціонарними щодо деякого детермінованого тренда - TS ряди (TS – trend stationary). Часові ряди зі стохастичним трендом, який видаляється тільки диференціюванням, становили лише 3% - DS (difference stationary) ряди. Результати досліджень нестационарності вхідного чигналу каналу тиску приведені на рис. 2.1...2.3. Дослідження засвідчили той факт, що вхідний сигнал є нестационарним. Він містить декілька складових з законами розподілу близькими до нормального та змінними середніми значеннями та дисперсіями в часі. Кількість складових як і їх параметри змінюються в часі в процесі роботи ТСО. Для прикладу, на рис. 2.1а приведена часова вибірка вихідного сигналу ВКТ тривалістю 30 хвилин, яка характеризується декількома сталими режимами, число яких залежить від режиму роботи ТСО. Також видно, що у вихідному сигналі присутні декілька складових параметри яких (середнє значення та тренд) міняються в часі. Разом з тим на гістограмі (рис. 2.1б) складові не вирізняються, що свідчить про те що складові вихідного сигналу мають змінні в часі середнє значення і дисперсію, тобто існує нестационарність сигналу. Це змушує здійснювати статистичну обробку на окремих часових фрагментах вихідного сигналу оскільки для визначення ДХ ВКТ будуть використовуватись тільки сталі режими роботи ТСО. В якості прикладу на рис.2.2а приведений фрагмент часової вибірки вихідного сигналу ВКТ тривалістю 12 хв (720 с). Гістограма сигналу даного фрагменту приведена на рис.2.2б. Згідно з нею даний вихідний сигнал являє собою випадковий процес, який розподілений за законом близьким до нормального з середнім значенням 16 МПа. Однак гістограма цього процесу, яка показана на рис. 2.2б, показує наявність в сигналі двох складових з середніми значеннями близькими до 15.98 МПа та 16.045 МПа. Графік автокореляційної функції (рис. 2.2в) містить періодичні сплески, що свідчить про наявність циклічної



a)



б)

Рисунок 2.1 – Вихідний сигнал ВКТ а) і його гістограма б) до обробки

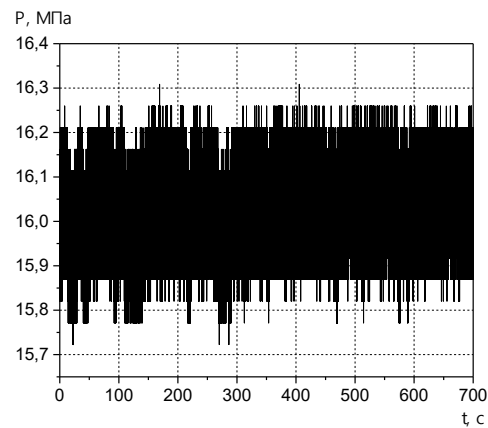
компоненти у вибраному часовому фрагменті.

Оскільки модель тренду нам не відома, то найпростіше оцінити тренд і циклічну компоненту можна за допомогою ковзаючого середнього. На рис. 2.2г приведено графік вихідного сигналу даного фрагменту, який згладжено ковзаючим середнім прямокутного вікна тривалістю 10 с (2000 вимірів). Тут вже можна виділити циклічні складові і приблизно оцінити тренд. Оцінка періоду флуктуацій згладженого сигналу (рис. 2.2г) показує наявність двох періодичних складових, про що свідчать гістограма (рис.2.2д) та спектр (рис. 2.3в) даного сигналу. Автокорреляційна функція згладженого сигналу приведена на рис. 2.2е. Вона має вигляд, що характерний для часового ряду з трендом. Автокорреляційна функція не наближається до нуля з ростом лагу  $k$  (лаг – кількість інтервалів аналізу на даній часовій вибірці). Для оцінки та видалення трендів з часових вибірок вихідного сигналу ВКТ використовувався метод найменших квадратів.

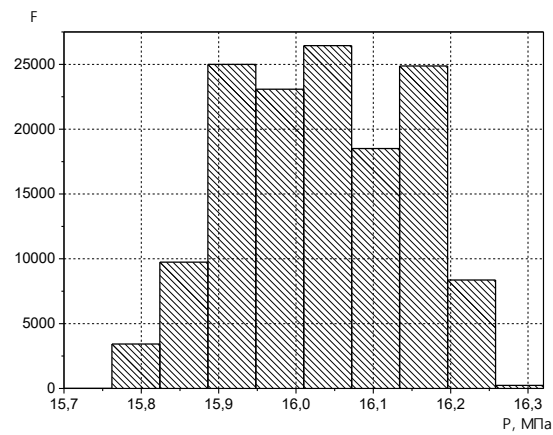
Візуальне вивчення графіків дозволило припустити що тренд цього ряду носить лінійний характер. Визначений тренд (рис.2.2г) описується виразом:

$$P(t) = t \cdot 5.7 \cdot 10^5. \quad (2.1)$$

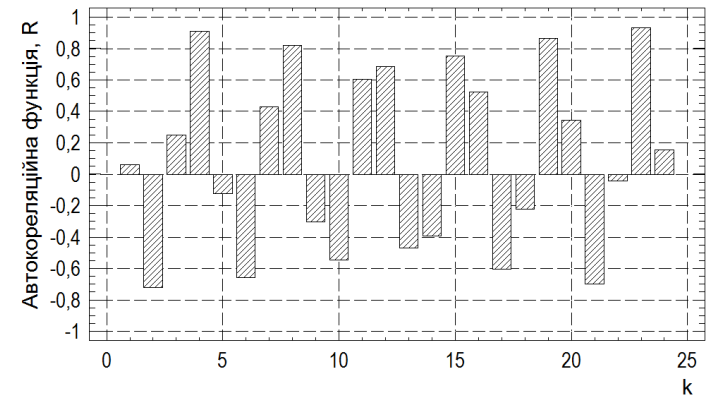
Таким чином, з вибраного часового фрагменту вихідного сигналу ВКТ необхідно видалити тренд (2.1). На рис.2.3а приведено графік вихідного сигналу досліджуваного фрагменту з вже видаленим трендом. Автокорреляційна функція цього сигналу (рис.2.3б) на тривалості фрагменту в 12 хв змінюється від 1 до 0.985, що свідчить про наявність залишків нестационарності. Подальший аналіз показав, що залишки нестационарності складають: по флуктуаціям середнього значення та дисперсії 0.15% а по флуктуаціям амплітуди 0.3%.



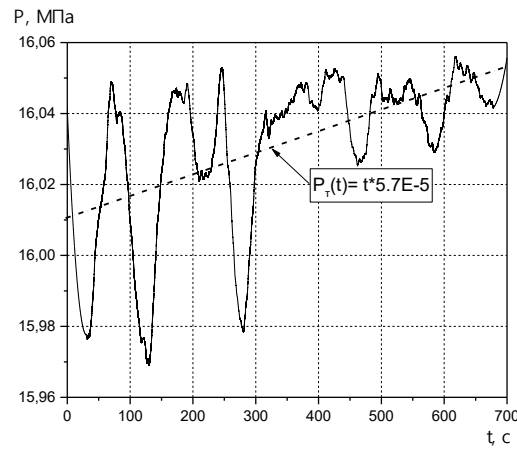
а)



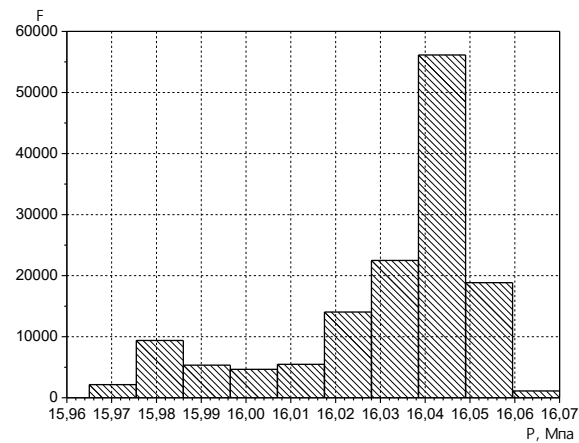
б)



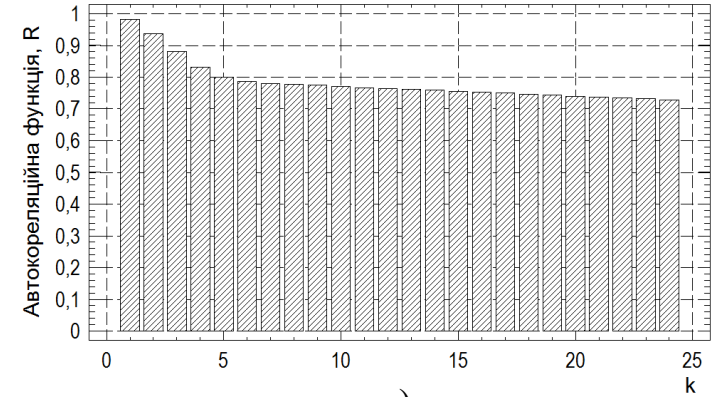
в)



г)

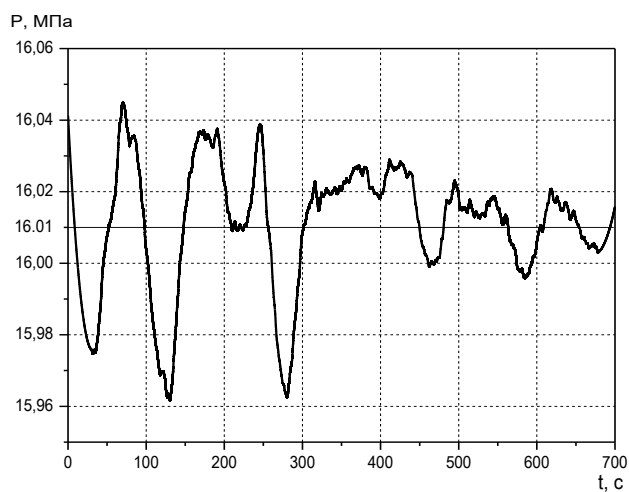


д)

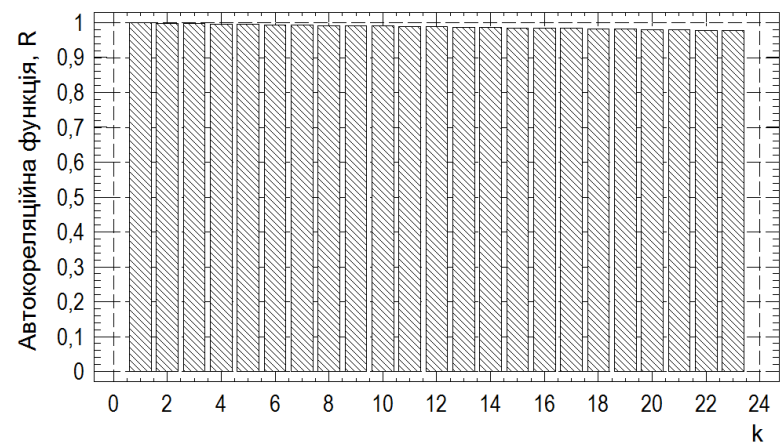


е)

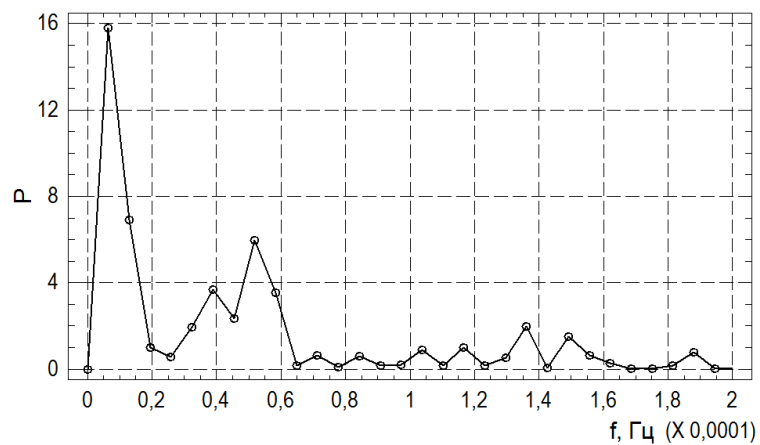
Рисунок 2.2 – Графіки результатів досліджень на стаціонарність фрагменту часової вибірки вихідного сигналу ВКТ тривалістю 12 хвилин



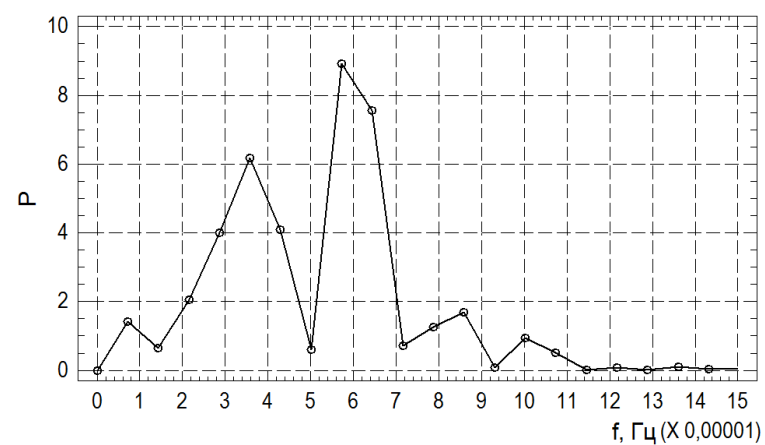
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.3 - Графіки результатів видалення нестационарності фрагменту часової вибірки вихідного сигналу ВКТ тривалістю 12 хв



Загалом вихідний сигнал вибраного фрагменту часової вимірної вибірки після проведеної обробки на усунення нестаціонарності можна вважати квазістаціонарним. Це також підтверджує спектр обробленого сигналу (рис.2.3г), кількість його складових практично не змінилось і він тільки незначно змістився.

Таким чином, в результаті проведених досліджень вихідного сигналу ВКТ на стаціонарність встановлено що:

- вихідний сигнал ВКТ є нестаціонарним флуктуюючим процесом;
- причина нестаціонарності вихідного сигналу обумовлена специфікою роботи ТСО;
- вихідний сигнал ВКТ складається з багатьох часових фрагментів сталих амплітуд, тривалість цих фрагментів різна і складає від одиниць секунд до 30 хв;
- нестаціонарність вихідного сигналу ВКТ усувається з використанням методу згладжування ковзаючим середнім та методу найменших квадратів на тривалості всієї вимірної вибірки (але при цьому буде втрачена інформативність сигналу і появиться додаткова похибка вимірювань тиску) або на тривалості окремих часових фрагментів, що вирізані із вимірної вибірки;
- усунути нестаціонарність вихідного сигналу ВКТ повністю неможливо, рівень залишків носить як суб'єктивний так і об'єктивний характер: він визначається як рівнем підготовки дослідника, так і можливостями програмного забезпечення, яке використовується, і становить 0.3...0.7%;
- за результатами досліджень встановлено, що інтервал стаціонарності вихідного сигналу ВКТ визначається тривалістю часового фрагменту сталої амплітуди і лежить в межах 5с...25 хв.;
- з метою автоматизації обробки часових фрагментів сталої амплітуди і усунення нестаціонарності вихідного сигналу ВКТ необхідно додатково розробляти нечіткі вимірювальні алгоритми.

Отже, в подальшому для визначення ДХ ВКТ в роботі будуть використовуватись стаціонарні вибірки сигналу, що отримуються після проведення операцій, які описані в даному розділі. При цьому потрібно дотримуватись наступної методики.

## **2.2 Методика та результати досліджень статичних та динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску**

Перед початком досліджень перевірявся технічний стан та справність вимірювальної лінії і проводилось калібрування датчиків тиску.

Для підвищення достовірності досліджень всі 15 датчиків тиску було поділено на 3 групи (по числу термінів експлуатації: 1 рік, 5 років та 10 років) по 5 датчиків в групі. Всі датчики були однотипними однієї серії та партії. Експерименти проводились для кожної групи окремо з наступним усередненням отриманих результатів. В них була задіяна одна вимірювальна лінія, на якій також моделювалось штучне "старіння" шляхом утворення відповідних закупорок, витоків та повітряних пробок.

Всі дослідження проводилось у відповідності з ГОСТ 22521-85 у атестованій та сертифікованій випробовувальній лабораторії ПрАТ "Манометр-Харків" (м. Харків). Досліджувались спочатку статичні і ДХ ВКТ без вимірювальної лінії, а потім проводились дослідження цих характеристик всього ВКТ.

Для оцінки впливу "старіння" елементів ВКТ на їх динамічні та метрологічні характеристики дослідження проводились в два етапи.

На першому етапі згідно з розробленою методикою проводились випробування однотипних датчиків тиску однієї партії виготовлення методом прискореного термічного "старіння". Тривалість випробування визначалась еквівалентним терміном роботи датчика (рівнем його "старіння"). Далі досліджувалась функція перетворення датчиків шляхом перевірки їх калібрування на стенді, тобто отримувались статичні характеристики. Метою

цих досліджень було вивчення впливу "старіння" датчика на його лінійність та визначення відхилень функції перетворення від номінальної.

На другому етапі для кожного датчика з відповідним рівнем "старіння" визначались ДХ, які потім порівнювались з ДХ, що мав датчик до його випробування методом прискореного термічного "старіння". Метою досліджень було виявлення закономірностей змінювання статичних і динамічних характеристик датчиків та вивчення впливу "старіння" датчиків тиску на їх перехідну та імпульсну характеристики, постійну часу і час затримки.

За опорні ДХ в дисертаційній роботі були прийняті як ДХ нових і справних вимірювальної лінії і датчика тиску, так і ДХ ВКТ загалом. За результатами порівняння ДХ нового та "старого" ВКТ оцінювався вплив деградаційних процесів в ВКТ на його ДХ.

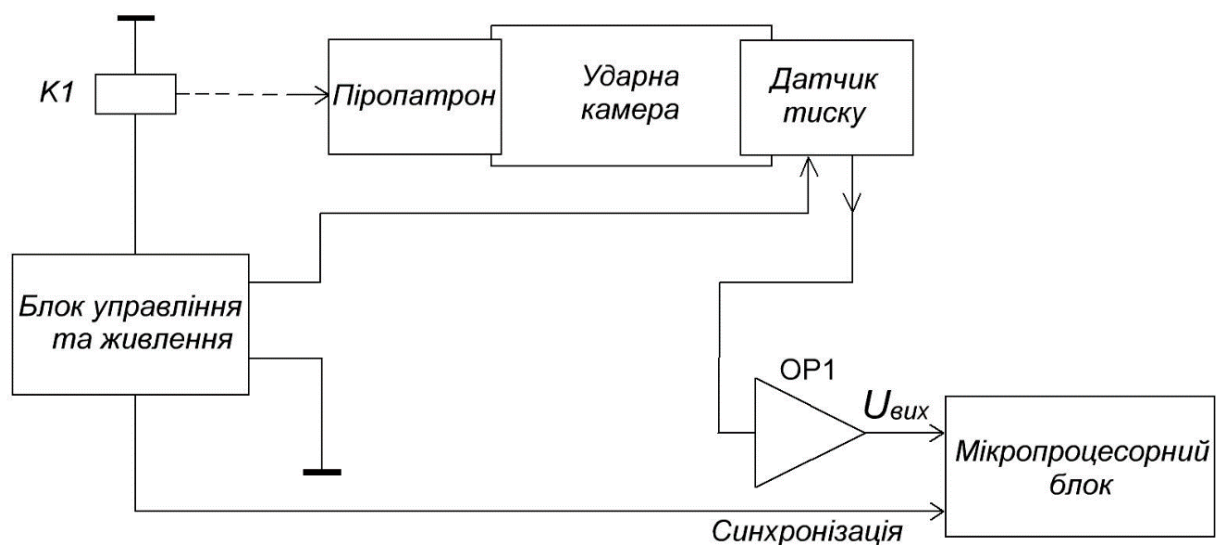


Рисунок 2.4 – Структурна схема вимірювального комплексу визначення динамічних характеристик датчиків тиску

Для визначення ДХ датчиків тиску методом лінійного сигналу був розроблений вимірювальний комплекс (рис. 2.4) з використанням атестованої ударної камери та ступінчатого тиску. Ступінчатий тиск створювався за

допомогою підриву відповідного піропатрона. З датчиком проводилось 10 випробовувань, отримані вимірювальні дані потім усереднювались. Всі вимірювання проводились синхронно в єдиному масштабі часу. Періодичність вимірювань в кожній з 10 серій становила 30 хв., а тривалість часової вибірки кожної серії - 1 хв. Періодичність вимірювань в 30 хв визначалась необхідністю скидання тиску до сталого атмосферного та заміни піропатрона. Дискретність вимірювань всередині однієї часової вибірки становила 5 мкс. Отже, отриманий масив даних розмірністю  $1 \times 12 \cdot 10^6$  виміряних часових вибірок записувався на жорсткий диск для подальшої обробки.

Обробка, отриманих в результаті серії експериментів вимірювальних часових вибірок імпульсних характеристик проводилась з використанням пакету Origin Pro. Для кожного датчика дані усереднювались за 10 випробовувань.

В результаті експериментальних випробовувань датчиків тиску були визначені:

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

Визначені за результатами експериментів усереднені перехідна та імпульсна характеристики датчика тиску з терміном служби 1 рік приведені відповідно на рис. 2.5а та рис.2.5б. Були визначені такі параметри перехідної характеристики датчика як його постійна часу  $\tau_\partial$  та час затримки  $t_3$ . Середнє значення постійної часу датчика склало  $\tau_\partial = 77 \pm 1$  мс. Розкид значень в  $\tau_\partial$  1 мс був викликаний неідентичністю зарядів піропатронів і, як наслідок, різними інтерференційними процесами у фронті падаючої хвилі тиску на датчик у ударній трубі. Час затримки  $t_3$  був сталим і складав 20 мс. За експериментально визначеною перехідною характеристикою була отримана

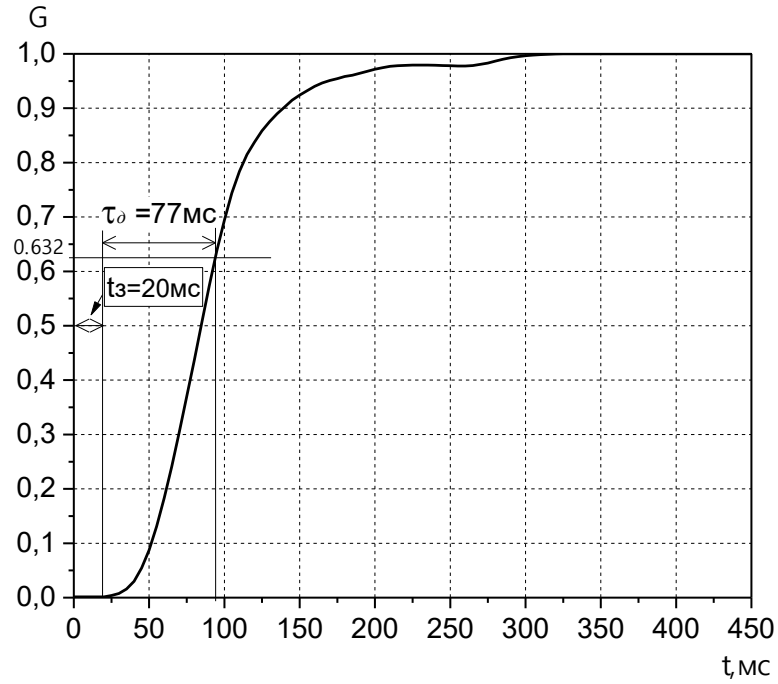
імпульсна характеристика датчика тиску (рис. 2.5б). Оскільки імпульсна характеристика має дзвіноподібну форму, то її ширина визначалась на рівні  $E/e$ . Для нормованої імпульсної характеристики амплітудне значення  $E=1$ , тоді рівень  $E/e=0.366$  -  $\tau_{ix}=76$  мс. Разом тим було встановлено (рис. 2.5а) наявність незначних перехідних процесів у перехідній характеристиці на рівні 0.8...0.9 від максимального амплітудного значення вихідного сигналу датчика тиску. Для того щоб підтвердити лінійність датчика тиску, були проведені додаткові дослідження його функції перетворення (ФП) на калібрувальному стенді виробника датчиків ПрАТ "Манометр-Харків". Результати досліджень у вигляді графіка ФП показані на рис. 2.6.

Експериментально встановлено, що функція перетворення має лінійний характер і з досить високою точністю може бути апроксимована виразом:

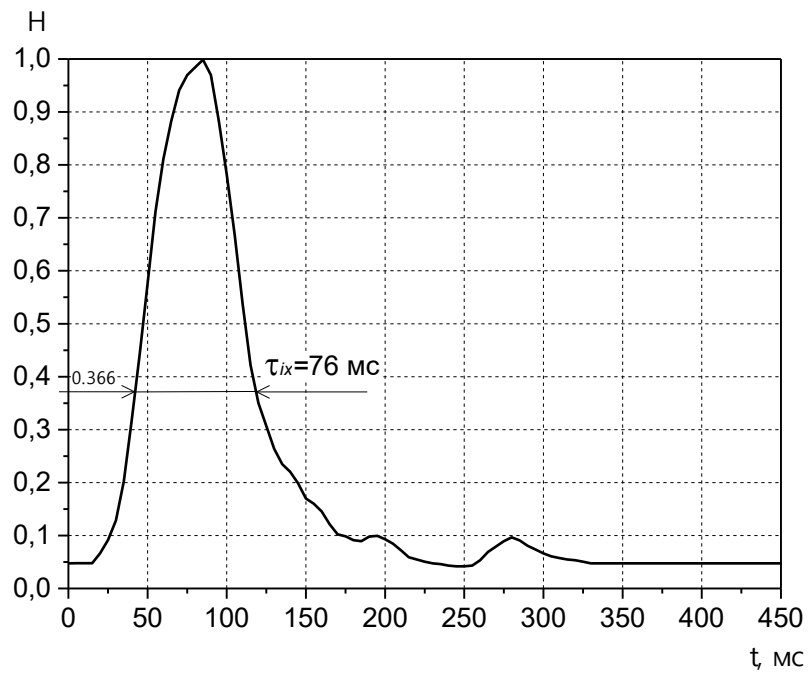
$$U = 0.098 + 0.184 \cdot P. \quad (2.2)$$

Відносна похибка  $\delta_U$  апроксимації експериментально отриманої ФП  $U(P)$  не перевищує  $\delta_U \leq \pm 0.3\%$  (рис. 2.7), що в повній мірі відповідає вимогам технічних умов ДК ПП 33.20.52.830 на випробовуванні датчики тиску -  $\delta_{TY} \leq \pm 0.5\%$ .

Таким чином, можна вважати, що датчик тиску є лінійним, а незначні перехідні процесів у перехідній характеристиці викликані не нелінійністю датчика. Для виявлення причин подібних перехідних процесів було проведені дослідження впливу "старіння" датчика тиску на його статичні та динамічні характеристики.



а)



б)

Рисунок 2.5 – Усереднені експериментально визначені перехідна  $G(t)$  а) та імпульсна  $H(t)$  б) характеристики датчика тиску з терміном роботи 1 рік

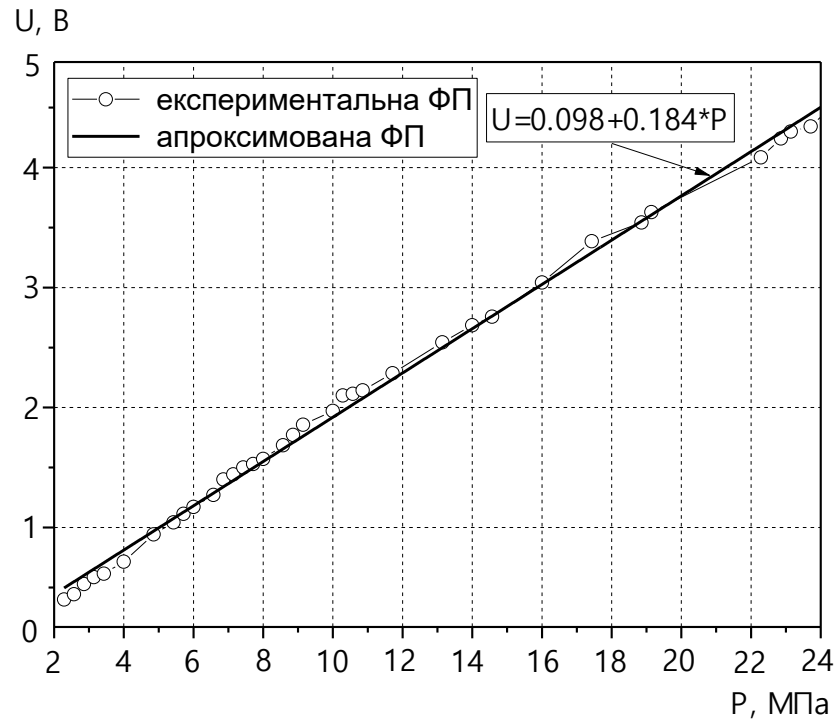


Рисунок 2.6 – Усереднена експериментально визначена функція перетворення  $U(P)$  датчика тиску та її лінійна апроксимація

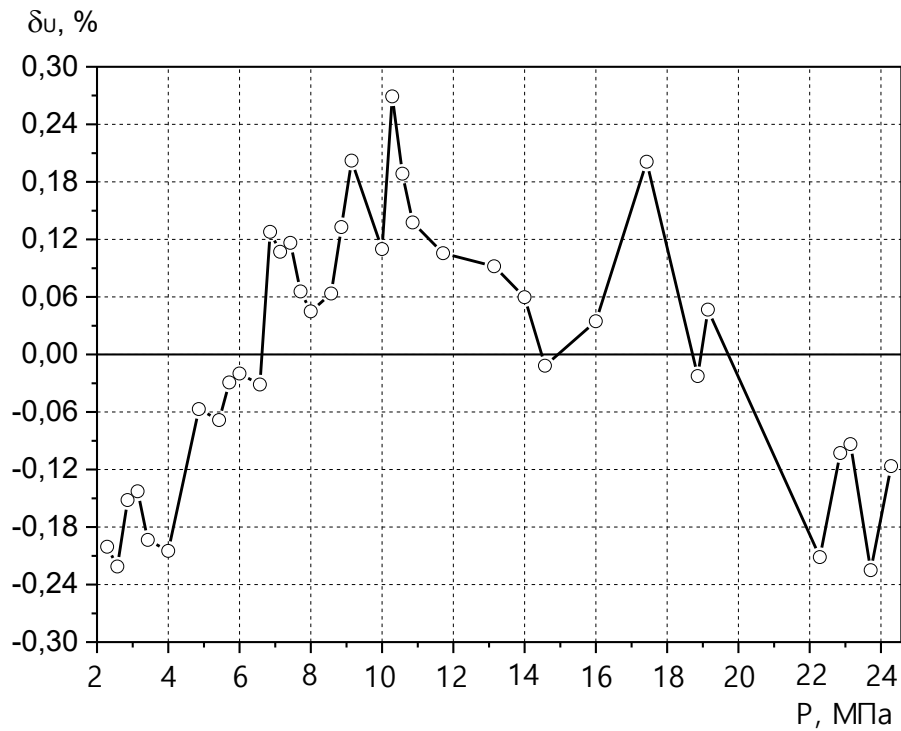


Рисунок 2.7 – Відносна похибка  $\delta_U$  апроксимації усередненої функції перетворення  $U(P)$  датчика тиску

## **2.3 Дослідження впливу "старіння" датчиків тиску на їх статичні та динамічні характеристики**

Дослідження впливу процесу "старіння" датчиків тиску на їх статичні та ДХ проводилось у два етапи.

Спочатку з однотипними датчиками тиску однієї партії виготовлення згідно з розробленою методикою проводились випробовування методом прискореного термічного "старіння". Тривалість випробовування визначалась еквівалентним терміном роботи датчика (рівнем його "старіння"). Після термічного випробовування на калібрувальному стенді перевірялось калібрування кожного датчика, тобто досліджувались статичні характеристики датчиків – їх ФП. Метою цих досліджень було вивчення впливу "старіння" датчика на його лінійність та визначення відхилень характеристик перетворення датчиків від номінальної статичної характеристики.

На другому етапі досліджень для кожного датчика з відповідним рівнем "старіння" визначались ДХ, які потім порівнювались з ДХ, які він мав до його випробовування методом прискореного термічного "старіння". Метою досліджень було: вивчення впливу "старіння" датчика тиску на його перехідну характеристику, постійну часу, час затримки та імпульсну характеристику; виявлення певних закономірностей зміни статичних і ДХ датчиків.

### **Методика штучного "старіння" датчиків тиску**

"Старіння" датчиків тиску викликане внутрішніми деградаційними процесами в процесі тривалої експлуатації на ТСО. Такі процеси можна створити штучно шляхом впливу на датчик підвищеної температури. Для цього проводились випробування згідно з технічними умовами на випробовування (ТУ) [82, 83]. При цьому застосовувалось обладнання і ЗВТ, які були повірені відповідно до ДСТУ 2708 [84], калібровані відповідно до ДСТУ 3989 [85] і опломбовані. Все випробне обладнання мало паспорти й було атестоване відповідно до ДЕРЖСТАНДАРТУ 24555 [82]. Використання ЗВТ і випробного обладнання, що не мали документів, які підтверджують їхню справність і метрологічну



придатність, не допускались

Для перевірки електричної міцності ізоляції між замкненими між собою електричними виводами й корпусом зразка випробувальна напруга. Пристрій захисту від електромагнітних перешкод при цьому від'єднувався і ізолювався від електричних кіл зразка. Випробувальна напруга підвищувалась плавно від нуля до заданого значення зі швидкістю не більш 100 В/с. Ізоляція витримувалась під дією випробувальної напруги протягом 1 хв, потім напруга понижувалась до нуля і випробувальна установка відключалась. Електрична ізоляція між електричними колами й корпусом, при від'єднаному обладнанні захисту від електромагнітних перешкод, витримувала протягом 1 хв дію випробної напруги 500 В синусоїдальної форми частотою від 45 до 65 Гц при температурі 23 °С і відносній вологості 80 %. Це цілком відповідає вимогам ДСТУ [86].

Визначення основної похибки вимірювань тиску проводилось при наступних умовах:

- температура повітря – плюс  $23 \pm 2$  °С;
- відносна вологість повітря – 45...80 %;
- атмосферний тиск 84,0...106,7 кПа;
- електричні й магнітні поля, що впливають на роботу датчика, відсутні;
- вібрація, що впливає на роботу датчика, відсутня;
- напруга живлення ( $36 \pm 0,72$ ) В;
- витримка часу після включення електроживлення – не менше 0,5 год.

Перевірка похибки проводилась відповідно до методики МІ 1997 [87] та МПУ 005/04 [26]. Похибка визначалась при заданні тиску в контрольних точках, досить рівномірно розподілених у діапазоні вимірювань, у тому числі на нижній і верхній межі діапазону.

Порядок дій при випробовуваннях датчиків тиску був наступний:

– нижня межа зміни вихідного сигналу встановлювалась у відповідності до таб. 2.1;

Таблиця 2.1 - Межі зміни вихідного сигналу датчика тиску

| Діапазон зміни       |                                   | Нижня межа                 |                           | $R_{HO},$<br>Ом |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------|
| вихідного струму, мА | вихідної напруги $ U_H - U_B , В$ | вихідного струму $I_H,$ мА | вихідної напруги $U_H, В$ |                 |
| 4-20                 | 0.8                               | 4                          | $0.2000 \pm 0.0004$       | 50              |

- встановлювався максимальний опір навантаження

$$R_{H \text{ макс}} = R_{HO} + R_H = 1.05 \text{ кОм.};$$

- на вхід подавався тиск, рівний  $P_e$ , після чого тиск скидався;

- проводилась корекція нуля (при необхідності), керуючись значенням нижньої межі вихідної напруги і його допустимим відхиленням для перевіряемого зразка, зазначеними в таб. 2.1;

- плавно підвищуючи тиск (прямий хід), фіксувались значення вихідної напруги при тисках, що відповідають контрольним точкам;

- тиск на вході  $P_B$  підтримувався протягом 1 хв.;

- при плавному пониженні тиску (зворотний хід), фіксувались значення вихідної напруги в тих же точках, що й при прямому ході;

- визначалась похибка в кожній контрольній точці як різниця між дійсним та розрахунковим значенням вихідної напруги, що наведене у таб. 2.1 для контрольної точки і віднесене до діапазону вихідної напруги  $|U_H - U_B|$ ;

- визначалась варіація в кожній контрольній точці як різниця між дійсним значенням вихідної напруги при прямому й зворотньому ході, що віднесена до діапазону вихідної напруги  $|U_H - U_B|$ , зазначеному в таб. 2.1.

Після проведення випробовувань оцінювалась правильність функціонування зразка. Датчик тиску приймався за такий, який правильно функціонує, якщо після термічного старіння основна похибка вимірювань у будь-якій контрольній точці не перевищувала допустимого значення

зазначеного в ТУ. В основу методики проведення прискореного "старіння" датчиків тиску покладена залежність швидкості "старіння" від температури, яка описується рівнянням Арреніуса:

$$K_n = \exp\left(\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right),$$

де  $K_n$  – коефіцієнт прискорення випробувань;

$T_1$  - робоча температура навколишнього середовища,  $T_1=35$  °C;

$T_2$  - температура при проведенні випробувань, К;

$E_a$  - енергія активації, рівень  $E_a$  для нових виробів приймається 1 еВ.

Термін служби датчика тиску визначався по формулі:

$$T_E = K_n \cdot t_{випр}, \quad (2.3)$$

де  $t_{випр}$  - тривалість режиму прискореного термічного старіння.

Прискорене термічне "старіння" проводилось шляхом витримки зразка (у виключеному стані) при температурі 80 (90) °C, безупинно, протягом часу, який визначався залежно від цієї температури по таб. 2.2.

Таблиця 2.2 - Час прискореного термічного "старіння" датчиків тиску

| Адекватний термін    | 5 років             | 10 років | 15 років | 20 років | 25 років | 30 років |
|----------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Температура в камері | Час "старіння", год |          |          |          |          |          |
| 80 °C                | 392                 | 784      | 1176     | 1568     | 1960     | 2352     |
| 90 °C                | 158                 | 316      | 474      | 632      | 790      | 948      |

При визначенні часу старіння враховувався кваліфікаційний запас тривалості "старіння" згідно ДСТУ ІЕС 60780 [86]. Час прискореного

термічного "старіння" може бути змінено при уточненні фактичних значень енергії активації для матеріалів і комплектуючих, які входять до складу датчика. Температура в камері підтримувалась з точністю  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Вплив "старіння" датчиків тиску на їх статистичні характеристики досліджувався для кожної з груп датчиків окремо, результати експериментальних досліджень потім усереднювались. Експериментальні дослідження впливу "старіння" датчика на його лінійність та визначення відхилень ФП датчиків від номінальної статичної характеристики та аналіз їх результатів дозволили зробити важливі висновки. Експериментально встановлено, що незалежно від терміну їх експлуатації ФП датчиків на робочій ділянці (2...24 МПа) має лінійний характер (рис. 2.8).

Слід відзначити, що за рахунок "старіння" датчиків їх ФП зміщуються відносно ФП нового датчика (опорної ФП) і чим більший термін експлуатації, то тим більше це зміщення, але цілком піддається коректуванню в процесі калібрування датчиків. Проведені дослідження також показали що "старіння" датчиків до еквівалентного терміну служби до 3 років практично не впливає на їх ФП. Характер графіка ФП не змінюється – ФП залишається лінійною. Таким чином, можна зробити висновок, що "старіння" датчиків не впливає на їх лінійність. В процесі експериментальних досліджень статичних характеристик датчиків було також вивчено вплив "старіння" датчиків на основну похибку вимірювань датчика тиску  $\gamma_c$  в залежності від діапазону зміни його вихідного сигналу:

$$\gamma_c = \pm \frac{P_g - P_n}{P_g} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де  $P_g$  - верхня межа вимірювань тиску;

$P_n$  - нижня межа вимірювань тиску.

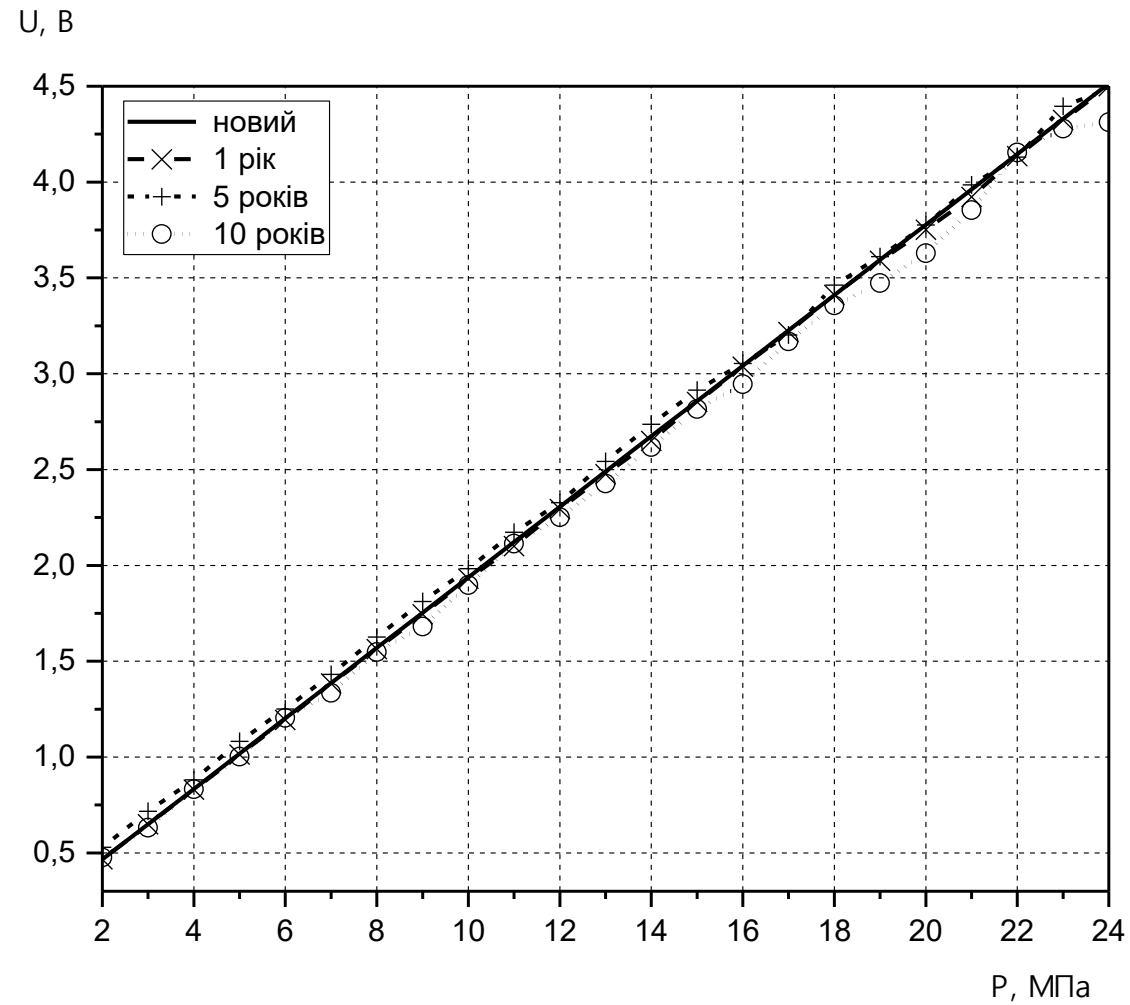


Рисунок 2.8- Усереднені функції перетворення  $U(P)$  датчиків тиску з різним терміном експлуатації

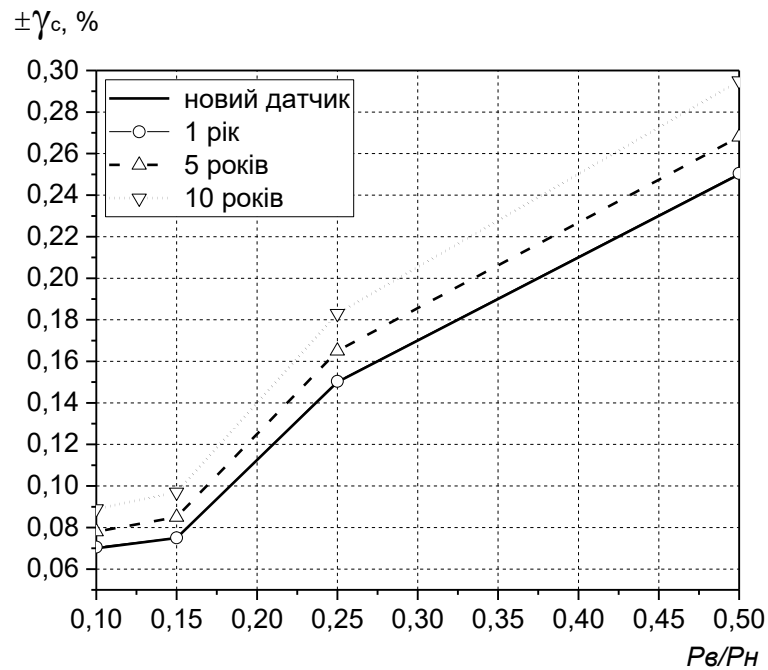


Рисунок 2.9 – Усереднені залежності основної похибки вимірювань тиску  $\gamma_c$  від діапазону зміни вихідного сигналу датчиків тиску  $P_c/P_n$  та терміну їх роботи  $t$

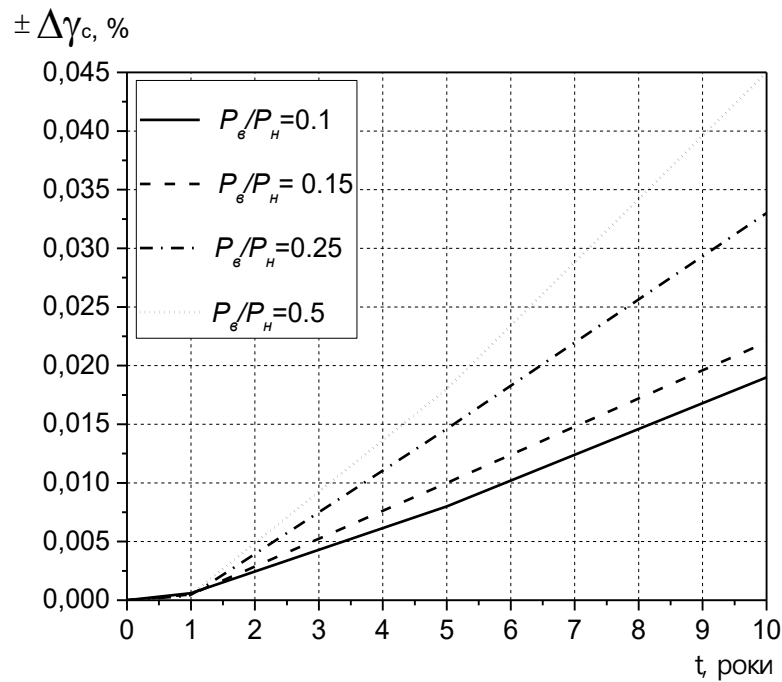


Рисунок 2.10- Залежність зміни основної похибки вимірювань  $\Delta\gamma_c$  датчиків тиску від терміну їх роботи  $t$

Встановлено, що з ростом терміну роботи датчика має зміщення ФП датчика, а це в свою чергу, приводить до росту основної похибки вимірювань  $\gamma_c$  (рис. 2.9). Слід відзначити, що у всіх експериментах відносна похибка вимірювань не перевищувала межі допустимої основної похибки вимірювань  $\gamma_c < \pm 0.5\%$ , але наближалась до неї. Факт росту відносної похибки вимірювань датчика тиску з ростом терміну його експлуатації свідчить про наявність дрейфу цієї похибки в часі. Зростання основної похибки вимірювань  $\Delta\gamma_c$  носить систематичний характер і залежить як від діапазону зміни вихідного сигналу  $P_g/P_n$  датчика тиску, так і від терміну його роботи та лежить в межах від 0.02% до 0.04% (рис. 2.10).

Дослідження показали, що якщо термін експлуатації датчика тиску  $t = (1...3)$  роки, то незалежно від діапазону змінювання вихідного сигналу  $P_g/P_n$  датчика зростання основної похибки вимірювань  $\Delta\gamma_c < \pm 0.01\%$ . Для датчика з 10 річним терміном експлуатації  $\pm 0.17\% \leq \Delta\gamma_c \leq \pm 0.45\%$ , а це близько до межі допустимої основної похибки вимірювань  $\gamma_c < \pm 0.5\%$ .

Отже, основний вплив процесу "старіння" датчика тиску на його статичну ФП полягає в її зсуві і, як наслідок, в зростанні відносної допустимої похибки вимірювань тиску та появі дрейфу цієї похибки в часі.

### **2.3.1 Результати досліджень впливу "старіння" датчиків тиску на їх динамічні характеристики**

В процесі досліджень визначались перехідна та імпульсна характеристики і постійна часу датчиків тиску. Досліджувались датчики тиску рівень "старіння" яких був еквівалентний терміну експлуатації відповідно 1 рік, 5 років та 10 років. Результати експериментальних досліджень ПХ приведені на рис. 2.11. Вони свідчать про те, що чим довше датчик знаходився в експлуатації, тим значніше проявляються випадкові спотворення переднього фронту його ПХ. Певної закономірності не було виявлено. Встановлено що

визначений сумарний час затримки становив  $t_3 = 20$  мс. З врахуванням впливу

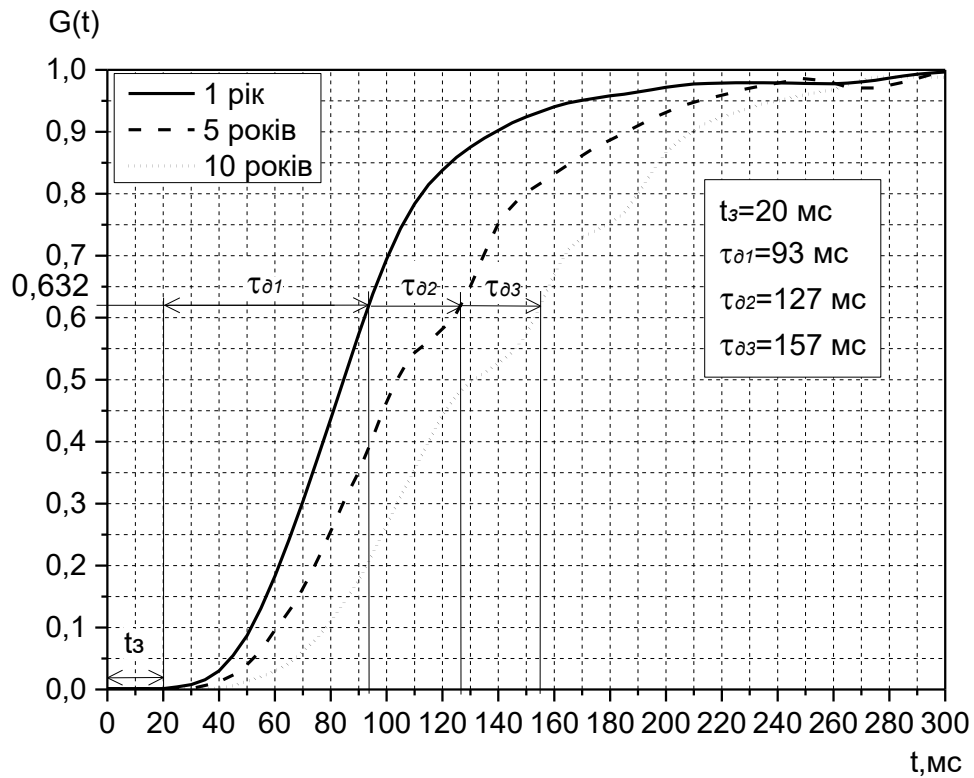


Рисунок 2.11 - Усереднені перехідні характеристики  $G(t)$  датчиків тиску

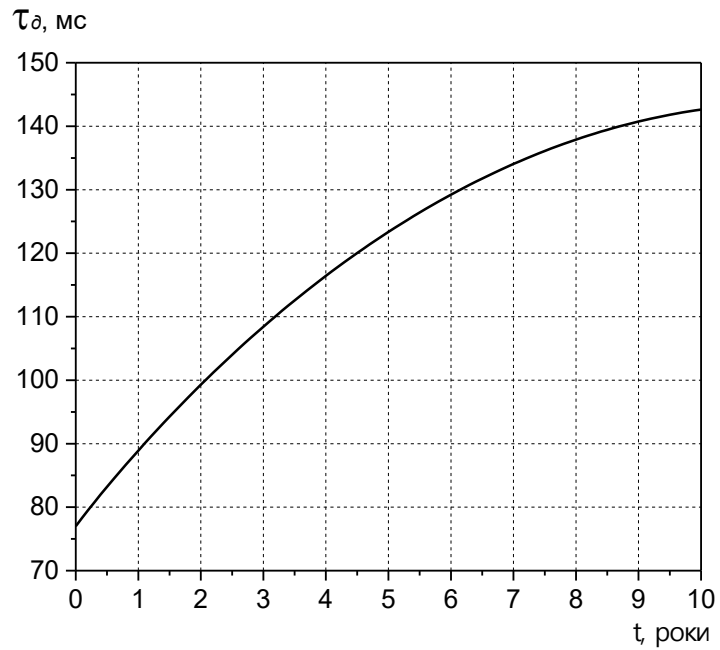


Рисунок 2.12 - Вплив "старіння" датчика на постійну часу датчика тиску  $\tau_d$



компонентів випробовувального стенду (рис. 2.4) отриманий час затримки можна записати як:  $t_3 = t_{cy} + t_{K1} + t_{\partial}$  (де  $t_{cy} = 10$  нс - час затримки системи управління;  $t_{K1} = 1$  мс - час затримки виконавчого механізму- реле K1). Тоді час затримки датчика тиску визначиться як  $t_{\partial} = t_3 - t_{cy} - t_{K1} = 19$  мс.

Постійні часу датчиків тиску  $\tau_{\partial}$  визначались за їх ПХ. Так усереднені постійні часу  $\tau_{\partial}$  для датчиків з термінами експлуатації 1, 5 та 10 років відповідно становили  $\tau_{\partial 1} = 93$  мс,  $\tau_{\partial 2} = 127$  мс,  $\tau_{\partial 3} = 157$  мс,. За отриманими експериментальними даними була встановлена залежність  $\tau_{\partial}$  від терміну експлуатації  $t$  (рис.2.12):

$$\tau_{\partial} = 77 + 12.6 \cdot t^{0.98} - 0.66 \cdot t^{1.9}. \quad (2.5)$$

Встановлено, що зростання  $\tau_{\partial}$  в найбільшій мірі проходить в перші 5 років експлуатації (рис.2.12), а в подальшому воно не є значним.

Постійна часу датчика  $\tau_{\partial}$  є складовою постійної часу системи автоматичного управління (САУ), елементами якої є датчики тиску. Враховуючи це, згідно технічними умовами приведеними в ДК ПП 33.20.52.830, завод виробник гарантує  $\tau_{\partial} \leq 100$  мс. Але як показали дослідження, вже через 2 роки експлуатації датчика на ТСО (рис. 2.12)  $\tau_{\partial} > 100$  мс., а через 10 років експлуатації  $\tau_{\partial} \approx 145$  мс.

Таким чином, встановлено що постійна часу датчика  $\tau_{\partial}$  має властивість змінюватись при експлуатації і потребує, враховуючи специфіку ТСО, постійного контролю для кожного типу датчика і для кожного місця його установки.

В метрологічній практиці, як показали дослідження [1, 2, 3, 4, 5] , при відновленні спотворених датчиком сигналів для оцінки амплітудно-частотної (АЧХ) та фазо-частотної характеристик (ФЧХ) частіше використовується

імпульсна ніж перехідна характеристика датчика. Тому наступним етапом дослідження був аналіз імпульсних характеристик датчиків тиску.

Експериментальні дослідження датчиків тиску свідчать про те, що з ростом терміну експлуатації його імпульсна характеристика  $H(t)$  спотворюється (рис. 2.13). Вона розширюється і деформується, а її амплітуда зменшується.

З метою забезпечення відтворення експериментально отриманих імпульсних характеристик датчиків з різним терміном експлуатації в наступних дослідженнях при створенні моделей як датчиків тиску, так і ВКТ в цілому ці характеристики апроксимувались аналітичними виразами. Найбільш прийнятним за критерієм мінімуму залишкової похибки апроксимації став метод апроксимації імпульсної характеристики з використанням функцій Лоренца (Лоренціан), які зображені на рис. 2.14 та описуються виразом:

$$H(t, \bar{p}) = p_0 + \frac{p_1}{\pi} \cdot \frac{p_2}{2(t - p_3)^2 + p_2^2}, \quad (2.6)$$

де  $\bar{p}$  - параметри функції Лоренца;

$p_0$  - базис Лоренціани;

$p_1$  - ордината максимального значення Лоренціани;

$p_2$  - коефіцієнт ширини;

$p_3$  - абсциса максимуму Лоренціани.

Результуюча апроксимаційна крива (рис. 2.14) описується сукупністю функцій Лоренца:

$$H(t, \bar{p}) = H_1(t, \bar{p}) + H_2(t, \bar{p}) + \dots + H_n(t, \bar{p}). \quad (2.7)$$

В загальному випадку вираз (2.7) може бути записаний як:

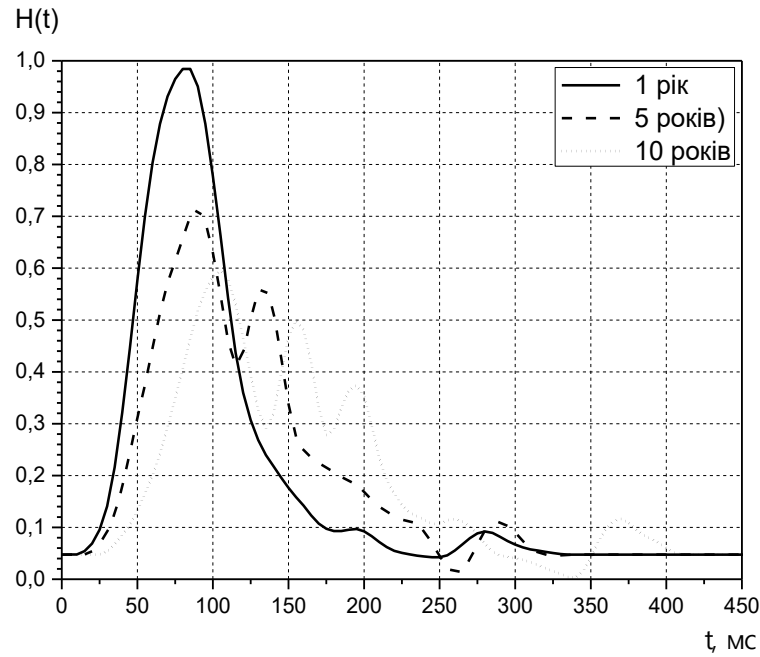


Рисунок 2.13 – Вплив "старіння" датчика тиску на його імпульсну характеристику  $H(t)$

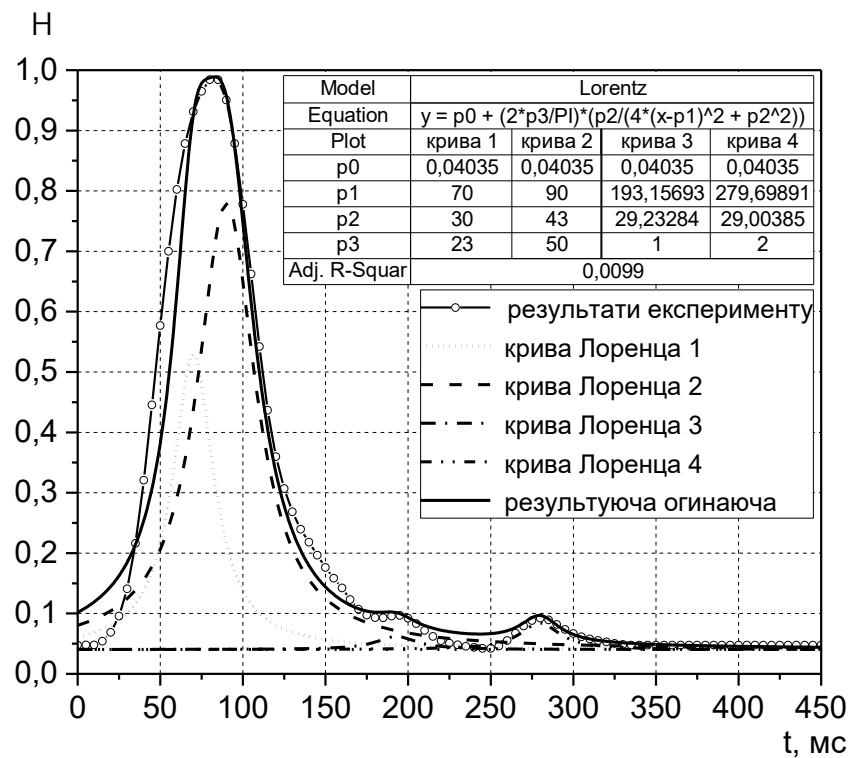


Рисунок 2.14 - Апроксимована функціями Лоренца  $H(t, \bar{p})$  імпульсна характеристика  $H(t)$  датчика тиску з терміном експлуатації 1 рік

$$H(t, \bar{p}) = \sum_{i=1}^n \left( p_{oi} + \frac{2 \cdot p_{i1}}{\pi} \cdot \frac{p_{i2}}{4 \cdot (t - p_{i3})^2 + p_{i2}^2} \right). \quad (2.8)$$

Кількість функцій Лоренца  $n$  необхідних для досить точної апроксимації імпульсної характеристики залежить від терміну експлуатації датчика, що коливається в межах від одного до 8...10 років експлуатації. За результатами експериментальних досліджень датчиків тиску були отримані емпіричні залежності кількості апроксимуючих функцій від терміну експлуатації  $n(t)$ :

$$n(t) = 1 + 2.2 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{0.3}\right) \right) + 12 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{16}\right) \right). \quad (2.9)$$

де  $H_e(t)$  - експериментальна імпульсна характеристика датчика;

$H_a(t)$  - апроксимована імпульсна характеристика датчика.

На рис. 2.15 зображена отримана за результатами експериментальних досліджень функція  $n(t)$  згідно виразу (2.9). Результати апроксимації оформлювались у вигляді графіків рис. 2.16...2.20 та таблиці додатку А. Апроксимовані імпульсні характеристики датчиків тиску, які описуються виразом (2.13) з врахуванням параметрів функції Лоренца, приведених в табл. 2.3 відповідно для терміну експлуатації 1 рік -  $H_1(t)$ , 5 років -  $H_5(t)$ , 10 років -  $H_{10}(t)$ , описуються виразами:

$$H_1(t) = 0.16 + \frac{439}{4 \cdot (t - 70)^2 + 900} + \frac{1369}{4 \cdot (t - 90)^2 + 1849} + \frac{18.6}{4 \cdot (t - 193)^2 + 854.6} + \frac{37}{4 \cdot (t - 280)^2 + 841}, \quad (2.10)$$

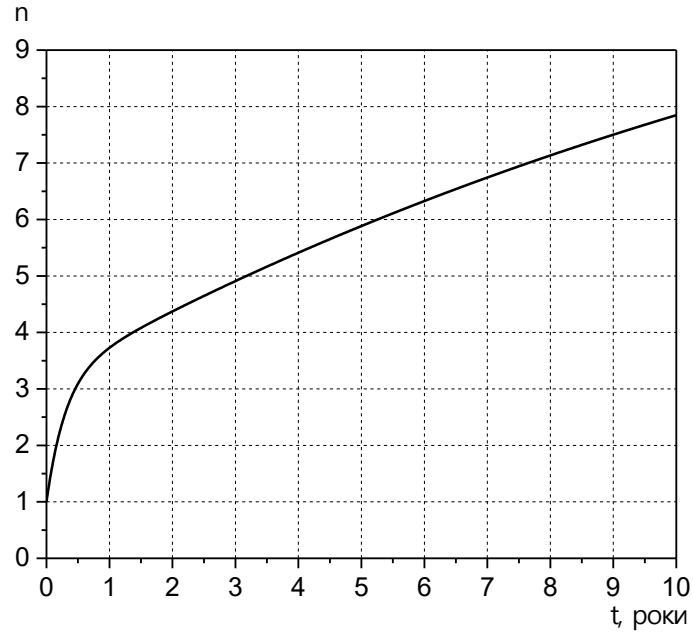


Рисунок 2.15 – Залежність кількості  $n$  апроксимаційних функцій від терміну експлуатації  $t$  датчика тиску

$$H_5(t) = 0.258 - \frac{305.6}{4 \cdot (t-17)^2 + 3600} + \frac{2567}{4 \cdot (t-87)^2 + 3969} +$$

$$+ \frac{140}{4 \cdot (t-138)^2 + 484} + \frac{2447}{4 \cdot (t-200)^2 + 21360} - , \quad (2.11)$$

$$- \frac{128}{4 \cdot (t-274)^2 + 4474} - \frac{326}{4 \cdot (t-285.5)^2 + 16.28}$$

$$H_{10}(t) = 0.344 - \frac{153}{4 \cdot (t-25)^2 + 3600} + \frac{1662}{4 \cdot (t-100)^2 + 3047} +$$

$$+ \frac{126}{4 \cdot (t-156)^2 + 400} + \frac{4858}{4 \cdot (t-207)^2 + 1697} - \frac{3920}{4 \cdot (t-207.8)^2 + 1568} - .(2.12)$$

$$- \frac{5.48}{4 \cdot (t-296)^2 + 273} - \frac{142}{4 \cdot (t-338)^2 + 1814}$$

При знаходженні апроксимаційного виразу для імпульсної характеристики датчика тиску  $H(t)$  в якості критерію достовірності був вибраний мінімум

відносної похибки апроксимації:

$$\delta_H(t) = \frac{H_e(t) - H_a(t)}{H_e(t)}. \quad (2.13)$$

На рис. 2.16, 2.18, 2.20 приведені графіки апроксимованих усереднених імпульсних характеристик  $H(t)$  датчиків тиску з термінами експлуатації відповідно 1, 5 та 10 років, які побудовані за виразами (2.10), (2.11) та (2.12). Відносні похибки апроксимації  $\delta_H(t)$  усереднених імпульсних характеристик  $H(t)$  датчиків тиску зображені на рис. 2.17, 2.19, 2.21. Встановлено, що похибка апроксимації носить як суб'єктивний, так і об'єктивний характер та не перевищує  $\pm 7\%$ . Її величина залежить від декількох факторів. Так, чим більше членів апроксимаційного поліному вибрано, тим менша похибка  $\delta_H(t)$ , але при цьому значно зростає час необхідний для апроксимації оскільки ця операція здійснюється оператором вручну з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм.

Таким чином, експериментально визначені і наближено аналітично описані імпульсні характеристики  $H(t)$  датчиків тиску з різним терміном експлуатації дозволяють створити базу даних датчиків тиску, яка дозволить розробляти моделі ВКТ, що є адаптивними до його "старіння".

Відновлені за експериментальними імпульсними характеристиками АЧХ датчиків приведені на рис.2.22. Внаслідок "старіння" датчиків зменшується амплітуда АЧХ.

Суттєвим є те, що за аналогією з тривалістю переднього фронту ПХ датчика це зменшення від  $A_{\text{макс}}$  до  $0.62 \cdot A_{\text{макс}}$  проходить в перші 5 років експлуатації. Ширина смуги пропускання АЧХ датчика  $\Delta f_{0.7} = 11$  Гц на протязі досліджуваного терміну експлуатації залишається незмінною, а амплітуда АЧХ в смузі 18...40 Гц (рис.2.22) зменшується в залежності від рівня "старіння" датчика майже в 2 рази.

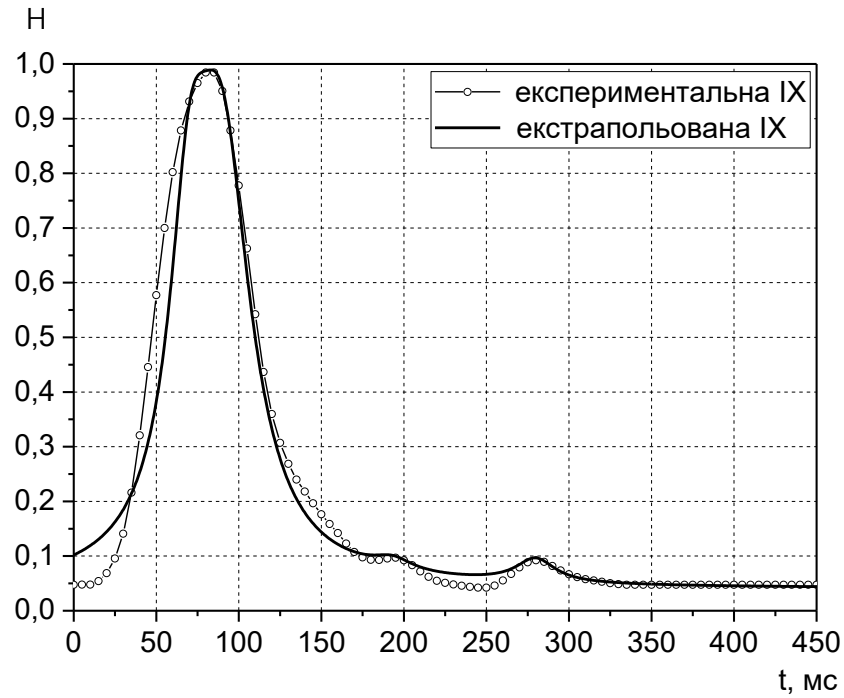


Рисунок 2.16 – Апроксимована усереднена імпульсна характеристика  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 1 рік

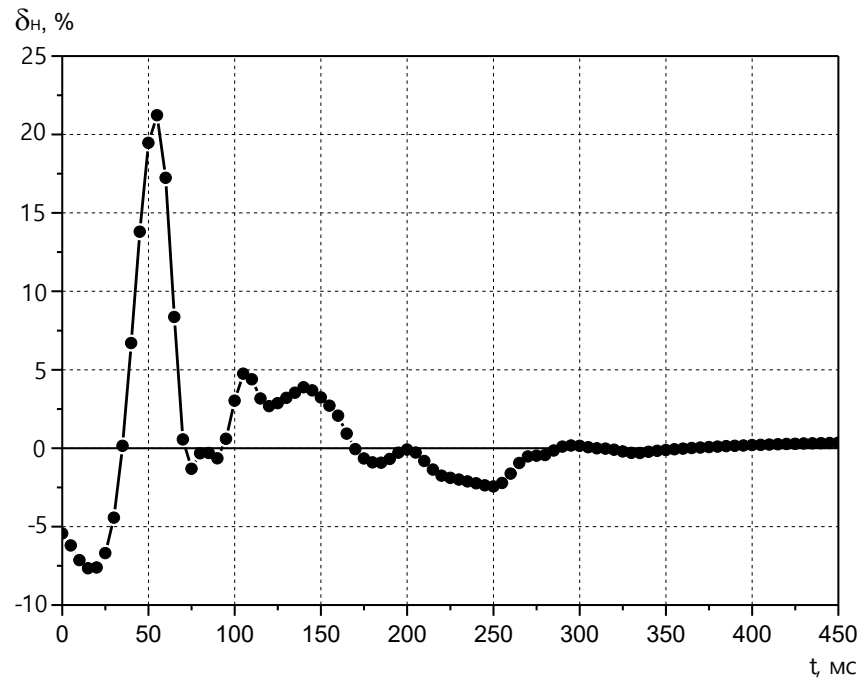


Рисунок 2.17 – Відносна похибка апроксимації  $\delta_H(t)$  усередненої імпульсної характеристики  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 1 рік

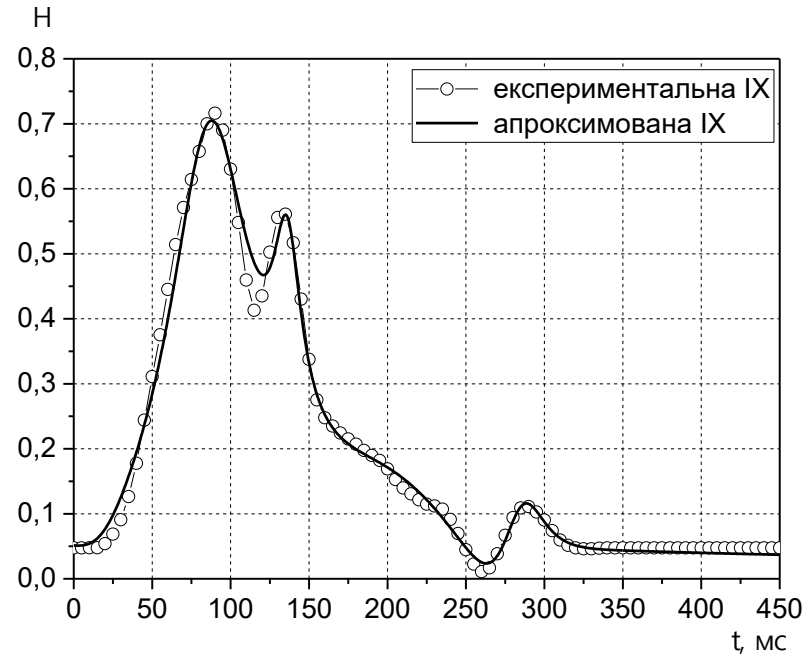


Рисунок 2.18 - Апроксимована усереднена імпульсна характеристика  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 5 років

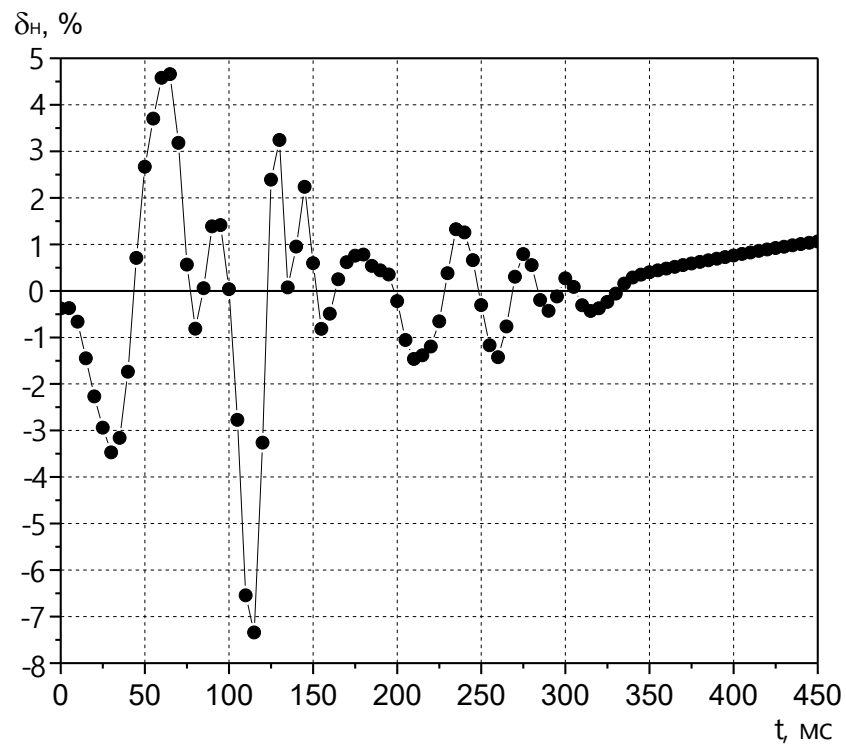


Рисунок 2.19 - Відносна похибка апроксимації  $\delta_H(t)$  усередненої імпульсної характеристики  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 5 років



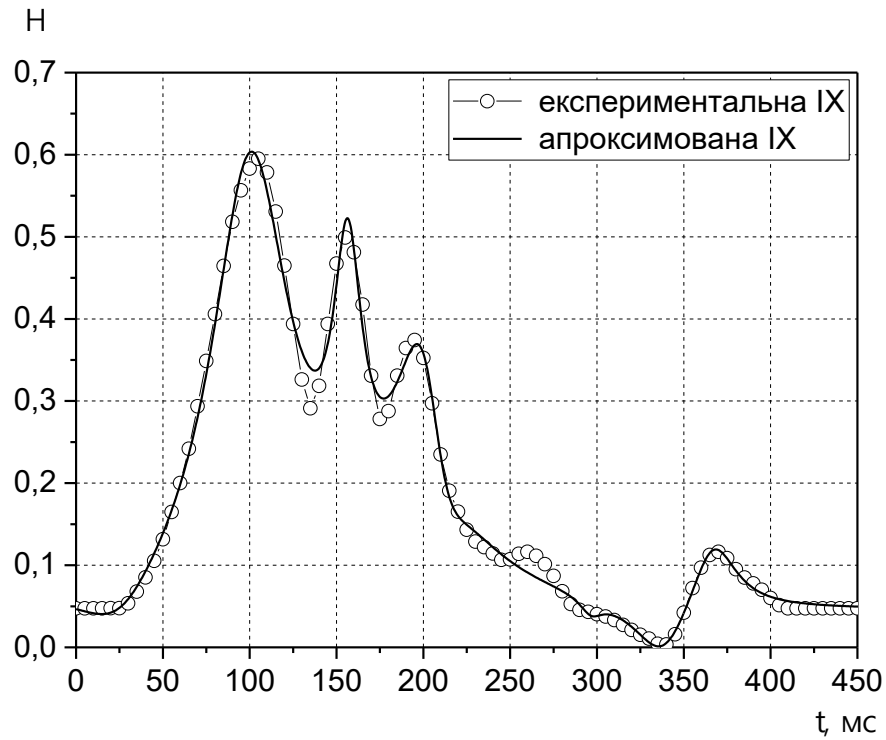


Рисунок 2.20 - Апроксимована усереднена імпульсна характеристика  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 10 років

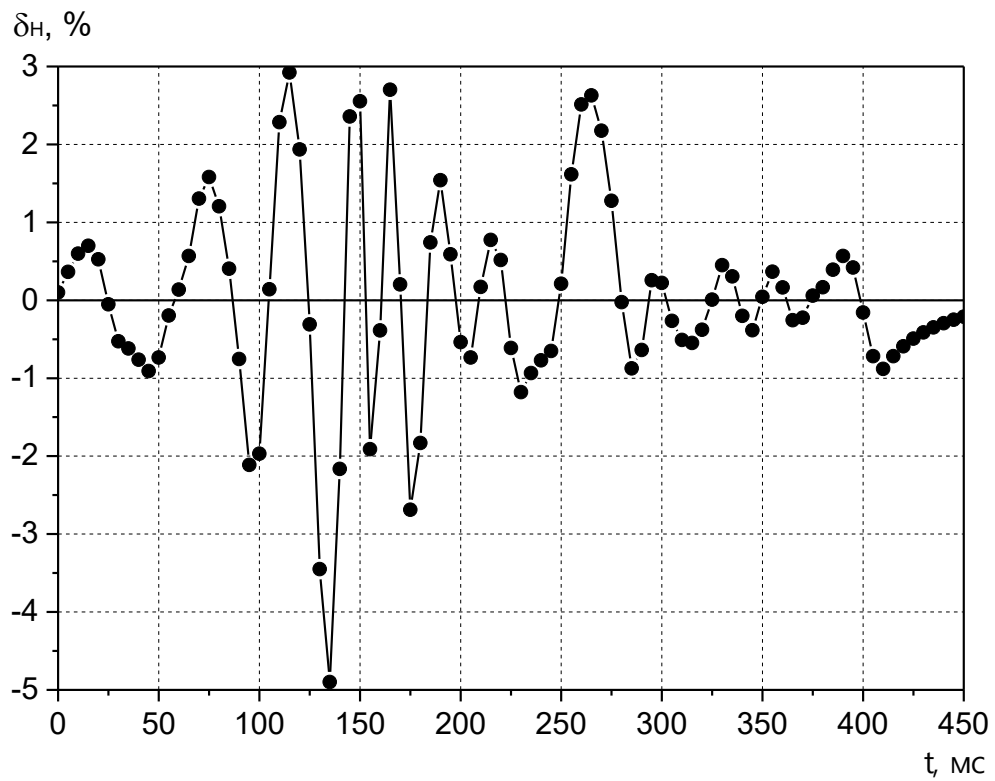


Рисунок 2.21- Відносна похибка апроксимації  $\delta_H(t)$  усередненої імпульсної характеристики  $H(t)$  датчиків тиску з терміном експлуатації 10 років

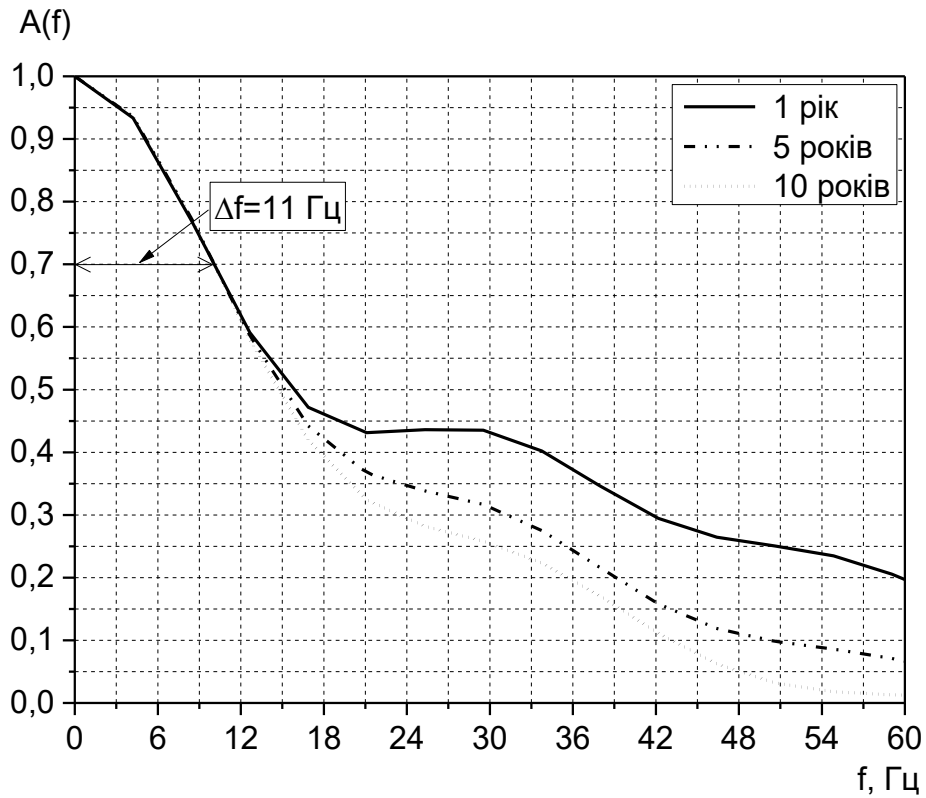


Рисунок 2.22 – Нормовані амплітудно-частотні характеристики  $A(f)$  датчиків тиску

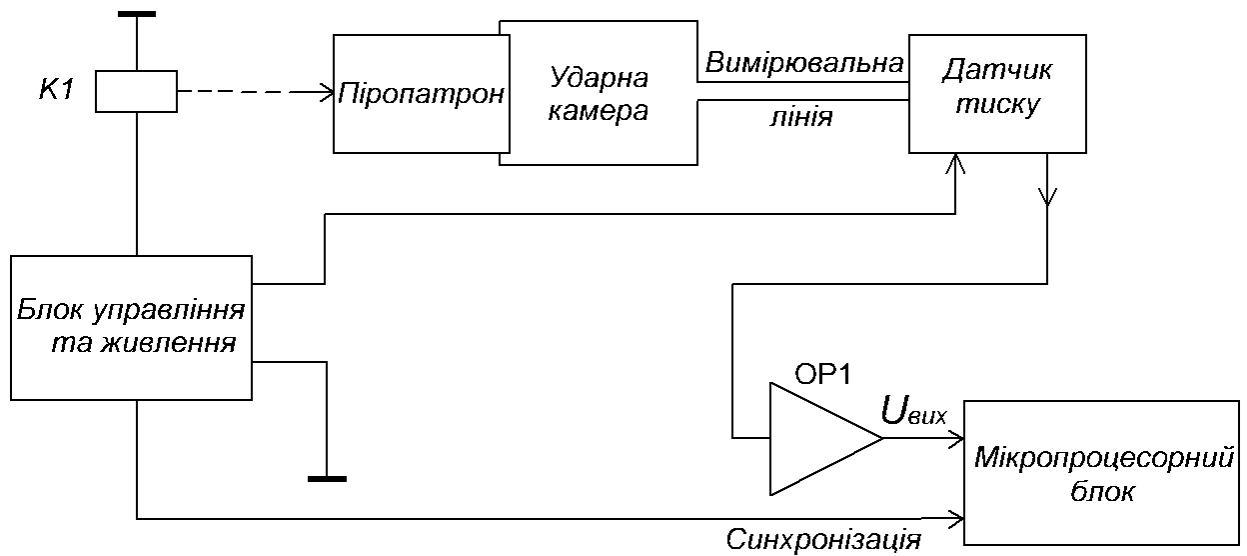


Рисунок 2.23 - Структурна схема вимірювального комплексу визначення динамічних характеристик вимірювальної лінії

Це свідчить про те складові спектру вхідного сигналу датчика тиску, які будуть попадати в смугу 18...40 Гц, будуть гаситися. Це в свою чергу приведе до спотворень форми вихідного сигналу датчика, що необхідно враховувати як при оцінці похибок вимірювань ВКТ з різним терміном експлуатації, так і при моделюванні ВКТ.

Отже, з проведених досліджень впливу "старіння" датчиків тиску на їх динамічні характеристики випливає:

1. Внаслідок "старіння" в процесі експлуатації датчиків тиску змінюються як статичні, так і динамічні характеристики датчиків тиску, зокрема постійна часу датчика, перехідна, імпульсна та амплітудно-частотна характеристики.

2. "Старіння" датчика викликає дрейф відносної похибки вимірювань тиску, який протягом 10 років експлуатації може перевищити межі відносної похибки вимірювань. Тому такі датчики тиску потребують посиленого контролю похибки вимірювань.

3. "Старіння" датчика в найбільшій мірі впливає на його постійну часу, яка може зрости майже в 2 рази, а також на амплітудно-частотну характеристику і, як наслідок, на форму сигналу на виході датчика.

Для ТСО важливими є, однак, ДХ всього ВКТ, що потребує аналізу вимірювальної лінії сумісно з датчиком тиску.

## **2.4 Визначення динамічних характеристик вимірювальних ліній вимірювального каналу тиску**

Вимірювальні лінії тиску використовуються на ТСО для того, щоб розмістити датчики тиску подалі від технологічного середовища з метою знизити вплив навколишньої температури на їхню працездатність і номінальний термін експлуатації. Високі температури навколишнього середовища можуть негативно вплинути на механічні компоненти датчика, а також зменшити термін служби його електроніки, в якій використовуються

напівпровідники

Додатковими причинами для розташування датчиків далеко від зони процесу є зниження вібрації й полегшення доступу до них для заміни або технічного обслуговування.

Дослідження впливу вимірювальних ліній на постійну часу вимірювального каналу тиску проводилось у відповідності з ГОСТ 22521-85. При цьому використовувались нові справні і повірені датчики тиску з вже визначеними статичними та динамічними характеристиками. Структурна схема вимірювального комплексу приведена на рис. 2.23.

В процесі досліджень використовувалась одна вимірювальна лінія заповнена водою. Вона була виготовлена із суцільних труб невеликого діаметра (20 мм) з вуглецевої сталі з товщиною стінок 1.5 мм. Безпосередній підвід до датчика тиску був виконаний з металопластикових труб. В силу того, що довжина ліній впливає на повний час реакції вимірювального каналу тиску, її треба вибирати короткою.

Реально на ТСО, в залежності від їх призначення, вимірювальні лінії можуть істотно відрізнятись за довжиною: від кількох метрів до 200...300 м з середнім значенням від 10 до 50 м. Щоб задовольнити вимогам ідентичності досліджуваної вимірювальної лінії її об'єктовому аналогу, для досліджень була вибрана лінія довжиною 25 м.

Методика визначення ДХ вимірювальної лінії каналу тиску повністю аналогічна методиці визначення ДХ датчика тиску. По своїй суті буде визначені динамічні характеристики справного нового (опорного) ВКТ. Оскільки динамічні характеристики використаного в експерименті датчика тиску відомі, то можна визначити постійну часу вимірювальної лінії як:

$$\tau_{\text{вл}} = \tau_{\text{вк}} - \tau_{\text{д}}, \quad (2.14)$$

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

$\tau_{\text{вк}}$  - постійна часу ВКТ.

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

В результаті проведених досліджень з використанням випробовувального стенду (рис. 2.23) була визначена перехідна характеристика ВКТ, яка приведена на рис. 2.24а. Аналіз отриманої ПХ ВКТ (рис. 2.25а) та ПХ датчика тиску, яка визначена раніше (рис. 2.24б) показав, що ПХ ВКТ практично повторює ПХ датчика. При цьому час затримки  $t_z$  ПХ ВКТ збільшився з 20 мс до 40 мс, а постійна часу залишилася незмінною -  $\tau_{\text{вк}} = \tau_0 = 74$  мс. Сумарний час затримки ВКТ визначається як:

$$t_z = t_{\text{звл}} + t_{\text{зд}}, \quad (2.15)$$

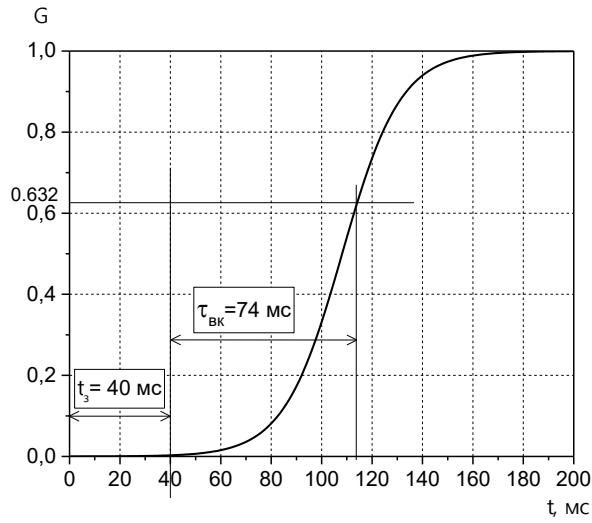
де  $t_{\text{звл}}$  - час затримки вимірювальної лінії тиску;

$t_{\text{зд}}$  - час затримки датчика тиску.

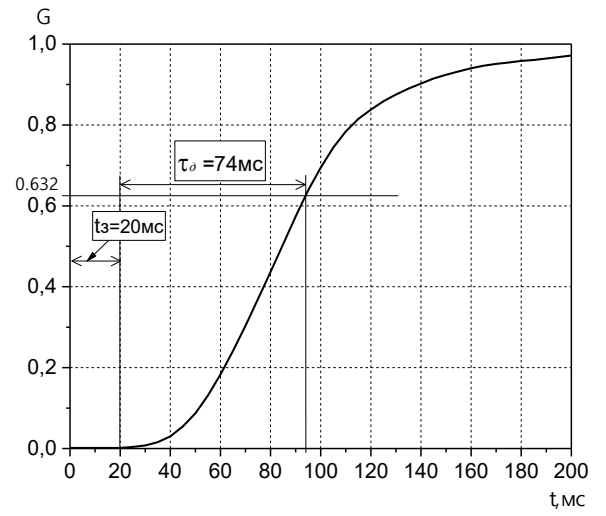
З урахуванням співвідношення (2.15), а також того що  $t_{\text{зд}} \approx 20$  мс, визначимо час затримки вимірювальної лінії тиску -  $t_{\text{звл}} = 20$  мс.

Отже, експериментально показано, що справна, нова без заторів і витоків вимірювальна лінія без спотворень передає вхідний сигнал з виходу на вхід з затримкою, яка визначається її довжиною.

Виходячи з лінійності вимірювальної лінії, можна безпосередньо визначити її ПХ за отриманими експериментальними даними як різницю між ПХ ВКТ і ПХ датчика тиску. Визначена таким способом ПХ вимірювальної лінії приведена на рис. 2.25а, а на рис. 2.25б її імпульсна характеристика. Як видно з рис. 2.25а, реакція вимірювальної лінії на ст тиску має певну (близько 1 мс) тривалість. Це пояснюється двома причинами:

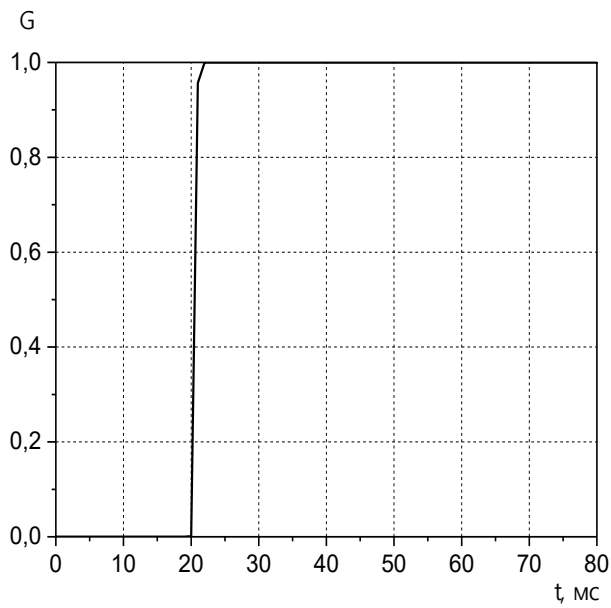


a)

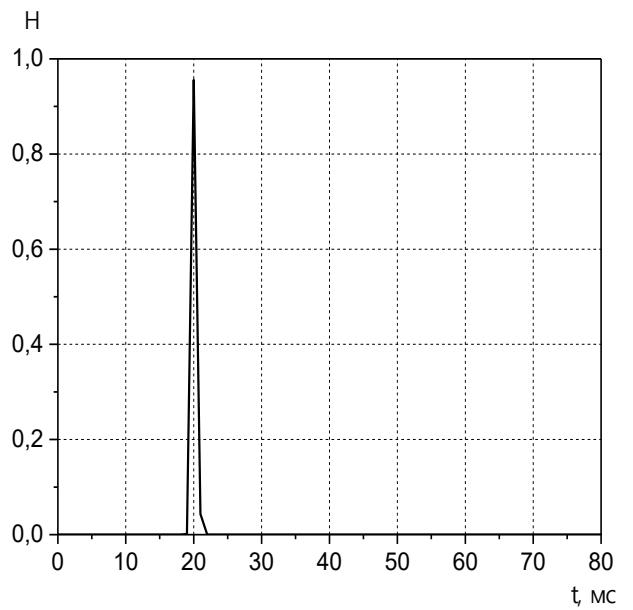


б)

Рисунок 2.24 – Перехідні характеристики  $G(t)$  опорного вимірювального каналу тиску а) та його датчика тиску б)



a)



б)

Рисунок 2.25 – Перехідна  $G(t)$  а) та імпульсна  $H(t)$  б) характеристики вимірювальної лінії каналу тиску

неможливо на практиці створити миттєвий стрибок вхідного сигналу тиску в трубі довжиною 25 м;

– вимірювальна лінія на практиці не є строго лінійною без викривлень та неоднорідностей у виді вентилів, фітингів та з'єднувачів.

Звідси випливає, що реакція вимірювальної лінії дорівнює тривалості вхідної дії (тривалості поширення хвилі повітряного тиску після підриву піропатрона). Імпульсна характеристика нової вимірювальної лінії (рис.2.25б) має тривалість близько 1мс, що свідчить про широкополосність лінії. В процесі експлуатації характеристики вимірювальної лінії будуть змінюватись.

## **2.5 Дослідження впливу "старіння" вимірювальної лінії на динамічні характеристики вимірювальних каналів тиску**

В процесі експлуатації у вимірювальній лінії, що заповнена технологічною рідиною, внаслідок її "старіння" утворюються закупорки, порожнечі та повітряні пробки і витоки, внаслідок чого лінія втрачає свою лінійність і тому не можна використовувати для дослідження впливу "старіння" вимірювальної лінії на ДХ ВКТ ті ж самі методи що і для датчика тиску. Крім того, в цьому випадку внаслідок нелінійної взаємодії вимірювальної лінії і датчика не можна визначити окремо ДХ вимірювальної лінії і датчика тиску. Це можна робити, використовуючи метод аналізу шумів. Дійсно, одним з основних переваг перевірки часу реакції за допомогою методу аналізу шумів є те, що його результати обов'язково включають вплив вимірювальних ліній, тобто будь-який результат для каналів тиску, отриманий методом аналізу шумів, враховує довжину і діаметр вимірювальних ліній, а також будь-які закупорки, порожнечі та витоки, які можуть бути присутні у цих лініях.

В процесі досліджень з визначення впливу "старіння" вимірювальної лінії на ДХ ВКТ було розроблено вимірювальний комплекс (рис.2.26), в якому був реалізований метод аналізу шумів. Стенд для досліджень вимірювальних

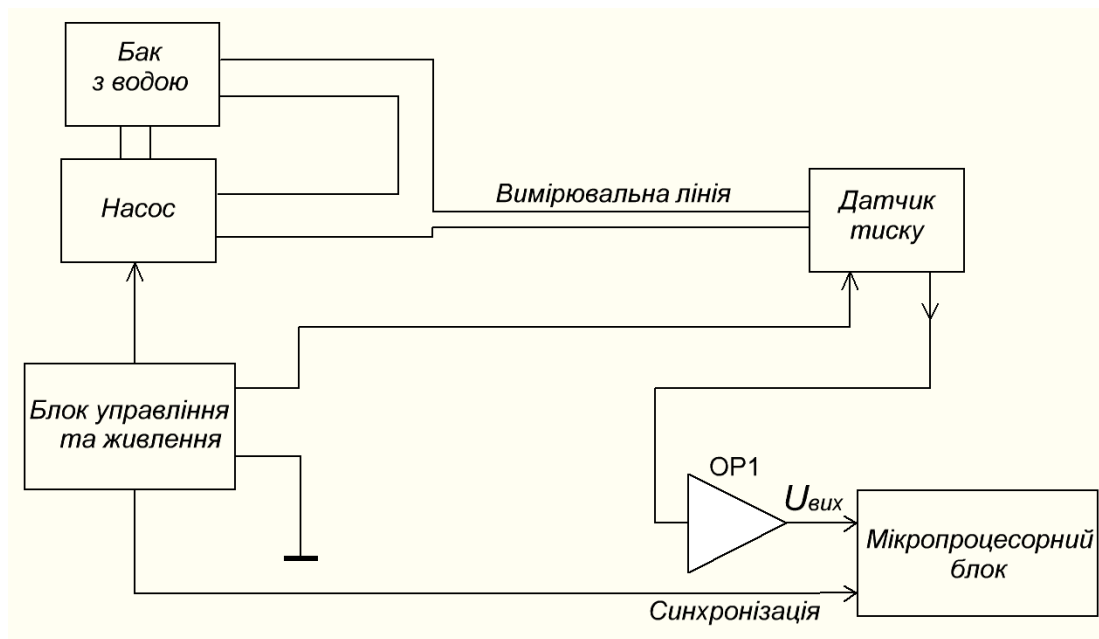


Рисунок 2.26 - Структурна схема вимірювального комплексу визначення динамічних характеристик вимірювального каналу

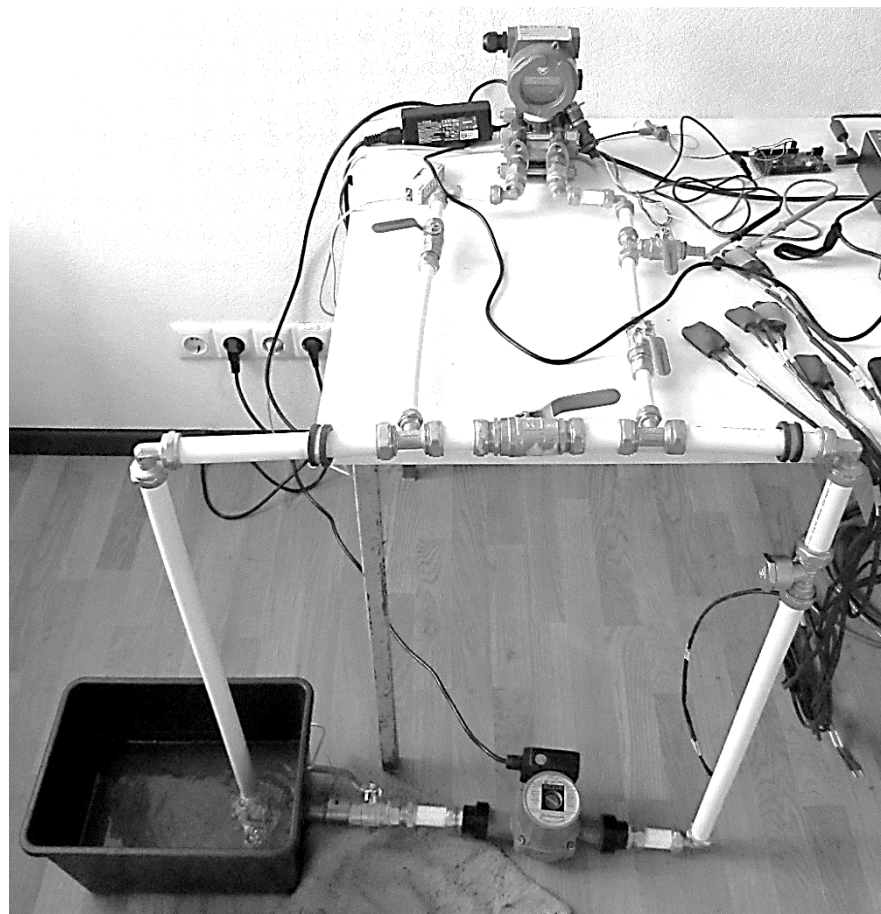


Рисунок 2.27- Зовнішній вигляд стенду дослідження вимірювальних ліній



ліній зображено на рис. 2.27. В дисертаційній роботі був проведений аналіз впливу кожного чинника "старіння" вимірювальної лінії на ДХ ВКТ.

Вплив порожнеч у вимірювальній лінії тиску викликаний наявністю в ній повітря або газу. Цей чинник приводить до додаткових похибок вимірювання тиску, уповільненої реакції каналу тиску й сторонніх шумів в результаті акустичних резонансів. Попадання повітря у вимірювальну лінію робить рідину стискаємою, що приводить до сповільнення передачі сигналу тиску з входу на вихід вимірювальної лінії. Хоча й можна було б очікувати, що пухирці повітря розчиняться в рідині при високих тисках, характерних для промислових вимірювань, позбутися порожнеч у вимірювальній системі важко. Наявність повітря або порожнеч у вимірювальних лініях тиску впливає на форму графіка спектральної щільності потужності (СЩП) сигналів шуму. На рис. 2.28 представлені результати експериментів, що показують вплив наявності повітря на ДХ ВКТ. Як і очікувалося, наявність повітря приводить до збільшення постійної часу ВКТ  $\tau_{вк}$ . Аналіз результатів досліджень з використанням методу аналізу шумів показав, що наявність повітря змушує резонанс СЩП зміщатися у бік більш низьких частот і що постійна часу каналу  $\tau_{вк}$  зростає в міру збільшення кількості повітря в лінії. Встановлено, що залежність постійної часу ВКТ від об'єму повітря в ньому може описуватись аналітичним виразом:

$$\tau_{вк} = 106 + 1664 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{251}\right)\right) \right). \quad (2.16)$$

Графік залежності  $\tau_{вк}$  від об'єму  $V$  повітря у вимірювальній лінії приведений на рис. 2.29.

Дослідження також проводились з вивчення впливу закупорок вимірювальних ліній ВКТ на його ДХ. Встановлено, що закупорки

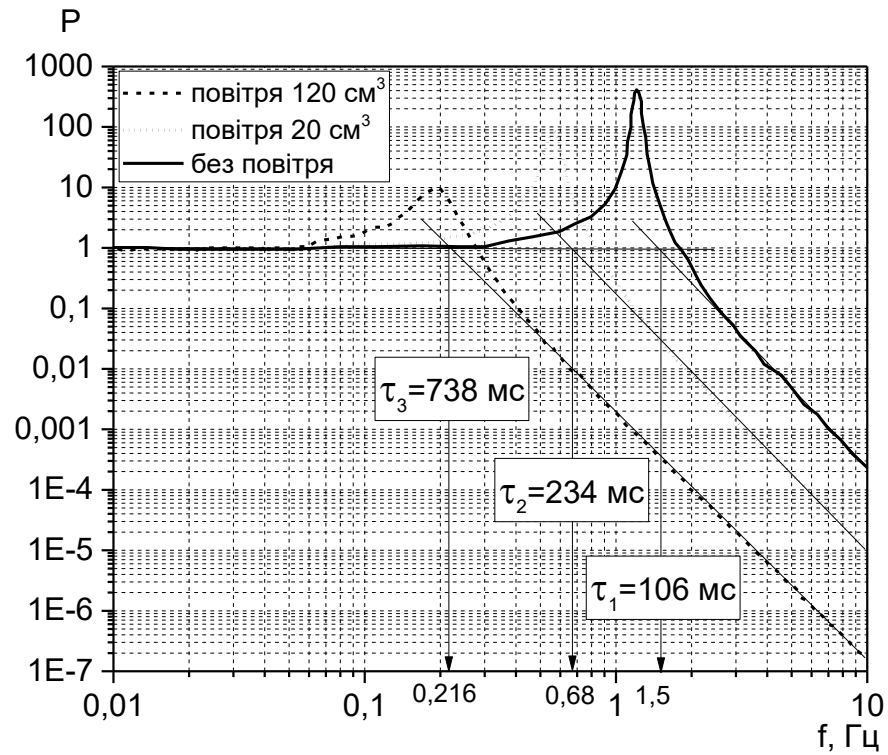


Рисунок 2.28 - Графіки СЦП при наявності повітря в каналі вимірювання тиску  $\tau_{\text{вк}}$

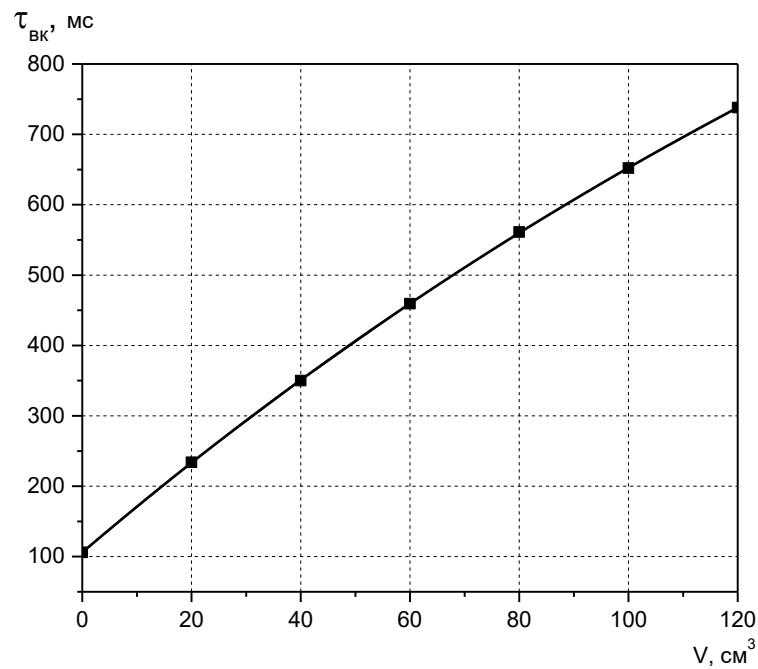


Рисунок 2.29 – Залежність постійної часу  $\tau_{\text{вк}}$  ВКТ від об'єму  $V$  повітря у вимірювальній лінії

вимірювальних ліній відбуваються, коли хімікалії, які використовуються для обробки води і її відстоювання твердіють або коли накопичуються інші забруднювачі. Це також відбувається через перешкоди, що виникають в вимірювальній лінії і через неточність установки та вирівнювання урівнювальних і відсікаючих вентилів або де вимірювальні трубки піддалися обтисненню. Часткові закупорки негативно позначаються лише на динамічній реакції каналу вимірювання тиску і не погіршують його статичну характеристику, але коли лінія повністю закупорена, інформація про тиск втрачається повністю.

Дослідження проводились з використанням аналога закупорки – відносного перекриття діаметру трубопровода вимірювальної лінії за допомогою шарового крану (рис. 2.27) В якості критерію оцінки рівня закупорки вимірювальної лінії було прийнято відносний рівень закупорки  $d$  :

$$d = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

де  $\alpha$  - кут повороту рукоятки шарового крана в градусах;

$\alpha_{\max} = 90^0$  - максимальний кут повороту рукоятки крана при якому він повністю перекривається.

Досліджувались звідносні акупорки з рівнями 0...50% з дискретністю в 5%. В результаті досліджень були отримані СЦП вихідного сигналу ВКТ при наявності та при відсутності закупорок у вимірювальній лінії (рис. 2.29) та апроксимаційна функція залежності постійної часу  $\tau_{\text{вк}}$  ВКТ від відносної закупорки  $d$  вимірювальної лінії (рис. 2.31):

$$\tau_{\text{вк}} = 97 + 1664 \cdot \left( 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{680}\right)\right) \right). \quad (2.18)$$

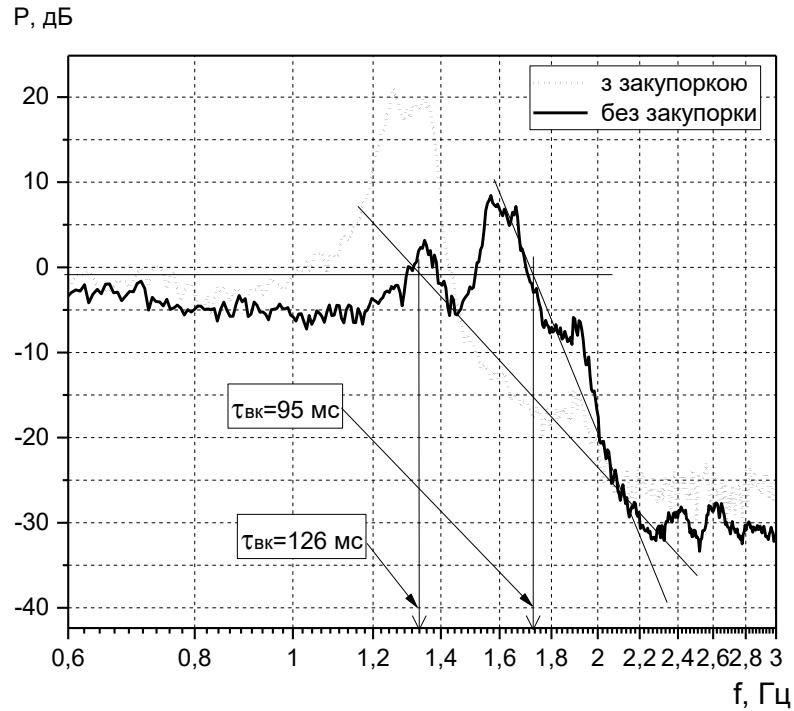


Рисунок 2.30 - СЦП сигналу для каналу вимірювання тиску при наявності та при відсутності закупорок у вимірювальній лінії

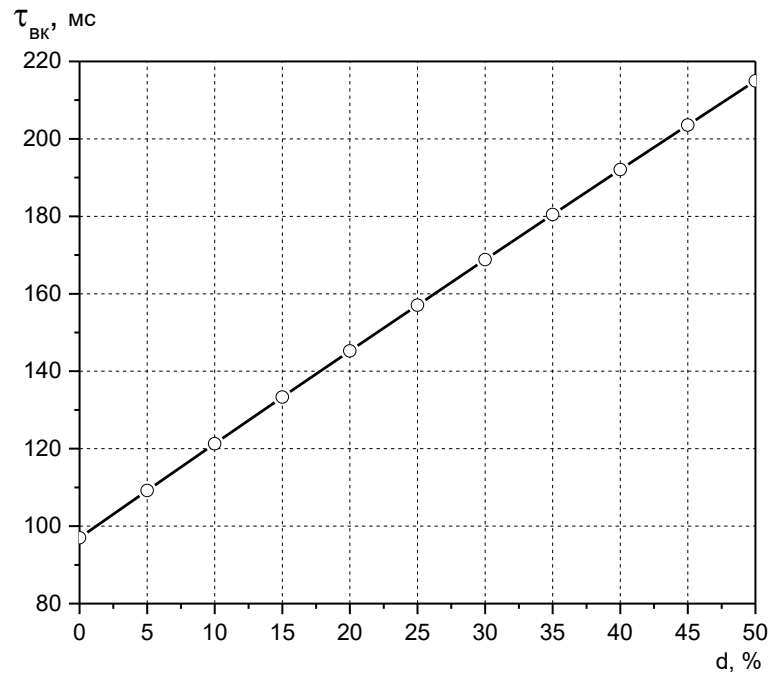
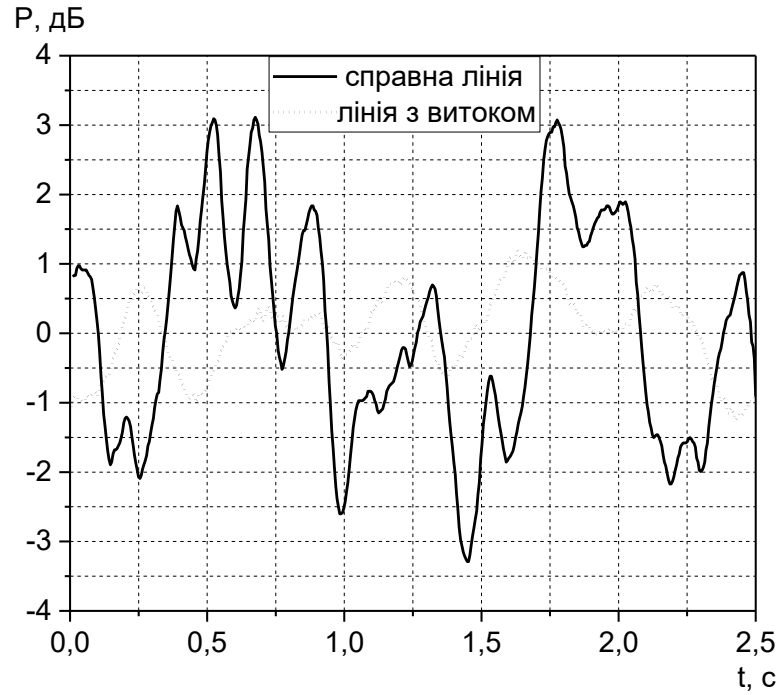
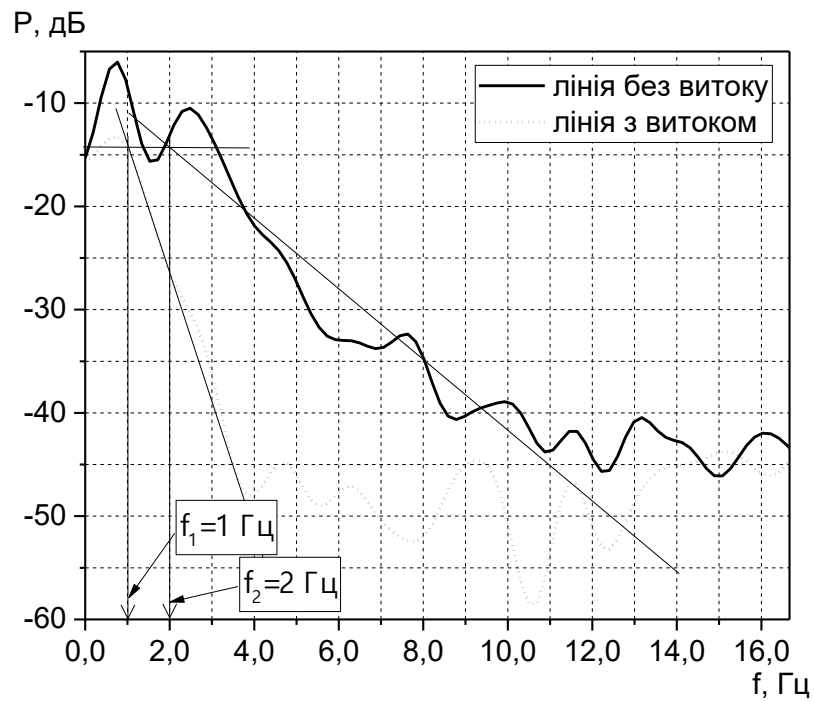


Рисунок 2.31 – Залежність постійної часу  $\tau_{BK}$  ВКТ від відносної закупорки  $d$  вимірювальної лінії



а)



б)

Рисунок 2.32 - Сигнал шуму а) та його СЩП б) на виході каналу тиску при відсутності і наявності витоку в вимірювальній лінії

Витоки у вимірювальних лініях тиску зустрічаються досить часто, це приводить до дрейфу сигналу на виході ВКТ. Для дослідження впливу витоків у вимірювальній лінії на ДХ ВКТ використовувався випробовувальний стенд зображений на рис. 2.27 і також використовувався метод аналізу шумів. На рис. 2.32 приведено сигнал шуму на виході справного каналу тиску і каналу, у вимірювальній лінії якого є витік.

Очевидно, що витік знижує амплітуду вихідного сигналу ВКТ. На рис. 2.33 приведена СЦП вихідного сигналу такого каналу тиску. Аналіз графіків СЦП вихідного сигналу ВКТ (рис. 2.33) показав, що наявність витоків в вимірювальній лінії приводить до звуження спектру вихідного сигналу ВКТ. При цьому додаткові резонанси не утворюються. В якості критерію оцінки витоку був прийнятий відносний рівень витоку  $q$ :

$$q = \left(1 - \frac{Q_1}{Q}\right) \cdot 100\%, \quad (2.19)$$

де  $Q_1$  - витрата води після місця протічки, л/год.;

$Q$  - витрата води до місця протічки, л/год..

Витрата води вимірювалась з використанням двох витратомірів (рис. 2.27), які встановлювались до місця імітації витоку та після нього. За результатами узагальнення досліджень була отримана залежність постійної часу  $\tau_{\text{вк}}$  ВКТ від відносного витоку  $q$  рідини в вимірювальній лінії (рис. 2.34), яка описується виразом:

$$\tau_{\text{вк}} = 30 + 60 \cdot e^{\left(\frac{5 \cdot Q_1}{Q}\right)}. \quad (2.20)$$

Аналіз експериментально отриманих результатів досліджень впливу чинників "старіння" вимірювальної лінії на ДХ ВКТ (рис. 2.29, 2.31, 2.34, 2.35), а також вивчення досвіду експлуатації ВКТ на ТСО показав, що ці чинники можна класифікувати. Критеріями класифікації є можливість їх виявлення в

процесі повсякденної експлуатації (при візуальному контролі) та рівень їх впливу на ДХ ВКТ.

До першої групи, чинники якої виявляються візуально і швидко усуваються, відносяться витоки рідини з вимірювальної лінії тиску. Але незначні витоки (до 10%), які в більшості ситуацій мають місце на ТСО, незначно впливають на постійну часу ВКТ (рис. 2.33). В цьому випадку постійна часу ВКТ зростає на 23% (в 1.2 рази) і  $\tau_{вк} \leq 120$  мс і знаходиться в межах допуску. До другої групи, чинники якої приховані і не можуть бути виявлені візуально та швидко не усуваються, відносяться наявність повітря та закупорки вимірювальної лінії. Наявність повітря у вимірювальній лінії в найбільшій мірі впливає на постійну часу ВКТ. Так наявність в вимірювальній лінії (рис. 2.29) тільки 20 см<sup>3</sup> повітря збільшує постійну часу ВКТ більше ніж в два рази – на 137%, а при 30 см<sup>3</sup> постійна часу ВКТ зростає на 205%.

Таким чином, цей чинник є дуже критичним до зміни постійної часу ВКТ. Закупорки є характерним чинником для вимірювальних ліній які експлуатуються тривалий час. Незначні закупорки (до 10%) незначно впливають на постійну часу. Вона зростає тільки на 23%.

Слід мати на увазі, що всі проаналізовані в дослідженнях чинники діють одночасно в вимірювальній лінії і сумарний вплив буде значним. Наприклад, якщо проаналізувати вимірювальну лінію без витоків з 10 см<sup>3</sup> повітря та 2.5% відносної закупорки, то внаслідок її "старіння" постійна часу ВКТ зросте на 220% і буде становити 310 мс, що більше ніж в два рази перевищує межі допуску.

Отримані результати експериментальних досліджень дозволяють в певній мірі прогнозувати стан вимірювального каналу тиску в залежності від рівня "старіння" його вимірювальної лінії. Так, якщо прийняти що витоки в лінії відсутні і кількість повітря в ній складає лише 10 см<sup>3</sup>, при умові що на протязі 10 років експлуатації її відносна закупорка не перевищить 20%,

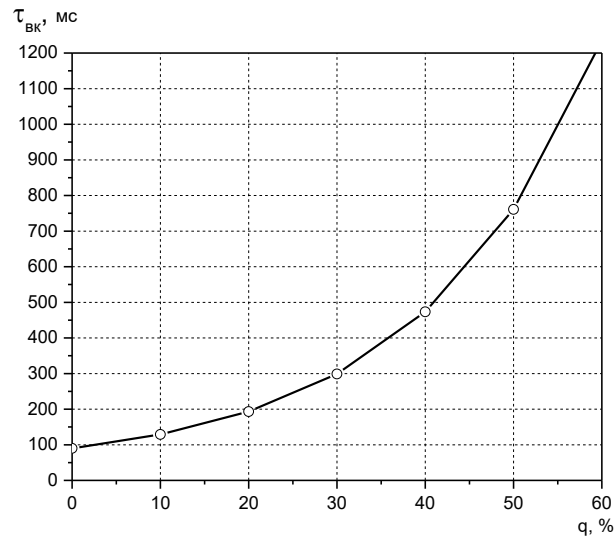


Рисунок 2.33 - Залежність постійної часу  $\tau_{вк}$  ВКТ від відносного витоку  $q$  рідини в вимірювальній лінії

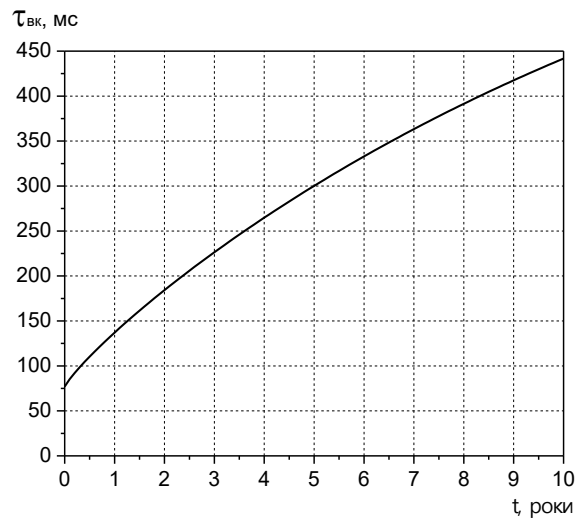


Рисунок 2.34 - Залежність постійної часу  $\tau_{вк}$  ВКТ від "старіння" вимірювальної лінії

постійна часу ВКТ зросте з 97 мс до 480 мс і на 300% перевищить межі допуску. Залежність постійної часу ВКТ від його терміну експлуатації буде мати вид, що приведений на рис. 2.34, і може бути описана рівнянням:

$$\tau_{вк}(t) = 78 + 49 \cdot t^{0.84} - 0.6 \cdot \left( \frac{t}{0.81} \right)^{1.67}. \quad (2.21)$$



Вплив "старіння" ВКТ необхідно враховувати при усуненні нестационарності вихідного сигналу ВКТ.

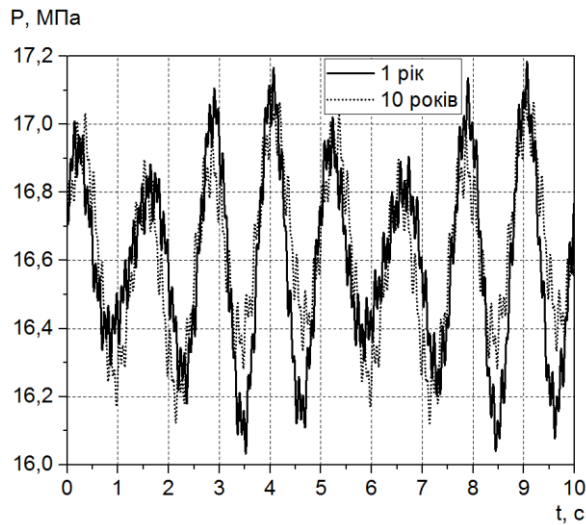


Рисунок 2.35 – Вихідні сигнали ВКТ з двох взаємодублюємих датчиків тиску з терміном роботи 1 та 10 років

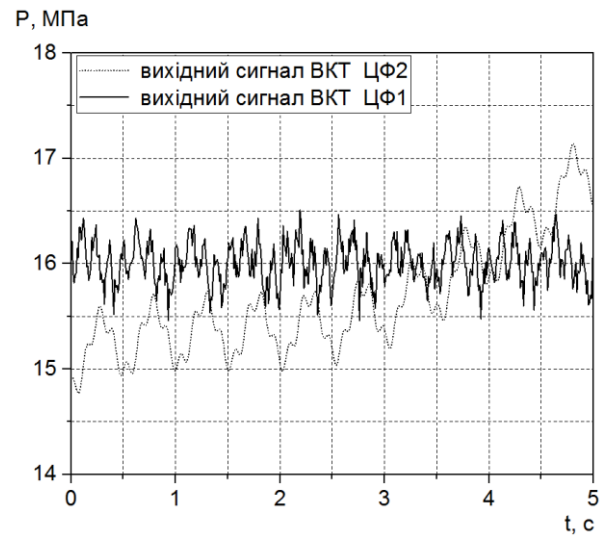


Рисунок 2.36 – Вихідні квазістаціонарні сигнали ВКТ на виході ЦФ1 з  $\tau_{цф} = 10\text{мс}$  та ЦФ2 з  $\tau_{цф} = 80\text{мс}$

На рис. 2.35 приведено вихідні сигнали двох взаємодублюємих датчиків з різним терміном роботи (1 та 10 років) одного і того ж ВКТ. Вони мають відмінності як по амплітуді і за частотними складовими, це пояснюється їх різними постійними часу цих датчиків які змінилися внаслідок "старіння". На рис 2.36 зображено вихідний сигнал ВКТ датчика з 10 річним терміном експлуатації після усунення нестационарності двома адаптивними цифровими фільтрами (ЦФ) ЦФ1 з постійною часу  $\tau_{цф} = 10\text{мс}$  дозволяє усунути як флуктуації сигналу, так і його тренд зберігаючи при цьому інформативність сигналу. ЦФ2 з постійною часу  $\tau_{цф} = 80\text{мс}$  більш інерційний. Він досить сильно згладжує сигнал і тренд не усувається. Це свідчить про те що при виборі постійної часу ЦФ необхідно враховувати постійну часу ВКТ, яка змінюється унаслідок "старіння".

Отже, за результатами експериментальних досліджень встановлено:

- "старіння" вимірювальної ліній в більшій мірі впливає на ДХ ВКТ ніж "старіння" датчика тиску;
- не всі чинники "старіння" вимірювальної лінії можуть бути усунуті повністю в процесі її експлуатації і їх вплив буде зростати від року до року;

– "старіння" ВКТ носить комплексний характер, тому для визначення його ДХ необхідно підходити з позицій системного аналізу.

## 2.6 Висновки до розділу

Динамічні характеристики мають важливе значення для оцінки працездатності вимірювального каналу тиску. Існуючі методи їх визначення мають обмеження і не враховують в повній мірі "старіння" елементів каналу. Тому основним напрямом дисертаційного дослідження є вдосконалення методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску.

За результатами досліджень вихідного сигналу вимірювального каналу тиску, статичних та динамічних характеристик його елементів і впливу їх "старіння" на динамічні характеристики каналу встановлено:

- вихідний сигнал вимірювального каналу тиску є нестационарним флюктууючим процесом;
- вихідний сигнал вимірювального каналу тиску складається з багатьох часових фрагментів сталих амплітуд, тривалість цих фрагментів різна і складає від одиниць секунд до 30 хвилин;
- для усунення нестационарності вихідного сигналу вимірювального каналу тиску необхідно використовувати метод згладжування ковзаючим середнім та метод найменших квадратів на тривалості всієї виміряної вибірки вихідного сигналу (але при цьому буде втрачена інформативність сигналу і появиться додаткова похибка вимірювань тиску) або на тривалості окремих часових фрагментів вирізаних із виміряної вибірки;
- повне усунення нестационарності вихідного сигналу вимірювального каналу тиску неможливе, рівень залишків носить як суб'єктивний, так і об'єктивний характер, тобто визначається як рівнем підготовки дослідника, так і можливостями програмного забезпечення, яке використовується;
- інтервал стаціонарності вихідного сигналу вимірювального каналу тиску визначається тривалістю часового фрагменту сталої амплітуди і лежить в межах 5с...25 хв.;
- вимірювальна лінія тиску є лінійною і безінерційною тільки за

відсутності в ній повітря, витоків та запорів;

- внаслідок "старіння" в процесі експлуатації вимірювальних ліній та датчиків тиску суттєво змінюються динамічні характеристики вимірювального каналу тиску;

- внаслідок "старіння" датчика виникає дрейф відносної похибки вимірювань тиску, який протягом 10 років експлуатації може перевищити межі відносної похибки вимірювань.

Отримані результати свідчать про наявність низки обмежень та припущень застосування методів визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску. Основними з них є:

1. Після усунення нестационарності вихідного сигналу вимірювального каналу тиску цей сигнал перетворюється в квазістационарний.

2. З метою збереження інформативності вихідного сигналу вимірювального каналу тиску методи визначення його динамічних характеристик доцільно використовувати лише на тривалості часових фрагментів виміряного сигналу з усунутою нестационарністю, що становлять 10...15 хв.

3. Відношення сигнал/шум на виході вимірювального каналу тиску повинно бути не менше 10 дБ.

4. Датчик тиску є лінійною інерційною ланкою. Такою ж ланкою є нова справна вимірювальна лінія, яка в окремих випадках може бути практично безінерційною.

З урахуванням встановлених припущень та обмежень для досягнення мети дисертаційної роботи – вдосконалення методів визначення постійної часу вимірювальних каналів тиску на технічно складних об'єктах необхідно виконати часткові задачі:

- удосконалити методи визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску на основі використання математичних моделей і експериментально отриманої вимірювальної інформації;

- обґрунтувати вимоги до метрологічного забезпечення запропонованих методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску.

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ

Третій розділ присвячений удосконаленню методів визначення ДХ вимірювальних каналів тиску на ТСО. Як було показано в першому розділі, на цей час існує практично один метод визначення постійної часу ВКТ – метод аналізу шумів, недоліки якого описані раніше. В дисертації запропоновані методи, що ґрунтуються на використанні аналітичних виразів, які зв'язують вихідний і вхідний сигнали ВКТ і включають постійну часу каналу. Методи одночасно використовують як експериментальну, так і теоретичну (модельну) інформацію. Перший метод ґрунтується на наближеному розв'язанні оберненої задачі вимірювань і дозволяє за однією типовою реалізацією випадкового процесу, що описує поведінку тиску на виході каналу, визначити його постійну часу та імпульсну характеристику. В другому методі з використанням внутрішнього контролю параметрів моделі ВКТ створюється база опорних моделей, яка використовується при навчанні нейронної мережі. Третій метод визначення ДХ ВКТ ґрунтується на використанні нейронних мереж і дозволяє здійснювати операції в масштабі часу близькому до реального.

### **3.1 Метод визначення постійної часу вимірювального каналу тиску на основі розв'язання оберненої задачі вимірювань**

В реальних умовах на вхід вимірювального каналу тиску подається вхідна дія, що має характер випадкового процесу  $\xi(t)$ . Окрему реалізацію цього процесу запишемо як  $x(t)$ . Вимірювальний канал тиску (ВКТ) перетворює вхідний випадковий процес  $\xi(t)$  у вихідний  $\zeta(t)$ , а реалізацією останнього є сигнал  $y(t)$ . Перетворення зазначених випадкових процесів опишемо з допомогою

оператора системи  $A_t$ , індекс "t" в якому показує, що оператор здійснює перетворення у часі.

Реально з фізичних міркувань можна вважати, що апіорно відомим є характер законів розподілу та загальні характеристики вхідного процесу  $\xi(t)$ . Найчастіше частково відомим є загальний вид оператора ВКТ  $A_t$ . Існують також метрологічні вимоги до точності визначення характеристик реалізацій вихідного випадкового процесу  $\zeta(t)$ . На основі цього потрібно визначити вид оператора  $A_t$  ВКТ, що найкращим чином задовольняє заданим вимогам до будь-якої реалізації  $y(t)$ . По суті, вид оператора  $A_t$  буде характеризувати одну з повних метрологічних характеристик ВКТ. Окрім повних метрологічних характеристик в дисертації розглядаються і окремі (часткові) характеристики, головною з яких є постійна часу.

Вид оператора  $A_t$  в повній мірі залежить від динамічних властивостей ВКТ. Це вимагає розглянути ВКТ як динамічну систему, що складається з підсистем: вимірювальна лінія (ВЛ), датчик тиску та пристрій обробки і передачі вимірювальної інформації. Останній, як показали наші дослідження, незважаючи на наявність у ньому енергонакопичуючих елементів, зокрема, конденсаторів, індуктивностей тощо, має постійну часу, що на порядки менше постійних часу перших двох елементів ВКТ (ВЛ і датчика тиску). Отже, в подальшому будемо розглядати ВКТ як систему, що складається з двох вище зазначених елементів.

Вимірювальна лінія, як правило, є металевою трубою складної форми, що наповнена рідиною. Якщо рідина є ідеальною, тобто має властивість ізотропності, нестискаємості при відсутності теплопровідності і теплопередачі, то тиск від труби основного технологічного процесу передається по ВЛ із затримкою, що дорівнює довжині ВЛ поділеній на швидкість поширення акустичної хвилі (звуку) в рідині. Постійна часу вимірювальної лінії, яка повністю заповнена рідиною, дорівнює нулю,

оскільки в такій ідеальній лінії немає перехідних процесів. Ця лінія також має велику ширину смуги пропускання і є неспотворюючою.

Реально ВЛ містить рідину, всередині якої є повітряні бульбашки, домішки, і тому рідина є стискаємою. При статичному навантаженні проявляються нелінійні властивості ВЛ, що є очевидним з фізичних міркувань. Дійсно, спочатку при навантаженні здійснюється стиснення іншорідних складових рідини (на вході ВЛ тиск інтенсивніше збільшується, ніж на виході), але при високому тиску повітряні неоднорідності починають поступово зникати [88, 89] і пропорційність між вхідним та вихідним тиском відновлюється. Крім того, у вимірювальній лінії в процесі експлуатації з'являються закупорки, забруднення, змінювання конфігурації внутрішнього перерізу лінії та ще додаткові негативні ефекти взимку, хоча ми будемо вважати, що подібні негативні фактори усуваються в процесі експлуатації. Таким чином, на практиці вимірювальну лінію можна вважати нелінійною інерційною системою. При таких умовах строгий розрахунок ВЛ стає практично неможливим.

Вид математичної моделі ВКТ, яку потрібно побудувати, істотно залежить від співвідношення між динамічними властивостями самого ВКТ та вхідного випадкового процесу. Якщо постійна часу ВКТ  $\tau_{\text{вк}}$  є істотно меншою, ніж час кореляції вхідної дії  $\tau_x$ , тобто  $\tau_{\text{вк}} \ll \tau_x$ , то ширина смуги пропускання ВКТ буде значно перевищувати ширину спектра вхідної дії і тому форма реалізації вихідного сигналу  $y(t)$  буде повністю повторювати форму реалізації вхідної дії  $x(t)$ . При таких умовах неможливо визначити ДХ ВКТ, оскільки значення постійної часу  $\tau_{\text{вк}}$  ніяк не впливають на вид сигналу  $y(t)$ . З математичної точки зору ВКТ є нелінійною неінерційною ланкою. Існує також проміжна ситуація, коли ВКТ є неінерційною системою тільки для основних гармонік спектру вхідної дії і це дозволяє визначати апріорний вид реалізацій вхідної дії.

У загальному випадку для аналізу нелінійних інерційних систем необхідно використовувати метод функціональних рядів Вольтерра, який запропонований вже давно [90], але виявився громіздким і незручним для практичного застосування навіть при наявності сучасних ЕОМ. Нелінійність всього ВКТ визначає вимірювальна лінія, а датчик тиску в більшості випадків можна вважати лінійною інерційною ланкою [91]. Тому в [92] запропоноване штучне розділення в математичній моделі динамічної системи функцій нелінійності та інерційності системи. В залежності від порядку виконання цих функцій розрізняють підходи Вінера та Гаммерштейна. Для аналізу ДХ вимірювальних каналів тиску прийнятним є тільки підхід Гаммерштейна, коли модель ВЛ представляють у вигляді послідовно з'єднаних моделей нелінійної неінерційної частини ВЛ та лінійної інерційної частини. Перевірка роботи подібної моделі, що проведена в [93], довела її працездатність. Отже, модель вимірювального каналу тиску має наступну структуру (рис. 3.1).

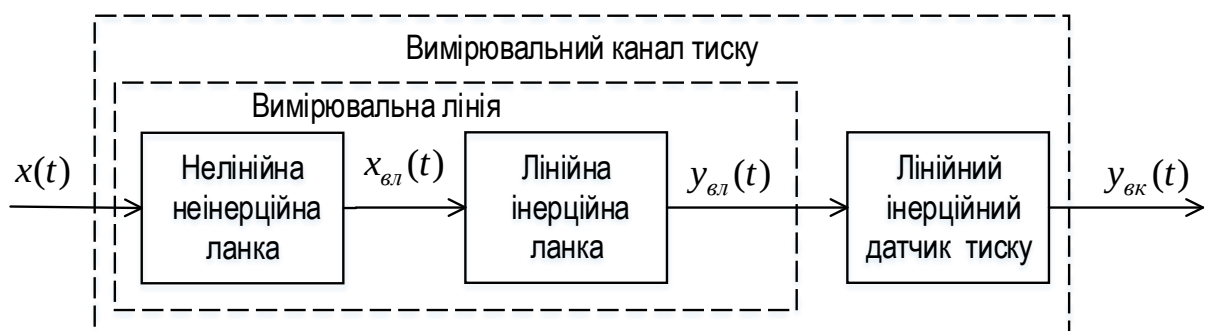


Рисунок 3.1 – Структура моделі вимірювального каналу тиску

Модель містить послідовно з'єднані лінійні інерційні ланки, які об'єднати в одну в загальному випадку не завжди доцільно, оскільки їх ДХ, як правило, відрізняються. Отримати перехідну характеристику датчика тиску відносно просто при наявності спеціалізованого стенда, в якому на вхід датчика подається імпульсна дія типу "сходінка". Технічно складніше це зробити для ВЛ, особливо з урахуванням нелінійної ланки. В [94] приведений вираз для перехідної характеристики, аналіз якого (додаток Б) свідчить про коливальний

вид цієї характеристики, але при наявності демпфуючих властивостей лінії та датчика перехідна характеристика ВКТ наближається до такої, що є властивою для динамічних систем першого порядку, які описуються рівняннями типу

$$\tau_{\text{вк}} \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t), \quad (3.1)$$

де  $x(t)$  - вхідна дія ВКТ;

$y(t)$  - вихідний сигнал ВКТ;

$k$  - постійний коефіцієнт, що використовується при моделюванні.

Отже, обидві лінійні інерційні ланки моделі вимірювального каналу (рис. 3.1) будемо описувати диференціальним рівнянням першого порядку, в якому постійні часу датчика  $\tau_{\text{д}}$  та ВЛ  $\tau_{\text{вл}}$  відрізняються. У такому випадку можна використовувати один і той же метод для визначення постійної часу ВЛ. Сумарне значення постійної часу ВКТ приблизно дорівнює сумі  $\tau_{\text{д}}$  і  $\tau_{\text{вл}}$ . При вибраних умовах лінійності та інерційності ВКТ зв'язок вхідної реалізації з вихідною виражається рівнянням згортки [95]:

$$y(t) = \int_0^T H_{\text{вк}}(t) \cdot x(t - \tau) d\tau, \quad (3.2)$$

де  $H_{\text{вк}}(t)$  є імпульсною характеристикою каналу тиску.

Залежність (3.2) є математичною моделлю вимірювального каналу тиску. Модель справедлива для всіх лінійних інерційних систем, що при умові виконання обмежень, які використовуються в дисертації, дозволяє використовувати цю модель для практично важливих ситуацій. Відзначимо, що модель описує тільки систему, яка складається з лінійної інерційної ланки ВЛ та лінійного інерційного датчика (рис. 3.1).



Згідно з метою дисертації необхідно на основі розв'язання інтегрального рівняння (3.2) визначити імпульсну характеристику  $H_{\text{вк}}(t, \tau_{\text{вк}})$ , де  $\tau_{\text{вк}}$  - постійна часу ВКТ. В роботах [96, 97] показано, що строгі методи розв'язання оберненої задачі вимірювань втрачають свою цінність внаслідок наявності похибок визначення вихідного сигналу ВКТ  $y(t)$ , наявності шумів на вході та виході динамічної системи і відсутності достовірної апріорної інформації про  $H_{\text{вк}}(t, \tau_{\text{вк}})$  та  $x(t)$ . Наприклад, при установці датчика тиску на стенді відомою є вхідна дія, що описується  $x(t)$ . Для цієї умови з рівняння (3.2) можна визначити імпульсну характеристику  $H_{\text{вк}}(t)$ . Якщо ж відомою є  $H_{\text{вк}}(t)$ , то можна визначити  $x(t)$ . При цьому до всіх функцій в рівнянні (3.2) висуваються дуже жорсткі вимоги щодо точності їх визначення на стендах [98]. І навіть при таких умовах інтегральне рівняння (3.2) часто вимагає регуляризації для забезпечення стійкості рішення, а іноді взагалі не може бути розв'язано точно.

В реальних умовах точність визначення  $H(t)$  або  $x(t)$  не є достатньою для того, щоб рівняння (3.2) розв'язувалось точно. До того ж, розв'язання обернених вимірювальних задач в метрології ускладнюється реальними обставинами, що часто обумовлені наявністю шумів на вході і виході датчика тиску.

Обернена задача вимірювань розглянута в роботі [96]. В рівнянні (3.2) відомою є тільки реалізація вихідного сигналу  $y(t)$  ВКТ на часовому інтервалі  $[0, T]$ . При таких обставинах інтегральне рівняння (3.2) взагалі не може бути розв'язане навіть наближено. Отже, виникає необхідність наявності відомостей або про імпульсну характеристику  $H_{\text{вк}}(t)$  ВКТ, або про його вхідну дію  $x(t)$ , що в процесі експлуатації каналу на ТСО є практично неможливим. Ось чому в дисертації запропоновано використання неповних відомостей як про вхідну дію  $x(t)$ , так і про імпульсну характеристику каналу

тиску  $H_{\text{вк}}(t)$ . В [96, 97] був запропонований наближений підхід до розв'язання рівняння (3.2) і визначення математичної функції  $x(t)$ , що описує реалізацію вхідної дії, та встановлені метрологічні вимоги до всіх функцій, які входять в (3.2). При цьому статистичне моделювання проведене при добре відомій імпульсній характеристиці динамічної системи. В нашому випадку, навпаки, потрібно визначити  $H_{\text{вк}}(t, \tau_{\text{вк}})$ , але це можна, зрозуміло, зробити при повністю відомій вхідній дії  $x(t)$  і за таких умов не існує можливості строгого визначення ДХ ВКТ. Тому в дисертації вдосконалено метод наближеного розв'язання оберненої задачі вимірювань, який раніше розроблений в [99, 97].

Метод визначення постійної часу ВКТ  $\tau_{\text{вк}}$  (на прикладі датчика тиску з постійною часу  $\tau_{\text{д}}$ ) розроблений з участю автора і описаний в [98]. Для наближеного розв'язання інтегрального рівняння (3.2) використовувались:

– часова вибірка квазістаціонарного вихідного сигналу ВКТ (рис.2.3а), один з прикладів якого на інтервалі часу  $0 \dots 10$  хвилин описується виразом

$$y(t) = 15 + 2 \cdot [\text{Sin}(2 \cdot \pi \cdot 0.2 \cdot t)]^2 + 3.8 \cdot \text{Sin}(2 \cdot \pi \cdot 0.76 \cdot t + 0.8) + ; \quad (3.3) \\ + 0.7 \cdot \text{Sin}(2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot t) + 0.5 \cdot \text{Sin}(2 \cdot \pi \cdot 5.8 \cdot t - 1.2)$$

– імпульсна характеристика нового каналу тиску, яка визначена методом диференціювання перехідної характеристики ВКТ

$$H(t) = \frac{U_0}{\tau_{\text{вк}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вк}}}}. \quad (3.4)$$

де  $U_0$  - амплітудне значення перехідної характеристики;

$\tau_{\text{вк}}$  - постійна часу ВКТ.

При "старінні" елементів ВКТ формула (3.4) може змінюватись, як,

наприклад, показано для конкретного вимірювального каналу в співвідношеннях (2.10). Для інших ВКТ можливі інші моделі перехідної та імпульсної характеристик.

Отже, рівняння згортки (3.2) має вигляд

$$y(t) = \int_0^T \frac{U_0}{\tau_{\text{вк}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вк}}}} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \psi_i(t - \tau) d\tau. \quad (3.5)$$

і описує теоретичний вихідний сигнал ВКТ  $y(t)$ . Невідомими в формулі (3.5) є коефіцієнти  $a_i$ ,  $U_0$  та постійна часу  $\tau_{\text{вк}}$ . Для розв'язання оберненої задачі вимірювань потрібно мати ще реалізацію випадкового процесу тиску  $y_{\text{вк}}(t)$ . В ідеальному випадку функції, що описують експериментальний і теоретичний сигнали, тобто  $y(t)$  та  $y_{\text{вк}}(t)$ , при правильно визначених параметрах  $a_i$ ,  $U_0$ ,  $\tau_{\text{вк}}$  повинні співпадати або бути близькими. Ці функції детально та всебічно досліджені О. В. Полярусом та Є. О. Поляковим в роботах [100, 100, 101, 96]. В функціональному просторі з квадратичною метрикою відстань між вихідним сигналом  $y(t)$ , що описується формулою (3.5), та вихідним експериментальним сигналом ВКТ  $y_{\text{вк}}(t)$  є деяким числом  $J$  або функціоналом, який в теорії сигналів називають метрикою сигналів [95]

$$J = \int_0^T \left[ y_{\text{вк}}(t) - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0}{\tau_{\text{вк}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{вк}}}} \sum_{i=1}^n a_i \psi_i(t - \tau) d\tau - n(t) \right]^2 dt, \quad (3.6)$$

де  $n(t)$  - білий шум, спектральна щільність якого використовувалась при моделюванні. Дана метрика потребує мінімізації шляхом варіацій  $a_i$ ,  $U_0$ ,  $\tau_{\text{вк}}$

на інтервалі тривалості часової вирізки реалізації квазістаціонарного вихідного сигналу ВКТ  $y_{вк}(t)$ . На рис. 3.5 приведена структурна схема наближеного методу розв'язання оберненої задачі вимірювань для визначення

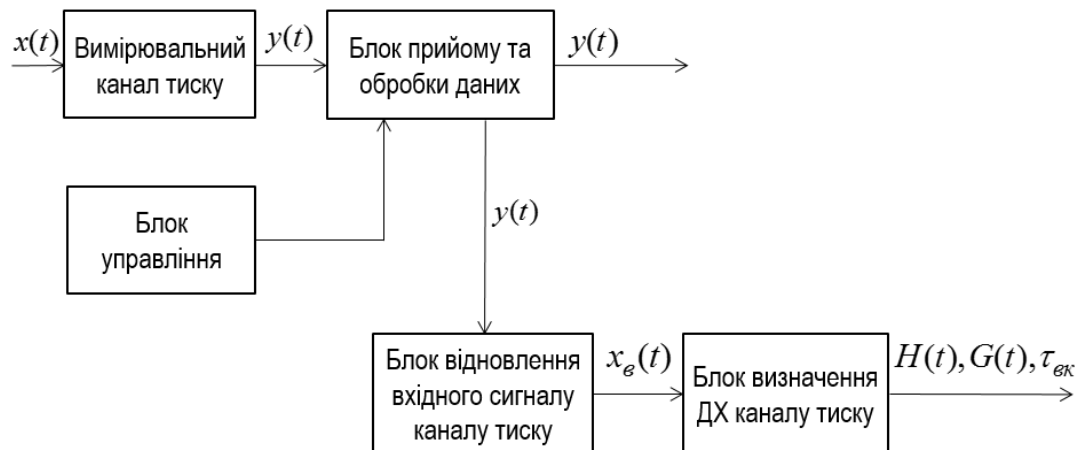


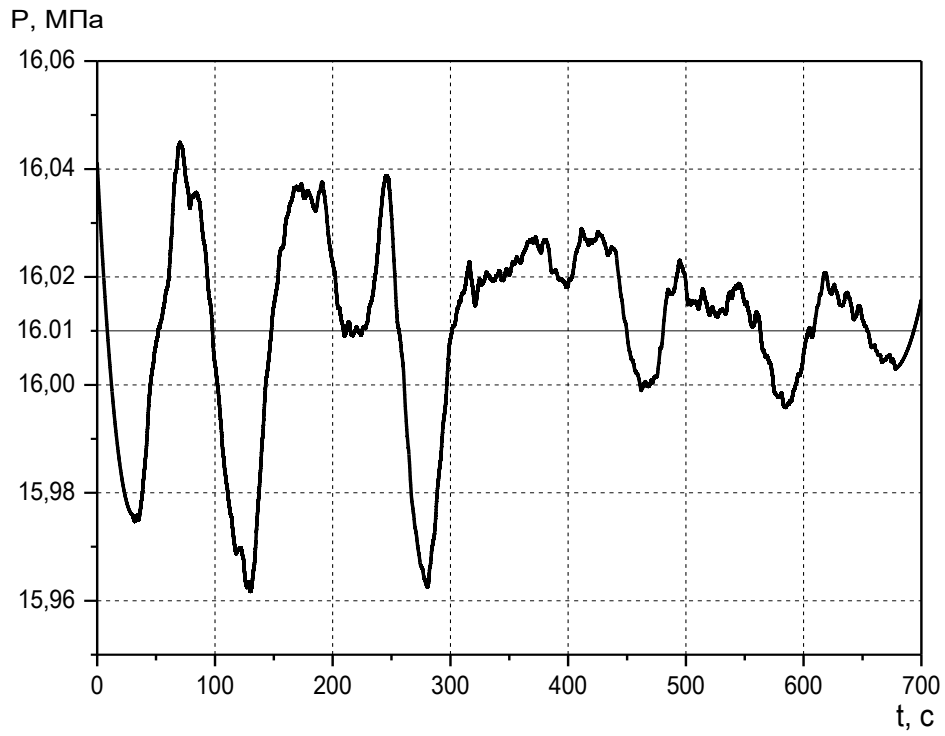
Рисунок 3.5 – Структурна схема наближеного методу розв'язання оберненої задачі вимірювань

постійної часу ВКТ.

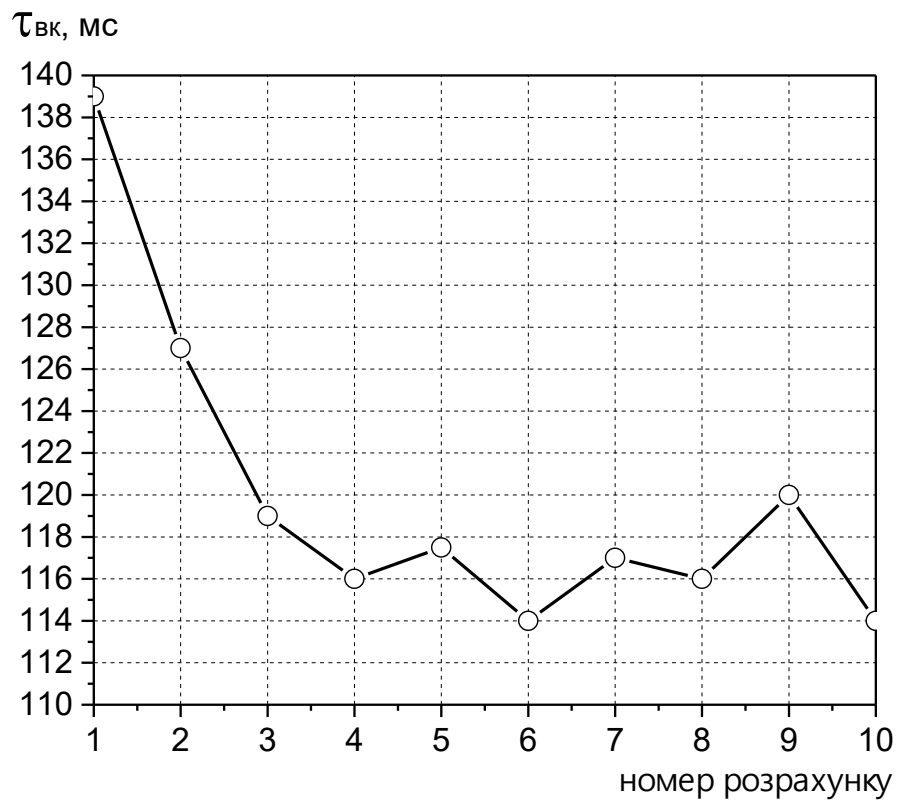
Мінімізація функціоналу (3.6) здійснювалась з використанням відомого методу глобального випадкового пошуку екстремуму – генетичного алгоритму. В результаті пошуку отримувались значення  $a_i$ ,  $U_0$ ,  $\tau_{вк}$  причому два останні значення використовувались для побудови імпульсної характеристики датчика. Основною метою було визначення постійної часу  $\tau_{вк}$ , але і значення коефіцієнтів  $a_i$  використовувались для відновлення сигналів вхідної дії, які поповнювали базу даних опорних сигналів.

Якість роботи методу була перевірена експериментально (рис.3.6). При мінімізації функціоналу (3.6) отримувалось значення постійної часу  $\tau_{вк}$ , причому для кожної реалізації вихідного сигналу тиску, приклад якої приведений на рис. 3.6а, генетичний алгоритм знаходив, як правило, інше значення  $\tau_{вк}$  (рис. 3.6б). Такі відмінності є властивістю методів випадкового пошуку. Після усереднення визначалось середнє значення постійної часу ВКТ, яке дорівнювало 113 мс і на 4 % відрізнялось від експериментального

значення (108 мс).



а)



б)

Рисунок 3.6- Вихідний сигнал (а) та постійні часу каналу (б)

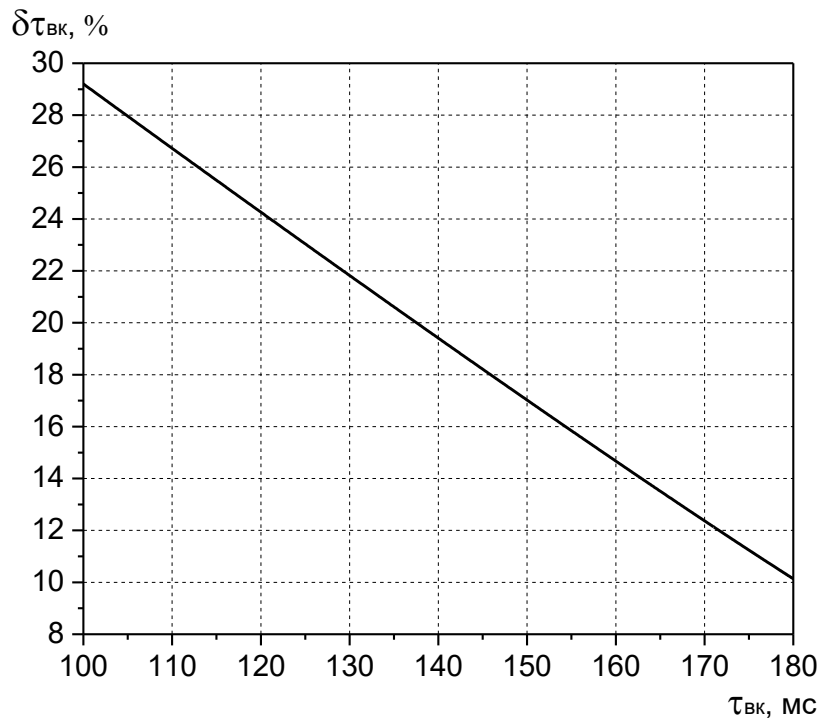


Рисунок 3.7 – Залежність відносної похибки  $\delta\tau_{вк}$  від постійної часу  $\tau_{вк}$

В процесі досліджень також було проведено 50 розрахунків для різних реалізацій вихідних сигналів ВКТ ТСО. Розкид значень постійної часу каналу тиску був обумовлений особливостями запропонованого методу, тобто наближеним розкладанням в ряд вхідної дії  $x(t)$  та оптимізацією функціоналу (3.6) за допомогою методу глобального випадкового пошуку. Результати визначення постійної часу ВКТ  $\tau_{вк}$  залежать від його терміну експлуатації (рис. 3.7). Це пояснюється зміною імпульсної характеристики ВКТ внаслідок "старіння", а також тим, що вплив інерційності ВКТ на вихідний сигнал  $y_{вк}(t)$  більше проявляється при високих значеннях  $\tau_{вк}$ . Визначена постійна часу  $\tau_{вк}$  становила 100 мс, тобто є близькою до експериментально визначеного середнього значення (98 мс). Оскільки час роботи генетичного алгоритму при розв'язанні задач такого типу найчастіше не перевищує кілька десятків секунд, то на визначення  $\tau_{вк}$  потрібно на порядки менше часу, ніж в методі аналізу шумів.

В оптимізаційній задачі, що розглядається, існує деяка ймовірність отримання «фантомних» рішень. При відсутності апіорних даних про вид вхідного сигналу та діапазон значень постійної часу ймовірність «фантомних» рішень збільшується. Для зменшення або виключення таких рішень необхідно задавати приблизний діапазон, в якому знаходиться вхідна дія та постійна часу. Цей діапазон на практиці є відомим. Генетичний алгоритм здійснює пошук мінімуму функціоналу в області, що задається дослідником, і тоді «фантомні» рішення практично виключаються. Отже, ймовірність отримання "фантомних" рішень в процесі розв'язання оберненої задачі вимірювань визначається наявністю достовірної апіорної інформації про вид вхідної дії та форму імпульсної характеристики вимірювального каналу і вона близька до нуля, якщо така інформація є. Але в процесі експлуатації внаслідок "старіння" елементів ВКТ його імпульсна характеристика змінюється. Її форма спотворюється і вона буде описуватися у вигляді ряду, що в деяких випадках може ускладнити оптимізацію функціоналу (3.6). Метод розв'язання оберненої задачі вимірювань для визначення постійної часу ВКТ може застосовуватись і при інших описах імпульсної характеристики ВКТ урахуванням рівня "старіння" його елементів, як показано у другому розділі. Результати моделювання показують, що він дозволяє визначати постійну часу ВКТ з рівнем спотворення імпульсної характеристики не більше 10%. Це є обмеженнями методу розв'язання оберненої задачі вимірювань для визначення постійної часу ВКТ.

Отже, методика застосування методу визначення постійної часу ВКТ зводиться до наступного. Спочатку треба виявити, чи взагалі створені умови для використання методу. Якщо постійна часу ВКТ є малою (або смуга пропускання каналу є широкою), то сигнал на виході ВКТ практично повністю повинен повторити поведінку вхідної дії в математичному сенсі, хоча їхні розмірності відрізняються. При збільшенні  $\tau_{\text{вк}}$  (звуженні смуги пропускання каналу) між відносними значеннями  $y(t)$  та  $x(t)$  з'являється

різниця  $\delta$ , залежність максимального значення якої у відсотках від постійної часу каналу  $\tau_{вк}$  для приведеного вище прикладу вихідного сигналу показана на рис. 3.8, причому при  $\tau_{вк}$ , що не перевищують приблизно одну секунду, залежність  $\delta(\tau_{вк})$  є майже лінійною.

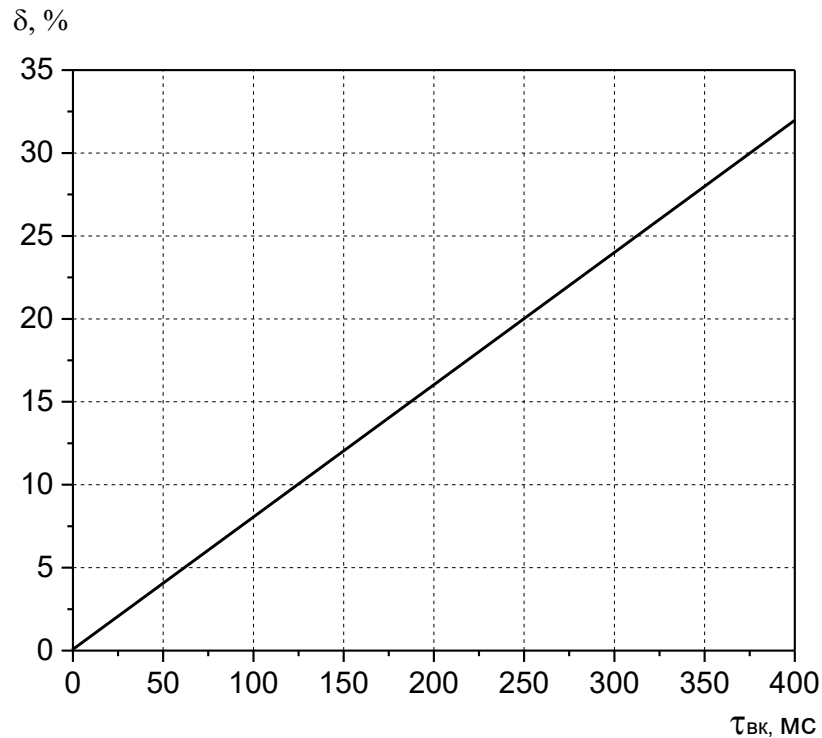


Рисунок 3.8 - Приклад залежності відносної різниці між вхідною дією та вихідним сигналом від постійної часу вимірювального каналу тиску

Нормування зазначеної різниці здійснювалось до максимального значення вихідного сигналу на інтервалі спостереження сигналу 10 с. Аналогічні залежності отримані для інших моделей вихідних сигналів ВКТ. З них випливає, що вже при  $\tau_{вк} \approx 100 \text{ мс}$  відносні зазначені різниці наближаються до 10 %, тобто проявляються інерційні властивості каналу. При великих  $\tau_{вк}$  спотворення вхідної дії може бути значним і це також є обмеженням методу, але такий випадок немає ніякого практичного значення, бо ВКТ з подібними інерційними властивостями буде видавати недостовірну інформацію, а вихідний сигнал не підлягає відновленню на вхід [96]. Все це



свідчить, що для більшості практичних випадків запропонований метод може застосовуватись у повному обсязі.

Таким чином, в дисертації удосконалено метод визначення постійної часу вимірювального каналу тиску, що ґрунтується на розв'язанні оберненої задачі вимірювань.

Для врахування "старіння" елементів ВКТ розроблено метод визначення динамічних характеристик ВКТ на основі нейронної мережі. Він вимагає наявності бази даних опорних моделей вимірювальних каналів з різним терміном експлуатації. Така база опорних моделей створюється за допомогою експертів в напівавтоматичному режимі.

### **3.2 Визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску з використанням методу внутрішнього контролю**

В другому розділі було досліджено вплив "старіння" елементів ВКТ на його ДХ і, зокрема, на постійну (рис.2.13, 2.30, 2.32, 2.34, 2.35). Отримано також аналітичні вирази (2.16), (2.18), (2.20), (2.21), які описують цей вплив. Комбінуючи постійні часу для певного стану вимірювальної лінії та датчика тиску, можна визначити постійну часу ВКТ з урахуванням "старіння" його складових для будь-якого терміну експлуатації. Особливо треба відзначити важливу роль даних, що були визначені відносно ВКТ, в якому вимірювальна лінія не має пустот, витоків, запорів і датчик тиску є новий. Динамічні характеристики такого ВКТ відповідають каналу з нульовим терміном експлуатації, тобто в ньому відсутні чинники "старіння". Цей ВКТ в подальшому приймемо за базовий. Слід враховувати, що в силу специфіки конструкції вимірювальної лінії та типу датчика тиску ДХ будуть різнитись для кожного ВКТ на ТСО. Таким чином, виникає задача визначення ДХ для будь-якого каналу тиску на ТСО. Ця задача може бути вирішена шляхом створення окремих математичних моделей каналів тиску на основі загальної моделі базового ВКТ, що побудована за результатами експериментальних досліджень

для ВКТ без "старіння". У випадку, коли кожному терміну експлуатації буде відповідати своя окрема модель ВКТ, такі моделі приймемо за опорні моделі ВКТ для даного ТСО.

Опорна модель ВКТ отримується шляхом зміни параметрів базової моделі каналу тиску та контролю за критерієм мінімуму різниці між перехідними, амплітудно-частотними (АЧХ) та фазочастотними характеристиками (ФЧХ) опорної та базової моделей.

Для цього в розділі був розроблений метод визначення ДХ ВКТ з використанням внутрішнього контролю параметрів базової моделі ВКТ. Реалізація методу внутрішнього контролю стосовно визначення ДХ ВКТ (рис. 3.9) зводиться до порівняння реакцій моделей на одну і ту ж вхідну дію  $x(t)$  типу "сходинка". За різницею реакцій  $\Delta\varepsilon$  здійснюється вибір коефіцієнтів низькочастотного цифрового фільтра, який покладено в основу побудови теоретичної моделі ВКТ. Ця модель вже враховує "старіння" елементів ВКТ і його динамічні властивості, що є важливим для практики. Розглянута

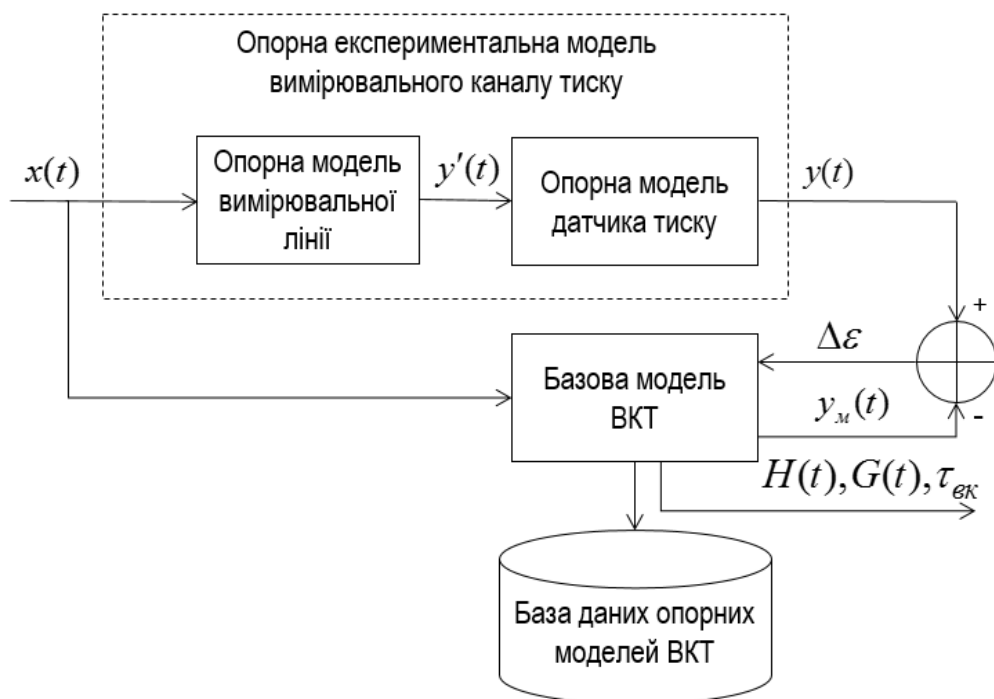


Рисунок 3.9 – Структурна схема реалізації методу внутрішнього контролю

вдосконалена модель ВКТ на основі методу внутрішнього контролю реалізована автором в програмному середовищі LabView.

Запропонований метод визначення ДХ ВКТ з використанням внутрішнього контролю на відміну від відомих дозволяє компенсувати час затримки теоретичної моделі передатної функції (ПФ) ВКТ, здійснювати фільтрацію різниці між експериментальною ПФ ВКТ та її базовою моделлю, компенсувати зміщення ПФ в стаціонарному режимі, візуально контролювати роботу моделі ПФ ВКТ, постійно контролювати її амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики. Модифікована модель зберігається в базі даних опорних моделей ВКТ.

### **3.2.1 Розробка базової моделі вимірювального каналу тиску**

Математичні моделі ВКТ у вигляді перехідних функцій приведені в [4, 5, 6, 7, 8]. Однак в цих роботах не розглянуті моделі ВКТ та методики корекції параметрів моделі ВКТ, які дозволили б автоматизувати цей процес. В роботах [8, 9, 10] недостатньо повно досліджено властивості системи внутрішнього контролю. Крім того, в зазначених роботах використання методу внутрішнього контролю з метрологічної точки зору не розглядалось.

Метою досліджень, проведених в процесі виконання дисертаційної роботи, була розробка системи внутрішнього контролю для визначення ДХ вимірювального каналу тиску за рахунок фільтрації різниці між ПФ опорної та базової моделей ВКТ. В дослідженнях в якості опорної моделі ВКТ була модель, що побудована за апроксимованими імпульсними характеристиками згідно з виразами (2.10), (2.11) та (2.12).

Як відомо [9, 62, 48, 50, 102], модель каналу не може в повній мірі повторити оригінал. Це пов'язано як з ентропією вимірюваного процесу на вході датчика, так і з певною ентропією динамічних характеристик датчика. Ентропія динамічних характеристик датчика обумовлюється як режимами роботи датчика, так і "старінням" елементів датчика. В цьому випадку

необхідно не тільки перевіряти розроблену модель датчика на адекватність, а і коректувати її. Для цього пропонується використовувати метод внутрішнього контролю моделі.

Відповідно до [46] перехідна функція вимірювального каналу тиску без врахування часу запізнення зв'язана з його передатною функцією залежністю зворотнього дискретного перетворення Лапласа

$$G(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \cdot G_p(s) \right\},$$

де  $L^{-1}$  - оператор зворотнього дискретного перетворення Лапласа;

$s$  - площина дискретного перетворення Лапласа;

$G_p(s)$  - дискретна передатна функція ВКТ.

В подальшому будемо оперувати з передатною функцією вимірювального каналу  $G_p(s)$ .

Сутність методу внутрішнього контролю [103, 104, 105] з метрологічної точки зору можна трактувати так. Якщо передаточну функцію ВКТ можна представити у вигляді сукупності передаточних функцій простих кіл низьких порядків, то підбираючи їх параметри, можна мінімізувати різницю між реальною передаточною функцією каналу та її моделлю.

Узагальнену структурну схему моделі ВКТ в операторному виді можна зобразити у вигляді, що приведена на рис.3.10.

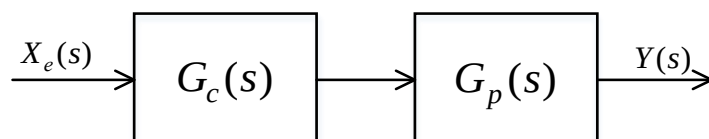


Рисунок 3.10 – Узагальнена схема моделі вимірювального каналу тиску

Оператор  $G_c(s)$  використовується для управління ПФ базової моделі ВКТ  $G_p(s)$  і настроюється таким чином, щоб він був оберненим по відношенню до оператора ПФ опорної моделі  $G_\Sigma^{-1}(s)$  ВКТ -  $G_c(s) = G_\Sigma^{-1}(s)$ . Вихідний сигнал ВКТ, у відповідності до рис. 3.10, запишемо у вигляді:

$$Y(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot X_e(s), \quad (3.7)$$

де  $G_p(s)$  - модель реальної, експериментально визначеної (базової), ПФ ВКТ;

$X_e(s)$  - модель еталонної вхідної дії типу "сходінка";

$G_c(s)$  - функціонал управління параметрами базової моделі ПФ ВКТ.

Прийmemo, що опорна модель ПФ ВКТ  $G_\Sigma^*(s)$  повністю відтворює його базову модель ПФ  $G_p(s)$ :

$$G_p(s) = G_\Sigma^*(s). \quad (3.8)$$

Тоді, якщо функціонал  $G_c(s)$  буде оберненим до опорної моделі ПФ ВКТ  $G_c(s) = G_\Sigma^{*-1}(s)$ , то на виході базової моделі ВКТ отримуємо  $Y(s) = G_\Sigma^{*-1}(s) \cdot G_\Sigma^*(s) \cdot X_e(s) = 1 \cdot X_e(s) = X_e(s)$ .

Звідси випливає, що вихідний сигнал базової моделі ВКТ завжди дорівнює контрольному еталонному сигналу  $X_e(s)$ . Слід відмітити, що це можливо лише при повністю визначеній ПФ базової моделі ВКТ  $G_p(s)$ .

На практиці завжди є певне розходження між реальною ПФ та її моделлю [31, 106, 107]. Це розходження викликане як "старінням" елементів ВКТ [108, 109], так і дією зовнішніх перешкод і внутрішніх шумів [110, 111, 112][1]. З урахуванням цього зміниться і структурна схема (рис. 3.11), яка

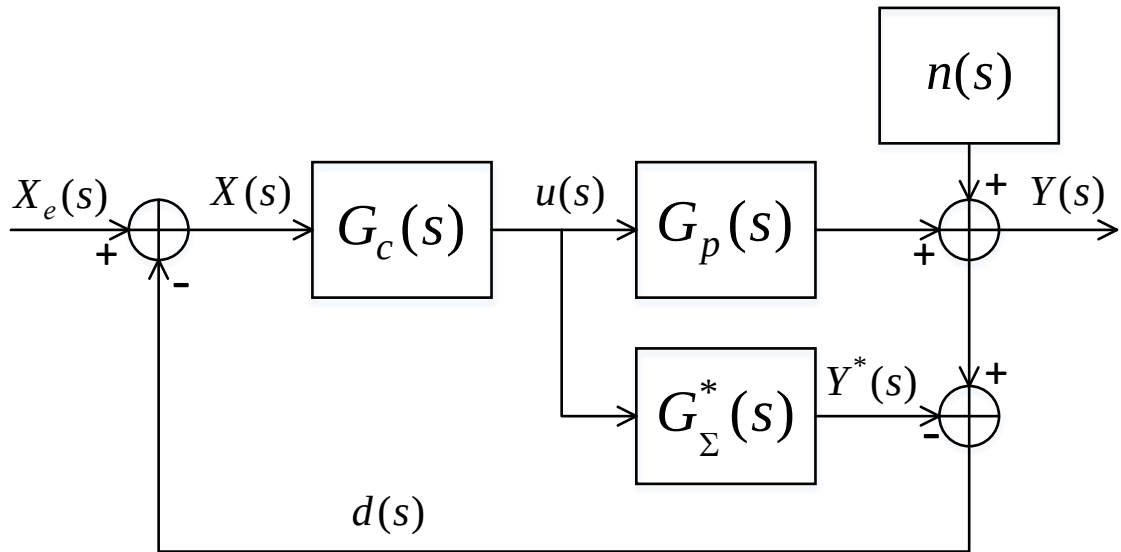


Рисунок 3.11 – Схема моделі вимірювального каналу тиску

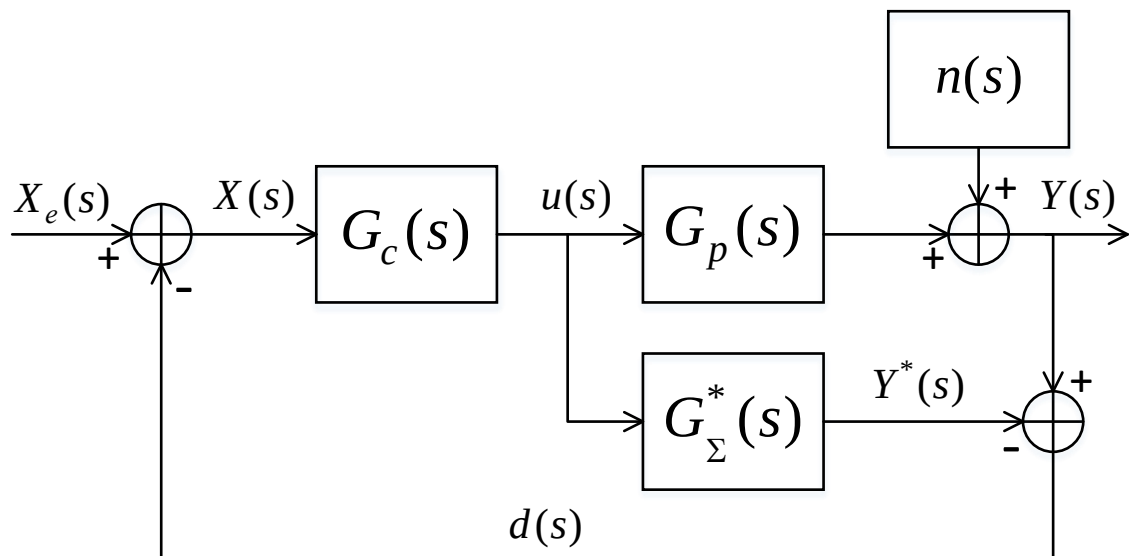


Рисунок 3.12 - Схема моделюючого алгоритму

реалізує метод внутрішнього контролю параметрів базової моделі ВКТ.

Дана схема має наступні змінні параметри:

$G_c(s)$ - функціонал управління параметрами базової моделі ПФ ВКТ;

$G_p(s)$ - модель базової ПФ ВКТ;

$G_\Sigma^*(s)$ - модель опорної ПФ ВКТ;

$X_e(s)$ - еталонний контрольний сигнал вхідної дії типу "сходинка";

$X(s)$ - модифікований контрольний сигнал для корекції базової моделі ПФ ВКТ;

$u(s)$ - значення функціоналу  $G_c(s)$  з урахуванням похибки  $d(s)$ ;

$n(s)$ - перешкода;

$d(s)$ - різниця між ПФ базової та опорної моделей;

$Y(s)$ - вихід моделі ВКТ.

Сигнал зворотного зв'язку  $d(s)$  визначається як:

$$d(s) = (G_p(s) - G_\Sigma^*(s)) \cdot u(s) + n(s). \quad (3.9)$$

Вхідний модифікований сигнал функціоналу  $G_c(s)$  виражається формулою:

$$X(s) = X_e(s) - d(s) = X_e(s) - (G_p(s) - G_\Sigma^*(s)) \cdot u(s) - d(s). \quad (3.10)$$

Даний підхід має певні обмеження. Якщо базова модель повністю відтворює опорну ПФ, то  $G_p(s) = G_\Sigma^*(s)$ . Тоді:  $X(s) = X_e(s) - d(s)$ , а  $Y(s) = X(s) \cdot G_c(s) \cdot G_p(s)$ . Якщо перешкода відсутня, тобто  $n(s) = 0$ , то  $Y(s) = X_e(s) \cdot G_c(s) \cdot G_p(s)$ .

Таким чином, отримана залежність є аналогом вихідного сигналу системи управління параметрами моделі ПФ без зворотнього зв'язку. Якщо функціонал  $G_c(s)$  буде стійким, то управління параметрами моделі ПФ також буде стійким.

На практиці перешкода  $n(s) \neq 0$  і завжди має місце різниця між реальною ПХ та її моделлю. Це вимагає, щоб функціонал  $G_c(s)$  був оптимальним з точки зору мінімуму різниці та швидкодії. З урахуванням цього зміниться і структурна схема, яка реалізує метод внутрішнього контролю. На рис. 3.12 приведена схема алгоритму, який реалізує метод внутрішнього контролю.

В цьому випадку оператори  $G_c(s)$ ,  $G_p(s)$ ,  $G_\Sigma^*(s)$  і  $n(s)$  будуть не векторами, а багатомірними матрицями, які змінюються у часі. Сигнал зворотнього зв'язку буде мати вигляд:

$$d(s) = [G_p(s) - G_\Sigma^*(s)] \cdot u(s) + n(s). \quad (3.11)$$

Сигнал похибки буде визначений згідно виразу:  $X(s) = X_e(s) - d(s)$ . Вихід функціоналу  $G_c(s)$   $u(s)$  можна знайти із рівняння:

$$[X_e(s) - d(s)] \cdot G_c(s) = [X_e(s) - \{[G_p(s) - G_\Sigma^*(s)] \cdot u(s) - n(s)\}] \cdot G_c(s).$$

При умові відсутності завад  $n(s) = 0$  і тоді

$$u(s) = \frac{[X_e(s) - d(s)] \cdot G_c(s)}{1 + [G_p(s) - G_\Sigma^*(s)] \cdot G_c(s)}. \quad (3.12)$$



Але  $Y(s) = G_p(s) \cdot u(s) + d(s)$ . Звідси ПФ системи внутрішнього контролю, що приведена на рис. 3.12, буде мати вид:

$$Y(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot X_e(s) + [1 - G_c(s) \cdot G_\Sigma^*(s)] \cdot d(s)}{1 + [G_p(s) - G_\Sigma^*(s)] \cdot G_c(s)}. \quad (3.13)$$

Тепер, якщо функціонал  $G_c(s)$  буде близький до інверсної моделі ПФ  $G_c(s) \approx G_\Sigma^*(s)^{-1}$ , то можна зменшити різницю  $d(s)$ . Окрім того, для підвищення стійкості системи необхідно мінімізувати похибку, яка викликана цією різницею.

Як показали дослідження [113, 104], різниця  $d(s)$  найчастіше має місце в високочастотній частині амплітудно-частотної характеристики датчика. Тому для зменшення різниці  $d(s)$  пропонується використовувати фільтр нижніх частот  $f(s)$ .

Отже, реалізація методу внутрішнього контролю стосовно підвищення точності базової моделі ПФ ВКТ є не що інше як інверсія моделі його ПФ послідовно з низькочастотною фільтрацією:

$$G_{\text{мвк}}(s) = G_c(s) \cdot G_f(s), \quad (3.14)$$

де  $G_f(s) = \frac{1}{(1 + \tau_f \cdot s)^n}$  - ПФ низькочастотного фільтра;

$\tau_f$  - постійна часу низькочастотного фільтра;

$n$  - порядок низькочастотного фільтра.

Порядок фільтра  $n$  вибирається таким чином, щоб уникнути надмірної диференціючої дії коректуючих сигналів. З урахуванням всього вище приведенного кінцевий алгоритм буде мати вид:

$$Y(s) = \frac{G_{мвк}(s) \cdot G_p(s) \cdot X_e(s) + [1 - G_{мвк}(s) \cdot G_{\Sigma}^*(s)] \cdot d(s)}{1 + [G_p(s) - G_{\Sigma}^*(s)] \cdot G_{мвк}(s)}. \quad (3.15)$$

Розглянемо приклад використання методу внутрішнього контролю для зміни параметрів базової моделі моделі ПФ ВКТ з метою її наближення до опорної моделі ПФ ВКТ зі "старінням". Базова модель ПФ ВКТ  $G_p(s)$  була визначена експериментально [104, 114] і описується рівнянням:

$$G_p(s) = \exp(-0.441176 \cdot s) \cdot \frac{2.72 \cdot (1 + 0.05 \cdot s)}{(1 + 0.2 \cdot s) \cdot (1 + 0.8 \cdot s + 0.2 \cdot s^2)}. \quad (3.16)$$

Опорну модель ПФ для ВКТ можна описати виразом:

$$G_{\Sigma}^*(s) = \exp(-677083 \cdot s) \cdot \frac{2.73913}{(1 + 0.712228 \cdot s)}. \quad (3.17)$$

На рис. 3.13 зображено ПХ обох моделей. Видно, що вони різняться за постійною часу ВКТ. Враховуючи вирази (3.16) і (3.17) та приймаючи до уваги, що  $G_c(s) \approx G_{\Sigma}^{*-1}(s)$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} G_{\Sigma}^*(s) &= G_{\Sigma}^{*+}(s) \cdot G_{\Sigma}^{*-}(s), \\ G_{\Sigma}^{*-}(s) &= \exp(-677083 \cdot s), \\ G_{\Sigma}^{*+}(s) &= \frac{2.73913}{(1 + 0.712228 \cdot s)}, \quad G_{\Sigma}^{*+}(s)^{-1} = 0.365079 \cdot (1 + 0.712228 \cdot s). \end{aligned}$$

Далі, вважаючи, що оператор  $G_{мвк}(s)$  повинен бути оберненим до  $G_{\Sigma}^{*+}(s)$  і

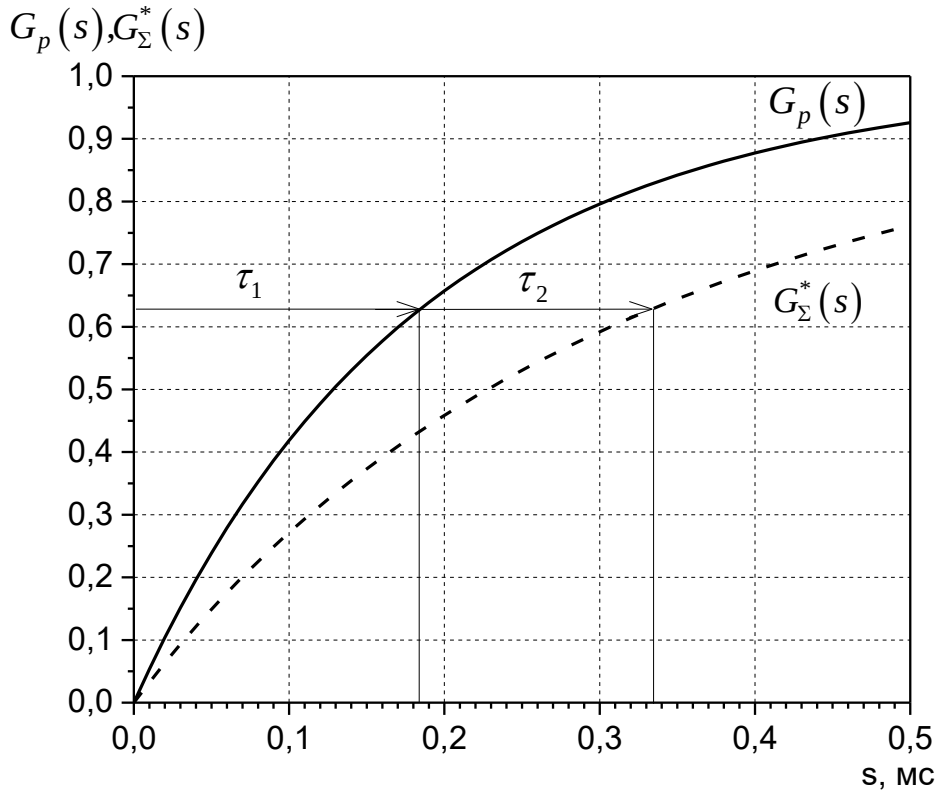


Рисунок 3.13 - Базова  $G_p(s)$  та опорна  $G_\Sigma^*(s)$  ПФ ВКТ

послідовно з'єднаним з фільтром нижніх частот  $G_f(s)$ , отримаємо вираз для оператора внутрішнього контролю  $G_{мвк}(s)$ :

$$G_{мвк}(s) = G_\Sigma^{*+}(s)^{-1} \cdot G_f(s) = \frac{0.365079 \cdot (1 + 0.712228 \cdot s)}{(1 + \tau_f \cdot s)^n}. \quad (3.18)$$

При  $n=1$  маємо стаціонарний режим. Оператор  $G_{мвк}(s)$  буде стійким, якщо постійна часу фільтра низьких частот дорівнює постійній часу розімкнутого контуру. В нашому випадку, як видно з виразу (3.18),  $\tau_f = 0.712228$ .

Проаналізуємо поведінку замкнутого контуру корекції параметрів моделі ПФ датчика тиску, приймаючи до уваги що  $G_p(s) = G_\Sigma^*(s)$ .

$$Y(s) = G_{\Sigma}^{*+}(s)^{-1} \cdot G_f(s) \cdot G_p(s) \cdot X_e(s) + \left[ 1 - G_{\Sigma}^{*+}(s) \cdot G_f(s) \cdot G_{\Sigma}^*(s) \right] \cdot d(s),$$

$$Y(s) = G_{\Sigma}^{*-}(s) \cdot G_f(s) \cdot X_e(s) + \left[ 1 - G_{\Sigma}^{*-}(s) \cdot G_f(s) \right] \cdot d(s).$$

$$Y(s) = \frac{\exp(-677083 \cdot s)}{1 + \tau_f \cdot s} \cdot X_e(s) + \left[ 1 - \frac{\exp(-677083 \cdot s)}{1 + \tau_f \cdot s} \right] \cdot d(s). \quad (3.19)$$

Таким чином, реалізація методу внутрішнього контролю параметрів базової моделі ПФ ВКТ характеризується наступними властивостями:

- вона забезпечує компенсацію часу затримки;
- низькочастотний фільтр може бути використаний для фільтрації різниці  $d(s)$  між базовою та опорною моделями ПФ ВКТ;
- в стаціонарному режимі схема дозволяє компенсувати зміщення ПФ.

Основною відмінністю вдосконаленого методу внутрішнього контролю параметрів моделі ВКТ від відомих є те, що він дозволяє за рахунок фільтрації різниці ПФ модифікувати базову модель ВКТ і визначити його ДХ з урахуванням поточного "старіння".

З метою перевірки реалізуємості вдосконаленого методу внутрішнього контролю для визначення ДХ ВКТ був розроблений алгоритм та програма з використанням пакету програмного комплексу LabView, який забезпечує в масштабі часу близькому до реального online збір та обробку вимірювальної інформації з ТСО, ведення експертної бази знань ВКТ та проведення моделювання ВКТ з визначення їх ДХ. Програмна реалізація методу внутрішнього контролю перехідних функцій ВКТ містить в собі наступні блоки (рис. 3.14):

1. Модуль визначення перехідної характеристики ВКТ.
2. Модуль наближення моделі ВКТ до опорної моделі.
3. Модуль внутрішнього контролю параметрів моделі ВКТ.

За результатами моделювання було також оцінено ефективність застосування розглянутого методу внутрішнього контролю для визначення динамічних характеристик ВКТ. Результати моделювання приведені на рис. 3.15 та рис. 3.16. Аналіз отриманих результатів показав, що якщо до корекції моделі ПФ різниця між постійними часу реальної ПФ ВКТ та її моделі становила  $\Delta\tau_1 = \tau_{вк} - \tau_{ом} = 71\text{ мс}$  ( $\tau_{вк}$  - постійна часу реальної ПФ ВКТ,  $\tau_{ом}$  - постійна часу опорної моделі каналу), то після корекції -  $\Delta\tau_2 = \tau_{вк} - \tau_{мвк} = -3\text{ мс}$  ( $\tau_{мвк}$  - постійна часу, що визначена методом внутрішнього контролю), тобто відносна похибка визначення постійної часу зменшилась з 44% до 1.8%. Дослідження показали, що відносна похибка визначення постійної часу методом внутрішнього контролю залежить від відношення сигнал/шум на виході моделі ВКТ та рівня "старіння" каналу. Відносна похибка 11% досягається при відношенні сигнал/шум  $q \geq 10\text{ дБ}$ . Отже, в роботі дістав подальшого розвитку метод визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску з використанням внутрішнього контролю, який відрізняється від відомих використанням базової моделі ВКТ, яка побудована за результатами розв'язання оберненої задачі вимірювань, що здатна адаптуватися до "старіння" елементів ВКТ. Недоліком запропонованого методу є неможливість визначення динамічних характеристик ВКТ в реальному масштабі часу. Так для досягнення максимально можливої точності цього методу в 13% необхідно приблизно 20...40 хвилин настроювання.

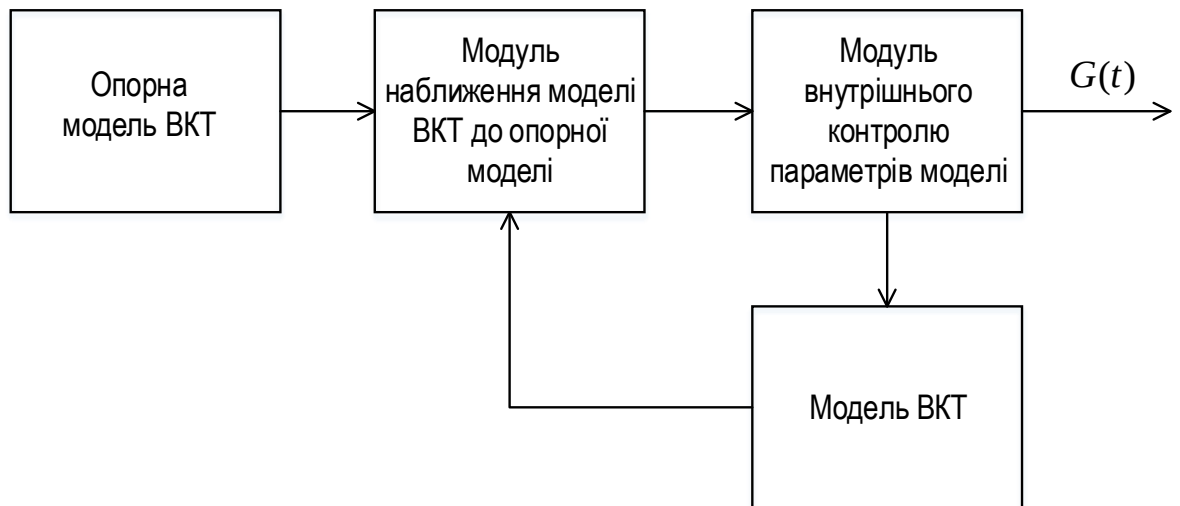


Рисунок 3.14 – Структурна схема програмного комплексу

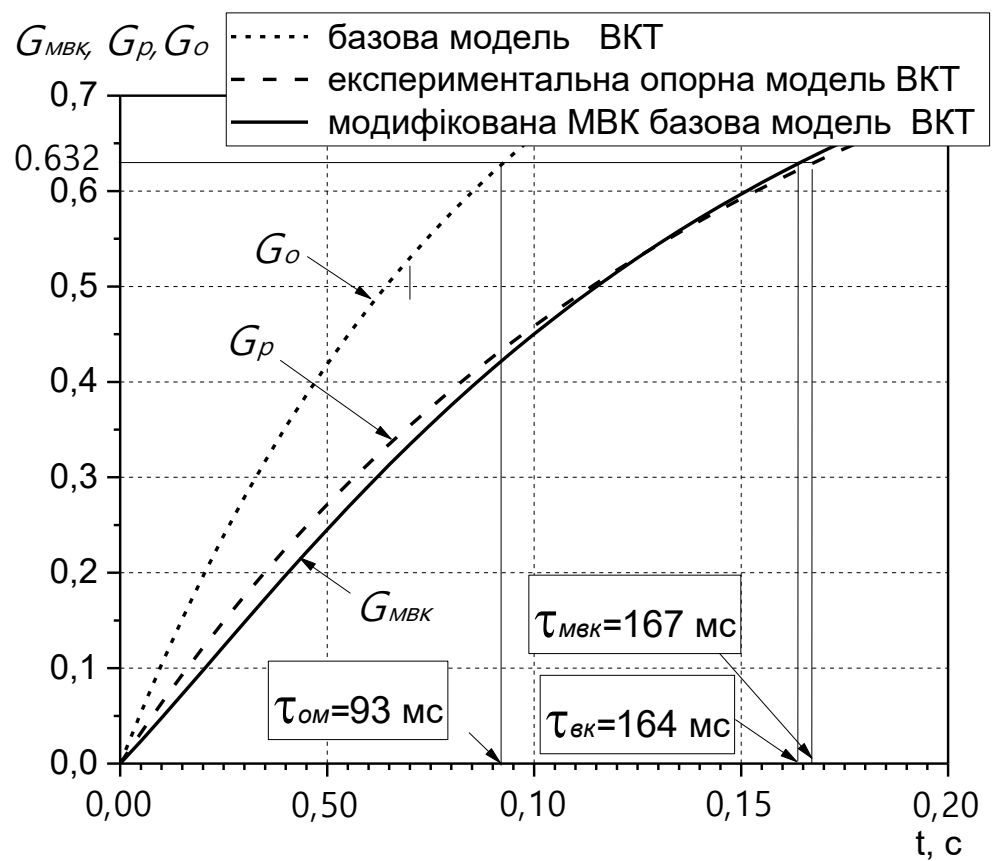


Рисунок 3.15 – Нормовані ПХ ВКТ:  $G_o$  – ПХ теоретичної моделі ВКТ,  $G_p$  – ПХ експериментальної опорної моделі ВКТ,  $G_{MVK}$  – ПХ, що отримана з використанням методу внутрішнього контролю

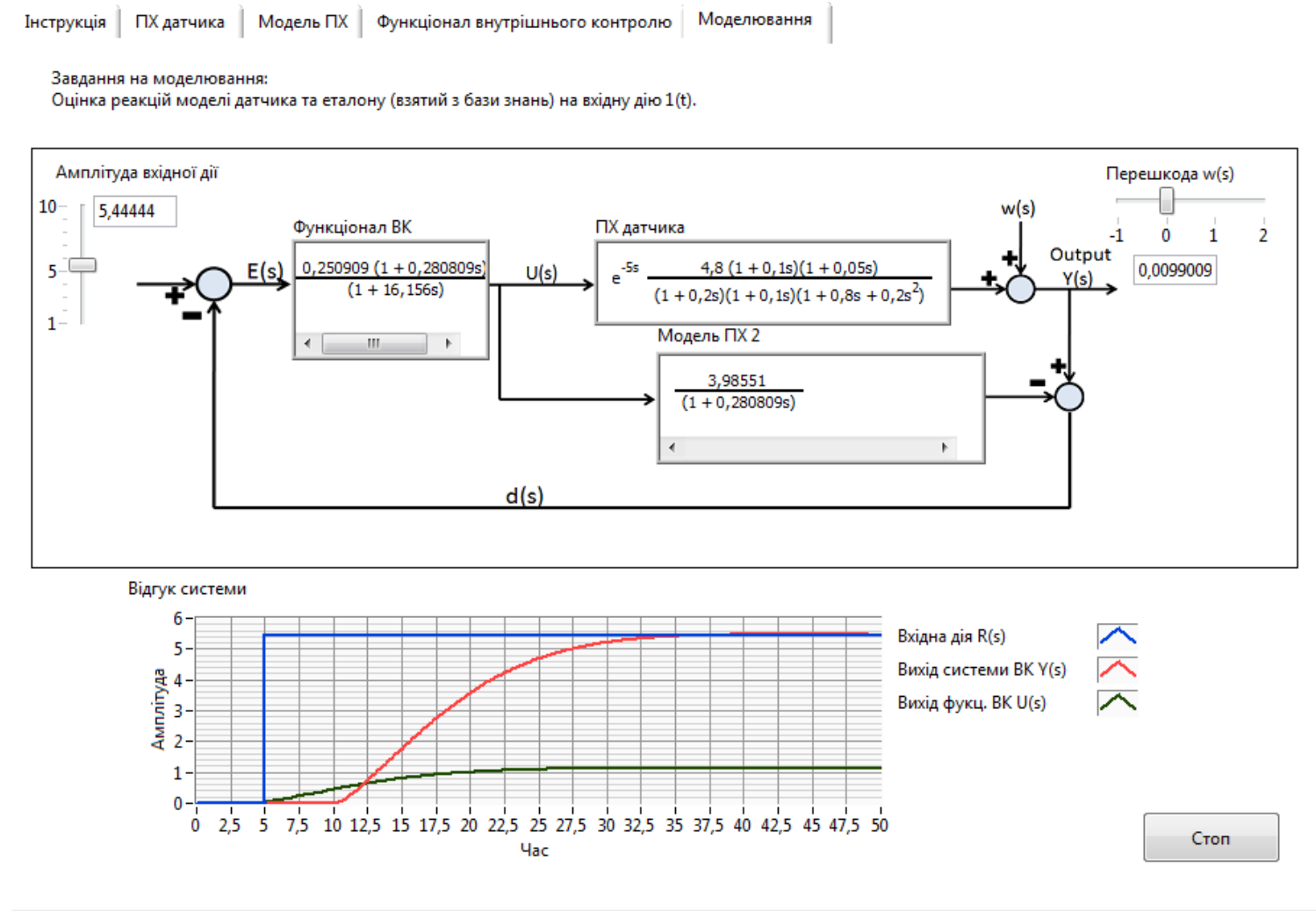


Рисунок 3.16 –Зовнішній вид панелі моделі в якій реалізовано метод внутрішнього контролю ДХ ВКТ

### 3.3 Метод визначення динамічних характеристик на основі нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску

Для істотного зменшення часу оцінки ДХ ВКТ розроблений третій метод визначення динамічних характеристик на основі нейромережевої моделі ВКТ, що функціонує майже в реальному часі (рис. 3.17). "Навчальним матеріалом" нейронної мережі є інформація баз з даних вхідних сигналів та опорних моделей ВКТ різних термінів експлуатації, які отримуються на основі застосування першого та другого методів визначення ДХ ВКТ та з допомогою яких настраюються вагові коефіцієнти мережі на початковому етапі роботи для зменшення часу навчання.

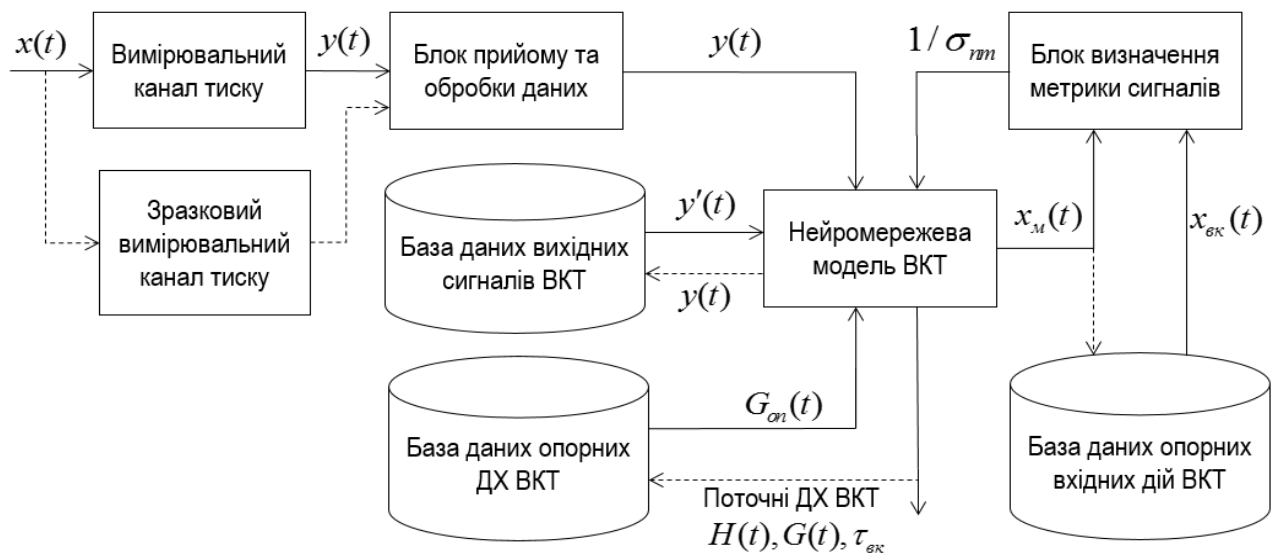


Рисунок 3.17 – Структурна схема нейромережевого методу визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску

Основним і найголовнішим завданням, яке постало при вдосконаленні методу визначення ДХ в реальному часі з використанням нейронної мережі, є визначення такого критерію навчання мережі, згідно з яким вона повинна не тільки розпізнати факт зміни ДХ ВКТ, а і визначити з заданою похибкою його постійну часу.



Експериментальні дослідження впливу "старіння" елементів ВКТ на його вихідний сигнал, які проводились протягом 2011...2014 років, показали що спектр вхідної дії буде знаходитись в межах смуги пропускання каналу тиску. Але оскільки внаслідок "старіння" ВКТ, як це було показано в 2 розділі роботи, його АЧХ звужується, то це приведе до спотворення як форми так і спектру вихідного сигналу каналу. Цей факт підтвердили і спільні експериментальні дослідження з ПрАТ "Манометр". Були отримані, з розбіжністю в 2%, результати дослідження спектрів вихідних сигналів ВКТ вимірювальним комплексом, розробленим автором, та комплексом А. М. Хашеміна (США, ПрАТ "Манометр"), які проводились як в лабораторних умовах, так і на ТСО в процесі експлуатації ВКТ. За результатами досліджень встановлено, що виявити зміну вихідного сигналу ВКТ внаслідок його "старіння" можливо лише шляхом порівняння результатів двомірного аналізу в просторі "час-частота" потужностей поточного сигналу ВКТ і опорного вихідного сигналу ВКТ.

Подальші дослідження показали, що точність визначення ДХ з використанням прямої нейромережевої моделі ВКТ (коли вхідна дія ВКТ або її аналог є входом нейронної мережі, а вихідний сигнал моделі ВКТ відповідає вихідному сигналу реального каналу) досить низька. Це пов'язано з тим, що нам точно не відома вхідна дія каналу, а тому ми не можемо точно навчити нейронну мережу за відсутністю достовірної навчаючої вибірки вхідного сигналу.

В роботі запропоновано для визначення ДХ ВКТ використовувати інверсну нейромережеву модель ВКТ (в якій вхід і вихід змінюються місцями). В якості вхідних сигналів в такій моделі використовується часова квазістаціонарна вирізка вихідного сигналу ВКТ. На входи нейронної мережі (рис. 3.17), яка навчається за методом корекції похибок, подаються вихідні сигнали від зразкового ВКТ при його наявності або з бази даних вихідних сигналів. Вихідний сигнал мережі порівнюється з навчальною вибіркою, в якості якої виступає вхідна дія (сигнал) з бази даних, що створена для даного

каналу. При кожному порівнянні вихідного сигналу мережі з навчальною вибіркою сигнал похибки здійснює корекцію вагових коефіцієнтів нейронної мережі. Критерієм зупинки алгоритму навчання є мінімум метрики відновленої вхідної дії та опорної вхідної дії ВКТ. Нейронна мережа функціонує як обернений оператор, коли по вихідному сигналу ВКТ отримується вхідна дія та ДХ каналу тиску. Таким чином, після перестроювання визначається ДХ зразкового ВКТ або його моделі. Порівняння цієї характеристики з наперед відомою характеристикою зразкового ВКТ дозволяє оцінити точність визначення ДХ і якість роботи нейронної мережі. Після навчання на нейронну мережу подається вихідний сигнал реального ВКТ з невідомими ДХ. Цей сигнал при навчанні не подавався, але, оскільки нейронна мережа отримала функцію узагальнення при навчанні, то вона в автоматичному режимі майже в реальному часі дозволяє визначити постійну часу та динамічні характеристики реального каналу.

Відмінністю запропонованого нейромережевого методу визначення ДХ ВКТ від відомих полягає в тому, що в ньому ДХ визначаються не за тестовими або вхідними діями ВКТ, а за його вихідними сигналами і в якості критерію навчання прийнятий мінімум метрики відновленої вхідної дії ВКТ.

Таким чином методика створення інверсної моделі ВКТ полягала в наступному.

1. Розробка прямої нейромережевої моделі ВКТ.
2. Перевірка достовірності роботи нейромережевої моделі і оцінка точності відновлення вихідного сигналу ВКТ за відомою опорною тестовою вхідною дією каналу тиску.
3. Розробка інверсної нейромережевої моделі ВКТ на основі вже розробленої нейронної мережі прямого поширення.
4. Перевірка достовірності роботи інверсної нейромережевої моделі як по тестовому вихідному сигналу ВКТ так по реальному каналу тиску.

### 3.3.1 Нейромережева модель вимірювального каналу тиску

У загальному випадку ПФ ВКТ може бути описана наступним лінійним рівнянням:

$$W_s(p) = K_0 \cdot \frac{\prod_{i=1}^{m_1} (T_{2i}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_{2i} \cdot T_{2i} \cdot p + 1) \cdot \prod_{i=m_1+1}^{m_2} (T_{2i} \cdot p + 1)}{\prod_{j=1}^{n_1} (T_{1j}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_{1j} \cdot T_{1j} \cdot p + 1) \cdot \prod_{j=m_1+1}^{n_2} (T_{1j} \cdot p + 1)}, \quad (3.20)$$

де  $U(p)$ ,  $Y(p)$  - зображення по Лапласу, відповідно вхідного та вихідного сигналів ВКТ;

$T_{1j}$ ,  $T_{2i}$  - постійні часу ВКТ;

$\xi_{1j}$ ,  $\xi_{2i}$  - коефіцієнти демпфування;  $i = \overline{(1, m_2)}$ ,  $j = \overline{(1, n_2)}$ ;

$K_0$  - статичний коефіцієнт підсилення;

$p$  - комплексна змінна.

Ступінь чисельника  $m$ , ступінь знаменника (порядок)  $n$  і ступінь  $q$  ПФ датчика визначаються, відповідно, у такий спосіб:  $m = m_1 + m_2$ ,

$$n = n_1 + n_2, q = n - m = n_1 - m_1 + n_2 - m_2.$$

Отримаємо дискретну модель ВКТ, що описаний за допомогою неперервної ПФ (3.20). Для цього скористаємося здатністю нейронних мереж (НМ) у їхньому процесі навчання підстроювати свої параметри під заданий цільовий вихід при наявності конкретного входу [47]. Дана здатність НМ дозволяє визначати значення параметрів дискретної ПФ ВКТ на основі інформації про його реакції на заданий вхідний вплив.

Метою розв'язання зазначеної задачі є не модифікація існуючих алгоритмів одержання дискретного аналога безперервної ПФ [64], а використання результатів розробки нейромережевої динамічної моделі каналу тиску та алгоритму її навчання для наступної побудови нейромережевої

моделі каналу і створення на її основі алгоритму корекції інерційності ВКТ. Представимо ПФ (3.20) ВКТ в наступному виді:

$$W_s(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_m \cdot p^m + b_{m-1} \cdot p^{m-1} + b_{m-2} \cdot p^{m-2} + \dots + b_1 \cdot p + b_0}{p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + a_{n-2} \cdot p^{n-2} + \dots + a_1 \cdot p + a_0}, \quad (3.21)$$

де  $b_i = b_i(T_{2j}, \xi_{2j}, K_0)$  - коефіцієнти, що залежать від постійних часу, коефіцієнтів демпфування елементарних кіл ВКТ і статичного коефіцієнта підсилення,  $i = (\overline{0, m})$ ,  $j = (\overline{1, m_2})$ ;

$a_i = a_i(T_{1j}, \xi_{1j})$  - коефіцієнти, що залежать від параметрів елементарних кіл, які становлять знаменник ПФ каналу,  $i = (\overline{0, n-1})$ ,  $j = (\overline{0, n_2})$ .

Дискретний аналог безперервної ПФ (3.20) запишемо у вигляді:

$$W_s(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot z^{-1} + \beta_2 \cdot z^{-2} + \dots + \beta_{n-1} \cdot z^{-n+1} + \beta_n \cdot z^{-n}}{1 - \alpha_1 \cdot z^{-1} - \alpha_2 \cdot z^{-2} - \dots - \alpha_{n-1} \cdot z^{-n+1} - \alpha_n \cdot z^{-n}}, \quad (3.22)$$

де  $U(z)$ ,  $Y(z)$  - Z-перетворення відповідно вхідного та вихідного сигналів каналу;

$\beta_i = \beta_i(b_0, \dots, b_m, a_0, \dots, a_{n-1}, T)$ ,  $\alpha_j = \alpha_j(b_0, \dots, b_m, a_0, \dots, a_{n-1}, T)$  - коефіцієнти, які залежать від коефіцієнтів ПФ (3.21) датчика та періоду квантування  $T$ ,  $i = (\overline{0, n})$ ,  $j = (\overline{1, n})$ .

Різницеве рівняння, що відповідає дискретній ПФ (3.22) каналу, запишеться у вигляді

$$y(k) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y(k-i) = \sum_{j=0}^n \beta_j \cdot y(k-j), \quad (3.23)$$

де  $u(k)$ ,  $y(k)$  - відліки, відповідно, вхідного й вихідного сигналів каналу із ПФ (3.20) у дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ .

Зв'язок між виходом і входом дискретної моделі ВКТ представимо у вигляді рекурентного рівняння, що отримується з виразу (3.23):

$$y(k) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y(k-i) + \sum_{j=0}^n \beta_j \cdot u(k-j) \quad (3.24)$$

Значення параметрів дискретної моделі (3.22) можна визначити на основі лінійної нейромережевої моделі ВКТ, структурна схема якої наведена на рис. 3.18. Зазначена модель являє собою рекурентну нейронну мережу, що складається з одного нейрона з лінійною функцією активації  $f_a(net)$  і нульовим зсувом  $b_0$ . При цьому структура даної моделі повністю відповідає виразу (3.24).

Рекурентне рівняння, що визначає зв'язок між входом і виходом нейромережевої моделі каналу тиску, запишеться у вигляді

$$y^*(k) = f_a(net) = net = \sum_{i=1}^n lw_i \cdot y^*(k-i) + \sum_{j=0}^n iw_j \cdot u(k-j), \quad (3.25)$$

де  $u(k)$ ,  $y^*(k)$  - відліки, відповідно, вхідної дії каналу й вихідного сигналу його нейромережевої моделі в дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ;

$lw_i$ ,  $iw_j$  - настроювані параметри (ваги) нейромережевої моделі каналу,  $i = (\overline{0, n})$ ,  $j = (\overline{1, n})$ .

При відповідному способі формування вхідної і цільової навчальних послідовностей, який відображає зв'язок між входом і виходом дискретної моделі ВКТ, параметри (ваги) нейромережевої моделі можуть бути настроєні

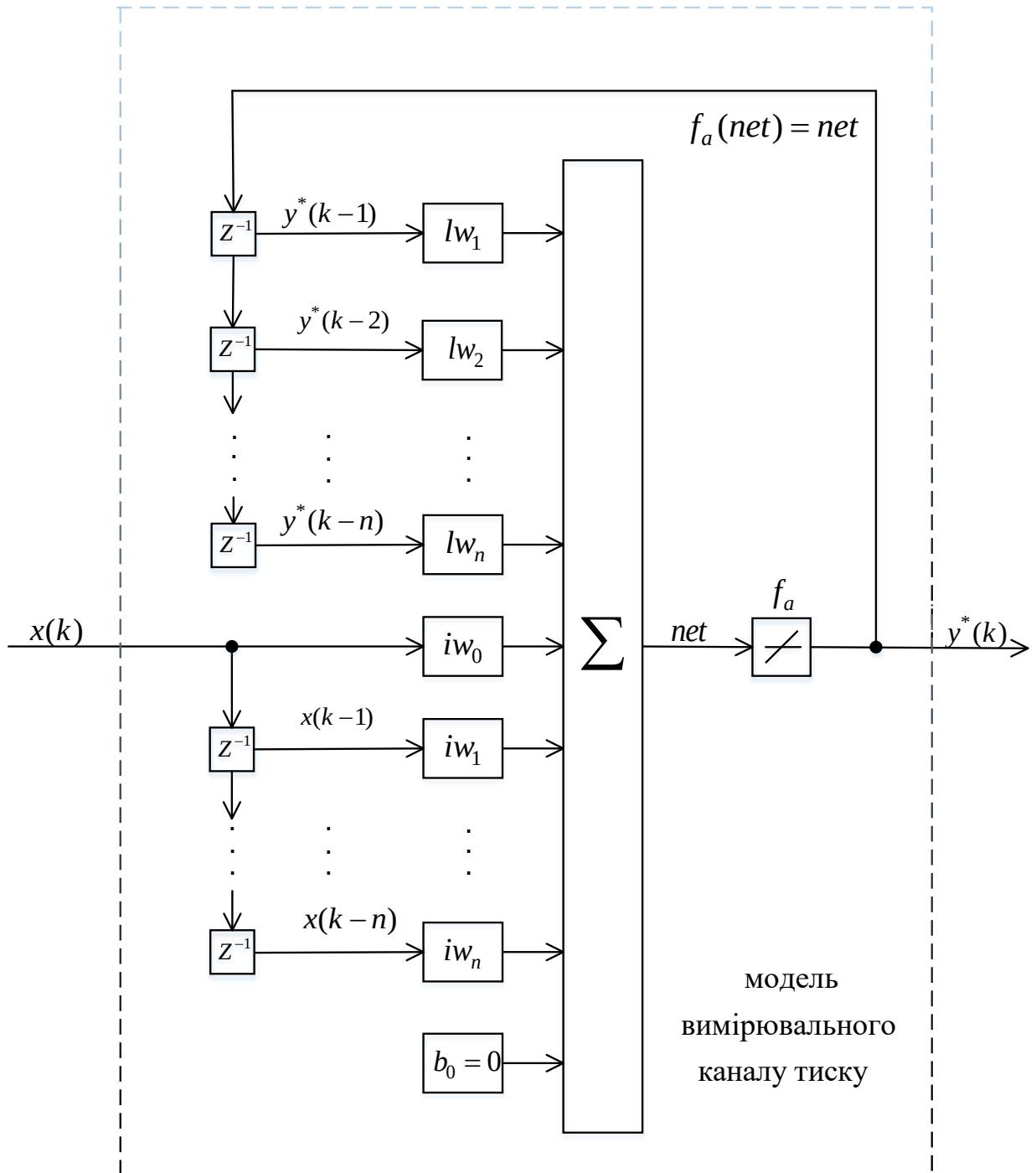


Рисунок 3.18 - Структурна схема нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску

в процесі її навчання таким чином, що при заданому рівні точності відліки вихідного сигналу нейромережевої моделі будуть дорівнювати відповідним дискретним відлікам вихідного сигналу каналу із ПФ (3.20). При цьому зазначена можливість випливає з лінійності й відповідності дискретної та нейромережевої моделей ВКТ. Дійсно, якщо  $y^*(k) = y(k)$  при  $k = 0, 1, 2, \dots$ , то, прирівнюючи між собою праві частини виразів (3.24) і (3.25), одержимо

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y(k-i) + \sum_{j=0}^n \beta_j \cdot y(k-j) = \sum_{i=1}^n l w_i \cdot y^*(k-i) + \sum_{j=0}^n i w_j \cdot u(k-j). \quad (3.26)$$

Після перетворення останнього виразу отримаємо рівняння:

$$\sum_{i=1}^n (\alpha_i - l w_i) \cdot y(k-i) + \sum_{j=0}^n (\beta_j - i w_j) \cdot u(k-j) = 0, \quad (3.27)$$

яке за умови ненульового вхідного сигналу ВКТ обертається в тотожність тільки тоді, коли  $\alpha_i = l w_i$  та  $\beta_j = i w_j$ , при  $i = (\overline{0, n})$ ,  $j = (\overline{1, n})$ .

Таким чином, якщо в результаті навчання нейромережевої моделі ВКТ, відліки її вихідного сигналу будуть дорівнювати відповідним дискретним відлікам вихідного сигналу ВКТ із ПФ, то значення настроєних параметрів нейромережевої моделі одночасно будуть і значеннями параметрів дискретної моделі (3.22) каналу тиску. Отже, у якості критерію навчання розглянутої моделі необхідно вибирати функцію похибки між бажаним і реальним виходом нейромережевої моделі первинного вимірювального каналу тиску.

### 3.3.2 Критерій і схема навчання нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску

З математичної точки зору, мета навчання нейромережевої моделі ВКТ (тобто підстроювання її параметрів, - вагових коефіцієнтів нейрона) полягає в

мінімізації необхідного критерію навчання. У якості останнього будемо використовувати сукупну по  $N$  відлікам вхідної навчальної послідовності  $H_0 = [h_0(0) \ h_0(1) \ h_0(2) \ \dots \ h_0(N-1)]$  середньоквадратичну похибку навчання, тобто різниці між бажаним (цільовим) і реальним виходом нейромережевої моделі:

$$E = E(IW, LW) = E(iw_0, \dots, iw_n, lw_0, \dots, lw_n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} (h_1(k) - h^*(k))^2. \quad (3.28)$$

де  $u(k)$ ,  $y^*(k)$  - відліки, відповідно, бажаного (цільового) і реального виходу нейромережевої моделі каналу в дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ ;  $IW = [iw_0 \ \dots \ iw_n]$ ,  $LW = [lw_1 \ \dots \ lw_n]$  - вектори, що містять ваги, відповідно, «нерекурсивної» і «рекурсивної» частини нейромережевої моделі ВКТ із ПФ (3.22).

Завдання навчання нейромережевої моделі ВКТ полягає в мінімізації функції багатьох змінних (тобто похибки навчання як функції вагових коефіцієнтів нейромережевої моделі) і відноситься до класу екстремальних задач [47]. У результаті розв'язання даної задачі з використанням одного з алгоритмів навчання повинні бути отримані значення настроюваних параметрів нейромережевої моделі каналу, які можуть використовуватися в якості параметрів дискретної моделі ВКТ (3.21). Алгоритми навчання нейронних мереж описані в літературі [14, 16, 47, 71, 89] і не мають потреби в описі при розгляді поставленої задачі, оскільки вони ґрунтуються на добре досліджених алгоритмах пошуку екстремуму функції багатьох змінних.

У зв'язку з розглянутим завданням виникає завдання побудови схеми навчання, що визначає спосіб формування навчальної послідовності й порядок реалізації алгоритму навчання. При цьому критерій (3.28) допускає дві схеми навчання, які відповідно до використовуваних при їхній реалізації способів



організації процедури навчання можна умовно розділити на схему навчання в динамічному режимі і схему навчання в статичному режимі.

Особливістю схеми навчання нейромережевої моделі ВКТ в динамічному режимі є необхідність використання динамічних алгоритмів навчання [65, 66, 67], оскільки в структурі розглянутої нейромережевої моделі є рекуррентні зв'язки і елементи затримки. Програмна реалізація таких алгоритмів супроводжується великими обсягами ітераційних обчислювальних операцій, що, як наслідок, приводить до низької точності результатів, нестійкості процесу й збільшенню часу навчання. Для усунення зазначених небажаних ефектів, які можуть виникнути при реалізації схеми навчання нейромережевої моделі ВКТ в динамічному режимі, доцільно використовувати інший можливий підхід до організації процедури навчання нейронних мереж, який полягає в модифікації зазначеної схеми навчання шляхом усунення зі структури нейромережевої моделі ВКТ динамічних зв'язків і зміни способу формування вхідної навчальної послідовності. В додатку Д обгрунтовано перехід від схеми навчання в динамічному режимі до схеми навчання в статичному режимі, а в додатку Г доведена еквівалентність схеми навчання моделі в динамічному режимі схемі навчання в статичному режимі.

Таким чином, для схеми навчання в статичному режимі (рис.3.18) функція похибки навчання запишеться у вигляді:

$$E = E(IW, LW) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2, \quad (3.29)$$

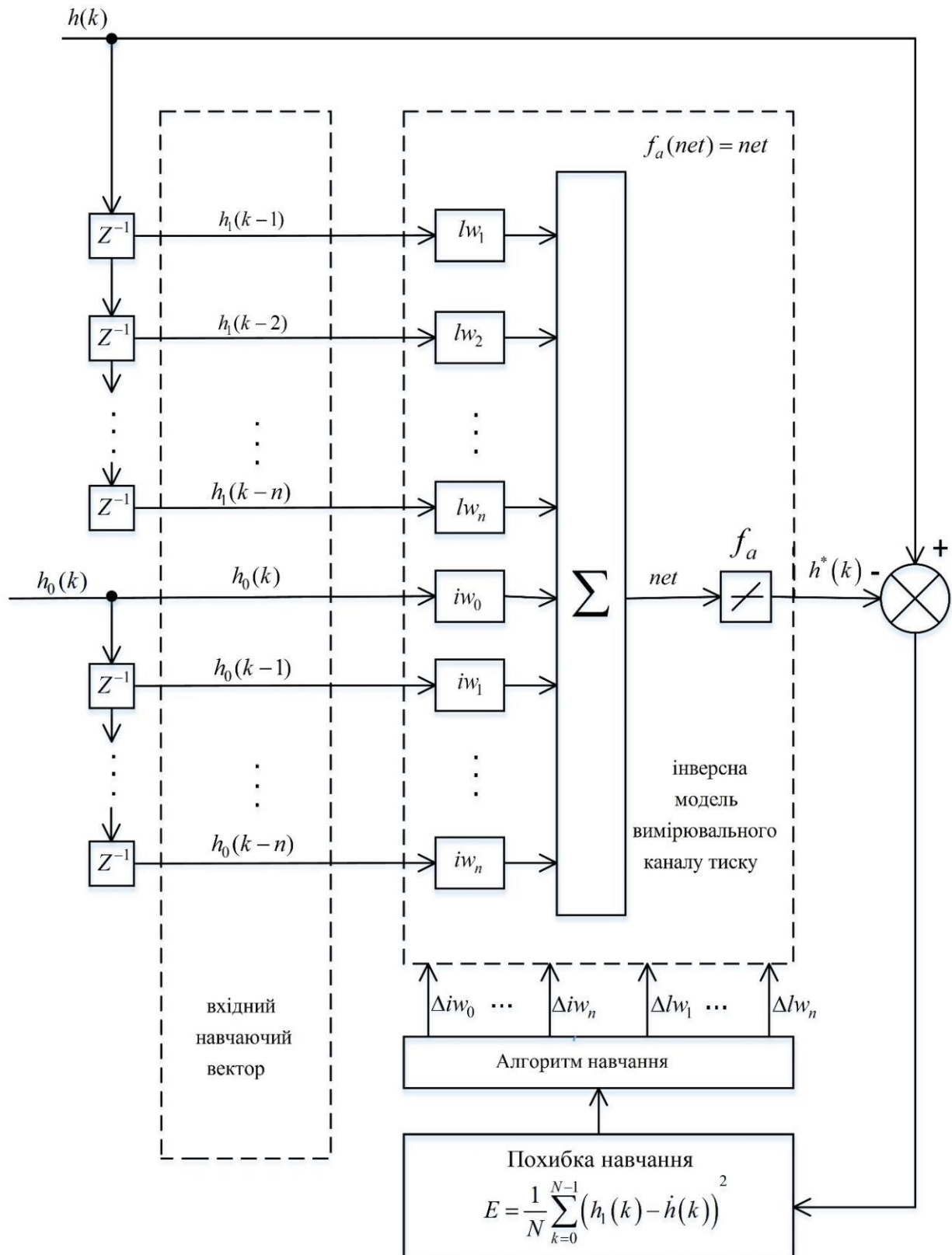


Рисунок 3.19 - Схема навчання нейромережевої ВКТ в статичному режимі

Очевидно, що дана функція щодо своїх аргументів - ваг нейромережевої моделі ВКТ - є багатомірним параболоїдом [47], тому вона має єдиний близький до нуля мінімум, який досягається при наступній умові:

Очевидно, що дана функція щодо своїх аргументів - ваг нейромережевої моделі ВКТ - є багатомірним параболоїдом [47], тому вона має єдиний близький до нуля мінімум, який досягається при наступній умові:

$$\begin{cases} lw_i = \alpha_i, i = \overline{(1, n)} \\ iw_j = \beta_j, j = \overline{(0, n)} \end{cases} \quad (3.30)$$

Отже, якщо значення вагових коефіцієнтів розглянутої нейромережевої моделі ВКТ є координатами мінімуму функції похибки навчання (3.29), то вони будуть і значеннями дискретної ПФ (3.22) ВКТ.

$$\begin{cases} lw_i = \alpha_i, i = \overline{(1, n)} \\ iw_j = \beta_j, j = \overline{(0, n)} \end{cases} \quad (3.31)$$

Отже, якщо значення вагових коефіцієнтів розглянутої нейромережевої моделі ВКТ є координатами мінімуму функції похибки навчання (3.29), то вони будуть і значеннями дискретної ПФ (3.22) ВКТ.

### **3.3.3 Формування послідовностей для навчання нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску**

Згідно зі схемою навчання, наведеної на рис. 3.19, у дискретний момент часу  $t_k = k \cdot T$  вхідний навчаючий вектор  $P^*$  з розмірністю  $(2 \cdot n + 1) \times 1$  має наступний вигляд:

$$P^*(k) = \begin{bmatrix} h_1(k-1) \\ h_2(k-2) \\ \dots \\ h_1(k-n) \\ h_0(k) \\ h_0(k-1) \\ \dots \\ h_0(k-n) \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

де  $h_0(k)$ ,  $h_1(k)$  -відліки, відповідно, вхідної і цільової навчальних послідовностей у дискретний момент часу  $t_k = k \cdot T$ .

Відповідний до навчального вектора  $P^*(k)$  цільовий вектор  $T^*(k)$  з розмірністю  $1 \times 1$  має вигляд:  $T^*(k) = h_1(k)$ .

При використанні в процесі навчання  $N$  відліків вхідної навчальної послідовності в моменти часу  $t_k = k \cdot T$  при  $k = \overline{(0, N-1)}$  вхідна навчальна матриця  $P^*$  буде мати розмірність  $(2 \cdot n + 1) \times N$  і може бути записана у вигляді:

$$P^* = \begin{bmatrix} 0 & h_1(0) & \dots & h_1(n-1) & h_1(n) & \dots & h_1(N-2) \\ 0 & 0 & \dots & h_1(n-2) & h_1(n-1) & \dots & h_1(N-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_1(0) & h_1(1) & \dots & h_1(N-n-1) \\ h_0(0) & h_0(1) & \dots & h_0(n) & h_0(n+1) & \dots & h_0(N-1) \\ 0 & h_0(0) & \dots & h_0(n-1) & h_0(n) & \dots & h_0(N-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_0(0) & h_0(1) & \dots & h_0(N-n-1) \end{bmatrix}. \quad (3.33)$$

Відповідний до навчальної матриці  $P^*$  вихідний цільовий вектор  $T^*$  буде мати розмірність  $1 \times N$  і запишеться у вигляді:

$$T^* = [h_1(0) \ h_1(1) \ \dots \ h_1(n) \quad h_1(n+1) \ \dots \ h_1(N-1)], \quad (3.34)$$

Виходячи з постановки задачі навчання нейромережевої моделі ВКТ, зв'язок між вхідною навчальною послідовністю  $H_0 = [h_0(0) \ h_0(1) \ h_0(2) \ ... \ h_0(N-1)]$  і цільовою навчаючою послідовністю  $H_1 = [h_1(0) \ h_1(1) \ h_1(2) \ ... \ h_1(N-1)]$ , з відліків яких формуються вхідна матриця  $P^*$  і цільовий вектор  $T^*$ , повинна відповідати зв'язку між входом і виходом дискретної моделі ВКТ.

Відповідно до обраного критерію навчання значення відліків вихідного сигналу нейромережевої, а отже, і дискретної моделі ВКТ повинні дорівнювати відповідним значенням дискретних відліків вихідного сигналу неперервної моделі ВКТ.

З урахуванням зазначених положень цільова навчальна послідовність  $H_1$ , повинна бути складена з дискретних відліків сигналу, що є реакцією неперервної моделі (3.20) ВКТ на сигнал, з дискретних відліків якого формується вхідна навчальна послідовність  $H_0$ . Приймемо, що  $x(t)$  - вхідний сигнал неперервної моделі ВКТ, а  $h(t)$  - реакція моделі на цей сигнал:  $h(p) = W(p) \cdot x(p)$ .

Тоді послідовності  $H_0$  і  $H_1$  будуть, відповідно, складені з наступних значень при  $k = \overline{0, N-1}$ :  $h_0(k) = x(k \cdot T)$ ,  $h_1(k) = h(k \cdot T)$ , де  $T$  - період квантування.

Тут виникає задача вибору конкретного виду сигналу  $x(t)$ , на основі якого й будуть формуватися зазначені послідовності. Для усунення невизначеності розв'язку даної задачі в якості сигналу  $x(t)$  виберемо функцію одиничного стрибка:  $x(t) = 1(t)$ .

Тоді в якості сигналу  $h(t)$  буде виступати перехідна характеристика ВКТ, яка в операторній формі має такий вигляд:  $h(p) = W_s(p) \cdot 1(p)$ .

Використання в якості сигналу для формування цільової навчальної послідовності перехідної характеристики ВКТ дозволяє обґрунтовано вибирати довжину навчальних послідовностей  $H_0$  і  $H_1$ .

Припустимо, що при  $\varepsilon \ll 1$ , починаючи з моменту часу  $T_h = N \cdot T$ , усі дискретні значення перехідної характеристики ВКТ будуть перебувати усередині наступного діапазону:

$$\Delta_h = K_0 \pm K_0 \cdot \varepsilon = K_0 \cdot (1 \pm \varepsilon) = K_0 \cdot \Delta_1, \quad (3.35)$$

де  $\Delta_1 = 1 \pm \varepsilon$  - діапазон відхилення від функції одиничного скачка.

Тоді вхідна  $H_0$  і цільова  $H_1$  навчальні послідовності можуть бути складені з  $N$  перших дискретних відліків відповідно функції  $1(t)$  і перехідної характеристики  $h(t)$  датчика з періодом квантування  $T$ :

$$H_0 = [1(0) \ 1(T) \ 1(2 \cdot T) \ \dots \ 1((N-1) \cdot T)], \quad (3.36)$$

$$H_1 = [h(0) \ h(T) \ h(2 \cdot T) \ \dots \ h((N-1) \cdot T)]. \quad (3.37)$$

Зазначений спосіб вибору довжини  $N$  навчальних послідовностей обумовлений тим, що значення дискретних відліків сигналу  $h(t)$ , починаючи з моменту часу  $T_h = (N-1) \cdot T$ , будуть мало відрізнятися, відповідно, від постійного значення  $K_0$ , і, отже, не будуть істотно впливати на зміну значення похибки навчання в процесі настроювання параметрів нейромережевої моделі ВКТ.

Останнє твердження випливає з аналізу виразу для похибки навчання (3.29) нейромережевої моделі ВКТ в умовах задачі вибору довжини навчальних послідовностей.

Граничне значення похибки навчання при збільшенні довжини навчальних послідовностей до нескінченності визначається згідно з виразом:

$$\begin{aligned}
E_0 &= \lim_{N \rightarrow \infty} E = \lim_{N \rightarrow \infty} E(IW, LW) = \\
&= \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right] = \\
&= \left( K_0 - K_0 \cdot \sum_{i=1}^n lw_i - \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 = \left( K_0 \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^n lw_i \right) - \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Тоді при умовах, визначених виразом (3.35), похибка навчання нейромережевої моделі ВКТ буде знаходитися усередині наступного діапазону:

$$\begin{aligned}
\Delta_\varepsilon &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( \Delta_h - \Delta_h \cdot \sum_{i=1}^n lw_i - \Delta_1 \cdot \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 = \\
&= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( K_0 \cdot (1 \pm \varepsilon) - K_0 \cdot (1 \pm \varepsilon) \cdot \sum_{i=1}^n lw_i - (1 \pm \varepsilon) \cdot \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 = \\
&= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( K_0 - K_0 \cdot \sum_{i=1}^n lw_i - \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 \cdot (1 \pm \varepsilon)^2 = \\
&= \left( K_0 - K_0 \cdot \sum_{i=1}^n lw_i - \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 \cdot (1 \pm \varepsilon)^2 = \\
&= \left( K_0 \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^n lw_i \right) - \sum_{j=0}^n iw_j \right)^2 \cdot (1 \pm \varepsilon)^2 = E_0 \cdot (1 \pm \varepsilon)^2.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Таким чином, вираз (3.39) встановлює прямий зв'язок між допустимим відхиленням похибки навчання від свого граничного значення та довжиною  $N$  навчальних послідовностей. Для визначення конкретного значення довжини навчальних послідовностей (3.36) і (3.37) необхідно:

- за допомогою відносного параметра  $\varepsilon$  задати межі допустимого відхилення величини похибки навчання (3.29) нейромережевої моделі ВКТ від свого граничного значення;

- з використанням обраного значення параметра  $\varepsilon$  на основі виразу (3.35) визначити межі діапазону, у який попадають усі дискретні значення перехідної характеристики ВКТ, починаючи з моменту часу  $T_h = N \cdot T$ ;
- визначити мінімальне значення моменту часу  $T_h$ , починаючи з якого всі наступні дискретні значення перехідної характеристики ВКТ будуть лежати усередині знайденого діапазону;
- знайти довжину навчальних послідовностей як відношення отриманого значення моменту часу  $T_h$  до величини періоду дискретизації  $T$ .

### 3.3.4 Результати математичного моделювання

Для ілюстрації можливостей запропонованої нейромережевої моделі в програмному середовищі Matlab було проведено математичне моделювання вимірювального каналу тиску, що має ПФ виду:

$$W_s(p) = \frac{1}{(T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi_1 \cdot T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)}, \quad (3.40)$$

де  $T_1 = 90$  мс,  $T_2 = 125$  мс - постійні часу ВКТ;

$\xi_1 = 0.7$  – коефіцієнт демпфування датчика тиску ВКТ.

Відповідно до алгоритму, який описано в попередньому підрозділі, було визначено значення довжини навчальних послідовностей -  $N = 540$ ; при цьому були задані наступні значення: період квантування  $T = 1$ с і параметр, що визначає довжину навчальних послідовностей,  $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ .

Достовірність розробленої нейромережевої моделі ВКТ проводилось методом порівняння з результатами роботи аналогової моделі каналу. Оцінювалась реакція обох моделей на стандартний випробовувальний сигнал типу "сходінка". За результатами моделювання оцінювалась відносна похибка реакції нейромережевої моделі ВКТ. Реакція аналогової та нейромережевої



моделі ВКТ на дію у вигляді "сходинки" приведена на рис. 3.20. Відносна похибка реакції на дію у вигляді "сходинки" між ПФ нейромережевої моделі ВКТ в порівнянні з аналоговою зображена на рис. 3.21. Графік зміни похибки навчання  $E$  нейромережевої моделі датчика залежно від кількості циклів (епох) навчання приведено на рис. 3.22. У якості алгоритму навчання був використаний алгоритм Левенберга-Марквардта [47], при цьому після 25 епох навчання значення похибки навчання склало 0.01. Мінімальна похибка навчання за умови авідсутності шумів слала  $3 \cdot 10^{-5}$  через 100 епох навчання (рис. 3.22). На основі виразу (3.40) з урахуванням отриманого значення похибки навчання нейромережевої моделі датчика дискретний аналог неперервної ПФ був представлений у вигляді :

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{iw_0 + iw_1 \cdot z^{-1} + iw_2 \cdot z^{-2} + iw_3 \cdot z^{-3}}{1 - lw_1 \cdot z^{-1} - lw_2 \cdot z^{-2} - lw_3 \cdot z^{-3}}. \quad (3.41)$$

де  $Y(z)$ ,  $U(z)$  - відображення в  $z$  площині відповідно вихідного сигналу ВКТ  $y(t)$  та його вхідної дії  $x(t)$ .

У результаті проведеного процесу навчання були отримані наступні значення параметрів нейромережевої моделі ВКТ, а отже, і значення параметрів дискретної ПФ  $W(z)$  (3.41):  $iw_0 = 2.622 \cdot 10^{-6}$ ;  $iw_1 = 1.031 \cdot 10^{-5}$ ;  $iw_2 = 2.534 \cdot 10^{-6}$ ;  $iw_3 = -2.227 \cdot 10^{-17}$ ;  $lw_1 = 2.933$ ;  $lw_2 = -2.867$ ;  $lw_3 = 9.343 \cdot 10^{-1}$ . Логарифмічні частотні характеристики безперервної (3.40) і отриманої дискретної (3.41) моделей ВКТ приведено на рис. 3.23. Очевидна близькість даних характеристик дозволяє зробити висновок про відповідність двох розглянутих моделей ВКТ.

Для оцінки точності отриманої дискретної моделі ВКТ необхідно порівняти між собою реакції моделей (3.40) і (3.41) на один і той же вхідний вплив, що відрізняється від вхідної навчальної послідовності. У якості такого

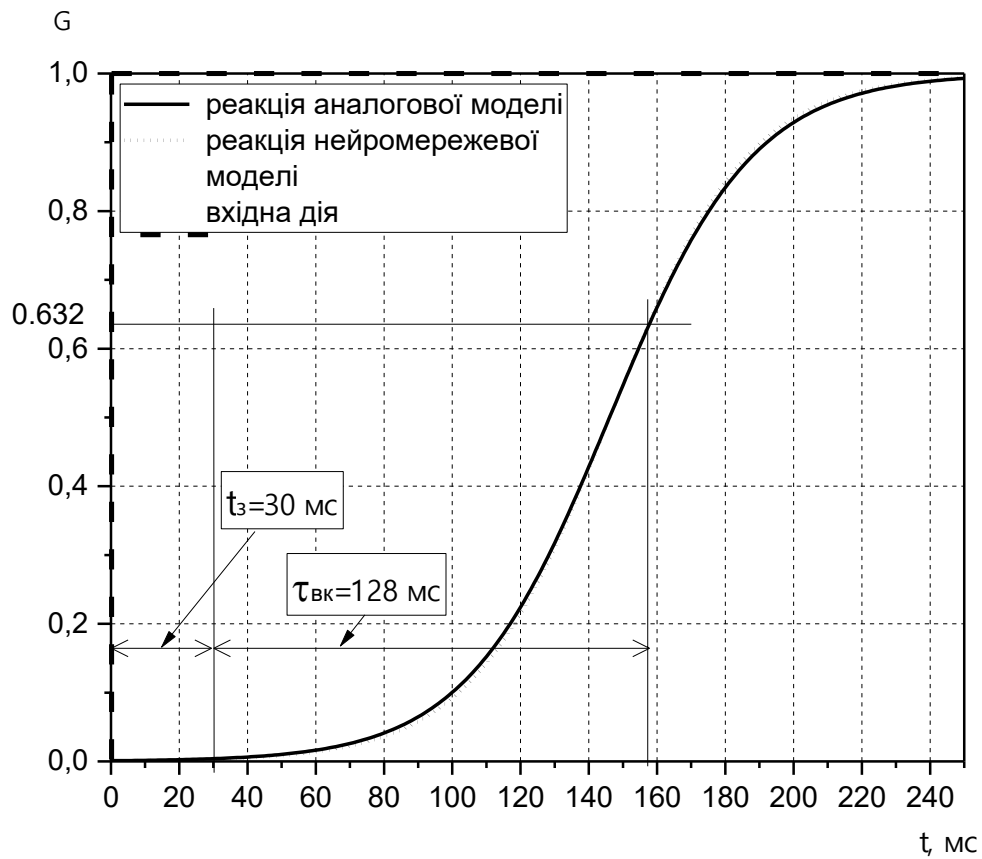


Рисунок 3.20 – Реакція аналогової та нейромережевої моделі ВКТ на дію у вигляді "сходинки"

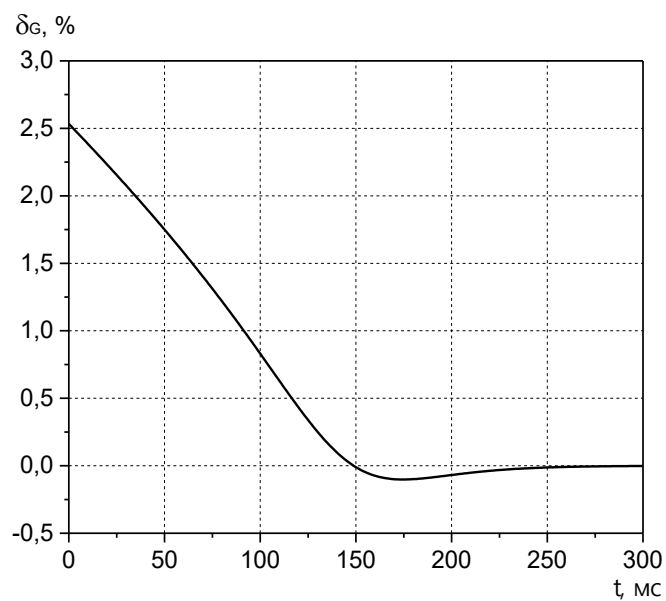


Рисунок 3.21 – Відносна похибка реакції на дію у вигляді "сходинки" між ПФ нейромережевої моделі ВКТ в порівнянні з аналоговою

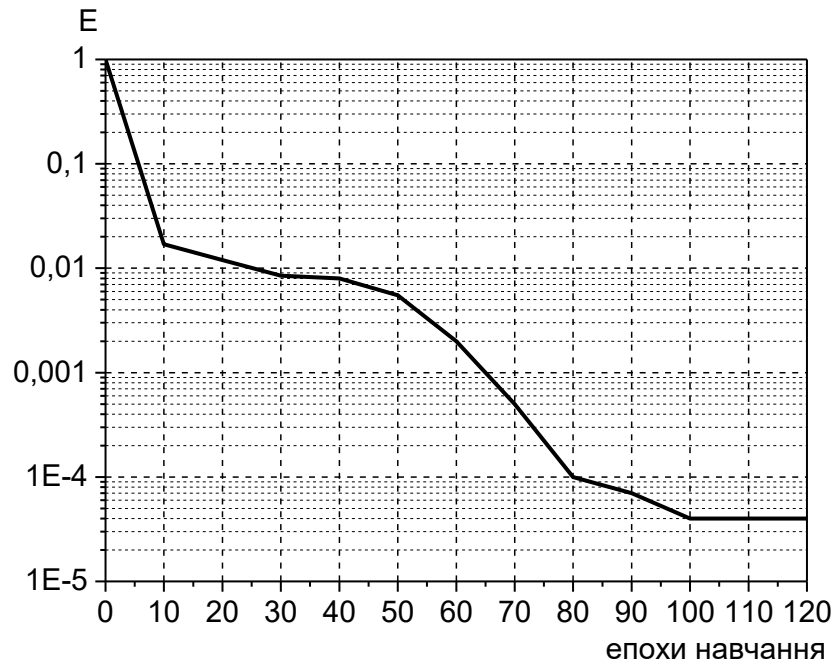


Рисунок 3.22 - Графік зміни похибки навчання залежно від кількості циклів (епох) навчання

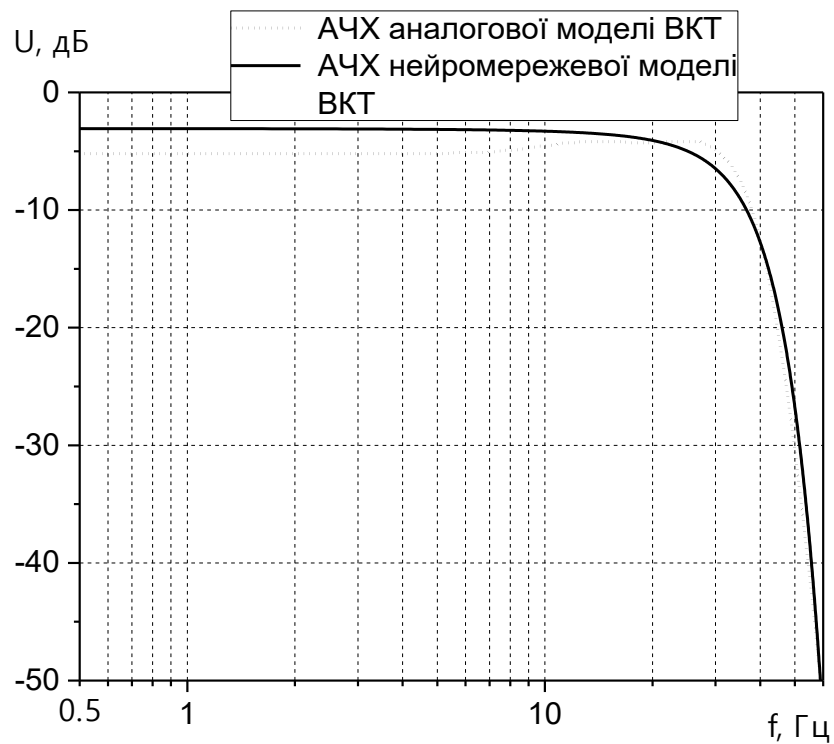


Рисунок 3.23 - Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики моделей

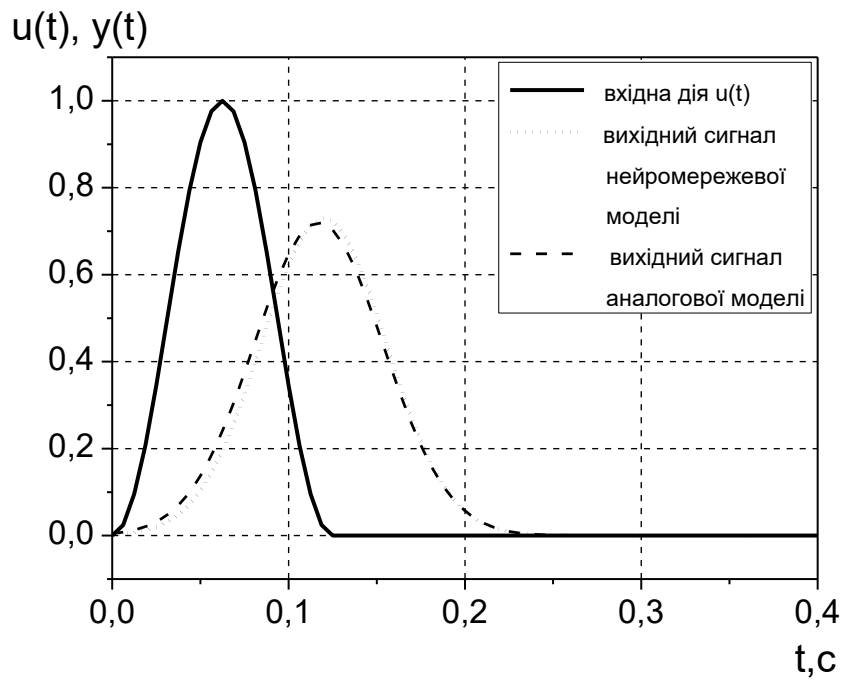


Рисунок 3.24 - Графіки вхідного і вихідного сигналів неперервної моделі ВКТ

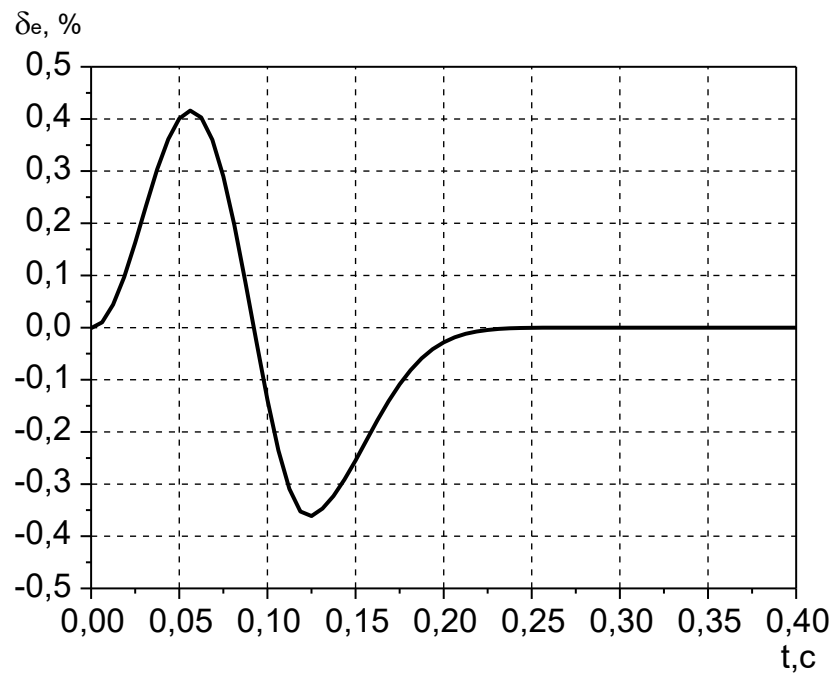


Рисунок 3.25 - Графік сигналу похибки між виходами безперервної і дискретної моделі ВКТ

впливу був використаний імпульсний сигнал у вигляді періоду квадрата синусоїди  $u(t) = \sin^2(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$  із частотою  $f = 4 \cdot 10^{-3}$  Гц.

Графіки вхідного  $u(t)$  і вихідного  $y(t)$  сигналів неперервної моделі датчика приведено на рис. 3.24. Графік сигналу похибки між неперервною і дискретною моделями ВКТ у вигляді різниці реакцій зазначених моделей на один і той же вплив наведено на рис. 3.25. При цьому похибка не перевищує значення 0.5%, що свідчить про відповідність у термінах «вхід-вихід» неперервної та отриманої дискретної моделей ВКТ.

Протестована на контрольному сигналі типу "сходінка" нейромережева модель ВКТ досліджувалась при роботі по реальному експериментально отриманому вихідному сигналу ВКТ. На рис. 3.26 приведені вихідні сигнали ВКТ та його нейромережевої моделі. Видна близькість форми сигналів. На рис. 3.27 зображено спектр вихідного сигналу нейромережевої моделі ВКТ. Він повністю відповідає спектру вихідного сигналу реального ВКТ, що свідчить про відсутність додаткових спотворень вихідного сигналу нейромережевою моделлю каналу.

Також були проведені дослідження якості відновлення вихідного сигналу ВКТ його нейромережевою моделлю в одному і тому ж сталому режимі, але через 12 годин. На рис. 3.28 зображено флуктуації різниці  $\Delta y$  між вихідними сигналами ВКТ та його нейромережевої моделі через 12 годин, а на рис. 3.29 спектр цих флуктуацій. Встановлено, що з часом спектральний склад сигналу незначно (по спектру самого вихідного сигналу не виявляється) але змінюється, про що свідчить спектральна складова флуктуацій на частоті 10,7 Гц (рис. 3.29). Цей факт необхідно в подальшому враховувати при формуванні опорних вхідних дій ВКТ.

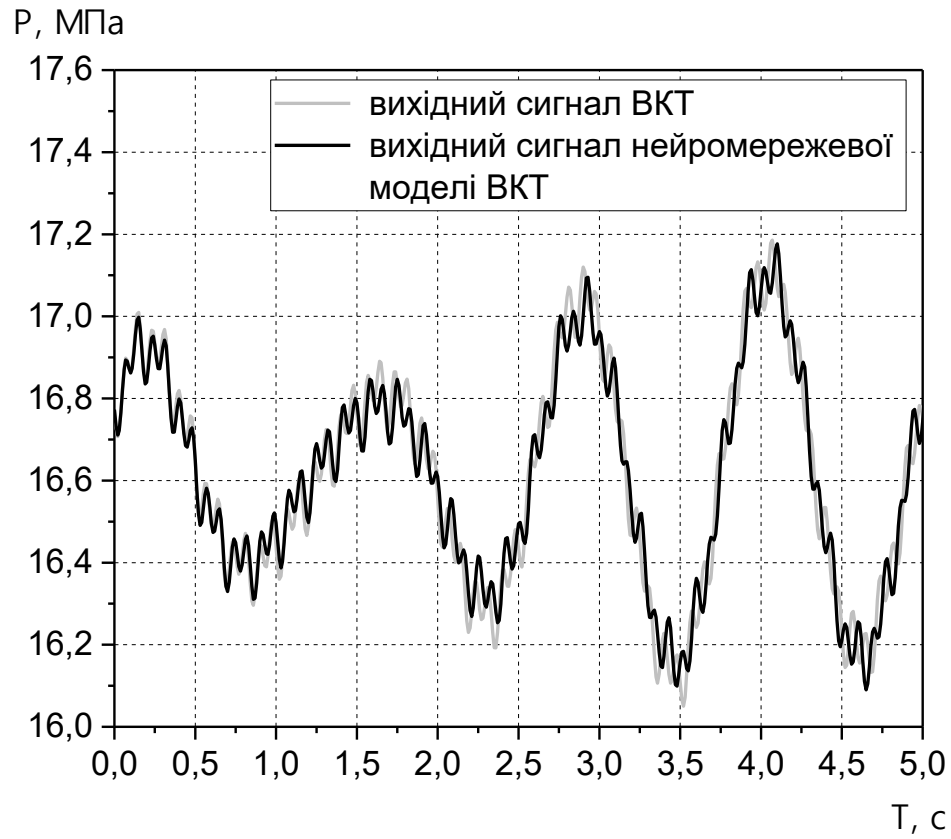


Рисунок 3.26 – Вихідні сигнали ВКТ та його нейромережевої моделі

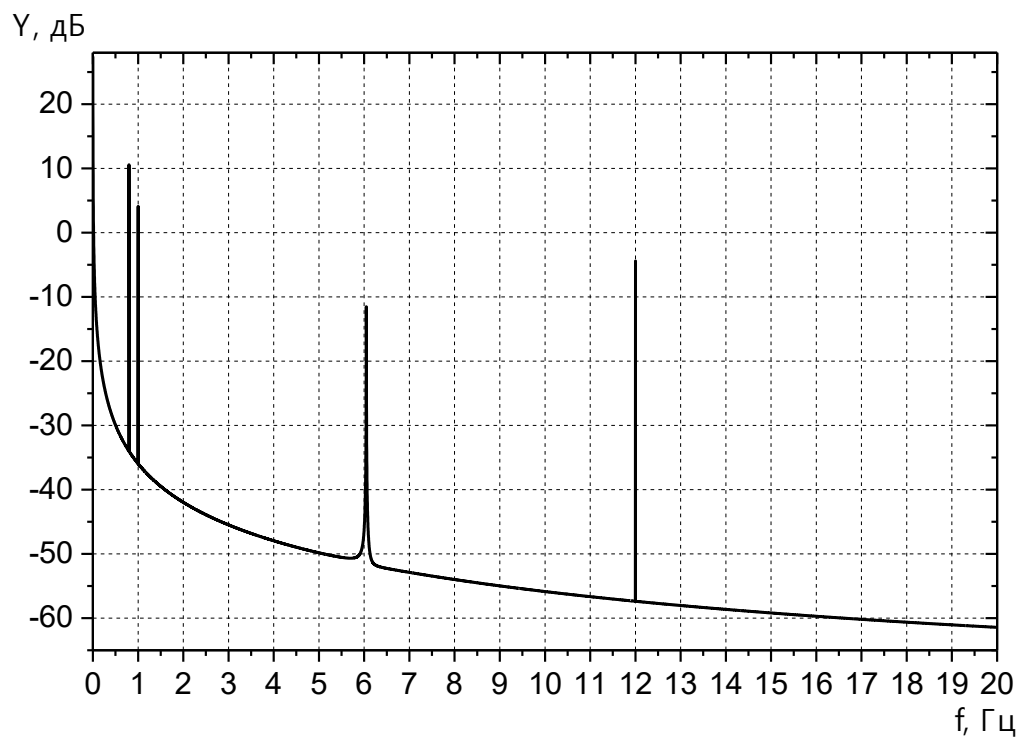


Рисунок 3. 27 – Спектр вихідного сигналу нейромережевої моделі ВКТ

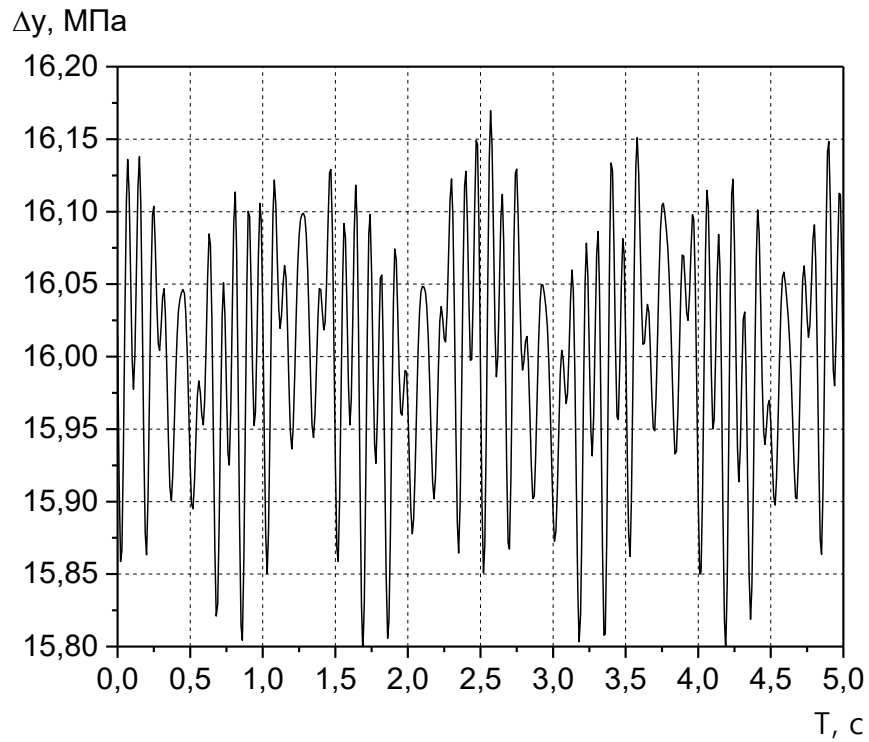


Рисунок 3.28 – Графік флуктуацій різниці  $\Delta y$  між вихідними сигналами ВКТ та його нейромережевої моделі через 12 годин.

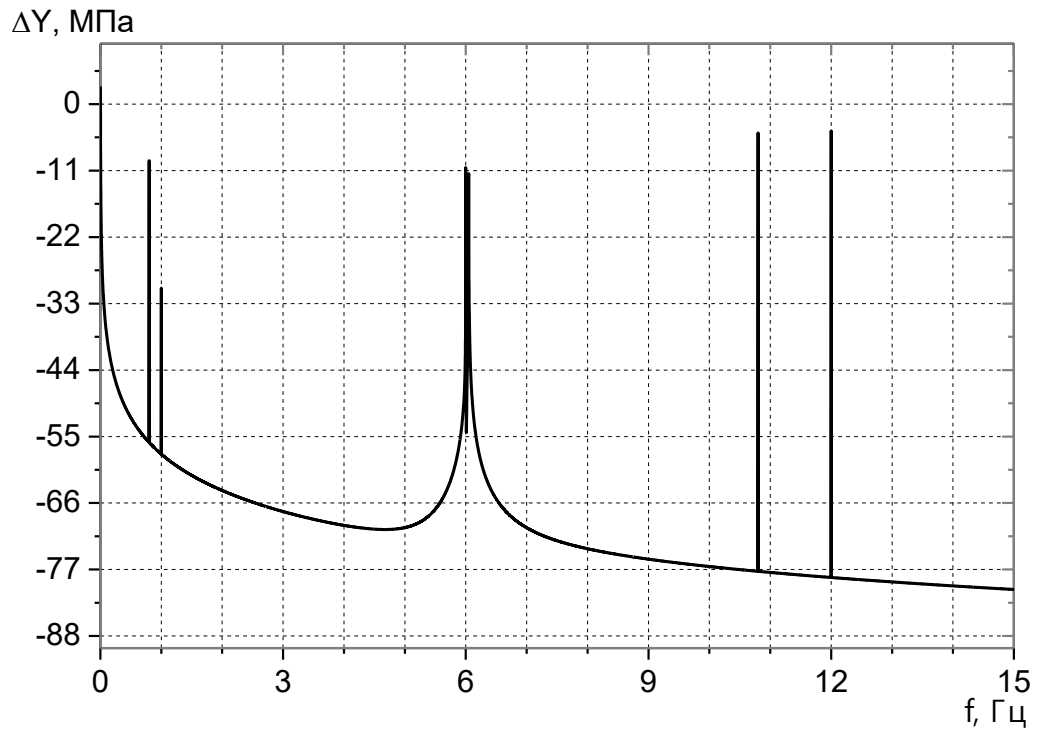


Рисунок 3.29 – Спектр флуктуацій різниці  $\Delta y$  між вихідними сигналами ВКТ та його нейромережевої моделі через 12 годин

### 3.3.5 Інверсна нейромережева модель вимірювального каналу тиску

Скористаємося розглянутим у попередньому розділі алгоритмом побудови нейромережевої динамічної моделі ВКТ і схемою її навчання для вирішення завдання корекції інерційності ВКТ з ПФ (3.14). Воно формулюється як завдання відновлення вхідної дії каналу тиску за відповідними дискретними відліками його вихідного сигналу.

З урахуванням даного формулювання необхідно на основі розглянутої прямої моделі і схеми її навчання побудувати нейромережеву інверсну динамічну модель каналу і схему настроювання її параметрів. Інверсна модель повинна забезпечувати відновлення вхідної дії ВКТ, тобто реалізовувати зворотну залежність між його входом і виходом.

Для отримання структури нейромережевої інверсної моделі ВКТ звернемося до його дискретної моделі, що описується за допомогою ПФ (3.19). Представимо дану ПФ в інверсному вигляді і проведемо перетворення:

$$\begin{aligned}
 W_s^{-1}(z) &= \frac{X(z)}{Y(z)} = \left( \frac{\beta_0 + \beta_1 \cdot z^{-1} + \beta_2 \cdot z^{-2} + \dots + \beta_{n-1} \cdot z^{-n+1} + \beta_n \cdot z^{-n}}{1 - \alpha_1 \cdot z^{-1} - \alpha_2 \cdot z^{-2} - \dots - \alpha_{n-1} \cdot z^{-n+1} - \alpha_n \cdot z^{-n}} \right)^{-1} = \\
 &= \frac{1 - \alpha_1 \cdot z^{-1} - \alpha_2 \cdot z^{-2} - \dots - \alpha_{n-1} \cdot z^{-n+1} - \alpha_n \cdot z^{-n}}{\beta_0 + \beta_1 \cdot z^{-1} + \beta_2 \cdot z^{-2} + \dots + \beta_{n-1} \cdot z^{-n+1} + \beta_n \cdot z^{-n}} = \\
 &= \frac{\frac{1}{\beta_0} - \frac{\alpha_1}{\beta_0} \cdot z^{-1} - \frac{\alpha_2}{\beta_0} \cdot z^{-2} - \dots - \frac{\alpha_{n-1}}{\beta_0} \cdot z^{-n+1} - \frac{\alpha_n}{\beta_0} \cdot z^{-n}}{1 + \frac{\beta_1}{\beta_0} \cdot z^{-1} + \frac{\beta_2}{\beta_0} \cdot z^{-2} + \dots + \frac{\beta_{n-1}}{\beta_0} \cdot z^{-n+1} + \frac{\beta_n}{\beta_0} \cdot z^{-n}} = \\
 &= \frac{\frac{1}{\beta_0} + \left( -\frac{\alpha_1}{\beta_0} \right) \cdot z^{-1} + \left( -\frac{\alpha_2}{\beta_0} \right) \cdot z^{-2} + \dots + \left( -\frac{\alpha_{n-1}}{\beta_0} \right) \cdot z^{-n+1} + \left( -\frac{\alpha_n}{\beta_0} \right) \cdot z^{-n}}{1 - \left( -\frac{\beta_1}{\beta_0} \right) \cdot z^{-1} - \left( -\frac{\beta_2}{\beta_0} \right) \cdot z^{-2} - \dots - \left( -\frac{\beta_{n-1}}{\beta_0} \right) \cdot z^{-n+1} - \left( -\frac{\beta_n}{\beta_0} \right) \cdot z^{-n}}
 \end{aligned} \quad , (3.42)$$



де  $X(z)$ ,  $Y(z)$  -  $z$ - перетворення, відповідно, вхідної дії і вихідного сигналу

ВКТ. Введемо наступні позначення:  $\mu_0 = -\frac{1}{\beta_0}$ ,  $\mu_i = -\frac{\alpha_i}{\beta_0}$ ,  $\lambda_i = -\frac{\beta_i}{\beta_0}$  для  $i = \overline{(1, n)}$ ,

тоді вираз (3.42) набуває вигляду:

$$W_s^{-1}(z) = \frac{X(z)}{Y(z)} = \frac{\mu_0 + \mu_1 \cdot z^{-1} + \mu_2 \cdot z^{-2} + \dots + \mu_{n-1} \cdot z^{-n+1} + \mu_n \cdot z^{-n}}{1 - \lambda_1 \cdot z^{-1} - \lambda_2 \cdot z^{-2} - \dots - \lambda_{n-1} \cdot z^{-n+1} - \lambda_n \cdot z^{-n}}. \quad (3.43)$$

Різницеве рівняння, що відповідає дискретній інверсній ПФ (3.43) каналу тиску, запишеться наступним чином:

$$x(k) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot x(k-i) = \sum_{j=0}^n \mu_j \cdot y(k-j), \quad (3.44)$$

де  $x(k)$ ,  $y(k)$  - відліки, відповідно, вхідної дії і вихідного сигналу ВКТ з ПФ (3.19) в дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$

Зв'язок між виходом і входом дискретної інверсної моделі ВКТ подана в вигляді рекурентного рівняння, яке отримане з виразу (3.44):

$$x(k) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot x(k-i) + \sum_{j=0}^n \mu_j \cdot y(k-j). \quad (3.45)$$

Структура виразу (3.45) аналогічна структурі виразу (3.25) для прямої дискретної моделі ВКТ, тому і структура нейромережевої інверсної моделі також буде аналогічна структурі нейромережевої прямої моделі ВКТ. Структурна схема нейромережевої інверсної моделі ВКТ на рис. 3.30. Дана модель являє собою рекурентний нейрон з лінійною функцією активації  $f_a(net)$  і нульовим зсувом  $b_0$ .

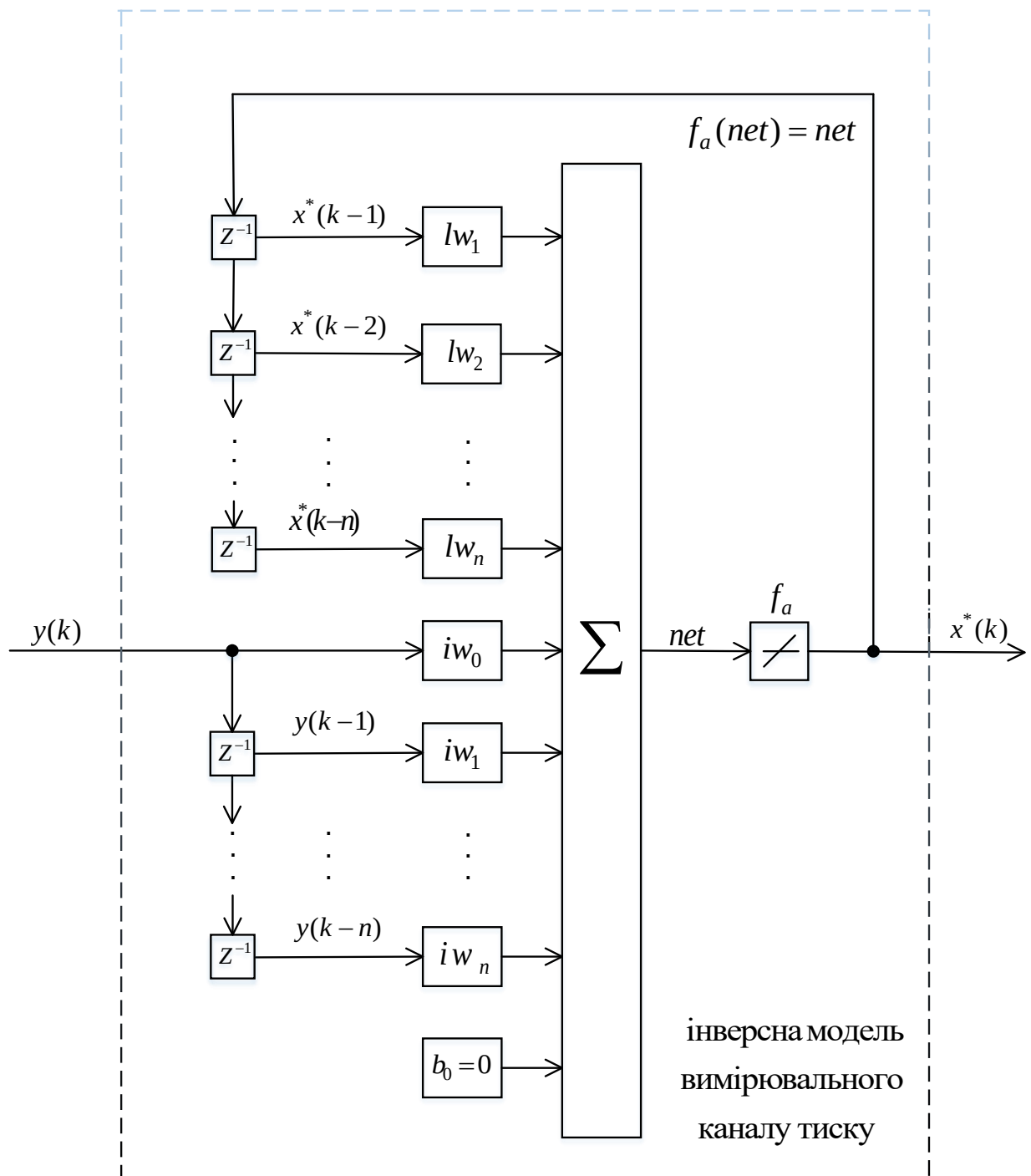


Рисунок 3.30- Структурна схема нейромережевої інверсної моделі вимірювального каналу тиску

При цьому структура даної моделі повністю відповідає виразу (3.45).

Рекурентне рівняння, що визначає зв'язок між входом і виходом нейромережевої інверсної моделі, запишеться у вигляді:

$$x^*(k) = f_a(net) = net = \sum_{i=1}^n lw_i \cdot x^*(k-i) + \sum_{j=0}^n iw_j \cdot y(k-j), \quad (3.46)$$

де  $y(k)$ ,  $x^*(k)$  - відліки вихідних сигналів ВКТ з ПФ (3.14) і нейромережевої інверсної моделі в дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot T$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ;

$lw_i$ ,  $iw_j$  - ваги нейромережевої інверсної моделі ВКТ,  $i = \overline{(0, n)}$ ,  $j = \overline{(1, n)}$ , які підстроюються в процесі навчання.

У якості критерію навчання інверсної моделі ВКТ (Додаток Г) вибрана функція похибки між цільовим і реальним виходом нейромережевої моделі ВКТ:

$$E = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_0(k-q) - \sum_{i=0}^n lw_i \cdot h_0(k-q-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_1(k-j) \right)^2. \quad (3.47)$$

При цьому в схемі навчання нейромережевої інверсної моделі каналу необхідно по відношенню до схеми навчання прямої моделі поміняти місцями вхідну і цільову навчальні послідовності.

### 3.3.6 Критерій зупинки навчання нейронної мережі

В процесі визначення ДХ ВКТ з використанням нейронної мережі виникає задача автоматичного визначення ступеню подібності вимірних сигналів, тобто визначення метрики (відстані між сигналами) [115].

Найбільш простий клас метрик порівняння сигналів на виході ВКТ - це порівняння вимірних сигналів за їх формою для кожного моменту часу.

Наприклад, можна порівнювати максимальне відхилення амплітуд сигналів, але така метрика чутлива до одиничних відмінностей в амплітудах сигналів:

$$U = \max_i |a_i - b_i|, \quad (3.48)$$

де вектори  $a_i$  і  $b_i$  - значення амплітуд порівнюваних вхідних дій (сигналів) ВКТ.

Іншим критерієм оцінки може служити середньоквадратичне відхилення амплітуд сигналів:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}}, \quad (3.49)$$

де  $n$  - кількість вимірів в часовій вибірці вхідного сигналу. Даному методу властиві недоліки:

— висока чутливість до середньої відмінності сигналів по амплітуді, що може привести до помилкового результату, у випадку, коли сигнали незначно відрізняються в середньому по амплітуді;

— вимірювальний канал має різну чутливість до спотворень вхідного сигналу у різних частинах частотного діапазону, що пов'язано з амплітудно-частотною характеристикою вимірювального каналу тиску. З цього випливає, що спотворення порівнюваних сигналів на низьких (0.001-5 Гц) і середніх частотах (5-20 Гц) будуть більшими, ніж на високих (20-50 Гц).

Таким чином, дана метрика не може враховувати різну чутливість ВКТ в різних частотних смугах, а при порівнянні двох різних сигналів з білим шумом швидше за все дасть висновок про те, що вони зовсім різні.

Іншим підходом є частотно-часова метрика вхідних сигналів ВКТ. Для одержання даної метрики вхідні сигнали спочатку послідовно покриваються

невеликими інтервалами з деяким кроком  $dt$  в часі. У кожному із цих інтервалів сигнал розкладається в ряд Фур'є, після чого будується спектр (без врахування фаз частотних складових). Отримані спектри записуються у двовимірний масив (час, частота) - спектрограму.

Перевагою даної метрики над описаною вище є те, що можна порівнювати значення амплітуд сигналів згідно з даними про сприйняття ВКТ тієї або іншої частотної складової, тобто робити порівняння за формулою:

$$\sigma_u = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_F} \frac{1}{\alpha_j} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} (Sa_{ji} - Sb_{ji})^2}}{N_F \cdot N_T} \quad (3.50)$$

де  $Sa_{ji}$ ,  $Sb_{ji}$  - двовимірні масиви амплітуд спектрограм двох вхідних сигналів  $a$  і  $b$ .

Коефіцієнт  $\alpha_j$  залежить від чутливості ВКТ в даній  $j$ -тій частотній ділянці амплітудно-частотної характеристики каналу тиску, значення для якої отримуються експериментально.

Для даного методу, як і для амплітудно-часової метрики, так само необхідно, щоб сигнали містили однакову енергію, тобто середньоквадратичне відхилення в спектрах для всього сигналу повинне бути мінімальним. У порівнянні зі звичайною метрикою в даній мірі практично вирішується проблема порівняння сигналів з різними амплітудами й ураховується нерівномірна чутливість ВКТ до різних частотних складових.

Для тестування цього методу визначення метрики вхідних сигналів ВКТ більш правильно застосовувати модифікацію даного методу: зі спектрограми послідовно виділяється кілька  $k$  частотних смуг і в них визначається середньоквадратичне відхилення. Частотні смуги вибираються неоднакової ширини, тому що змістовної інформації для технологічного процесу ВКТ в межах 0-5 Гц більше, чим у межах 20-40 Гц, отже й смуги в низькочастотній

області вибираються вузкими, ніж у високочастотній.

$$\sigma_k = \frac{\sqrt{\sum_{j=N_{F \min}}^{N_{F \max}} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} (Sa_{ji} - Sb_{ji})^2}}{(N_{F \max} - N_{F \min}) \cdot N_T}. \quad (3.51)$$

Перевагою даного методу є те, що стає можливим порівняння вхідних сигналів ВКТ, оброблених фільтром низьких частот для зменшення кількості вимірювальної інформації. Такі сигнали можна порівнювати тільки в тих частотних смугах, які характерні для даного сталого режиму роботи ТСО. Також у цьому випадку не обов'язково зберігати енергію сигналів у всьому частотному діапазоні при переході від одного сталого режиму ТСО до другого. При коректному збереженні енергії сигналу в частотній смузі можна досить точно визначити середню відмінність сигналів в цій смузі. Одним з недоліків методу є мала розрізнявальна здатність як по частоті, так і за часом.

Для зменшення впливу цього недоліку на якість роботи нейронної мережі весь частотний діапазон вхідного сигналу ВКТ розбивається на декілька  $n$  смуг. В залежності від їх значимості для характеристики технологічного процесу та точності вимірювання тиску в каналі ТСО ширина кожної смуги  $dF_n$  різна. Аналогічним чином весь часовий інтервал аналізу подібності вхідних сигналів розбивається на  $m$  підінтервалів часу з різною шириною  $dT_m$ , в межах яких буде проводитись порівняння сигналів. Таким чином, можна отримати середнє відхилення між вхідними сигналами ВКТ в області розміром  $n \times m$  :

$$\sigma_{nm} = \frac{\sum_{j=1}^n \cdot \sum_{i=1}^m |Sa_{ji} - Sb_{ji}|}{dF_n \cdot dT_m}. \quad (3.52)$$

З точки зору реалізації пошуку екстремуму зручніше оцінювати не мінімуми  $\sigma_{nm}$ , а максимуми  $1/\sigma_{nm}$ . Аналіз метрики відновленого сигналу нейромережевим алгоритмом та опорного вхідного сигналу за критерієм максимуму  $1/\sigma_{nm}$  дає можливість визначити ДХ ВКТ у полі аналізу. На рис. 3.32 приведена одна із реалізацій поля аналізу метрик відновленої нейромережевим алгоритмом та опорної вхідної дії сигналу ВКТ. Вихідний сигнал ВКТ характеризується декількома частотними складовими. Для кожного сталого режиму роботи ТСО кількість цих складових різна. Характерним є наявність як амплітудних, так і частотних флуктуацій як в межах одного, так і при переході до іншого сталого режиму ТСО. Хоча ці флуктуації, на перший погляд, і не значні, але це приводить до того що метрика  $\sigma_{nm}$  порівнюваних вхідних дій (фактично їх енергія) буде розподілена в декількох елементах аналізу, що значно ускладнює пошук екстремуму  $1/\sigma_{nm}$ . Як наслідок, зростає час та похибка навчання нейронної мережі, в окремих випадках нейронна мережа взагалі не може навчитися. На рис. 3.31 зображено ізолінії відображення одної з реалізацій відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при навчанні нейронної мережі. Такий вид метрики аналізованих вхідних дій є характерним при малому відношенню сигнал/шум ( $q < 7$  дБ) або при тривалості квазістаціонарної часової вибірки менше 1 хвилини.

Для усунення цього недоліку запропоновано визначення метрики аналізованих вхідних дій проводити в два етапи (рис. 3.32). На першому етапі двовірним ковзаючим вікном в площині "час-частота" проводиться грубий пошук екстремуму. При його знаходженні проводиться точне визначення елементів аналізу шляхом одночасного часово-частотного аналізу в часовому та частотному стробах. Спочатку одночасно оцінюються всі максимуми, які попали в строб часу, і якщо знайдений за результатами грубої оцінки є дійсно найбільшим максимумом, то далі проводиться його уточнення частотним стробом. Таким чином усувається неоднозначність оцінки критерію зупинки

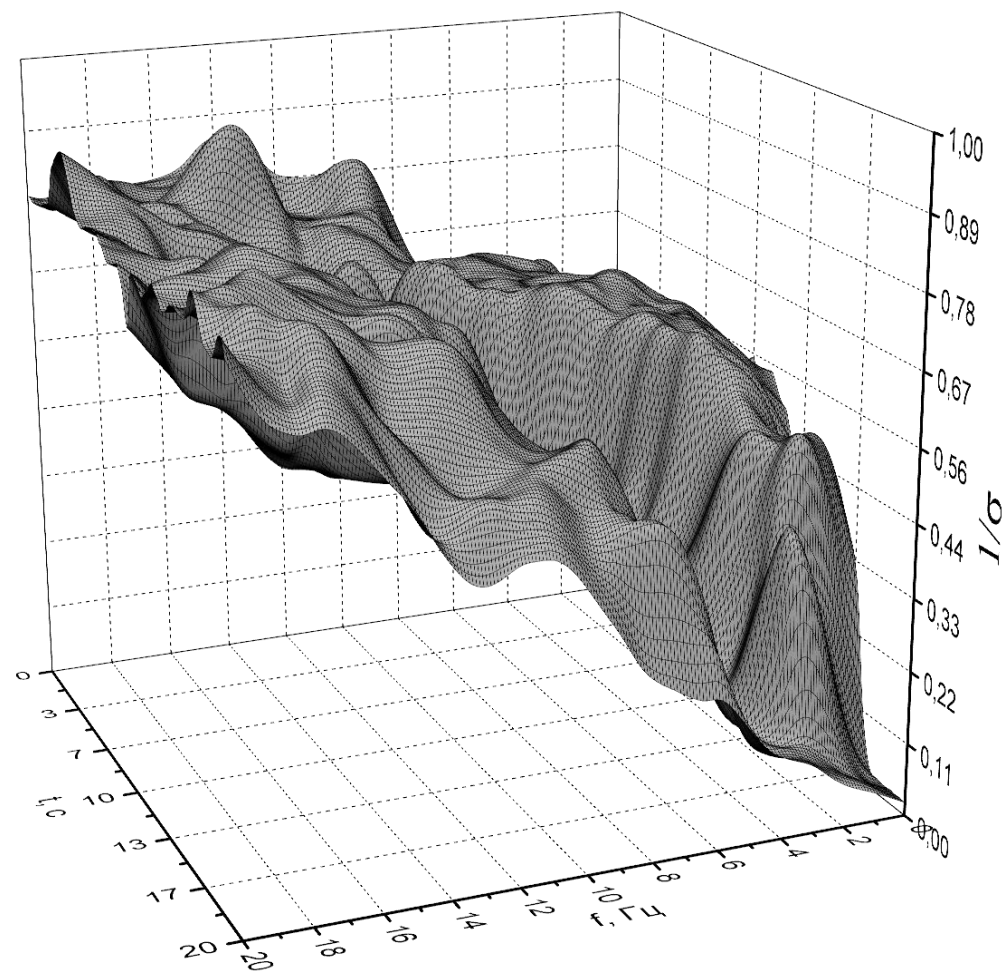


Рисунок 3.31 – Відображення реалізації відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при навчанні нейронної мережі



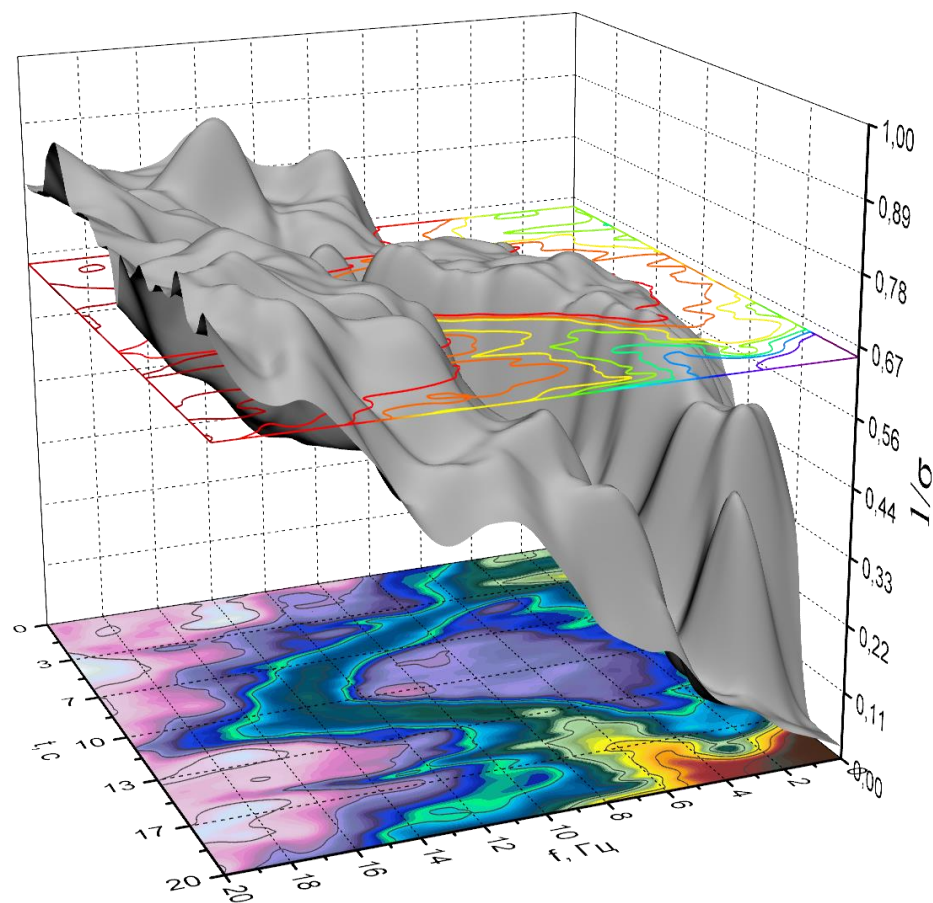


Рисунок 3.32 – Формування відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при навчанні нейронної мережі

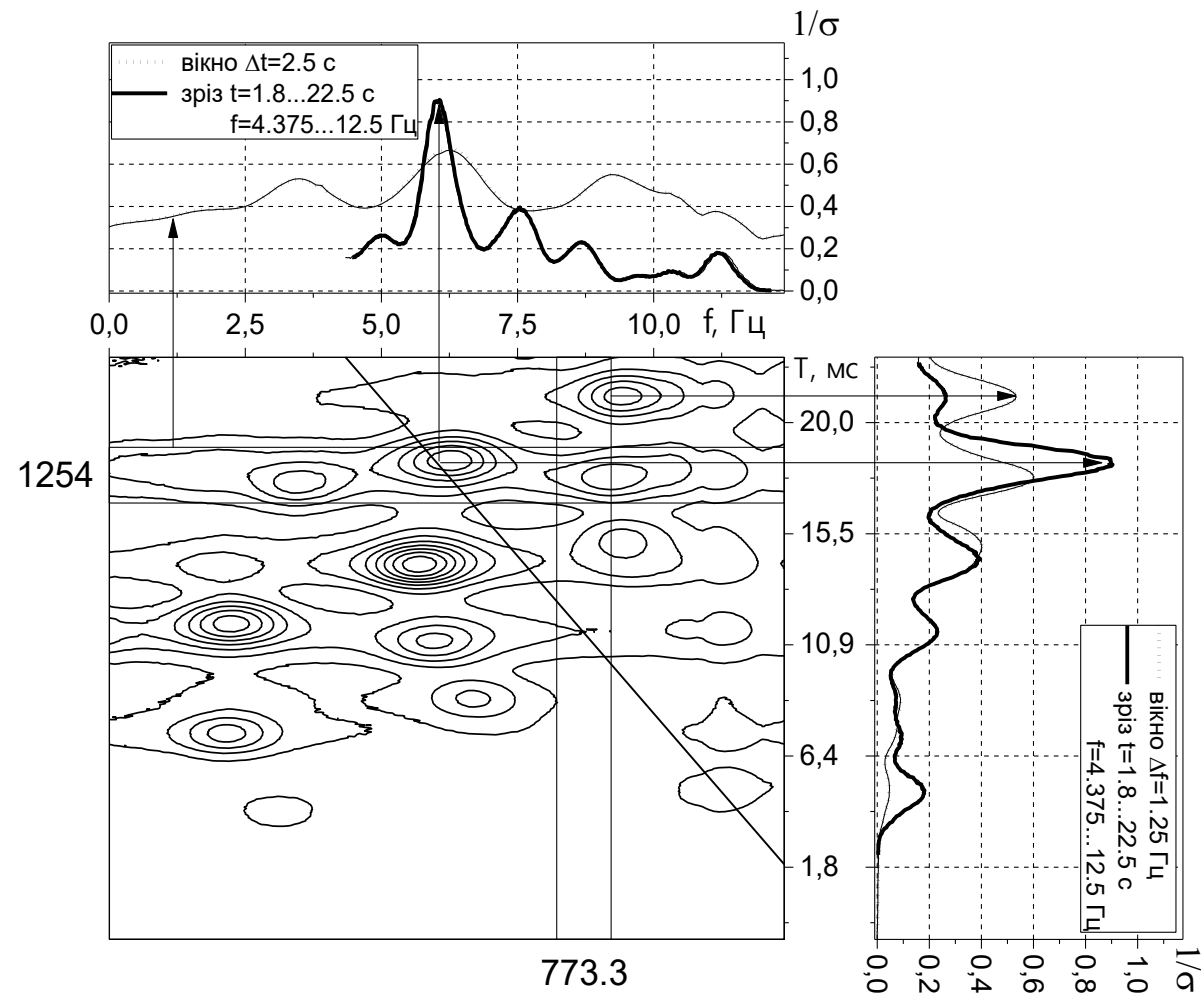


Рисунок 3.33 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

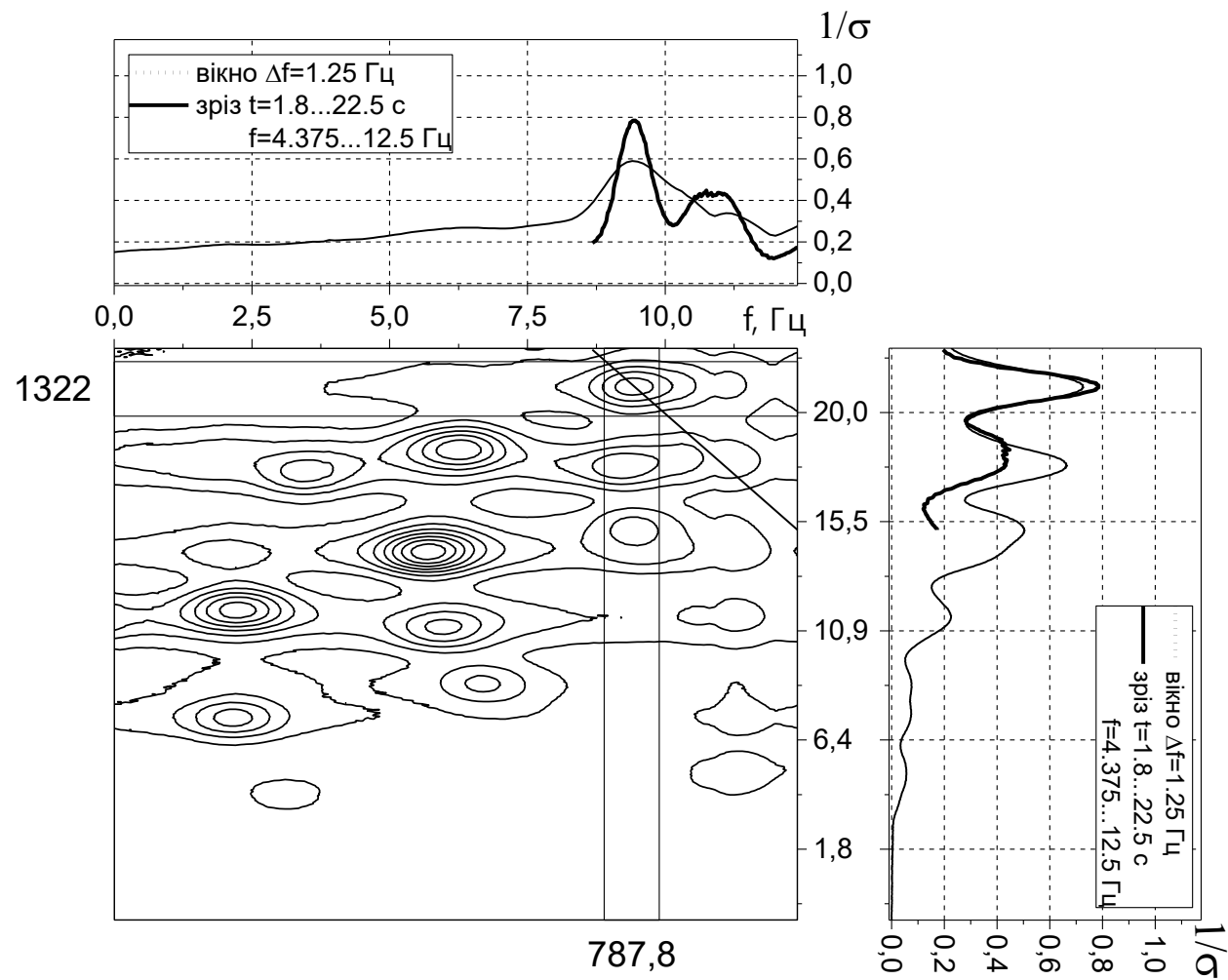


Рисунок 3.34 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

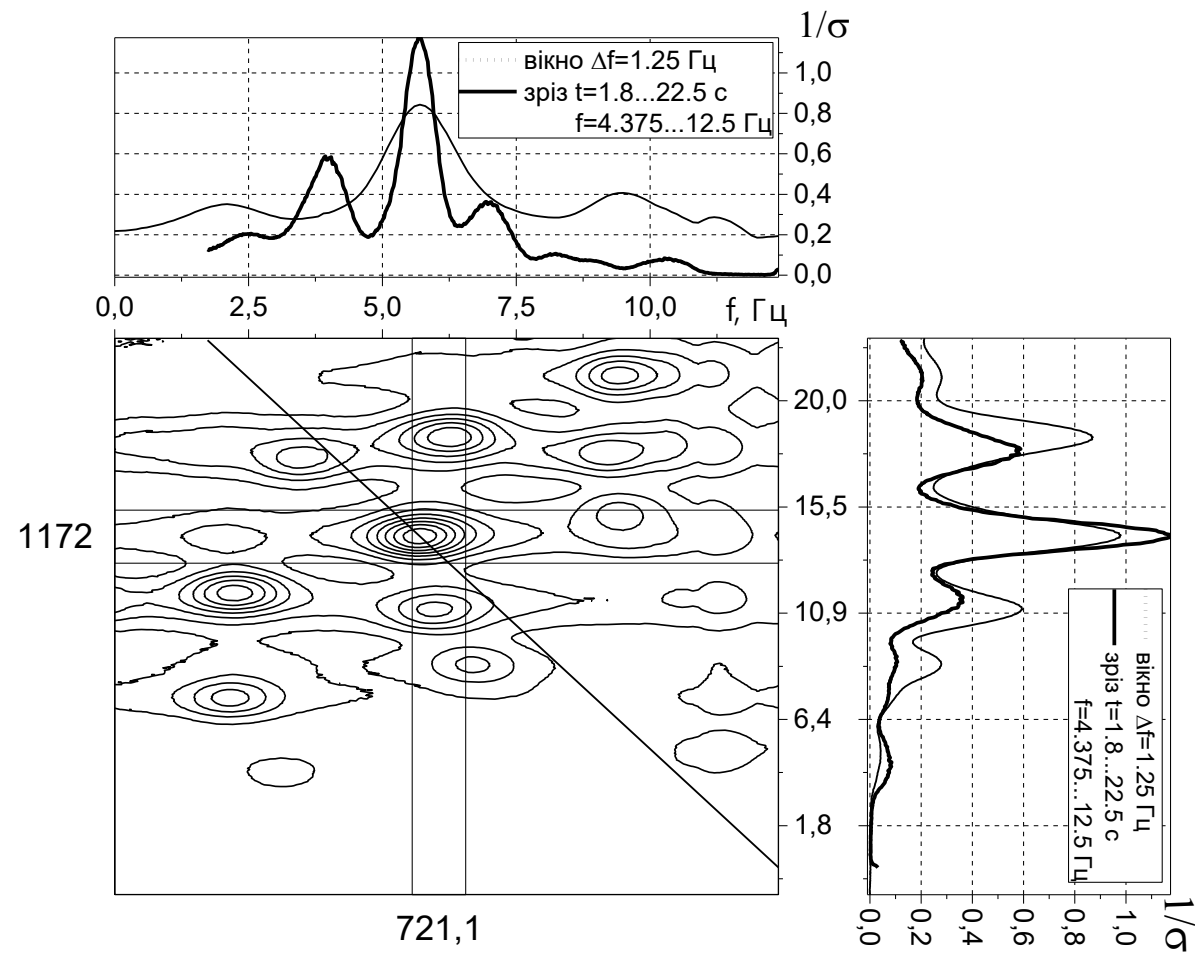


Рисунок 3.35 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

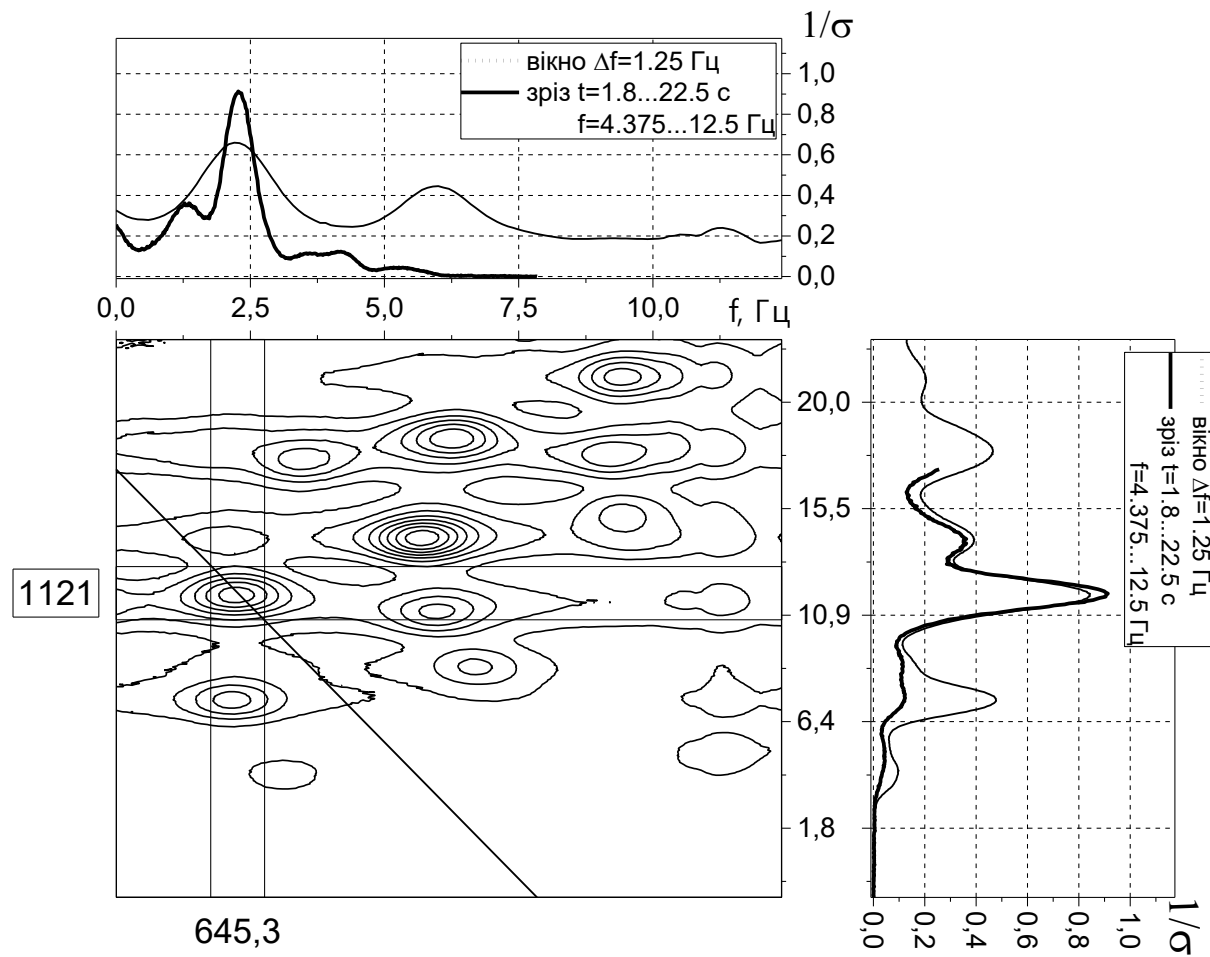


Рисунок 3.36 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

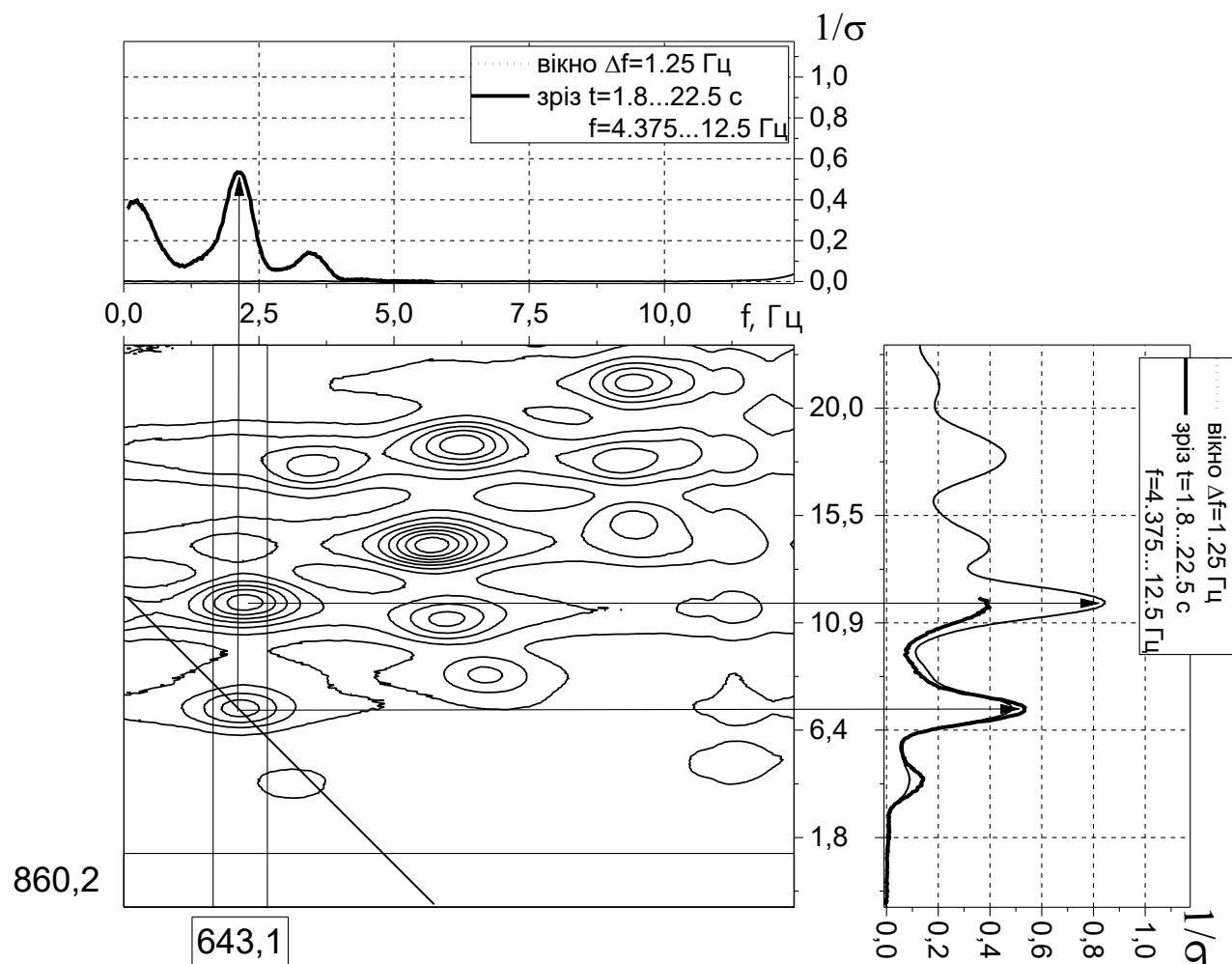
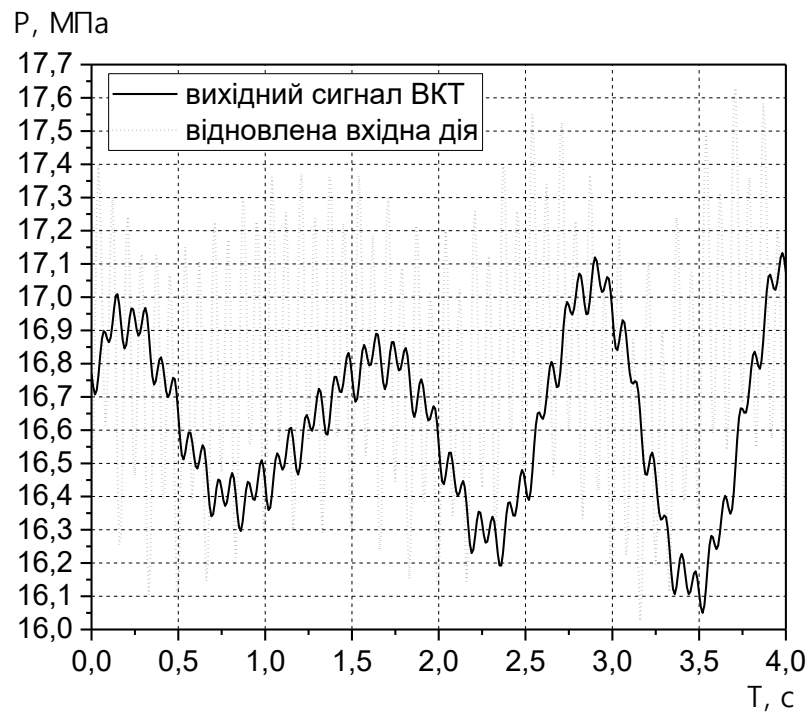


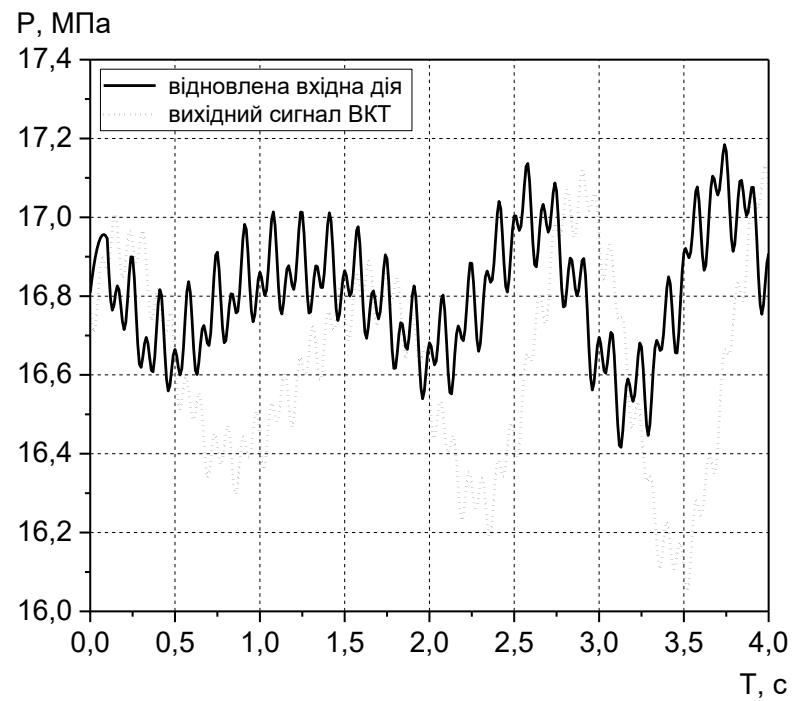
Рисунок 3.37 – Відображення відносної метрики сигналів в часово-частотному полі аналізу при співпаданні сигналів

навчання нейронної мережі. Нейронна мережа функціонує як обернений оператор, коли по вихідному сигналу ВКТ отримується вхідна дія та ДХ каналу тиску (рис. 3.38). Таким чином, після перестроювання визначається ДХ зразкового ВКТ або його моделі. Порівняння цієї характеристики з наперед відомою характеристикою зразкового ВКТ дозволяє оцінити точність визначення ДХ і якість роботи нейронної мережі. Після навчання на нейронну мережу подається вихідний сигнал реального ВКТ з невідомими ДХ. Цей сигнал при навчанні не подавався, але, оскільки нейронна мережа отримала функцію узагальнення при навчанні, то вона в автоматичному режимі майже в реальному часі дозволяє визначити постійну часу та динамічні характеристики реального каналу. Результати роботи інверсної моделі ВКТ приведені на рис. 3.31...3.37. Оцінка якості відновлення вхідної дії ВКТ його нейромережевою моделлю оцінювалась методом порівняння отриманих результатів методом розв'язання оберненої задачі вимірювань за одним і тим же вихідним сигналом ВКТ. На рис. 3.38а зображено відновлену вхідну дію каналу тиску, що отримана методом розв'язання оберненої задачі вимірювань, а на рис.3.38б - нейромережевим алгоритмом. На рис. 3.39 приведені відповідні спектри відновлених вхідних дій. Видно, що нейромережева модель ВКТ відновлює вхідну дію з меншим рівнем високочастотних складових, що є результатом низькочастотної фільтрації моделюючого нейромережевого алгоритму.

Час навчання визначається заданим рівнем точності та фактичним терміном експлуатації ВКТ (рівнем впливу "старіння" на ПФ каналу). Функція похибки навчання щодо своїх аргументів – вагових коефіцієнтів нейромережевої моделі ВКТ – є багатомірним параболоїдом, тому вона має єдиний мінімум, що близький до нуля. З метою оцінки ефективності використання нейромережевого методу визначення ДХ було досліджено ВКТ з річним терміном експлуатації. Постійна часу ВКТ, що визначена нейромережевим методом, склала 105 мс, а за результатами натурного експерименту – 94.5 мс.



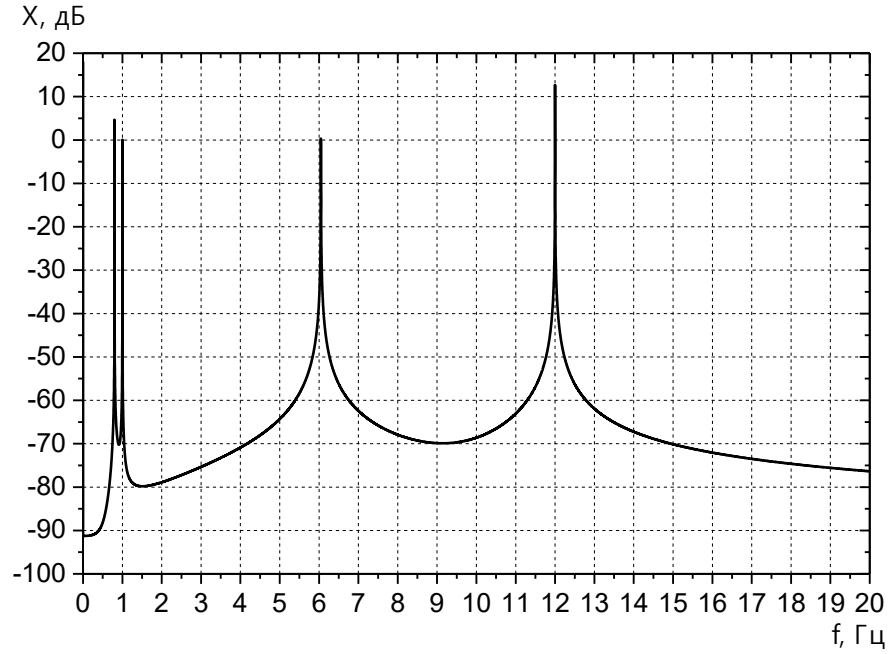
а)



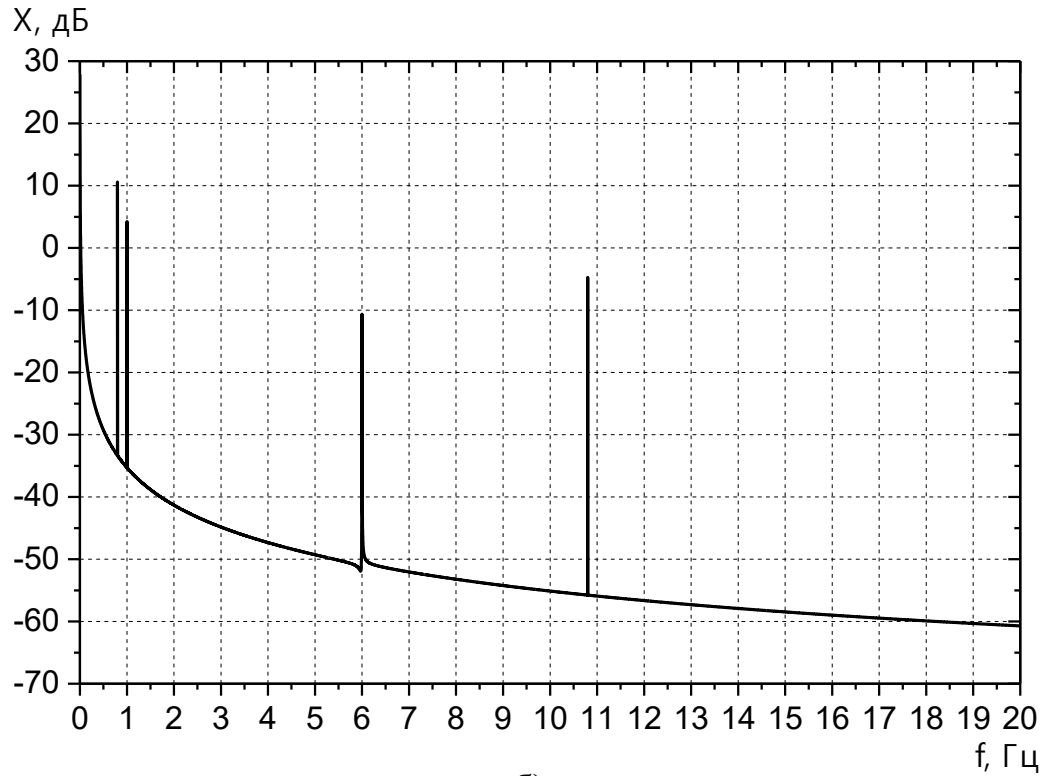
б)

Рисунок 3.38 – Відновлена вхідна дія ВКТ методом розв'язання оберненої задачі вимірювань а) та нейромережним алгоритмом б)





а)



б)

Рисунок 3.39 – Спектр вхідної дії ВКТ отриманий методом розв'язання оберненої задачі а) та нейромережевим методом б)

Таким чином, відносна похибка визначення постійної часу дорівнює 12%. Алгоритм був досліджений при різних вхідних даних та відношеннях сигнал/шум і показав високу стійкість. В роботі проведено порівняльний аналіз похибок вимірювань постійної часу ВКТ методом внутрішнього контролю та з використанням нейромережевої моделі каналу. Порівняння проводились для величини відношення сигнал/шум на виході ВКТ 10 дБ. Встановлено, що величина похибки залежить від часу роботи відповідного алгоритму та відношення сигнал/шум. Так, при відношенні сигнал/шум 10 дБ відносна похибка визначення постійної часу ВКТ лежить в межах: для методу внутрішнього контролю – 13%; для методу з використанням нейромережевих технологій – 11%. Час встановлення стабільної похибки визначення постійної часу ВКТ тиску склав: для методу внутрішнього контролю – 30 хвилин (1800 с), а для методу з використанням нейромережевих технологій – 8 хвилин (500 с) без попереднього навчання і 18 с з попереднім навчанням.

Отже, найбільш швидкодіючим методом визначення постійної часу ВКТ є метод з використанням нейромережевих технологій, який забезпечує визначення постійної часу каналу з відносною похибкою не більше 11% в майже реальному масштабі часу. В роботі також оцінена ефективність використання нейромережевого методу визначення постійної часу вимірювального каналу (рис. 3.41а).

Критерієм ефективності була відносна похибка визначення постійної часу вимірювального каналу (рис. 3.41б). В якості опорної постійної часу прийнята постійна часу ВКТ, що отримана експериментально. Встановлено, що на протязі 10 років експлуатації відносна похибка визначення постійної часу вимірювального каналу тиску  $\delta\tau_{вк}$  змінюється: для методу шумів на 13% (з 27% до 40%, дисперсія похибки також змінюється з 5 до 12); для методу з використанням нейронної мережі –  $\delta\tau_{вк}$  практично постійна і становить 11%

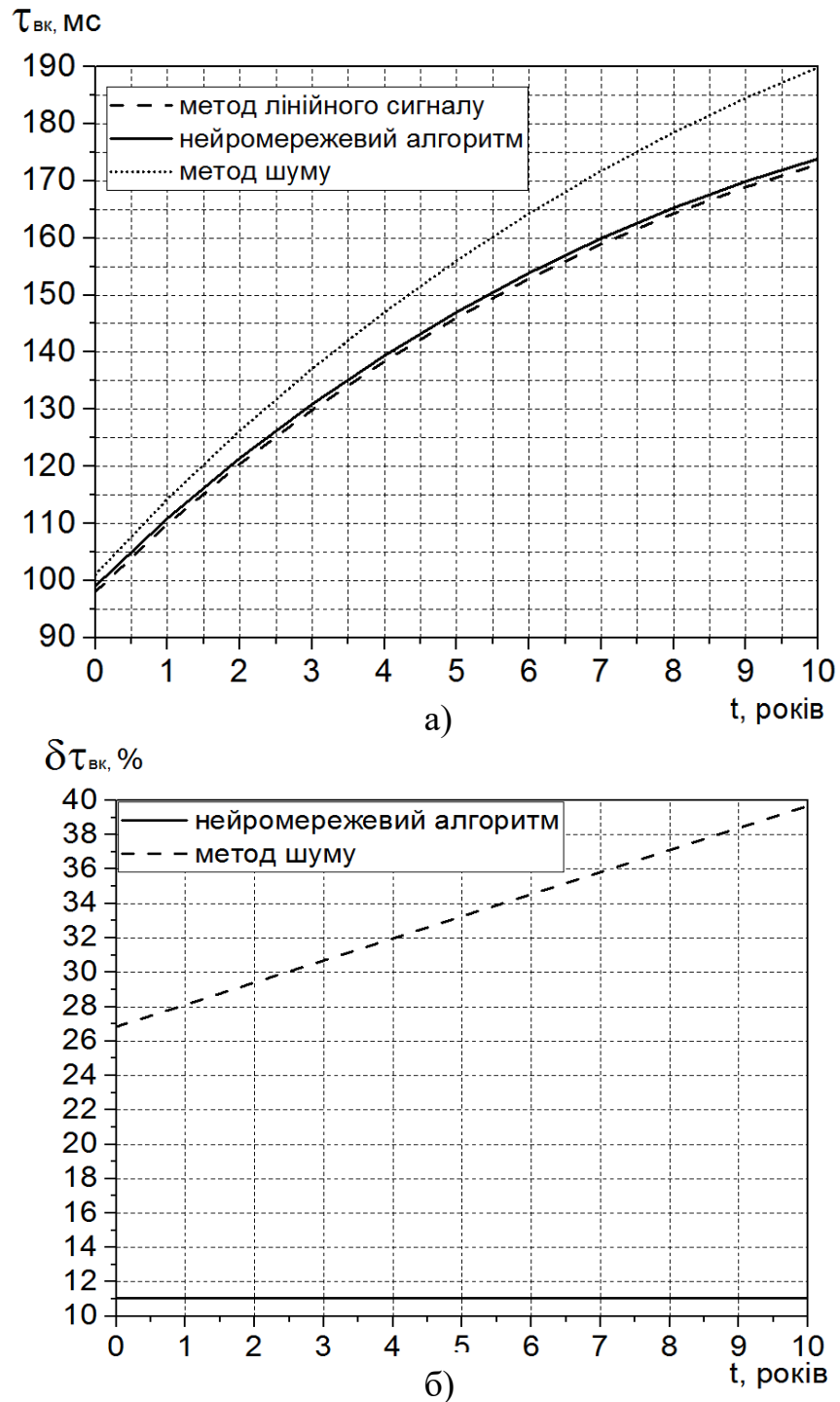


Рисунок 3.41 – Залежність постійної часу вимірювального каналу тиску  $\tau_{вк}$  від терміну його експлуатації, що визначена методом лінійного сигналу, методом шуму та нейромережевим методом (а) і залежність відносної похибки визначення постійної часу вимірювального каналу тиску  $\delta\tau_{вк}$  від терміну його експлуатації для методу аналізу шумів та нейромережевого методу (б).

### 3.4 Висновки до розділу

1. Запропоновано удосконалений метод визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску на основі розв'язання оберненої задачі вимірювань, який не потребує еталонних дій і дозволяє визначити постійну часу каналу за реалізаціями випадкового сигналу тиску. При наявності апіорної інформації про постійну часу каналу та вихідну дію може досягатись похибка визначення постійної часу каналу близько 10% при відношенні сигнал/шум не менше 10 дБ.

2. Для створення бази даних опорних моделей вимірювального каналу тиску запропоновано удосконалений метод визначення динамічних характеристик з використанням внутрішнього контролю, який на відміну відомих дозволяє модифікувати теоретичні моделі каналу тиску за даними експериментальних досліджень і тим самим врахувати його «старіння».

3. Запропоновано метод визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску на основі нейромережевих моделей, який на відміну від відомих дозволяє визначити динамічні характеристики каналу тиску за результатами плинних вимірювань в масштабі часу близькому до реального. Похибка визначення постійної часу каналу цим методом становить 10...12% при перевищенні відношення сигнал/шум 10 дБ незалежно від рівня «старіння» елементів вимірювального каналу тиску.

## **РОЗДІЛ 4**

### **МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЙОГО ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Вдосконалені методи визначення ДХ ВКТ є прийнятними при умові виконання низки вимог до умов їх застосування. Такі вимоги повинні бути обгрунтованими для конкретних практичних ситуацій, що ставить нові завдання перед метрологічним забезпеченням вдосконалених методів визначення ДХ вимірювальних каналів тиску на ТСО, але воно на цей час практично відсутнє. Звідси виникає завдання розробки основних положень метрологічного забезпечення (МЗ) ВКТ при визначенні ДХ ВКТ на ТСО.

Основним завданням є досягнення єдності і точності вимірювань. Вдосконалені в дисертації методи носять загальний характер і не відносяться тільки до конкретного ТСО. Для порівняння метрологічних характеристик методів необхідно мати відповідні еталони, зокрема, еталон ВКТ. Однак, вимірювальний канал тиску на ТСО є по суті унікальним об'єктом і створити для нього еталон важко і економічно недоцільно. Існує можливість створення еталонів окремих елементів ВКТ, зокрема, датчика тиску. Якщо вимірювальна лінія повністю заповнена водою і не має ніяких неоднорідностей, які описані раніше, то можна вважати, що близьким до еталону ВКТ з точки зору ДХ є еталон датчика тиску. У цьому випадку постійна часу ВКТ визначається практично постійною часу датчика, бо в зазначеному випадку вимірювальна лінія є безінерційною. Оскільки сутність розроблених в дисертації методів є справедливою не тільки для вимірювальної лінії та датчика тиску, а і для всього вимірювального каналу, то можна сподіватись, що метрологічні характеристики ВКТ можна визначити аналогічно. З іншого боку, може виявитись, що динамічні характеристики датчика, що взятий окремо, і його ж ДХ, але у складі вимірювального каналу, не завжди співпадають. Ось чому

виникає необхідність визначення ДХ як всього ВКТ, так і його складових.

На цей час в існуючих ТСО на спеціалізованих стендах визначаються тільки статичні характеристики датчиків тиску, регулювання яких не приводить до зміни ДХ. Аналіз законодавчої бази з метрологічного забезпечення свідчить, що державні стандарти та інші документи державної системи забезпечення єдності вимірювань при визначенні ДХ ВКТ не розроблені, а нові експлуатаційні вимоги вже їх потребують. В цих умовах важливими завданнями є нормування і визначення динамічних характеристик ВКТ та оцінювання похибок визначення ДХ ВКТ. Розглянемо їх детальніше далі.

#### **4.1 Нормування і визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску**

Одним з головних завдань метрологічного забезпечення є нормування та визначення динамічних характеристик ВКТ, які можуть бути повними і частинними [9].

Для нормування повних ДХ ВКТ встановлюються вимоги до залежності цих характеристик від вхідної дії, оцінюється наявність різних неврахованих дестабілізуючих факторів, змінювання ДХ зі старінням елементів ВКТ тощо. Для нормування повної динамічної характеристики необхідний кількісний опис нормованого параметра. В дисертації обґрунтовані вимоги тільки до частинних ДХ, зокрема, до постійної часу ВКТ, хоча проводиться аналіз і повних ДХ. Моделі останніх розроблено для різних термінів експлуатації ВКТ на основі експериментів зі штучного старіння. Безумовно, будуть спостерігатись відмінності між цими моделями та реальними ДХ ВКТ. З допомогою запропонованих методів здійснюється корекція моделей для різних термінів експлуатації.

В роботі для визначення повної динамічної (імпульсної або перехідної) характеристики використовується розкладання її в ряд, як показано в формулах

(3.5), (3.6), чи представлення у вигляді формул типу (2.10...2.12). Отже, щоб знайти всю характеристику, потрібно визначити, зокрема, коефіцієнти типу  $a_i$ ,  $U_0$ ,  $\tau_{ек}$ , що входять до функціоналу (3.6). При описанні імпульсної характеристики у вигляді функції з декількома невідомими можуть бути допущені похибки визначення коефіцієнтів  $a_i$ ,  $U_0$  і постійної часу датчика  $\tau_{ек}$ . Таким чином, виникає задача нормування динамічних характеристик каналу шляхом встановлення вимог до точності визначення цих коефіцієнтів. Аналіз подібних задач показує, що похибки визначення зазначених коефіцієнтів не повинні перевищувати 10...20 %. Статистичне моделювання, яке проведене в [96], свідчить, що похибки визначення цих коефіцієнтів не перевищують декількох відсотків і тому зазначені вимоги виконуються. В цілому чисельні вимоги повинні встановлюватись окремо для кожного ВКТ і тоді навіть при погано налаштованому генетичному алгоритмі виключається знаходження "фантомного" рішення, оскільки апріорні відомості про ДХ ВКТ завжди є відомими.

Оскільки результати розв'язання оберненої задачі вимірювань використовуються для створення бази даних опорних входних дій, то до точності відновлених входних сигналів ВКТ встановлюються конкретні вимоги. Кількість членів ряду в (3.5), як показали дослідження, не повинна перевищувати 30...40, але для окремих вихідних сигналів, як показали результати моделювання, що проведені автором, їх кількість може перевищувати 50. Для умов роботи ВКТ при повільному змінюванні тиску кількість членів ряду взагалі зменшується до декількох одиниць. Збільшення числа коефіцієнтів ряду призводить до збільшення часу обчислень. Збільшення часу спостережень після досягнення певної тривалості не приводить до істотного зниження точності відновлення, але є причиною збільшення часу розрахунку. Похибку, що обумовлена настроюванням генетичного алгоритму, можна вважати методичною і вона не перевищує приблизно 5%. Якщо для

навчання нейронної мережі вважати якісним відновленням вхідної дії з похибкою меншою 10% і кореляцією більшою 0,9, то для відновлення вхідної дії необхідно, щоб відносні систематична та випадкова похибки вимірювання вихідного сигналу не повинні перевищувати приблизно 20%. Моделювання при наближеному розв'язанні оберненої задачі вимірювань свідчить про складну залежність точності відновлення вхідної дії від точності представлення імпульсної характеристики, оскільки вони зв'язані одним інтегральним рівнянням типу (3.5). При цьому важко провести узагальнення.

Для зменшення залежності параметрів імпульсної характеристики ВКТ від коефіцієнтів ряду Карунена-Лоева основною рекомендацією є використання надійної апріорної інформації про діапазон змінювання постійної часу ВКТ та діапазон вхідних дій. Все це звужує діапазон пошуку генетичного алгоритму, підвищує точність визначення ДХ ВКТ і зменшує час розрахунку.

Особливого розгляду потребує випадок, коли в стаціонарному вхідному впливі виникають швидкі змінювання параметрів і ці змінювання є інформативними. В такому випадку доцільно використовувати розглянуті автором в [111] методи виявлення і вимірювання швидких змінювань параметрів, де пропонується адаптивне управління смугою пропускання вимірювальної системи при швидкому змінюванні статистичних характеристик вхідної дії.

Оцінімо тепер похибки визначення ДХ ВКТ. Порівняння будемо здійснювати з результатами експериментів, в яких автор приймав участь. Важливо знати похибки, які дає реальний вимірювальний канал тиску.

#### **4.2 Аналіз точності блоку вимірювання параметрів вихідного сигналу вимірювального каналу тиску**

На технічно складних об'єктах вимірювальний канал тиску для забезпечення заданої метрологічної надійності має в своєму складі від 2 до 6



взаємодублюємих датчиків тиску. Вихідні сигнали від всіх датчиків поступають на технологічні комутаційні шафи, які, як правило, розташовані в пункті управління об'єктом. Зовнішній вид цих шаф приведено на рис. 4.1. На рис. 4.2а зображено вид шафи спереду, де видно вхідні роз'єми разом з індикаторами наявності сигналів. На рис. 4.2б приведено вид цієї ж технологічної шафи, але вид з боку технологічних контактних планок. Технологічні контактні планки виконані у вигляді пружних самопритискачів. Весь монтаж в шафі виконано у вигляді стантартизованих перемичок, що забезпечує з однієї сторони простоту, надійність і наглядність монтажу, а з іншої – оперативність зміни схеми з'єднань при необхідності. Отже, схема з'єднань та конструкція технологічних шаф дозволяє під'єднати вимірювальне обладнання в апаратній залі на диспетчерському пункті.

В процесі виконання досліджень автором була розроблена чотирьохканальна вимірювальна інформаційна система, яка конструктивно була виконана у виді окремого блоку вимірювання сигналів датчиків. На рис. 4.2 приведено вид цього блоку та його підключення до технологічних планок шафи. Слід відмітити, що для того, щоб уникнути шунтування вихідних сигналів датчиків вхідними колами блоку вимірювання необхідно було забезпечити при вхідних значеннях опору та ємності  $R_{ex} \geq 300 \text{ кОм}$  і  $C_{ex} \leq 40 \text{ пФ}$ . Для вимірювання кожного технологічного параметра на ТСО використовували від двох до чотирьох датчиків, які встановлюються поряд один з одним в вимірювальній рамці. Таке взаємодублювання датчиків покращує працездатність ТСО і дозволяє уникнути виникнення проблем з її експлуатацією або безпекою при виході з ладу одиночного датчика. Таке дублювання датчиків використовується в схемі вимірювальної системи ТСО для підвищення безпеки і працездатності станції. Якщо відомі ДХ одного з датчиків, то канал з таким датчиком в окремих випадках можна використовувати як опорний.

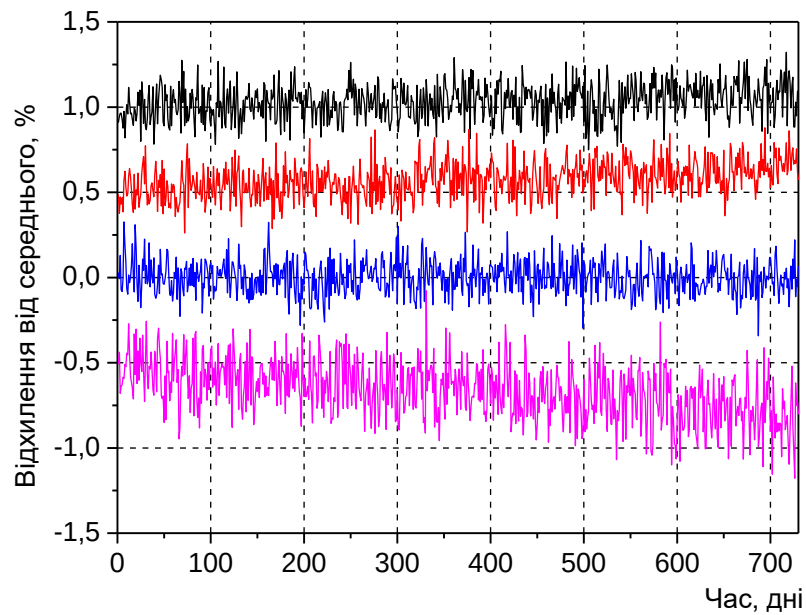


Рисунок 4.1 – Вихідні сигнали взаємодублюємих датчиків вимірювального каналу тиску

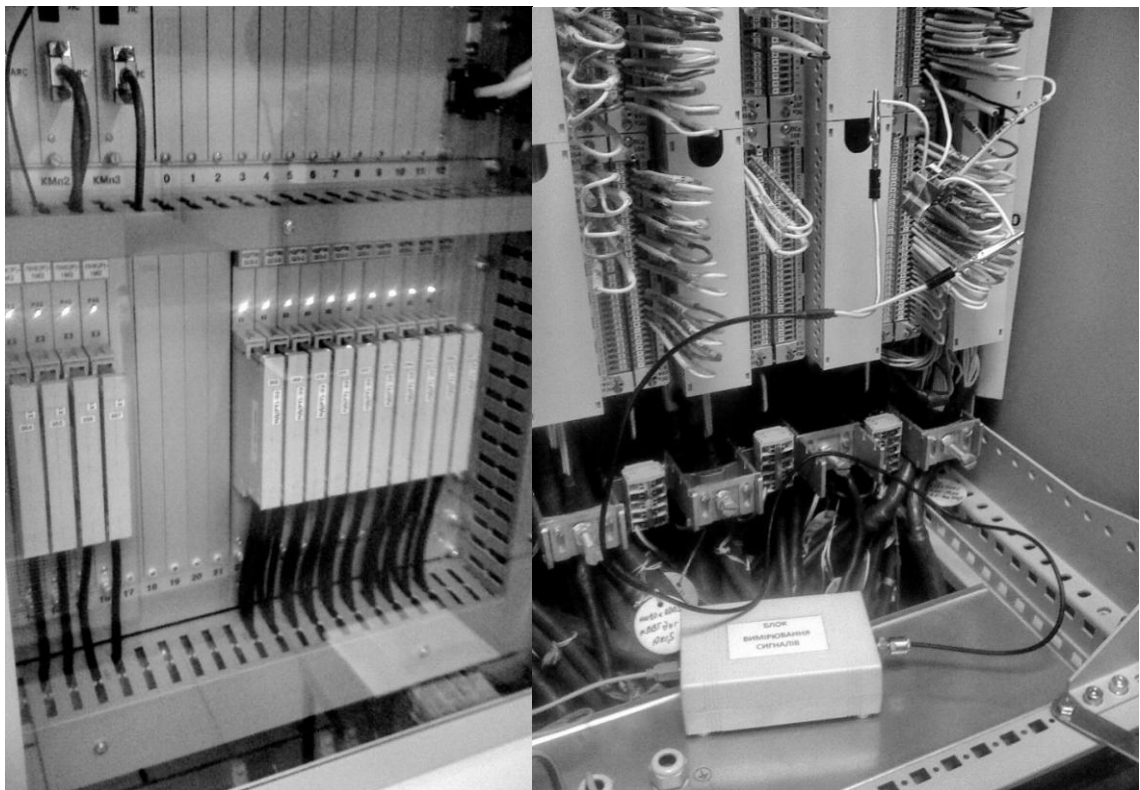


Рисунок 4.2 - Під'єднання блоку обробки вимірюваних сигналів до технологічного шкафа на ТСО

Оскільки вимірювання параметрів технологічних процесів на ТСО здійснюється цілодобово і безперервно з документуванням результатів вимірів, то це дублювання пропонується використовувати і для виконання інших завдань метрологічного забезпечення. Такими завданнями може бути набір вимірювальних сигналів для бази даних, що використовується для навчання нейронної мережі.

Проведемо метрологічний аналіз ВКТ, який використовував автор в експериментах.

При розробці вимірювальних каналів необхідно враховувати похибки всіх його складових: датчиків, перетворювачів (АЦП), пристроїв обробки і відображення інформації. Аналіз вимірювальної лінії був проведений у другому розділі.

Найбільшу похибку у вимірювальний канал вносить первинний вимірювальний перетворювач і тому основна похибка ВКТ буде визначатися, в основному, похибками датчиків.

Похибки інших складових вимірювальних каналів складають:

- похибка контролера  $\varepsilon_k = 0.3 \%$ ;
- похибка блоку шлюзу  $\varepsilon_{ш} = 0.05 \%$ ;
- похибка ПЕОМ  $\varepsilon_{пс\text{ом}} = 10^{-6} \%$ ;
- похибка давача тиску  $\varepsilon_p = 0.5 \%$ ;
- похибка блоку перетворення сигналів (БПС) для каналу тиску

$\varepsilon_{\text{БПС}} = 0.5\%$ .

Наведемо приклад розрахунку результуючої похибки системи контролю з довільним значенням довірчої ймовірності за допомогою ентропійного коефіцієнта. Перевагою такого методу розрахунку результуючих похибок вимірювальних каналів є те, що він дає уявлення про закон розподілу цих похибок і дозволяє визначити оцінку довірчої ймовірності, а відповідно і інтервал невизначеності.

Похибка датчика тиску нормована по паспорту максимальним значенням  $\gamma_p = 0.5\%$ . Для того, щоб від цього значення перейти до середньоквадратичного відхилення (СКВ), необхідно знати вид закону розподілу похибки.

Похибка датчика тиску є мультиплікативною і розподіленою за нормальним законом. При значенні ймовірності 0.98 по таблиці нормального розподілу знаходимо, що такій ймовірності відповідають границі в  $\pm 2.3\sigma$ . Звідси шукане  $\sigma_p = 0.5/2.3 = 0.218\%$ , а параметри закону розподілу  $k = 2.066$ ,  $\varepsilon = 3$ ,  $\chi = 0.577$ .

Похибка контролера зазначається в паспорті приладу і зумовлена, в основному, похибкою АЦП. Дана похибка складає  $\gamma_K = 0.3\%$ , є адитивною і розподілена по рівномірному закону розподілу. Тому  $\gamma_K = 0.3\%$  можна вважати половиною ширини цього рівномірного розподілу і визначити СКВ як  $\sigma_K = \gamma_K / \sqrt{3} = 0.3 / \sqrt{3} = 0.173\%$ . Для рівномірного розподілу  $k = 1.73$ ,  $\varepsilon = 1.8$  і  $\chi = 0.745$ .

Похибка шлюзу  $\gamma_{Ш} = 0.05\%$  є адитивною і розподілена за трикутним законом розподілу, оскільки не залежить від величини вимірюваного сигналу. Середнє квадратичне відхилення для трикутного розподілу  $\sigma = \gamma_{\max} / \sqrt{6}$ , тому  $\sigma_{Ш} = \gamma_{Ш} / \sqrt{6} = 0.05 / \sqrt{6} = 0.02\%$ . Параметри трикутного розподілу (Сімпсона):  $k = 2.02$ ,  $\varepsilon = 2.4$ ,  $\chi = 0.65$ .

Похибка ПЕОМ, як і похибка контролера ( $\gamma_{\text{ПЕОМ}}$ ), є адитивною, а закон розподілу будемо вважати рівномірним з шириною  $\pm 10^{-6} \%$ . Тоді СКВ цієї похибки  $\sigma_{\text{ПЕОМ}} = \gamma_{\text{ПЕОМ}} / \sqrt{3} = 10^{-6} / \sqrt{3} = 5.78 \times 10^{-6} \%$ . Параметри рівномірного розподілу:  $k = 1.73$ ,  $\varepsilon = 1.8$  і  $\chi = 0.745$ .

Отже, визначено всі складові похибки (адитивні і мультиплікативні), їх закони розподілу, обчислено СКВ. Визначення сумарної похибки як функції зміни значення самої вимірюваної величини проводиться шляхом розподілу всіх складових похибки (адитивних і мультиплікативних). Далі отримуємо суму

адитивних складових, яка дає значення адитивної частини результуючої похибки, а сума мультиплікативних складових – мультиплікативну складову.

Для усунення впливу деформації форми законів розподілу при сумуванні похибки всі складові, що сумуються, представляються своїми СКВ. У результаті сумування СКВ вихідних складових отримують СКВ, відповідно адитивної і мультиплікативної складових результуючої похибки.

Розрахунок результуючої похибки зводиться до обчислення похибки, яка включає в себе всі складові. Вибір методу сумування залежить від того, чи є корельованими або незалежними похибки, які ми сумуємо. Доцільно одразу виділити корельовані похибки і виконати їх алгебраїчне сумування. Для алгебраїчного сумування корельованих похибок необхідно встановити їх знак. Після врахування кореляційних зв'язків всі отримані похибки можна сумувати як незалежні.

У вимірювальному каналі тиску похибок, які б мали кореляційний зв'язок немає, тому результуючу похибку слід розраховувати як сумування під коренем квадратів всіх складових. Похибка даного каналу включає в себе чотири складові:  $\sigma_p=0.218\%$ ,  $\sigma_K=0.173\%$ ,  $\sigma_{ш}=0,02\%$ ,  $\sigma_{ПЕОМ}=5.78 \times 10^{-6} \%$ .

Отже, СКВ похибки ВКТ визначається як:

$$\sigma_p=(\sigma_p^2+\sigma_K^2)^{1/2}=(0.218^2+0.173^2)^{1/2}=0.278 \approx 0.3\%.$$

Одна з просумованих складових ( $\sigma_p$ ) похибки розподілена нормально, а всі інші ( $\sigma_K$ ) – рівномірно. Для визначення ексцеса і ентропійного коефіцієнта результуючого розподілу необхідно розрахувати вагу дисперсії рівномірної складової із суми в загальній дисперсії:

$$p=\sigma_K^2/(\sigma_p^2+\sigma_K^2)=\sigma_K^2/\sigma_p^2=0.173^2/0.3^2=0.33$$

Ексцес даного розподілу буде визначатись як:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_K p^2 + 6p(1-p) + \varepsilon_p(1-p^2) = 1.8 \cdot 0.33^2 + 6 \cdot 0.33 \cdot (1-0.33) + 3 \cdot (1-0.33^2) = 4.19,$$

а контрексцес  $\chi_p = 1/\sqrt{\varepsilon_p} = 1/(4.19)^{1/2} = 0.5$ .

Ентропійний коефіцієнт композиції нормального і рівномірного розподілу можна отримати також аналітичним способом по наближеній формулі, яка апроксимує дану криву:

$$k_\Sigma = k_H - p^{1.4(5.7-k)} [0.14 + 0.4(k_H - k)^2],$$

де  $p$  – вага складової з ентропійним коефіцієнтом  $k$ ;

$k_H$  – ентропійний коефіцієнт нормального розподілу ( $k_H = 2.066$ ).

Отже, відповідно до даної формули значення  $k_T$  складатиме:

$$k_T = 2.066 - 0.33^{1.4(5.7-1.8)} (0.14 + 0.4(2.066 - 1.8)^2) = 2.0656 \approx 2.066.$$

Значення  $k_T = 2.066$  відповідає нормальному закону розподілу, отже результатом сумування нормального і рівномірного розподілу в нашому випадку буде значення похибки, що розподілене за нормальним законом.

Проте слід зауважити, що внаслідок неточності оцінки СКВ, яке ми використовуємо –  $\sigma_\Sigma$  або ентропійного коефіцієнта  $k_\Sigma$  і оцінка  $P_d$  довірчої ймовірності буде також мати відповідний інтервал невизначеності. Тому отримане значення  $P_d$  необхідно закругляти і виражати не більше ніж двома знаками. Таким чином,  $P_d = 0.899 + 0.1818/4.19 = 0.95$ , тобто  $\gamma_T = 0.62\%$  відповідає  $\gamma_{0.95}$ .

Підхід до здійснення метрологічного аналізу з використанням ентропійного коефіцієнта дає можливість:

- не встановлювати довільним рішенням значення ймовірності;
- приймати інтервал величини довіри, а також визначити точність

вимірювання за концепцією невизначеності вимірювань, оскільки ентропійний коефіцієнт використовується при розрахунках стандартної невизначеності кожної складової сумарної невизначеності, яка розраховується за типом В (коли відсутні результати багаторазових спостережень, що дають можливість визначити вплив даної складової).

Отримані похибки вимірювання експериментальною установкою є значно меншими, ніж ті, що забезпечують самі методи. Проведемо оцінювання точності, що забезпечують самі методи.

#### **4.3 Обґрунтування вимог до точності вдосконалених методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску**

Вдосконалені методи визначення ДХ вимірювальних каналів тиску є ефективними при належному метрологічному забезпеченні, при якому задовільняються вимоги до точності. Проведемо аналіз джерел похибок, які в найбільшій мірі впливають на точність визначення ДХ: просторова і часова нестабільність роботи ТСО; наявність закупорок та повітря у вимірювальних лініях; нестационарність вимірюваного процесу тиску в ВКТ; похибки вимірювань тиску в ВКТ; похибки відновлення вхідного сигналу тиску при розв'язанні оберненої задачі вимірювань; неточність визначення опорних ДХ ВКТ.

Просторова і часова нестабільність роботи ТСО, наявність шкідливих неоднорідностей у вимірювальній лінії є причиною нестационарності вихідних сигналів ВКТ. В другому розділі приведена методика усунення нестационарності без істотної втрати інформації про постійну часу ВКТ. Таким чином, в удосконалених методах здійснюється обробка стаціонарних вихідних сигналів. З одного боку, тривалість реалізації вихідного сигналу може бути невеликою (до десятка секунд) і цього достатньо для визначення постійної часу ВКТ методом розв'язання оберненої задачі вимірювань з використанням

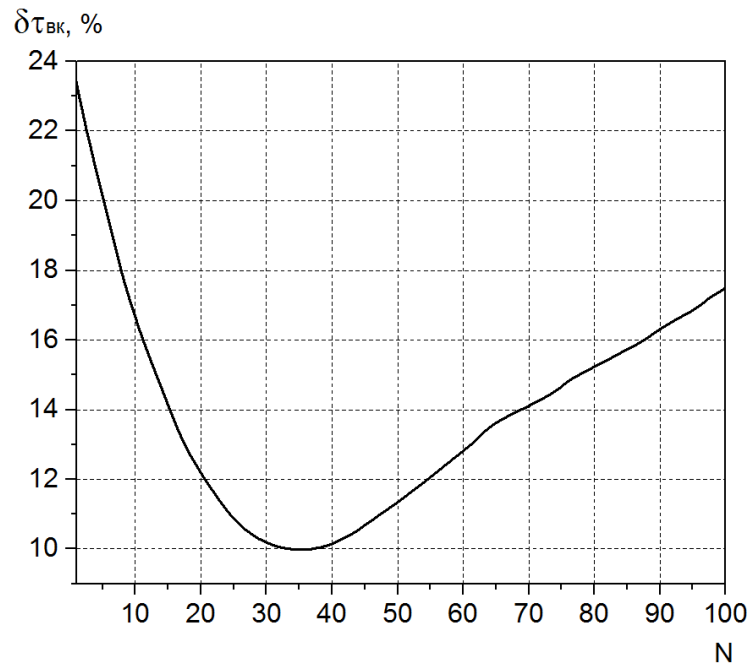
функціоналу (3.6). Раціональна кількість членів ряду в (3.6) повинна бути  $N = 30...40$  (рис. 4.3а). З іншого боку, для забезпечення бази даних вхідними сигналами при навчанні нейронної мережі тривалість зазначеної реалізації повинна бути великою (до десяти хвилин). При такому часі гарантовано усувається нестационарність вихідного сигналу. Як було показано, для забезпечення похибки визначення постійної часу ВКТ методом розв'язання оберненої задачі вимірювань нейромережевим алгоритмом в процесі навчання  $\delta\tau_{\text{вк}} \leq 15\%$  необхідно, щоб інтервал спостереження вихідного сигналу ВКТ був не менше 10 хвилин. Такий час дозволяє досягнути мінімальної похибки визначення постійної часу нейронною мережею (рис. 4.3б).

На точність визначення постійної часу впливає рівень похибок вимірювання вихідних сигналів ВКТ. Чутливість удосконалених методів до систематичних  $\delta y_c$  та випадкових  $\delta y_e$  похибок вимірювання вихідних сигналів є різною (рис. 4.4). При наявності надійних апріорних даних найменші похибки визначення постійної часу  $\delta\tau_{\text{вк}}$  досягаються в методі оберненої задачі вимірювань та нейромережевому методі, як показують результати математичного моделювання по 50 вибірках вихідного сигналу.

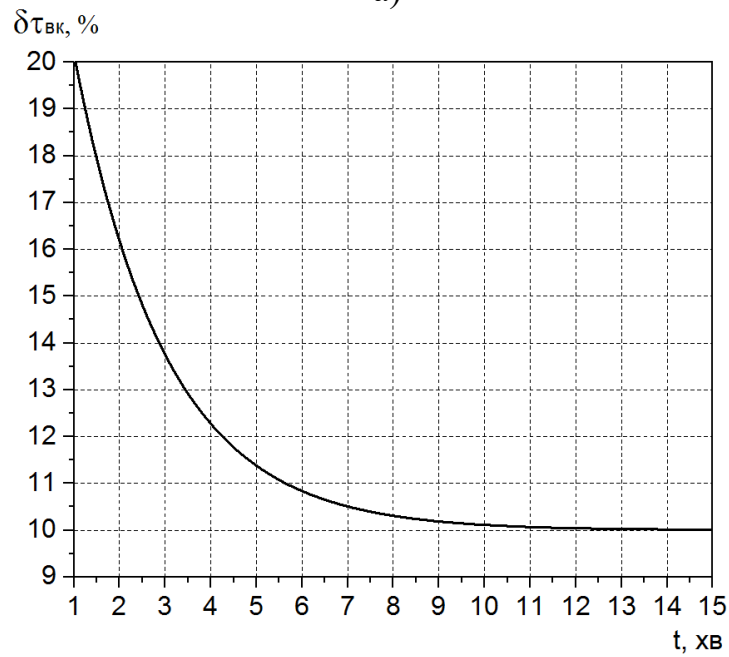
Допустимі рівні цих видів похибок для кожного методу різні. Так, для методу розв'язання оберненої задачі вимірювань для досягнення похибки визначення постійної часу ВКТ, що не перевищує 10 % ( $\delta\tau_{\text{вк}} = 10\%$ ) необхідно, щоб систематична похибка вимірювання вихідного сигналу була не більшою 3.5% ( $\delta y_c = 3.5\%$ ), а випадкова похибка приблизно 1% ( $\delta y_e = 1\%$ ). Для методу внутрішнього контролю ці цифри становлять:  $\delta\tau_{\text{вк}} = 13\%$ ,  $\delta y_c = 3\%$ ,  $\delta y_e = 3\%$ , а для нейромережевого методу:  $\delta\tau_{\text{вк}} = 11\%$ ,  $\delta y_c = 3.7\%$ ,  $\delta y_e = 5\%$ .

Рівень зазначених похибок істотно залежить від відношення сигнал/шум на виході ВКТ (рис. 4.5а). Мініміально допустиме відношення сигнал/шум



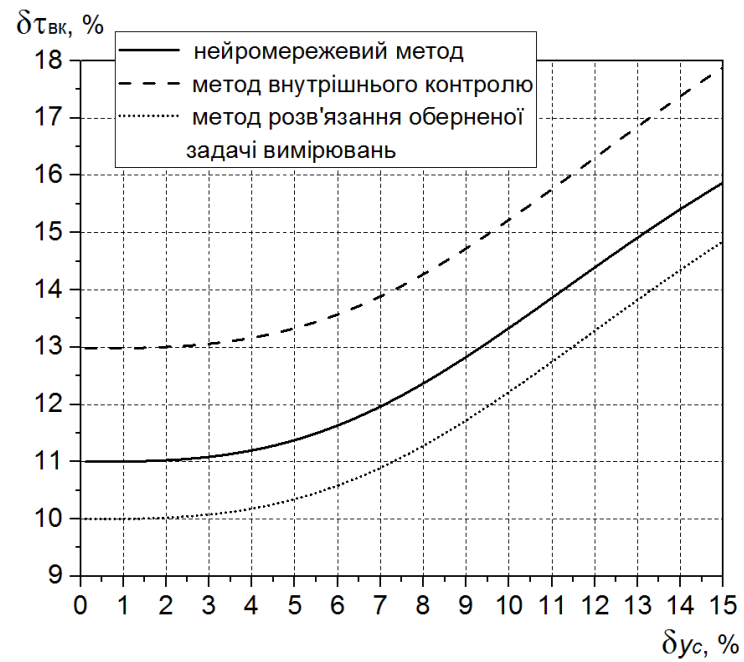


а)

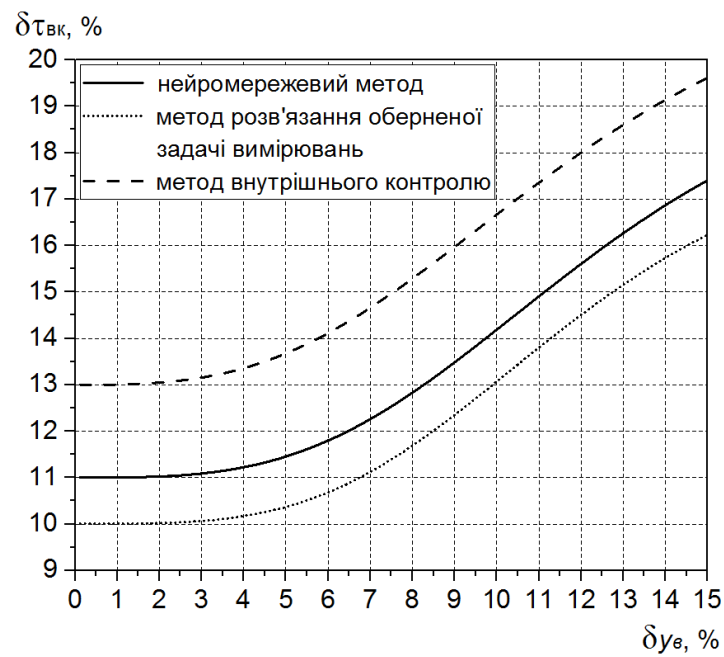


б)

Рисунок 4.3 – Залежність величини відносної похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{BK}$  від кількості членів ряду  $N$ , яким представлено вхідний сигнал при використанні методу розв'язання оберненої задачі вимірювань (а) та відносної похибки визначення постійної часу  $\delta\tau_{BK}$  від інтервалу спостереження (б)



а)



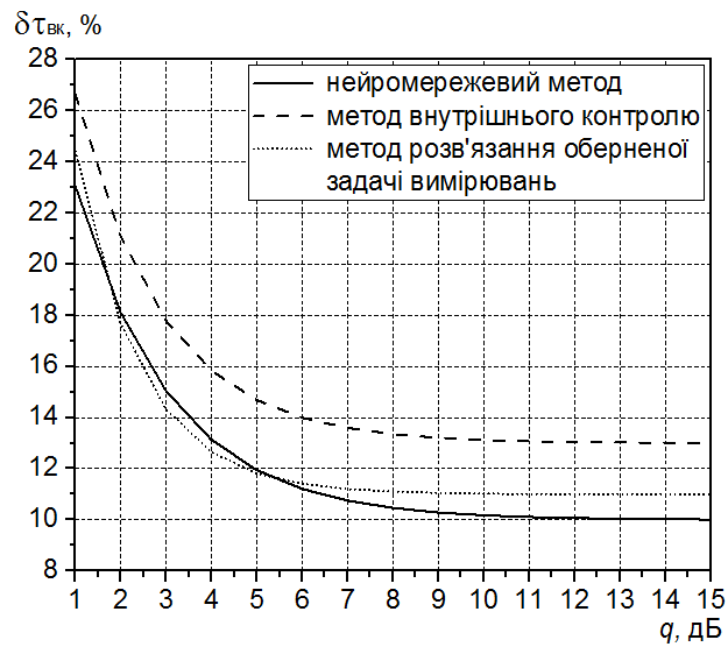
б)

Рисунок 4.4 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{вк}$  від величини відносних випадкової  $\delta y_{с}$  (а) та систематичної  $\delta y_{в}$  (б) похибок вимірювання вихідного сигналу ВКТ

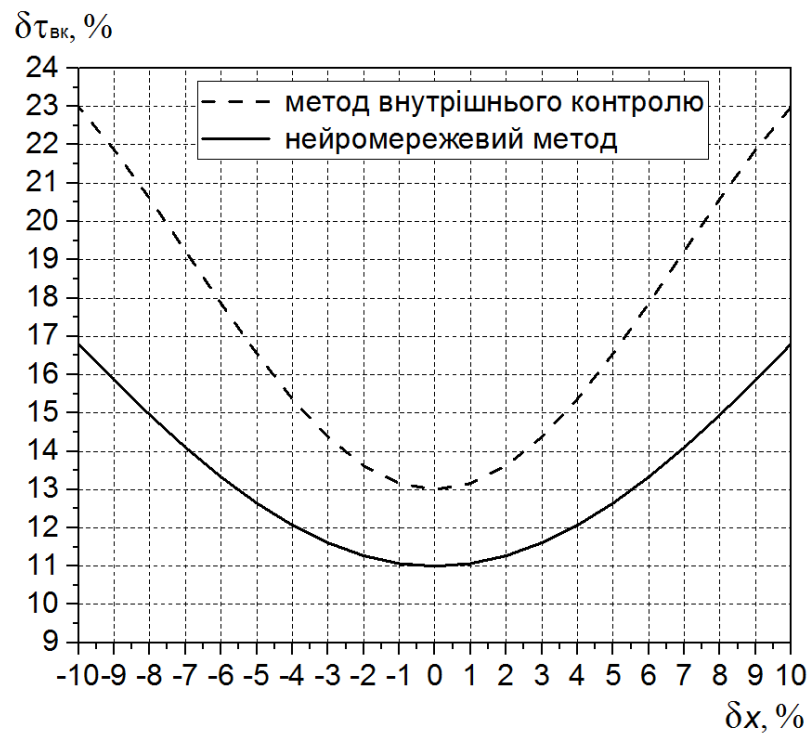
повинно перевищувати 10 дБ, щоб задовольнити вимогам до похибки  $\delta\tau_{\text{вк}} = 10\%$  для всіх удосконалених в роботі методів.

Оскільки в основу визначення постійної часу ВКТ покладено наявність бази даних відновлених вхідних сигналів, то необхідно висувати вимоги до точності їх відновлення. Залежність похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{\text{вк}}$  від похибки відновлення вхідних сигналів отримана шляхом математичного моделювання і показана на рис. 4.5б. Якщо така похибка досягає 10%, то похибка визначення постійної часу ВКТ зростає приблизно на 50% (рис. 4.5б). Для забезпечення похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{\text{вк}} \pm 1.5\%$  похибка відновлення вхідного сигналу  $\delta x$  повинна бути не гірше:  $\pm 2.5\%$  для методу внутрішнього контролю і  $\pm 3\%$  для нейромережевого методу.

Всі вимоги щодо метрологічного забезпечення визначення постійної часу ВКТ повністю переносяться і на визначення інших ДХ, зокрема, перехідної та імпульсної характеристик, оскільки вони визначаються аналітично за результатами визначення постійної часу ВКТ. Використання рис. 4.3...4.5 дозволяє визначити межі похибок вимірювання вихідних сигналів та відновлення вхідних дій, оцінити вплив відношення сигнал/шум на точність визначення постійної часу ВКТ. Крім того, в умовах нестаціонарності випадкових процесів тиску потрібно визначати якість усунення зазначеної нестаціонарності, яка може впливати на точність визначення постійної часу. Критерій залишкової нестаціонарності у відсотках встановимо у вигляді:  $\xi = \eta_{\text{тр}} + \eta_{\text{пер}}$ , де  $\eta_{\text{тр}}$  - некомпенсована трендова складова нестаціонарного процесу;  $\eta_{\text{пер}}$  - некомпенсована періодична складова нестаціонарного процесу. Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{\text{вк}}$  від залишкової нестаціонарності  $\xi$  приведена на рис. 4.6.



(a)



б)

Рисунок 4.5 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{BK}$  від відношення сигнал/шум  $q$  (а) та від сумарної похибки відновлення вхідного сигналу  $\delta x$  (б)

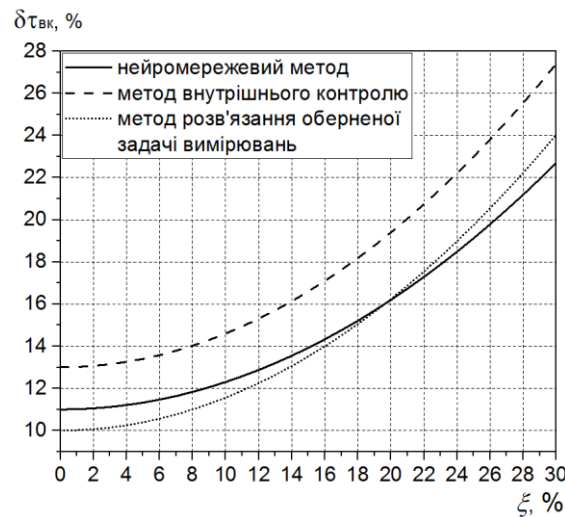


Рисунок 4.6 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ  $\delta\tau_{вк}$  від залишкової нестационарності  $\xi$  технологічного процесу

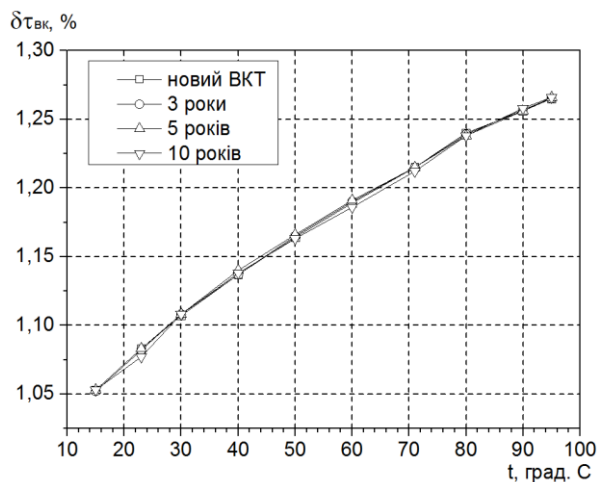


Рисунок 4.7 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ вимірювань нейромережевим методом від температури вхідної дії та "старіння" каналу тиску

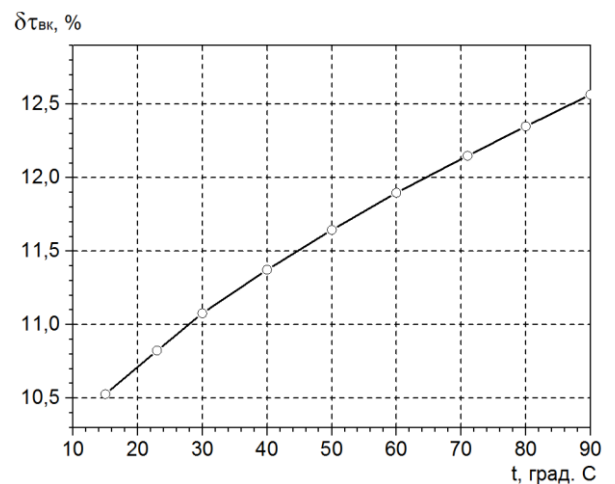


Рисунок 4.8 – Залежність усередненої відносної похибки визначення постійної часу ВКТ методом оберненої задачі вимірювань від температури вхідної дії

Дослідження показали, що критерій залишкової нестационарності не повинен перевищувати: для методу оберненої задачі вимірювань - 8%, для методу внутрішнього контролю та нейромережевого методу – 6%. Також встановлена залежність відносної похибки визначення постійної часу вдосконаленими методами від температури вхідної дії (температури теплоносія) та рівня "старіння" ВКТ. Незалежно від рівня "старіння" нейромережевий метод

дозволяє визначити постійну часу з точністю  $\delta\tau_{\text{вк}} \leq 1.3\%$  (рис.4.7). Метод оберненої задачі вимірювань забезпечує визначення  $\tau_{\text{вк}}$  у всьому температурному діапазоні теплоносія постійної часу з відносною похибкою  $\delta\tau_{\text{вк}} \leq 12.5\%$  (рис.4.8).

#### 4.4 Висновки до розділу

1 Нормування динамічних характеристик вимірювального каналу тиску потребує оцінки впливу різних дестабілізуючих факторів і визначення вимог щодо факторів, які впливають на точність визначення постійної часу вдосконаленими методами.

2 Похибки визначення постійної часу вимірювального каналу тиску є різними для трьох вдосконалених в роботі методів. Для забезпечення допустимої похибки визначення постійної часу каналу в 10% необхідно здійснювати вимірювання вихідного сигналу з систематичними похибками, які не перевищують 3.5% для методу розв'язання оберненої задачі вимірювань, 3% для методу внутрішнього контролю і 3.7% для нейромережевого методу. Відповідно випадкові похибки для цих методів не повинні перевищувати 1%, 3% і 5%.

3 Точність всіх трьох вдосконалених методів істотно залежить від відношення сигнал/шум, але, якщо це відношення більше 10 дБ, то похибки вимірювання постійної часу каналу при задовільних інших впливаючих факторах не перевищують 10%.

4 Методи внутрішнього контролю та нейромережевий метод використовують відновлені вхідні сигнали для своїх баз даних. Похибки відновлення таких сигналів не повинні перевищувати 3%.

5 Робота всіх вдосконалених методів ґрунтується на використанні стаціонарних сигналів. Для цього на протязі 10...15 хвилин в результаті статистичної обробки усувається нестационарність. При цьому залишкова нестационарність повинна знаходитись в межах 6...8%.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности / Х. М. Хашемиан. – Москва: Бином, 2008. – 336 с. – (ISBN 978-5-9518-0270-5).
2. Хашемиан Х. М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях / Х. М. Хашемиан. – Москва: Бином, 2012. – 350 с. – (ISBN 978-5-9518-0418-5).
3. Щапов П. Ф. Прилад бездемонтажного контролю метрологічних характеристик термоперетворювачів / П. Ф. Щапов, В. В. Муляров, О. В. Гусельніков. // Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – №25. – С. 20–30.
4. Кондрашов С. І. Спосіб формування тестового сигналу для контролю динамічних характеристик вимірювальних каналів / С. І. Кондрашов, К. І. Діденко, В. М. Балєв, В. М. Новіков. // Патенты и изобретения: UA 31487 A. – 2000.
5. Кондрашов С. І. Методи підвищення точності систем тестових випробовувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах / С. І. Кондрашов. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – 224 с.
6. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва: Наука, 1979. – 288 с.
7. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукции к идеальному прибору в физике и технике / Г. И. Василенко. – Москва: Советское радио, 1979. – 272 с.
8. Солопченко Г. Н. Обратные задачи в измерительных процедурах / Г. Н. Солопченко. // Измерения, контроль, автоматизация. – 1983. – №34. – С. 32–45.
9. Грановский В. А. Динамические измерения в отраслях энергетического, тяжелого и транспортного машиностроения / В. А. Грановский, В. М. Домницкий, В. А. Соломник. // Измерительная техника. – 1985. – №1. – С. 3–4.

10. Этингер Ю. С. Методика определения динамических свойств средств измерений / Ю. С. Этингер, В. А. Грановский. // Метрология. – 1974. – №10. – С. 9–12.

11. Леонов В. В. Метод понижения порядков номиналов передаточных функций / В. В. Леонов. // Измерительная техника. – 1980. – №10. – С. 16–18.

12. Крюков О. М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї / О. М. Крюков, О. А. Александров. // Системи озброєння і військова техніка. Академія внутрішніх військ України. – 2010. – №4. – С. 71–74.

13. Крюков О. М. Структурно-алгоритмічна схема засобу вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї / О. М. Крюков, О. А. Александров. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №2. – С. 60–63.

14. Крюков О. М. Дослідна установка для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї та артилерійських систем / О. М. Крюков, О. А. Александров. // Метрологія та прилади. – 2011. – №4. – С. 62–67.

15. Крюков О. М. Оцінювання динамічної похибки датчика миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї / О. М. Крюков, О. А. Александров. // Системи озброєння і військова техніка. Академія внутрішніх військ України. – 2010. – №2. – С. 14–18.

16. Александров А. Г. Адаптивное управление с эталонной моделью при внешних возмущениях / А. Г. Александров. // Автоматика и телемеханика. – 2004. – №5. – С. 77–91.

17. Егоршин А. О. Оптимизация параметров стационарных моделей в унитарном пространстве / А. О. Егоршин. // Автоматика и телемеханика. – 2004. – №2. – С. 29–49.



18. Костоглотов А. А. Синтез интеллектуальных измерительных процедур на основе принципов регуляризации / А. А. Костоглотов. // Измерительная техника. – 2001. – №1. – С. 8–12.

19. Крузнер А. Б. Восстановление входных сигналов средств измерений, описываемых линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами / А. Б. Крузнер. // Измерительная техника. – 1996. – №42. – С. 142–152.

20. Kuş J. Artificial neural networks in fault diagnosis of dynamical / J. Kuş, J. Korbicz. // Diagnostics of Processes. – 2013. – С. 37–49.

21. Materassi D. Reconstruction of topologies for acyclic networks of dynamical systems / Materassi. // Proc. of the American Control Conference. – 2014. – С. 37–41.

22. Tan P. V. A contribution to the identification of switched dynamical systems over finite fields / P. V. Tan, G. Millérioux, J. Daafouz. // Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control. – 2013. – С. 4429–4434.

23. Saggin B. Dynamic error correction of a thermometer for atmospheric measurements / B. Saggin, S. Debei, M. Zaccariotto // Measurement. – 2015. – № 30. – P. 223–230.

24. Cessac B. Neural Networks as dynamical systems / Cessac. // International Journal of Bifurcations and Chaos. – 2014. – №6. – С. 1585–1629.

25. Gonzalez C. Instance-based learning: integrating sampling and repeated decisions from experience / Gonzalez. // Psychol. Rev.. – 2015. – №118. – С. 523–551.

26. МИ 1317-2004 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров // ФГУП ВНИИМС. – 2004.

27. Чинков В. М. Основи теорії похибок засобів вимірювальної техніки / В. М. Чинков. – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 88 с.

28. Полярус О. В. Відновлення динамічно спотвореного вимірюваного сигналу / О. В. Полярус, Є. О. Поляков. // ГП НИТИП. – 2014. – №8. – С. 34–37.

29. Полярус О. В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення / О. В. Полярус, Є. О. Поляков. – Харків: Лідер, 2014. – 116 с.

30. Полярус О. В. Оцінка джерел невизначеності та похибок при наближеному розв'язанні оберненої задачі вимірювань / О. В. Полярус, Є. О. Поляков. // Техніка. – 2012. – №7. – С. 79–84.

31. Захаров И. П. Погрешности моделирования переходных характеристик апериодических средств измерительной техники / И. П. Захаров, М. П. Сергиенко. // Системи обробки інформації. – 2005. – №45. – С. 13–17.

32. Захаров И. П. Определение параметров передаточных функций линейных систем / И. П. Захаров, М. П. Сергеев. // НТУРЭ. – 2012. – №5. – С. 20–27.

33. Щапов П. Ф. Статистическая модель бездемонтажного контроля погрешностей первичного измерительного преобразования измерительного преобразователя / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко, М. И. Шпарева. // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №15. – С. 141–146.

34. Солопченко Г. Н. Компенсация динамических погрешностей при неполных сведениях о свойствах приборов и измеряемых сигналов / Г. Н. Солопченко, И. Б. Челпанов. // Метрология. – 1979. – №6. – С. 3–13.

35. Марчук Г. И. Некоторые вопросы линейной теории измерений / Г. И. Марчук, Ю. П. Дробышев. // Автометрия. – 1977. – №3. – С. 24–30.

36. Турчин В. Ф. Выбор ансамбля гладких функций при решении обратной задачи / В. Ф. Турчин. // Мир. – 2012. – №2. – С. 24–30.

37. МИ 222-80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по

метрологическим характеристикам компонентов / МИ 222-80. – Москва: Ордена "Знак почета", 1981. – 24 с. – (ВНИИМИУС).

38. Савелова Т. И. Об оптимальной регуляризации уравнений типа свертки с приближенными правыми частями и ядром / Т. И. Савелова. // Мир. – 2011. – №2. – С. 210–214.

39. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб: Питер, 2008. – 608 с.

40. Крылов В. В. Способ коррекции выходного сигнала измерительных датчиков / В. В. Крылов. // Измерительная техника. – 1995. – №11. – С. 59–61.

41. Крюков О. М. Застосування методів цифрової фільтрації при дослідженні внутрішніх балістичних процесів у стрілецькій зброї / О. М. Крюков, О. А. Александров, В. В. Антонець. // Системи озброєння і військова техніка. Академія внутрішніх військ України. – 2012. – №2. – С. 27–30.

42. Barwicz A. An integrated structure for Kalman-filter-based measurand reconstruction / Barwicz. // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1994. – №3. – С. 403–409.

43. Hajiyeve C. Innovation approach based measurement error self-correction in dynamic systems / C. Hajiyeve. // Measurement. – 2006. – №39. – С. 585–593.

44. Симонов М. М. Метод оптимизации регуляризирующих алгоритмов динамической коррекции / М. М. Симонов, А. И. Бутко. // Измерительная техника. – 1990. – №2. – С. 13–15.

45. Солопченко Г. Н. Простой регуляризирующий метод компенсации влияния аппаратной функции на результат измерения / Г. Н. Солопченко, Н. И. Серегина. // Техническая кибернетика. – 1984. – №2. – С. 166–172.

46. Бизяев М. Н. Восстановление динамически искаженных сигналов испытательно-измерительных систем методом скользящих режимов / М. Н. Бизяев, А. Л. Шестаков. // Энергетика. – 2004. – №6. – С. 114–125.

47. Иосифов Д. Ю. Динамические измерительные системы с измеряемым вектором параметров состояния датчиков / Д. Ю. Иосифов, А. Л. Шестаков. // Приборостроение. – 2002. – С. 98–102.

48. Domingues R. J. Reconstruction in compressive sensing using affine scaling transformations with variable-p diversity measure / Domingues. // IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop. – 2009. – С. 708–713

49. James K. R. Precision digital instruments to measure dynamic wind loads on trees during storms / K. R. James, B. S. Kane. // Agricultural and Forest Meteorology. – 2012. – №13. – С. 1055–1061.

50. Fang D. Research on sine dynamic torque measuring system. Procedia Engineering / D. Fang, X. Zhe. // Agricultural and Forest Meteorology. – 2012. – №29. – С. 2677–2681.

51. Ланге П. К. Коррекция динамической погрешности измерительных преобразователей на основе онлайн-аппроксимации сигнала / П. К. Ланге. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2003. – №1. – С. 115–118.

52. Шестаков О. Л. Коррекция динамической погрешности измерительного преобразователя линейным фильтром на основе модели датчика / О. Л. Шестаков. // Известия вузов. Серия "Приборостроение". – 1991. – №4. – С. 8–13.

53. Бугаков И. А. Метод динамических измерений параметров экстремальных воздействий / И. А. Бугаков. // Датчики и системы. – 2001. – №10. – С. 6–11.

54. Зотов М. Г. Конструирование модифицированного регулятора в пространстве состояний / М. Г. Зотов. // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №4. – С. 35–47.

55. Головкин В. А. Нейроинтеллект: Теория и применения / В. А. Головкин. – Брест: БПИ, 1999. – 260 с. – (Книга 1. Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями).

56. Ciresan D. Multi-column Deep Neural Network for Traffic Sign Classification / D. Ciresan, U. Meier, J. Masci. // *Neural Networks*. – 2012. – №34. – С. 333 – 338.

57. Armour P. G. A measure of control / Armour. // *Communications of the ACM*. – 2012. – №55. – С. 44–49.

58. Калач А. В. Применение метрологии искусственных нейронных сетей для обработки сигналов сенсоров / А. В. Калач. // *Нейрокомпьютеры*. – 2003. – №10. – С. 43–47.

59. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

60. Лубенцов В. Ф. Исследование САУ процессом ферментации с применением технологии нейронных сетей / В. Ф. Лубенцов. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2005. – №9. – С. 1–4.

61. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва: ООО "ИД Вильямс", 2006. – 1104 с.

62. Danisman K. Design of a precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types / K. Danisman, I. Dalkiran, F. V. Celebi. // *Measurement*. – 2006. – №39. – С. 695–700.

63. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. – Москва: Высшая школа, 2002. – 183 с.

64. Омату С. Нейроуправления и его приложения / С. Омату, М. Халид, Р. Юсоф. – Москва: Высшая школа, 2008. – 272 с.

65. Ивченко В. Д. Применение нейросетевых технологий в различных областях науки и техники / В. Д. Ивченко, С. С. Кананадзе. // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2005. – №6. – С. 28–29.

66. Кириевский В. Е. Анализ нейросетевых структур системы измерения скорости разгона тел в электродинамическом ускорителе / В. Е. Кириевский, Е. В. Кириевский. // *Измерительная техника*. – 2004. – №1. – С. 39–43.

67. Шестаков А. Л. Коррекция динамической погрешности измерительного преобразователя линейным фильтром на основе модели датчика / А. Л. Шестаков. // Изв. вузов, Приборостроение. – 1991. – №4. – С. 8–13.

68. Ищук И. П. Многофакторные измерения при идентификации переменных на линиях неопределенности / И. П. Ищук. // Метрология. – 2003. – №12. – С. 3–7.

69. Калач А. В. Применение метрологии искусственных нейронных сетей для обработки сигналов сенсоров / А. В. Калач. // Нейрокомпьютеры. – 2003. – №10. – С. 43–47.

70. Кобяков П. В. Анализ архитектур темпоральных сетей и их применение в информационных системах / П. В. Кобяков, Г. Ф. Малыхина. // Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции. Том III. – 2002. – С. 140–144.

71. Дегтярев А. В. Идентификация нелинейных динамических средств измерений с помощью искусственной нейронной сети / А. В. Дегтярев, О. В. Запорожец, Т. А. Овчарова. // Метрологія та прилади. – 2013. – №2. – С. 85–89.

72. Чинков В. Н. Методика аналитического конструирования агрегированного нейросетевого регулятора в контуре управления подсистемой синхронизации системы передачи эталонных сигналов времени по каналам цифрового телевидения / В. Н. Чинков, М. Л. Троцко. // Збірник наукових праць. Об'єднаного науково-дослідного інституту Збройних Сил. – 2006. – №1. – С. 78–90.

73. Назаров А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А. В. Назаров, А. И. Логскутов. – Москва: Наука и Техника, 2003. – 384 с.

74. Васильев В. И. К выбору структуры нейрорегулятора в системе управления динамическим объектом / В. И. Васильев, С. С. Валеев,

А. А. Шилоносков. // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2001. – №4. – С. 52–60.

75. Wasserman P. D. Neural Computing: Theory and Practice / Wasserman., 1989. – 230 с.

76. Khrobostov D. A. Sensor Calibration with Artificial Neural Network / D. A. Khrobostov, G. F. Filaretov. // 45th International Scientific Colloquium. – 2000. – С. 2–7.

77. Водотыка С. В. Использование искусственных нейронных сетей при построении калибровочной зависимости средства измерения / С. В. Водотыка. // Системи обробки інформації. – 2011. – №1. – С. 24–28.

78. Дюк В. А. Data Mining: учебный курс / В. А. Дюк, А. П. Самойленко. – СПб: "Питер", 2001. – 368 с.

79. Ильин Е. С. Интеллектуальная система анализа данных на основе нейронных сетей : дис. канд. техн. наук : 05.13.01 / Ильин Евгений Сергеевич – Москва, 2004. – 174 с.

80. Heht-Nielsen R. Theory of the backpropagation neural network/ Neural Networks for Human and Mashine Perception / Heht-Nielsen. // H. Wechsler (Ed). – 1992. – №2. – С. 65–93.

81. Craven M. W. Extracting tree-structured representations of trained networks / M. W. Craven, J. W. Shavlik., 1996. – 368 с. – (MIT Press, Cambridge MA).

82. ДЕРЖСТАНДАРТ 24555-81. Система державних випробувань продукції. Порядок атестації іспитового обладнання. Основні положення / ДЕРЖСТАНДАРТ 24555-81. – Москва, 1987.

83. ДЕРЖСТАНДАРТ 15150-69. Машины, прилади й інші технічні вироби. Виконання для різних кліматичних районів. Категорії, умови експлуатації, зберігання й транспортування в частині впливу кліматичних факторів зовнішньогосередовища / ДЕРЖСТАНДАРТ 15150-69. – Москва: ФГУП "Стандарт информ", 2005.

84. ДСТУ 2708:2006. Повірка засобів вимірювальної техніки / ДСТУ 2708:2006. – Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2006.

85. ДСТУ 3989-2000. Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів / ДСТУ 3989-2000. – Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2000.

86. ДСТУ ІЕС 60780:2007. Атомні електростанції. Обладнання систем безпеки, електричне. Кваліфікація / ДСТУ ІЕС 60780:2007. – Київ: Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, 2007.

87. МИ 1997-89. Рекомендация. ГСИ. Преобразователи давления измерительные. Методика поверки / МИ 1997-89. – Москва: ВНИИМС, 1989.

88. Бэтчелор Д. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор. – Москва: Мир, 1973. – 758 с.

89. Башта М. Т. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / М. Т. Башта. – Москва: Машиностроение, 1972. – 320 с.

90. Кузнецов П. И. Прохождение случайных функций через нелинейные системы / П. И. Кузнецов, Р. Л. Стратонович, В. И. Тихонов. // Автоматика и телемеханика. – 1953. – №14. – С. 375–391.

91. Rowell D. Advanced System Dynamics and Control / Rowell. // Massachusetts Institute of Technology. Department of Mechanical Engineering. – 2004. – №22. – С. 1–41.

92. Тихонов В. И. Нелинейное преобразование случайных процессов / В. И. Тихонов. – Москва: Радио и связь, 1986. – 266 с.

93. Babik Z. Hammerstein and Wiener models in modeling of nonlinear process / Babik. // Vienna, Austria. – 2011. – №22. – С. 663–664.

94. Hashemian H. M. Maintenance of process Instrumentation in Nuclear Power Plants / Hashemian. – Hardcover: Springer, 2006. – 303 с.

95. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов / И. С. Гоноровский. – Москва: Радио и связь, 1986. – 512 с.



96. Поляков Є. О. Удосконалення методів зменшення динамічних похибок датчиків : дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / Поляков Євген Олександрович – Харків, 2014. – 194 с.

97. Полярус О. В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення / О. В. Полярус, Є. О. Поляков. – Харків: Лідер, 2014. – 120 с.

98. Коваль А. О. Визначення постійної часу датчика при розв'язанні оберненої задачі вимірювань / А. О. Коваль, О. В. Полярус, Є. О. Поляков, А. І. Котова // Метрологія та прилади. – 2014. – №1. – С. 111–113.

99. Тимощук П. В. Штучні нейронні мережі / П. В. Тимощук. – Львів: Львівська політехніка, 2011. – 444 с.

100. Russell S. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 2nd Edition / S. Russell, P. Norvig., 2015. – 1408 с.

101. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 201 с.

102. 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.

103. Ming T. Internal Model Control / Ming., 2012. – (Chemical and Process Engineering).

104. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для оцінки адекватності моделі вимірювального перетворювача / А. О. Коваль // IX МНПК "Метрологія та вимірювальна техніка". – 2014. – С. 23-26.

105. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для досліджень перехідних характеристик давачів тиску / А. О. Коваль // Український метрологічний журнал. – 2015. – №1. – С. 64–67.

106. Коваль А. О. Обґрунтування необхідності використання нечітких вимірювань в бортових інтелектуальних інформаційно-вимірювальних

системах дорожніх машин / А. О. Коваль, Д. Є. Петрукович, О. В. Вікторова // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин. – 2010. – №57. – С. 211–213.

107. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.

108. Коваль А. О. Вплив "старіння" датчиків температури на їх динамічні характеристики / А. О. Коваль, О. В. Полярус // ХУПС. – 2014. – №6. – С. 123–126.

109. 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.

110. Пат. 95482 Україна, МПК (2015.01) G01D 21/00. Спосіб відновлення сигналу на вході датчика в умовах завад / Коваль А. О., Полярус О. В., Поляков Є. О.; заявник і патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201407577; заяв. 07.07.2014; опуб. 25.12.2014 Бюл. № 24, 7 с.

111. Пат. 56069 Україна МПК (2009) G01V 15/00. Звукодальний мір з оцінкою черги транспорту / Коваль А. О., Альошин Г. В., Коломійцев О. В., Ярута А. М., Наконечний О. А., Вікторова О. В.; заявник і патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201007426; заяв. 14.06.2010; опуб. 27.12.2010, Бюл. № 24.

112. Коваль А. А. Аппаратно-программный комплекс "Вибро" / А. А. Коваль, Т. А. Коломина, Е. С. Мясоедова // материалы 3-й МНПК студ., аспирант. и молод. учен. "Наука и молодежь в начале нового столетия",

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – 2010. – С. 77–80.

113. Бодянський Є. В. Рекурентна прогноуюча штучна нейронна мережа: архітектура та алгоритми навчання / Є. В. Бодянський, Н. Є. Кулішова, О. Г. Руденко. // Адапт. системи автомат. упр.. – 1999. – №2. – С. 129–137.

114. Бодянський Є. В. Адаптивне виявлення розладнань в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж / Є. В. Бодянський, О. І. Михальов, І. П. Плісс. – Д: Систем. технології, 2000. – 140 с.

115. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб: "Питер", 2003. – 608 с.

116. НП 306.2.141-2008. Общие положения безопасности атомных станций / НП 306.2.141-2008. – Киев: Государственный комитет ядерного регулирования Украины, 2008.

117. СТП 0.03.050-2009. Кваліфікація встаткування й технічних обладнень АЕС / СТП 0.03.050-2009. – Київ, 2009.

118. ТУ В 24275859.002-99. Датчики тиску "САФІР" Технічні умови / ТУ В 24275859.002-99. – Харків.

119. СТП 0.08.073-2008. Кваліфікація обладнання й технічних пристроїв АЕС. Вимоги до кваліфікації технічних засобів автоматизації програмно-технічних комплексів і інформаційно-керуючих систем, важливих для безпеки, при їхній розробці й модернізації / СТП 0.08.073-2008. – Київ: Енергопроект.

120. "САФІР". Конструкторська документація на датчики тиску / "САФІР". – Харків: "Манометр-Харків".

121. ИТЕК.406233.009 ПМ. Програма й методика типових випробувань датчиків тиску "САФІР" / ИТЕК.406233.009 ПМ. – Харків.

122. ИТЕК.406233.001 РЕ. Датчики тиску "САФІР". Посібник з експлуатації / ИТЕК.406233.001 РЕ. – Харків.

123. ИТЕК.406233.002 РЕ. Датчики тиску "САФІР". Посібник з експлуатації / ИТЕК.406233.002 РЕ. – Харків.

124. Коваль А. О. Оптимальна система виявлення і оцінювання стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів / А. О. Коваль, О. В. Полярус, В. В. Барчан, Є. О. Поляков // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – №6. – С. 21–23.

125. Кононюк А. Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми / А. Ю. Кононюк. – Київ: «Корнійчук», 2008. – 446 с. – (ISBN 978 -966 -7599- 50).

126. Коваль А. О. Використання м'яких обчислень в інтелектуальних інформаційно-вимірювальних системах дорожніх машин / А. О. Коваль, О. В. Вікторова. // Вестник ХНАДУ. – 2011. – №53. – С. 43–46.

127. Коваль О. А. Математичне моделювання динамічних навантажень, які впливають на дорожню машину / О. А. Коваль, О. В. Вікторова // Вісник НТУ "ХПІ". – № 53. – С. 3-7.

128. Коваль А. О. Лінійна нейромережева динамічна вимірювальна система з послідовним відновленням і фільтрацією вхідного сигналу датчика / А. О. Коваль // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – №53. – С. 84–89.

129. Коваль А. О. Критерій та схема навчання нейромережевої моделі вимірювального датчика / А. О. Коваль // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – №68. – С. 75–78.

130. Коваль А. О. Метрологічне забезпечення атестації робочих місць за умовами праці / А. О. Коваль // Вестник ХНАДУ. – 2012. – №59. – С. 43–46.

131. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории / А. И. Галушкин. – Москва: Горячая Линия – Телеком, 2010. – 496 с.

132. Татузов А. Л. Нейронные сети в задачах радиолокации / А. Л. Татузов. – Москва: Радиотехника, 2009. – 528 с.

133. Френкс Л. Теория сигналов / Л. Френкс. – Москва: Сов. радио, 1974. – 344 с.

134. Денисенко А. Н. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие / А. Н. Денисенко. – Москва: Горячая линия - Телеком, 2005. – 704 с.

135. Верлань А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. – Киев: Наукова думка, 1986. – 543 с.

136. Пугачев В. С. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация / В. С. Пугачев, И. Н. Сеницин. – Москва: Наука, 1990. – 632 с.

137. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей / А. И. Галушкин. – Москва: ИПРЖР, 2000. – 415 с.

138. Головки В. А. Нейроинтеллект: теория и применение / В. А. Головки. – Брест: БПИ, 1999. – 260 с.

139. Ефимов Д. В. Адаптивная система управления с нейронной сетью. Методы и аппаратные средства цифровой обработки сигналов / Д. В. Ефимов, В. А. Терехов, И. Ю. Тюкин // ГЭТУ. – 1996. – № 490. – С. 32–35.

140. Ивченко В. Д. Применение нейросетевых технологий в различных областях науки и техники / В. Д. Ивченко, С. С. Кананадзе // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 6. – С. 28–29.

141. Терехов В. А. Динамические алгоритмы обучения многослойных нейронных сетей в системах управления / В. А. Терехов // РАН. Серия «Теория и системы управления». – 1996. – № 3. – С. 70-79.

142. Терехов В. А. Исследование устойчивости процессов обучения многослойных нейронных сетей / В. А. Терехов, И. Ю. Тюкин // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 10. – С.145-161.

143. Warwick K. Neural networks of control and systems / K. Warwick, G. W. Irwin, K. J. Hunt. – London: Peter Peregrinus. – 1988. – С. 534.

144. 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.

145. Коваль А. О. Нейромережевий метод підкріплюваного навчання у завданнях автоматичного управління / А. О. Коваль, Н. М. Єфіменко, К. П. Бердар // зб. доп. 10-ї Міжн. міждисц. наук.-практ. школа-конф. "Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління", Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. – 2010. – С. 281–288.

146. Shestakov A. L. Dynamic Error Correction Method / A. L. Shestakov // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2013. – №1. – P. 250–255

147. Коваль А. О. Обґрунтування необхідності інтелектуалізації інформаційно-вимірювальної системи дорожніх машин / А. О. Коваль, Н. М. Єфіменко // сб. науч. тр. 10-й Межд. конф. "Проблемы информатики и моделирования, НТУ "ХПИ". – 2010. – С. 98–105.

148. Коваль А. А. Информационно-измерительная система для определения и оперативного прогноза загрязнения воздуха в городской черте / А. А. Коваль, Е. В. Викторова // материалы 5-й МНПК "Эколого-правовые и экономические аспекты техногенной безопасности регионов", ХНАДУ. – 2010. – С. 43-46.

149. Коваль А. О. Нейромережева модель первинного вимірювального перетворювача / А. О. Коваль // сборник тезисов VI МНПК "Качество технологий – качество жизни", УИПА. – 2013. – С. 102–104.

150. Коваль А. О. Нейромережева модель датчика температуры / А. О. Коваль, О. В. Полярус // XXII МНПК., часть IV, НТУ "ХПИ". – 2014. – С. 63–65.

## Додаток А

## Значення параметрів апроксимуючих функцій Лоренца

| Номер<br>функції Лоренца | Параметр $\bar{p}$ | Термін роботи датчиків температури |         |          |
|--------------------------|--------------------|------------------------------------|---------|----------|
|                          |                    | 1 рік                              | 5 років | 10 років |
| 1                        | $p_0$              | 0.04                               | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              | 70                                 | 17      | 24.6     |
|                          | $p_2$              | 30                                 | 60      | 60.6     |
|                          | $p_3$              | 23                                 | -8      | -6.3     |
| 2                        | $p_0$              | 0.04                               | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              | 90                                 | 87      | 100.6    |
|                          | $p_2$              | 43                                 | 63      | 55       |
|                          | $p_3$              | 50                                 | 64      | 47       |
| 3                        | $p_0$              | 0.04                               | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              | 193                                | 136     | 156      |
|                          | $p_2$              | 29                                 | 22      | 20       |
|                          | $p_3$              | 1                                  | 10      | 10       |
| 4                        | $p_0$              | 0.04                               | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              | 280                                | 200     | 207      |
|                          | $p_2$              | 29                                 | 146     | 41       |
|                          | $p_3$              | 2                                  | 26      | 173      |
| 5                        | $p_0$              |                                    | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              |                                    | 274     | 208      |
|                          | $p_2$              |                                    | 67      | 40       |
|                          | $p_3$              |                                    | -21     | -155     |
| 6                        | $p_0$              |                                    | 0.043   | 0.043    |
|                          | $p_1$              |                                    | 286     | 297      |
|                          | $p_2$              |                                    | 40      | 17       |
|                          | $p_3$              |                                    | 13      | -0.52    |
| 7                        | $p_0$              |                                    |         | 0.043    |
|                          | $p_1$              |                                    |         | 338      |
|                          | $p_2$              |                                    |         | 43       |
|                          | $p_3$              |                                    |         | -5.23    |

## Додаток Б

### Результати аналізу перехідної характеристики вимірювальної лінії

Для визначення перехідної характеристики ВЛ на вхід останньої треба подати тиск, який змінюється за законом типу "сходінка", що зробити складно з технічної точки зору. Перехідна характеристика вимірювальної лінії у загальному випадку може бути представлена лінійною моделлю другого порядку. Частота коливань цієї системи записується як [2]

$$\omega_n = \frac{\pi U_a}{2L} \sqrt{\frac{V_{FS}}{\frac{\pi^2}{4} [BC_t + \frac{BV_b}{\gamma P_b} + V_t] + V_{FS}}}, \quad (\text{Б.1})$$

де  $U_a$  - швидкість акустичної хвилі в рідині ВЛ;

$L$  - довжина ВЛ;

$V_{FS}$  - об'єм рідини всередині вимірювальної лінії;

$V_t$  - об'єм рідини всередині датчика тиску;

$B$  - об'ємний модуль пружності рідини;

$V_b$  - об'єм газу всередині рідини у ВЛ, тобто об'єм "бульбашків", що присутні у ВЛ;

$\gamma$  - відношення питомих теплоємностей "бульбашків" газу при постійному тиску  $c_p$  та постійному об'ємі  $c_v$ ;

$P_b$  - тиск, що підводиться до "бульбашків";

$C_t$  - піддатливість датчика тиску, тобто відношення змінювання об'єму  $\Delta V_t$  в порожнині датчика до змінювання тиску, що породжує виникнення  $\Delta V_t$  (для ідеальної рідини  $C_t = 0$ ).



З формули (Б.1) випливає, що частота коливань ВЛ як системи при збільшенні  $C_t$  зменшується і при деяких значеннях  $C_t$  буде наближатись до нуля, що може свідчити про втрату нею коливальних властивостей.

Динамічний відгук на виході ВЛ становить:

$$y(t) = K[1 - \frac{\omega_n}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \arctg(\frac{\omega_d}{\alpha})], \quad (\text{Б.2})$$

де  $K$  - коефіцієнт підсилення системи;

$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  - власна частота коливань в лінії з урахуванням затухання;

$\alpha = \omega_n \zeta$  - коефіцієнт затухання;  $t$  - час в секундах.

Показник  $\zeta$  визначається за формулою:

$$\zeta = \frac{16\nu}{\omega_n d_s^2},$$

де  $\nu$  - кінематична в'язкість рідини;

$d_s$  - внутрішній діаметр вимірювальної лінії.

Аналіз формули (Б.2) показує, що при збільшенні демпфуючих властивостей ВЛ як системи (наприклад, при збільшенні  $C_t$ ) амплітуда коливань перехідної характеристики зменшується і ця характеристика перетворюється в звичайну експоненційно зростаючу функцію, що наближається до значення  $K$ . Оскільки на практиці всередині вимірювальної лінії міститься, як правило, декілька демпферів у вигляді діафрагм, то можна вважати, що ВЛ являє собою систему, що описується диференціальними рівняннями першого порядку. Результат зазначених міркувань приведений на рисунку

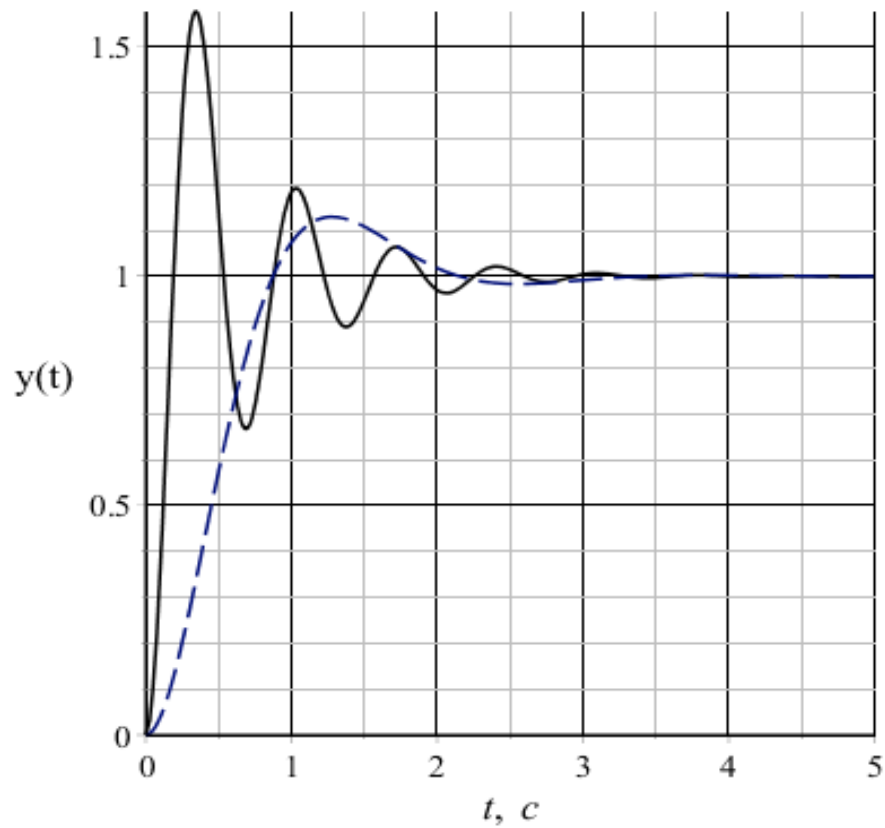


Рисунок Б.1 - Динамічний відгук на виході вимірювальної лінії при різних значеннях піддатливості датчика тиску:  $C_t = 0,01$  (суцільна лінія) і  $C_t = 0,1$  (пунктирна лінія)

Графіки отримані при наступних числових значеннях параметрів:

$$Ua := 1481; L := 10; Vfs := 0.0785; B := 2 \cdot 10^9; Vt := 0.2; \gamma_a := 0.8;$$

$$Pb := 10^9; Vb := 0.0005; K := 1;$$

## Додаток В

Блок схеми та результати роботи програмної реалізації методу внутрішнього контролю для визначення динамічних характеристик вимірювального каналу тиску

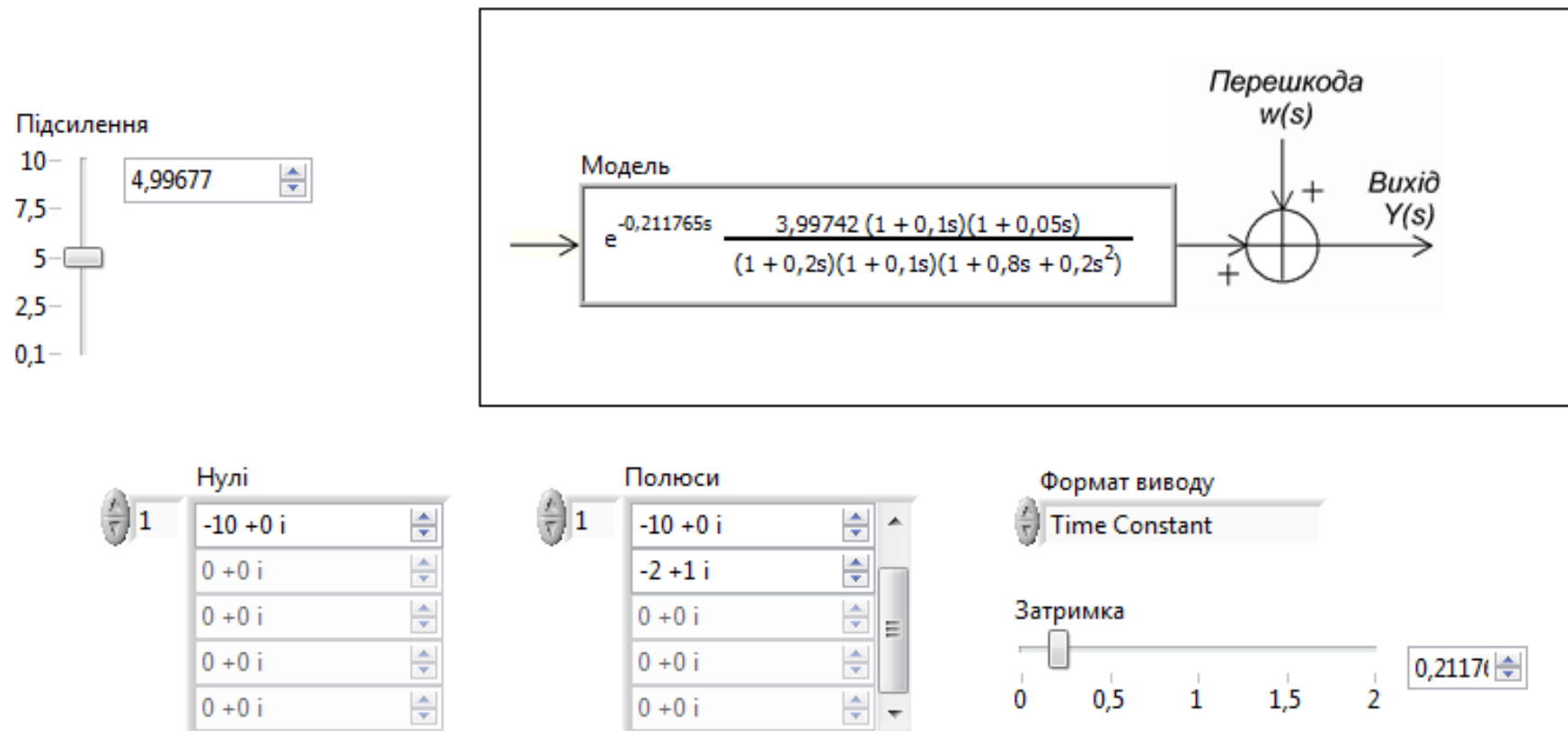


Рисунок В.1 - Зображення екрану при роботі програми модуля визначення моделі ПХ ВКТ(часова форма представлення ПХ)

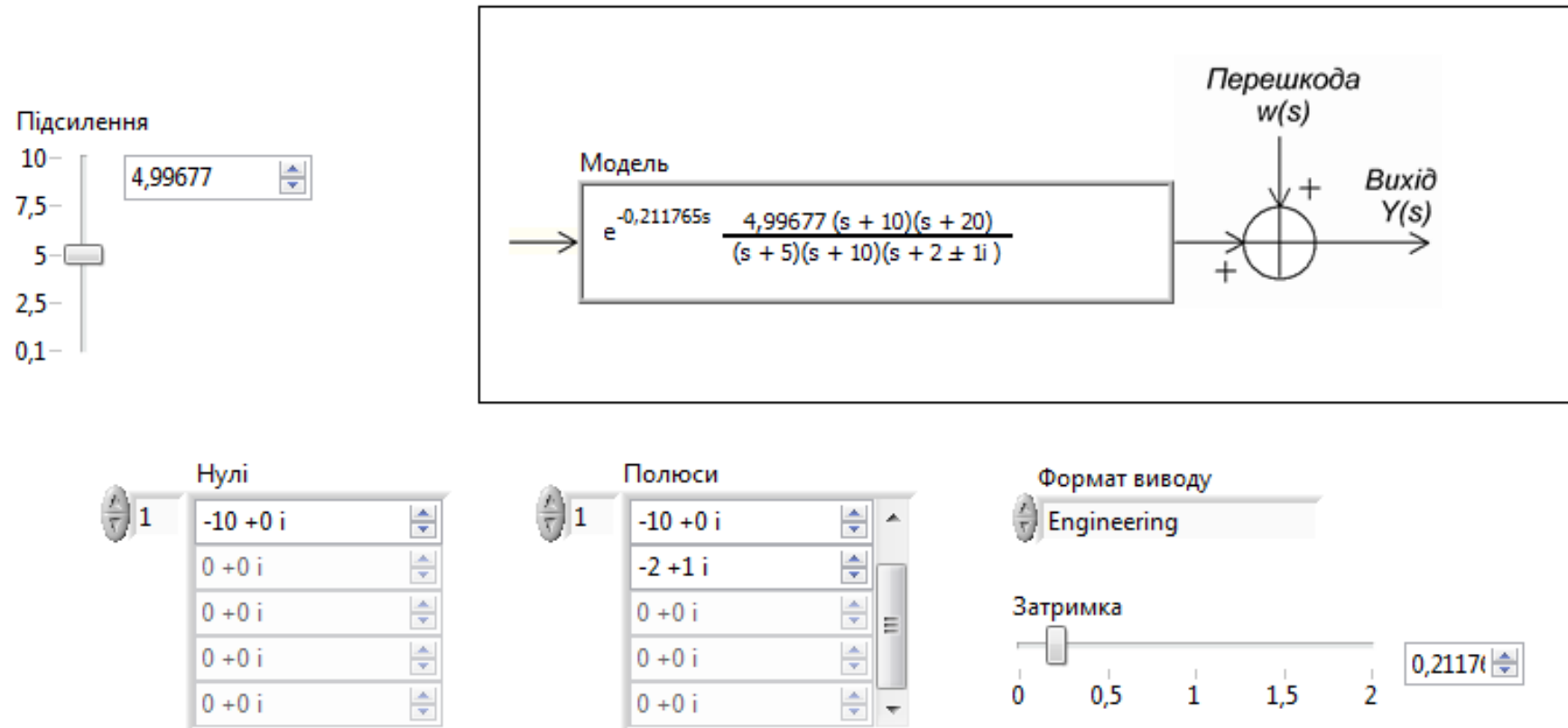


Рисунок В.2 - Зображення екрану при роботі програми модуля визначення моделі ПХ ВКТ (комплексна форма представлення ПХ)

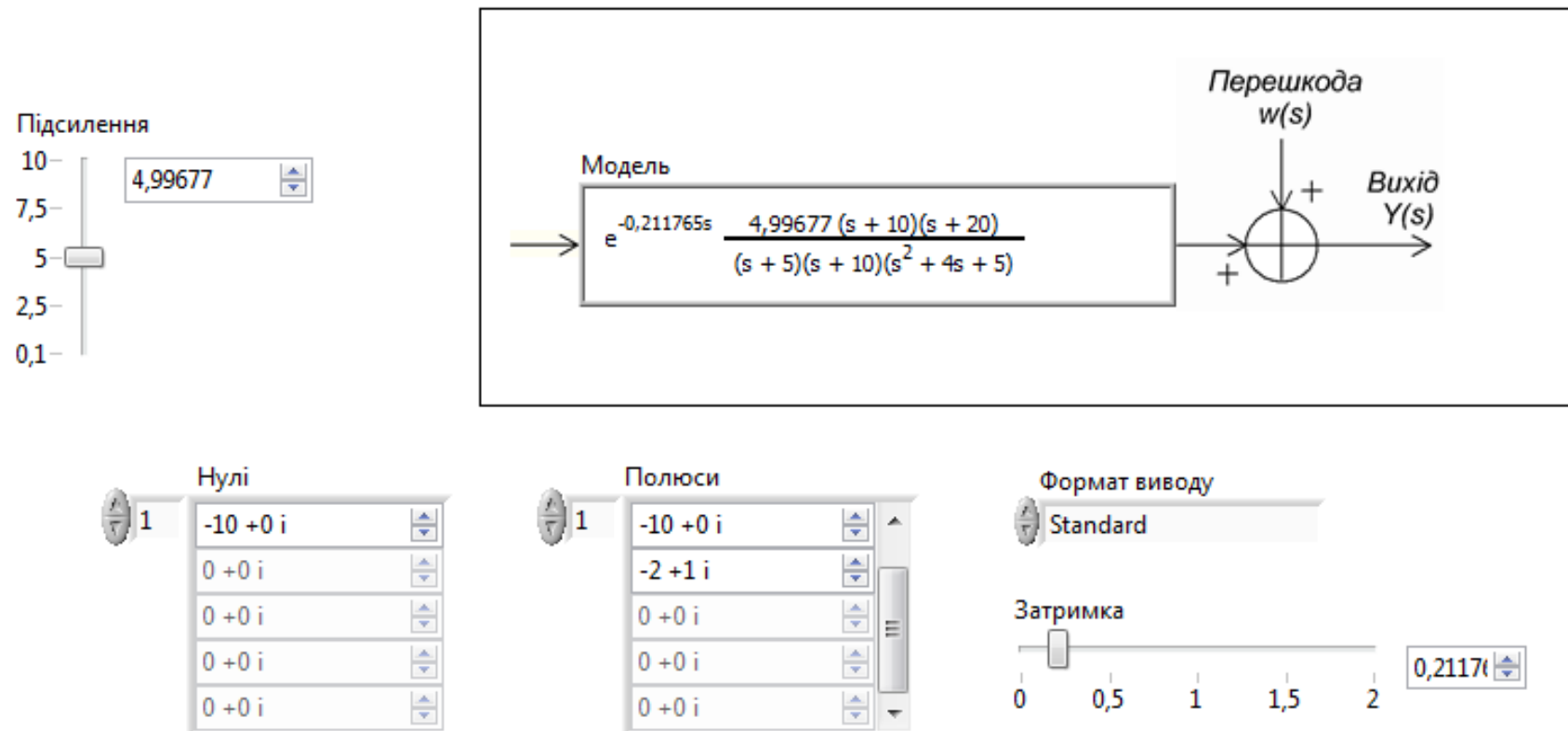


Рисунок В.3 - Зображення екрану при роботі а програми модуля визначення моделі ПХ ВКТ (стандартна форма представлення ПХ)

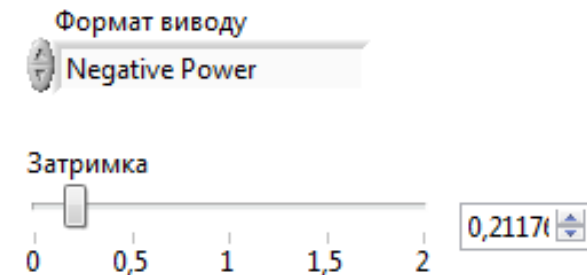
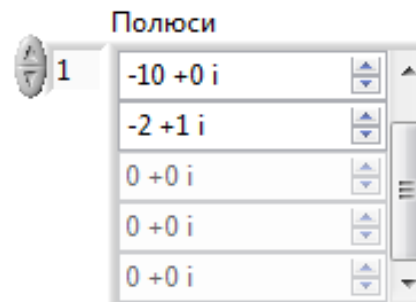
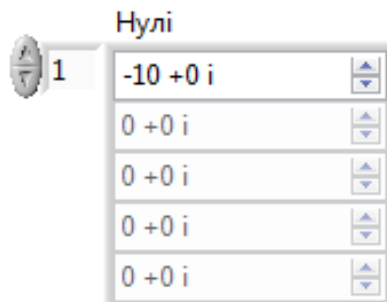
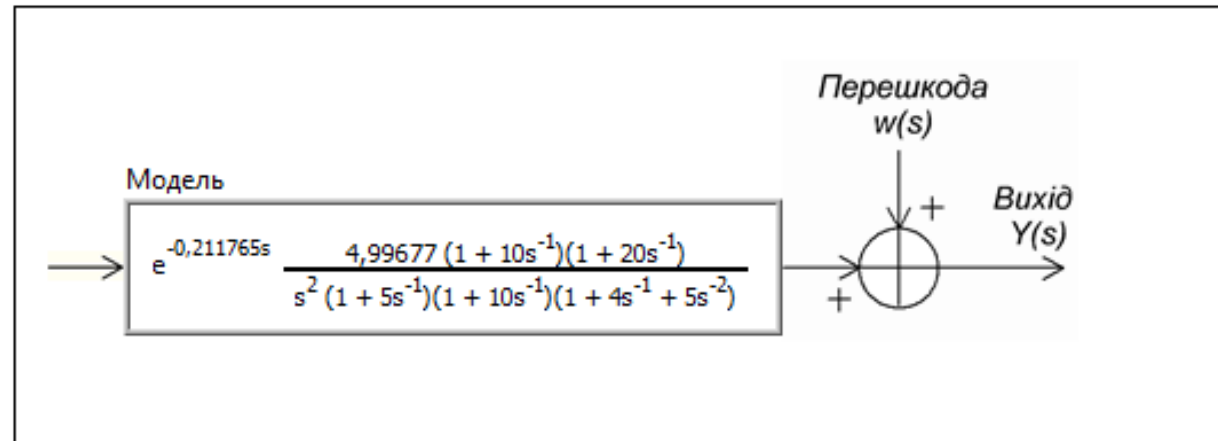
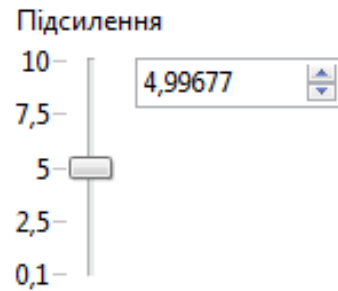


Рисунок В.4 - Зображення екрану при роботі програми модуля визначення моделі ПХ ВКТ (показникова форма представлення ПХ)



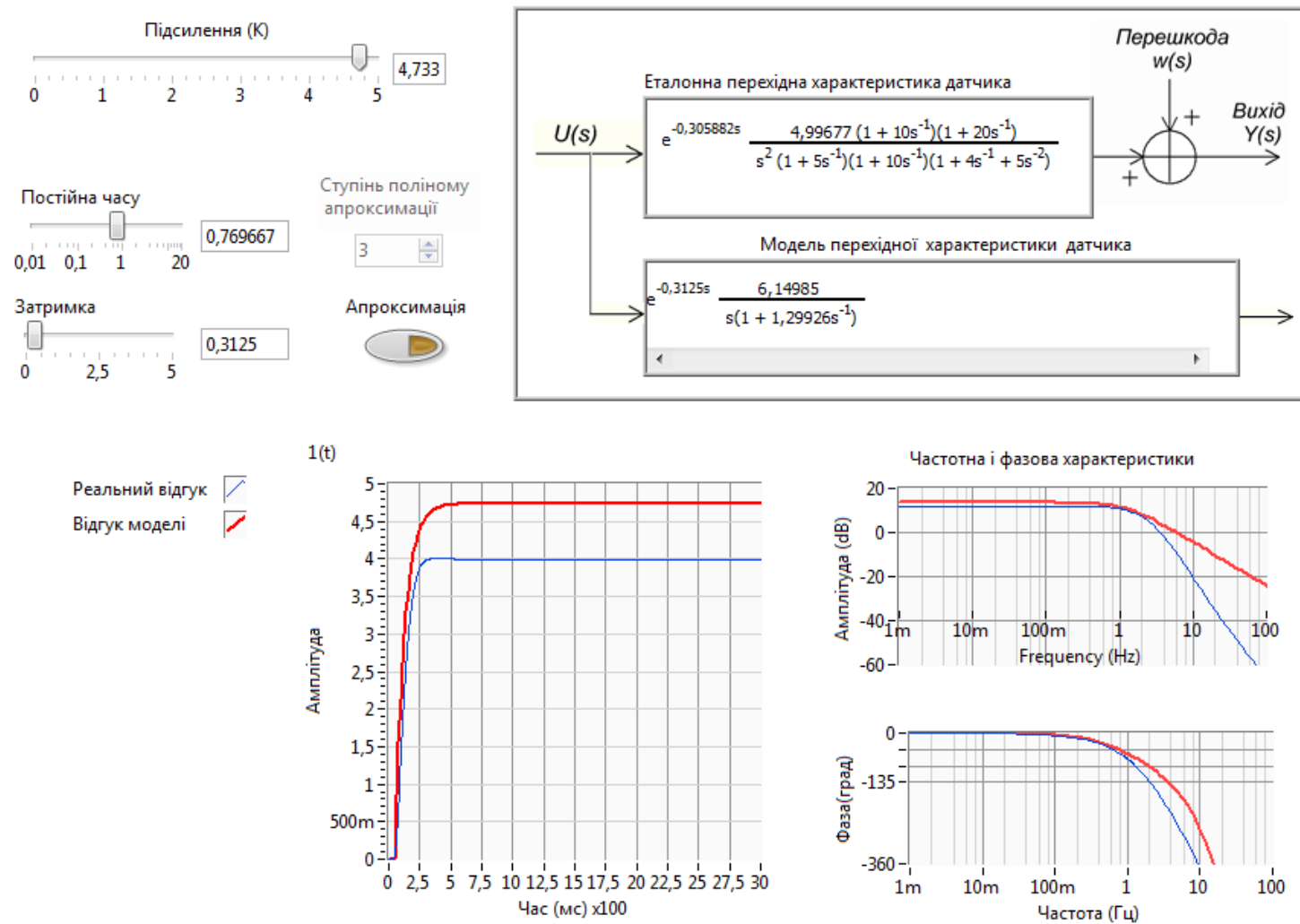


Рисунок В.6 – Зображення екрану при роботі програми модуля наближення моделі до опорної моделі ВКТ





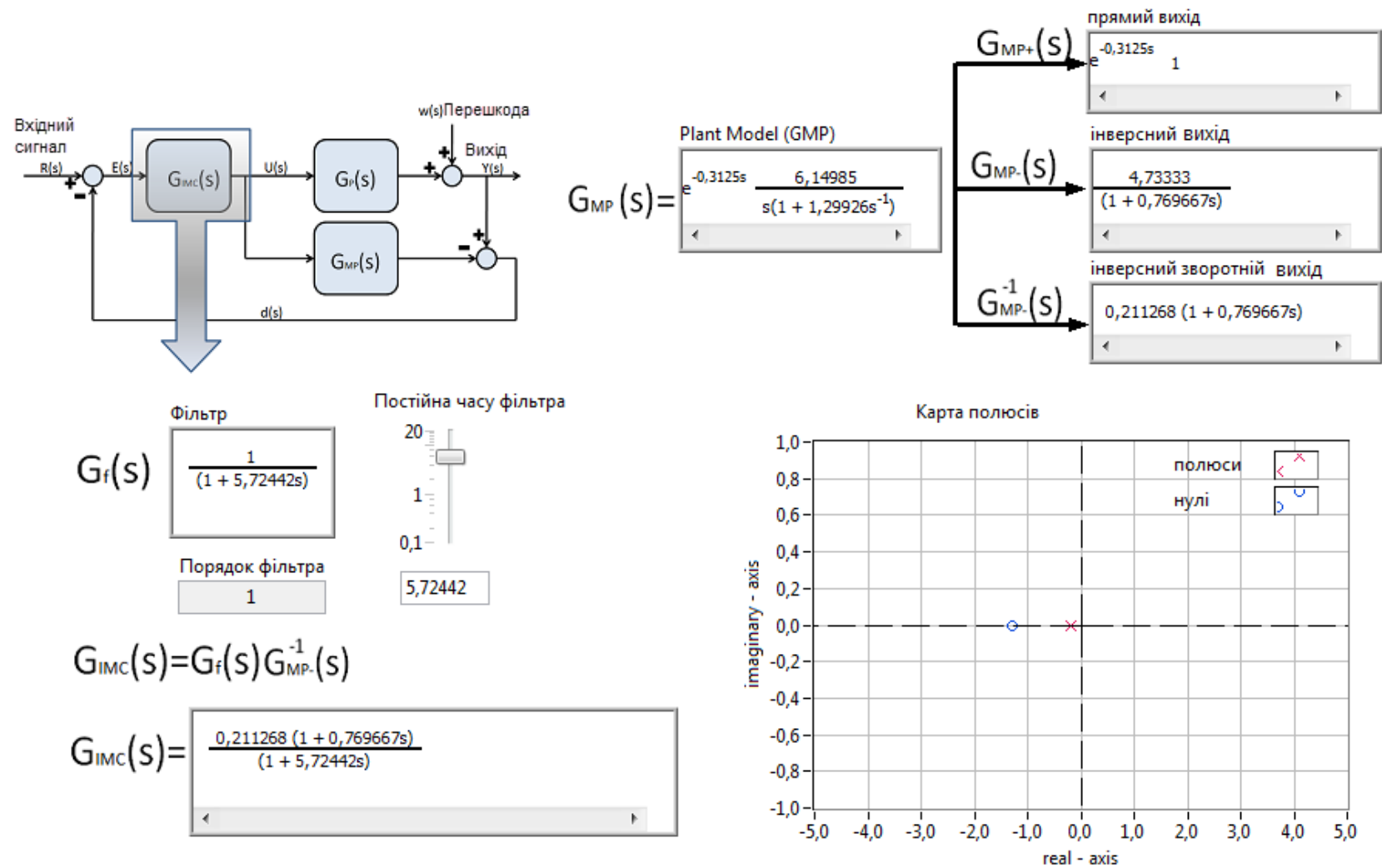


Рисунок В.8 - Зображення екрану при роботі програми внутрішнього контролера якості моделі ПХ ВКТ

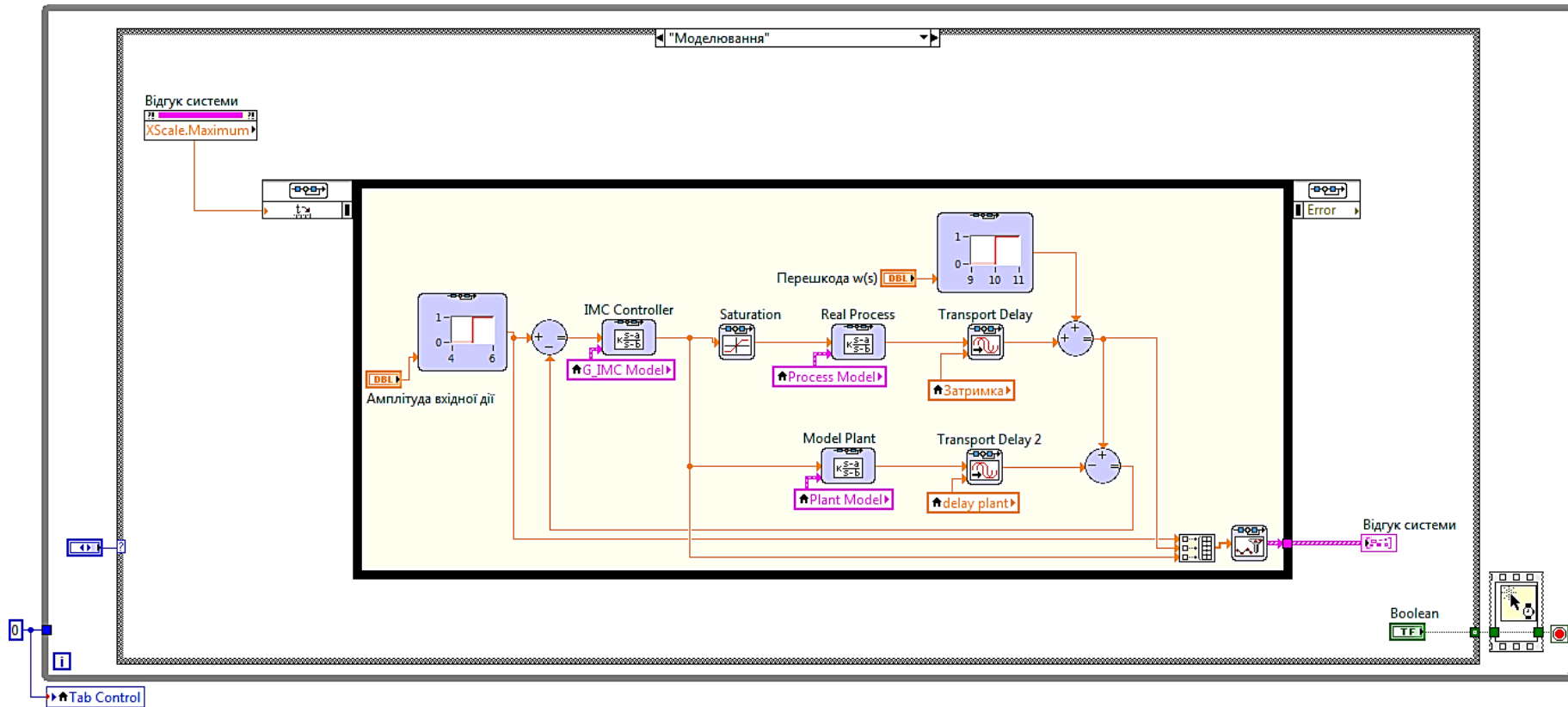


Рисунок В.9 - Блок-схема програми модуля контролю моделі ПХ ВКТ

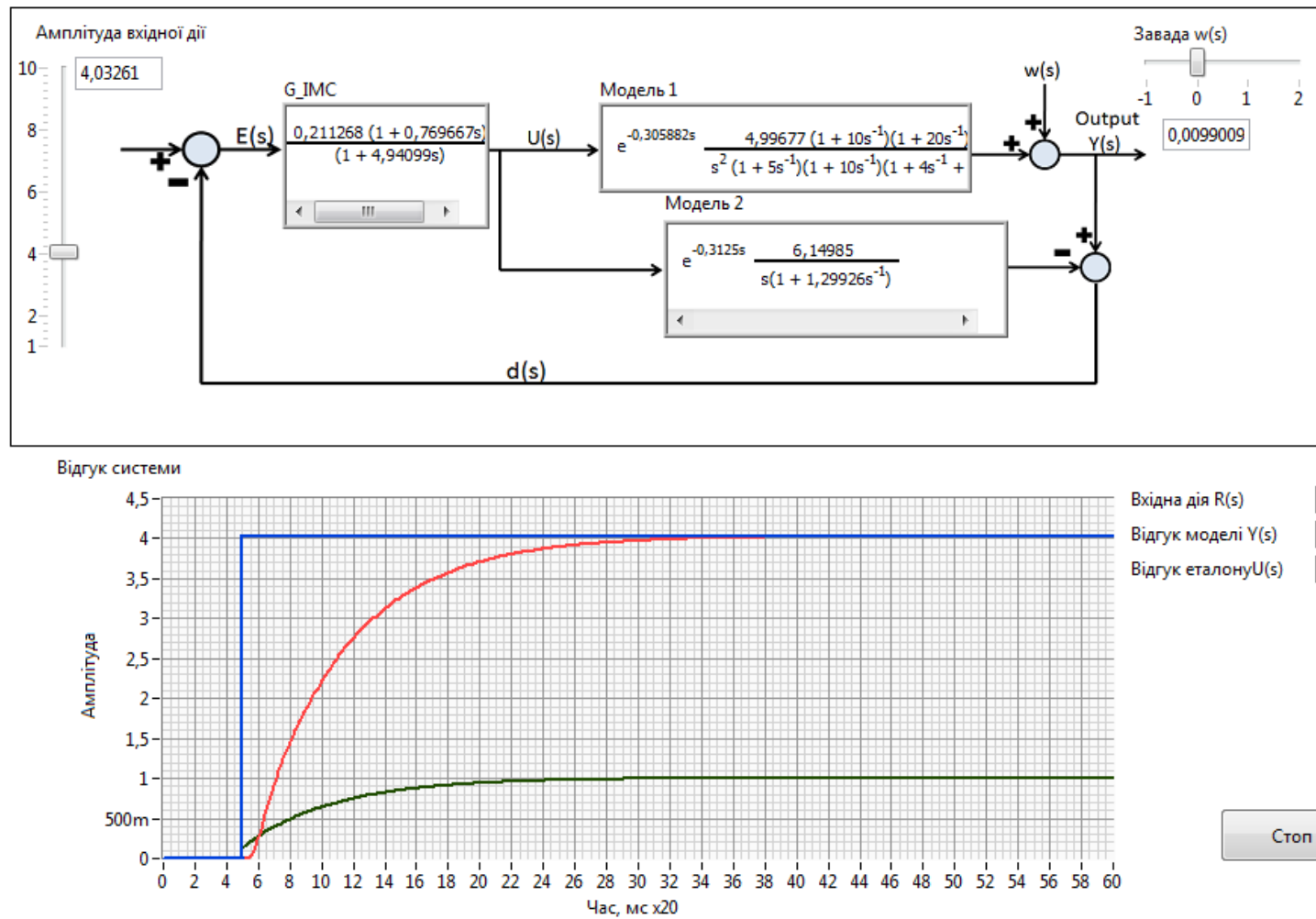


Рисунок В.10 - Зображення екрану при роботі програми контролю моделі ПХ ВКТ

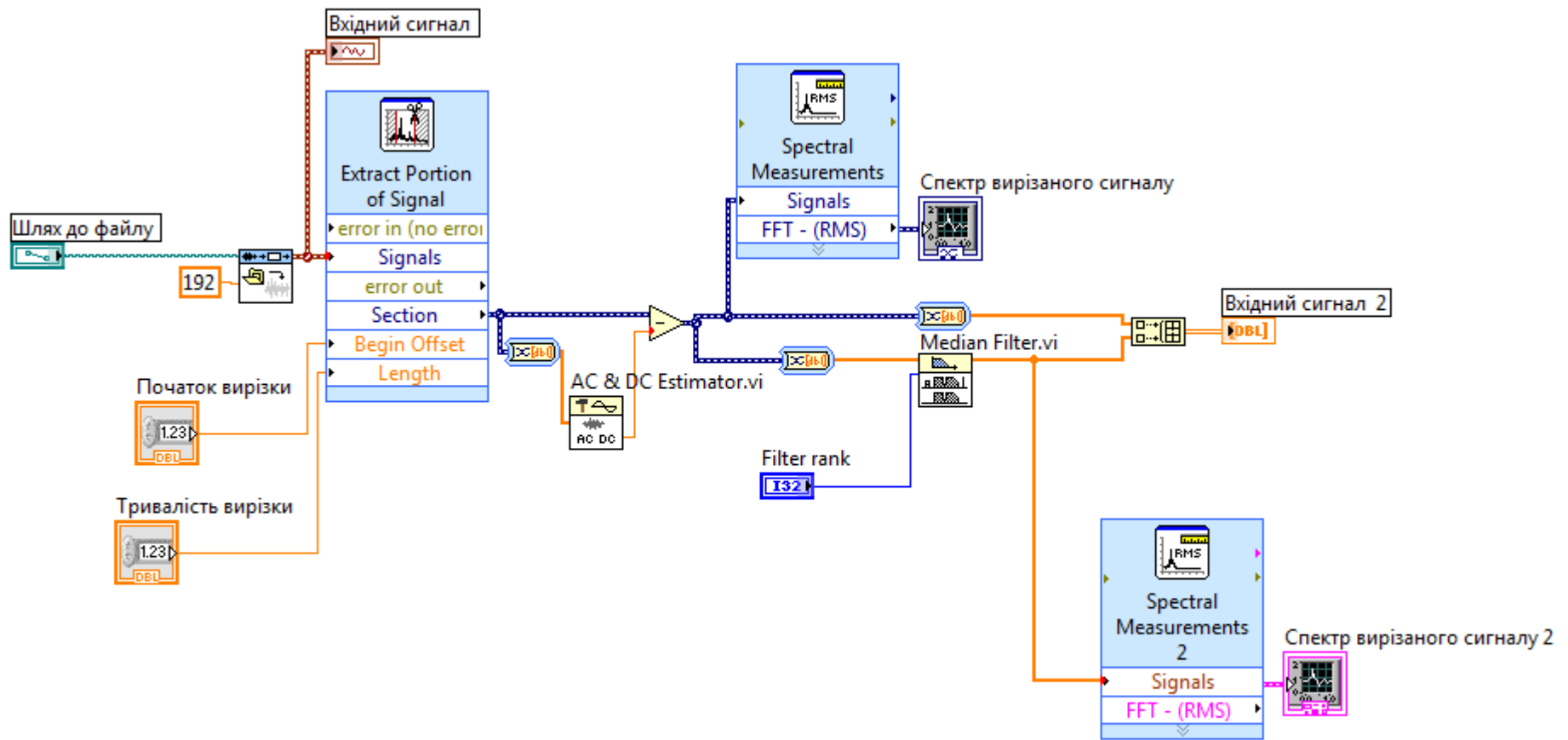


Рисунок В.11 – Блок діаграма програми усунення нестационарності вихідного сигналу ВКТ

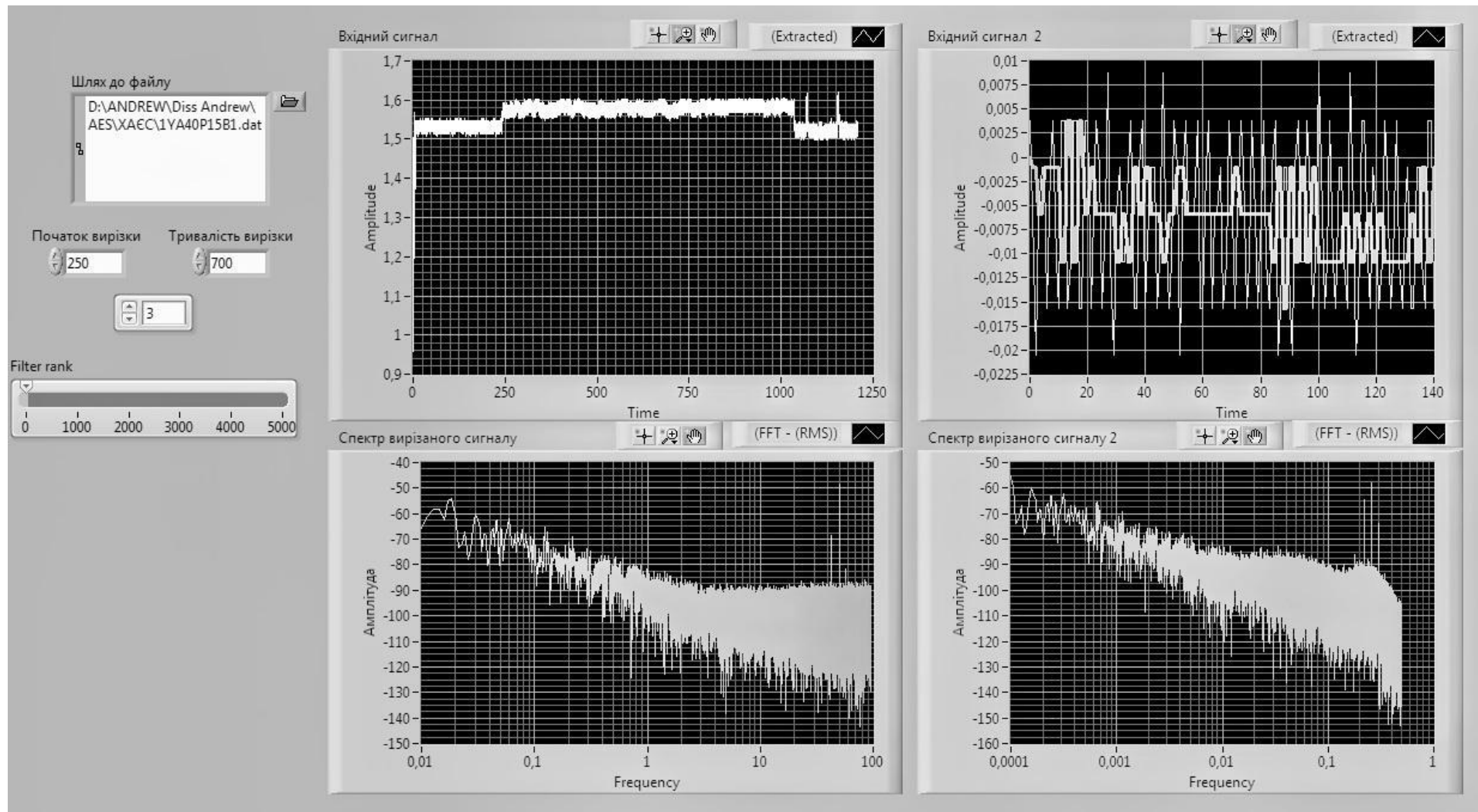


Рисунок В.12 - Зображення екрану при роботі програми усунення нестаціонарності вихідного сигналу ВКТ

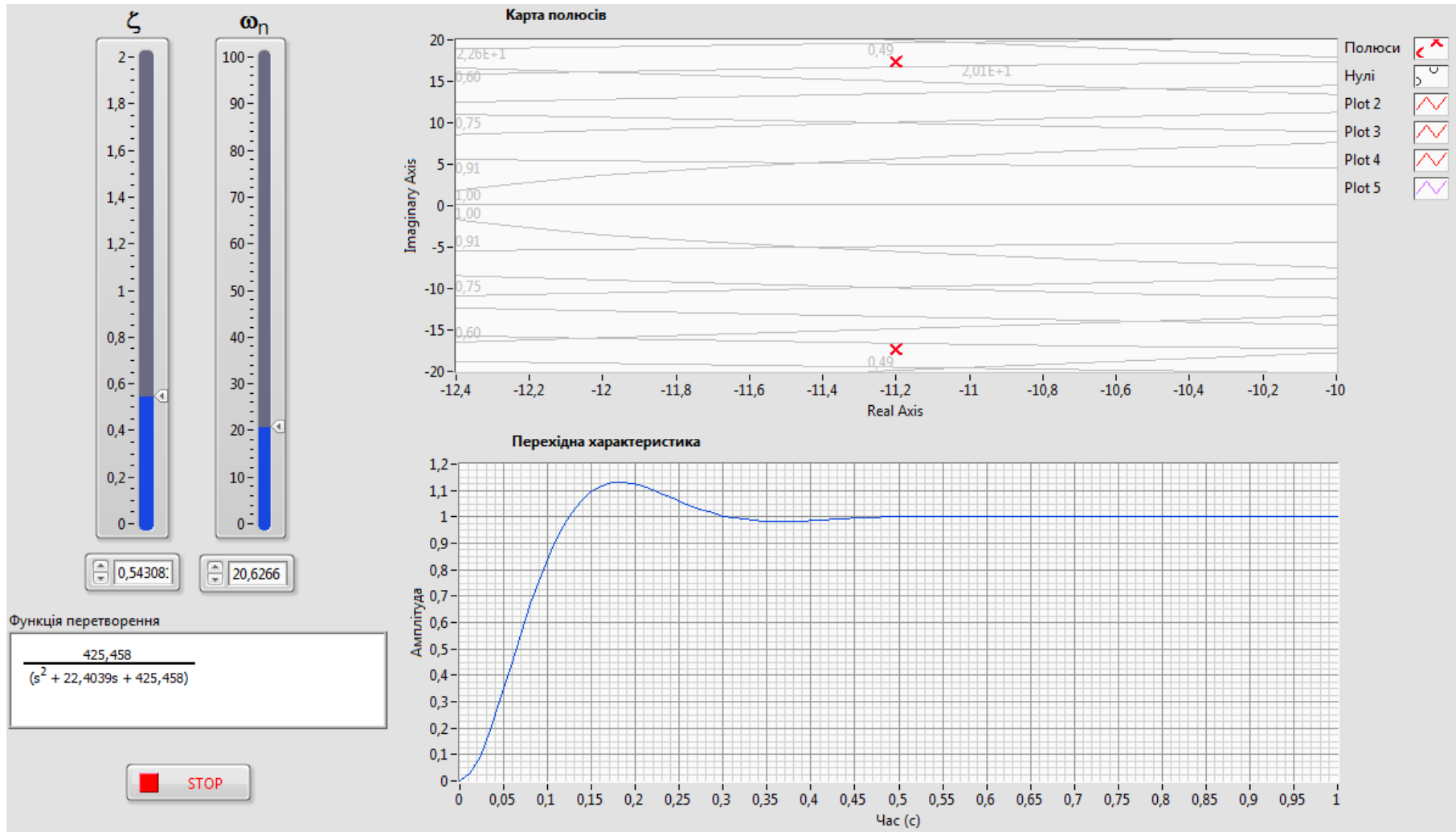


Рисунок В.13 - Зображення екрану при роботі програми контролю опорної моделі ПХ ВКТ

## ДОДАТОК Г

### Обрунтування еквівалентності схеми навчання моделі вимірювального каналу тиску в динамічному режимі схеми навчання в статичному режимі

Еквівалентність двох схем навчання впливає з аналізу для кожної зі схем критерію навчання

$$E = E(IW, LW) = E(iw_0, \dots, iw_n, lw_0, \dots, lw_n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - h^*(k) \right)^2 \quad (\Gamma.1)$$

нейромережевої моделі ВКТ. Для схеми навчання в динамічному режимі критерій даний запишеться в наступному виді:

$$E^{dyn} = E^{dyn}(IW, LW) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - h^*(k) \right)^2. \quad (\Gamma.2)$$

У момент часу  $t_k = k \cdot T$  реальний вихідний сигнал моделі ВКТ, отриманий у процесі навчання, має вигляд:

$$h^* = \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h^*(k-i) + \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j). \quad (\Gamma.3)$$

Тоді з урахуванням виразу (Г.2) критерій (Г.3) прийме вид:

$$E^{dyn} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h^*(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2. \quad (4)$$



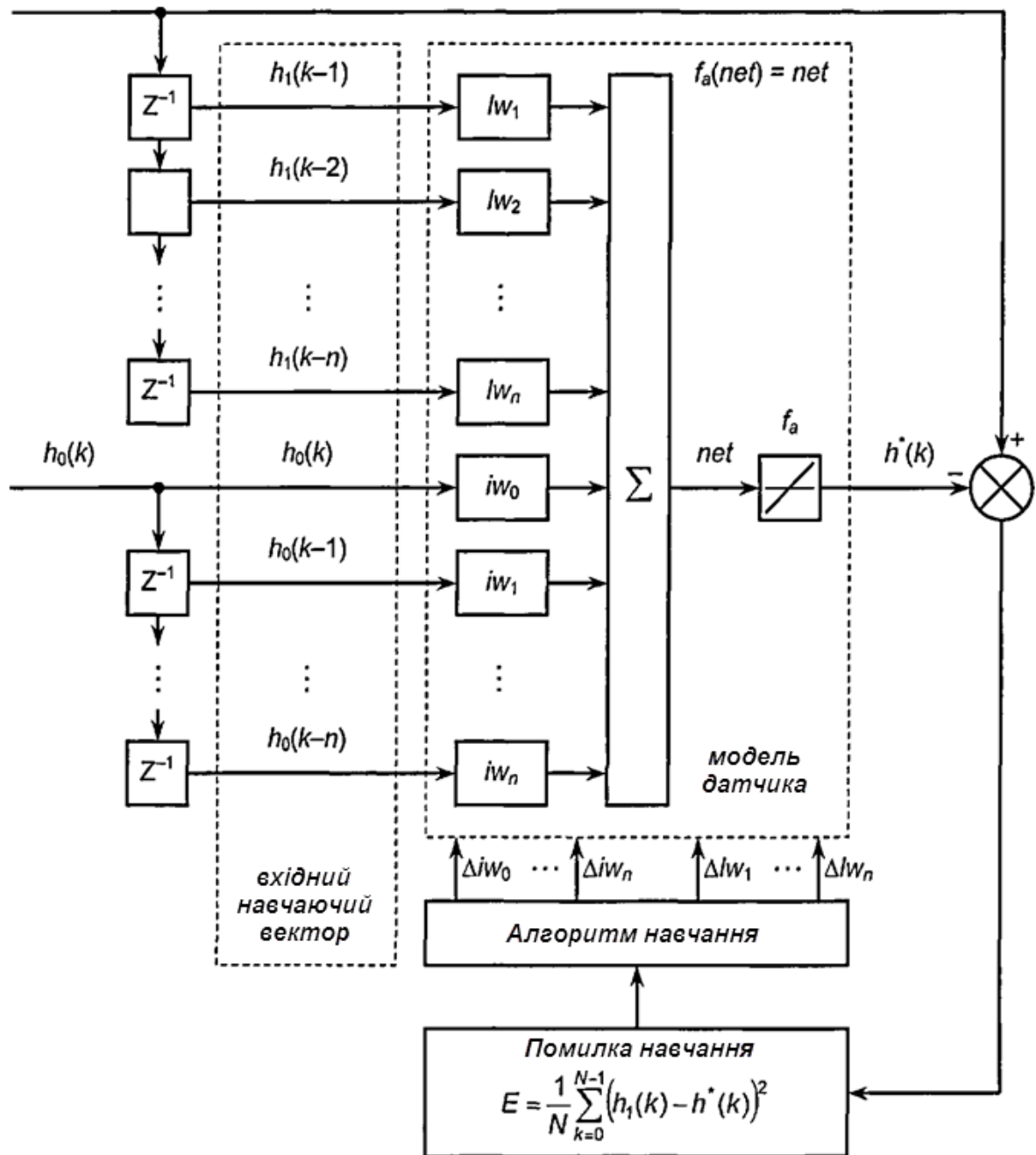


Рисунок Г.1 - Схема навчання нейромережевої ВКТ в статичному режимі

Як видно з виразу (Г.4), критерій навчання мінімізується при наближенні вихідного вектора моделі каналу тиску до цільового вектора, що

означає наближення значень параметрів нейромережевої моделі до значень параметрів дискретної моделі ВКТ:

$$E_{\min}^{dyn} = \lim_{h^*(k) \rightarrow h(k)} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h^*(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right] =$$

$$= \lim_{\substack{lw_i \rightarrow \alpha_i \\ iw_j \rightarrow \beta_j}} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right] \quad (\Gamma.5)$$

Тому остаточно можна записати:

$$E_{\min}^{dyn} = \lim_{\substack{lw_i \rightarrow \alpha_i \\ iw_j \rightarrow \beta_j}} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right] \quad (\Gamma.6)$$

Для схеми навчання в статичному режимі критерій (Г.4) запишеться аналогічно виразу (Г.6):

$$E^{stat} = E^{stat}(IW, LW) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - h^*(k) \right)^2 \quad (\Gamma.7)$$

Таким чином у момент часу  $t_k = k \cdot T$  реальний вихідний сигнал моделі ВКТ, отриманий у процесі навчання, має вигляд

$$h^*(k) = \sum_{i=1}^n lw_i \cdot h_1(k-i) + \sum_{j=0}^n iw_j \cdot h_0(k-j) \quad (\Gamma.8)$$

Тоді з урахуванням виразу (Г.8) критерій (Г.7) прийме вид

$$E^{stat} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n l w_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n i w_j \cdot h_0(k-j) \right)^2. \quad (\Gamma.9)$$

Очевидно, що критерій (Г.9) мінімізується при наближенні значень параметрів нейромережевої моделі до значень параметрів дискретної моделі ВКТ, тому справедливо впливає наступний вираз:

$$E_{\min}^{stat} = \lim_{\substack{l w_i \rightarrow \alpha_i \\ i w_j \rightarrow \beta_j}} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n l w_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n i w_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right]. \quad (\Gamma.10)$$

Оскільки праві частини виразів (Г.6) і (Г.10) рівні, то можна записати:

$$E_{\min}^{stat} = E_{\min}^{dyn} = \lim_{\substack{l w_i \rightarrow \alpha_i \\ i w_j \rightarrow \beta_j}} \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \left( h_1(k) - \sum_{i=1}^n l w_i \cdot h_1(k-i) - \sum_{j=0}^n i w_j \cdot h_0(k-j) \right)^2 \right]. \quad (\Gamma.11)$$

Отриманий вираз означає, що при мінімізації критерію навчання нейромережевої моделі вимірювального каналу тиску по кожній зі схем значення настроюваних параметрів моделі прагнуть до одних і тих самих значень дискретної моделі ВКТ, тому обидві наведені схеми навчання еквівалентні. Останній висновок дозволяє використовувати схему навчання нейромережевої моделі ВКТ в статичному режимі, враховуючи відзначені вище її переваги перед схемою навчання в динамічному режимі.