



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Коваль А. О.

НОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Конспект лекцій

Затверджено методичною радою
факультету, протокол № 1 від 7
«вересня» 2018 р.

Харків
2018

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

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

11 ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТИСКУ

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.

11.1 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 [1,2,3,4,5].

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 дослідженні для визначення повної динамічної (імпульсної або перехідної) характеристики використовується розкладання її в ряд, чи представлення у вигляді формул. Отже, щоб знайти всю характеристику, потрібно визначити, зокрема, коефіцієнти типу a_i , U_0 , $\tau_{ек}$. 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 [2], 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 вхідних дій, то до точності відновлених вхідних сигналів ВКТ встановлюються конкретні вимоги. Кількість членів ряду, 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. При цьому важко провести узагальнення.

Для зменшення залежності параметрів імпульсної характеристики ВКТ від коефіцієнтів ряду Карунена-Лоева основною рекомендацією є використання

надійної апіорної 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 [1,2] методи виявлення і вимірювання швидких змінювань параметрів, де пропонується адаптивне управління смугою пропускання вимірювальної системи при швидкому змінюванні статистичних характеристик вхідної дії.

Оцінимо 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.

11.2 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 рисунку 11.1. На рисунку 11.2а зображено вид шафи спереду, де видно вхідні роз'єми разом з індикаторами наявності сигналів. На рисунку 3.2б 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

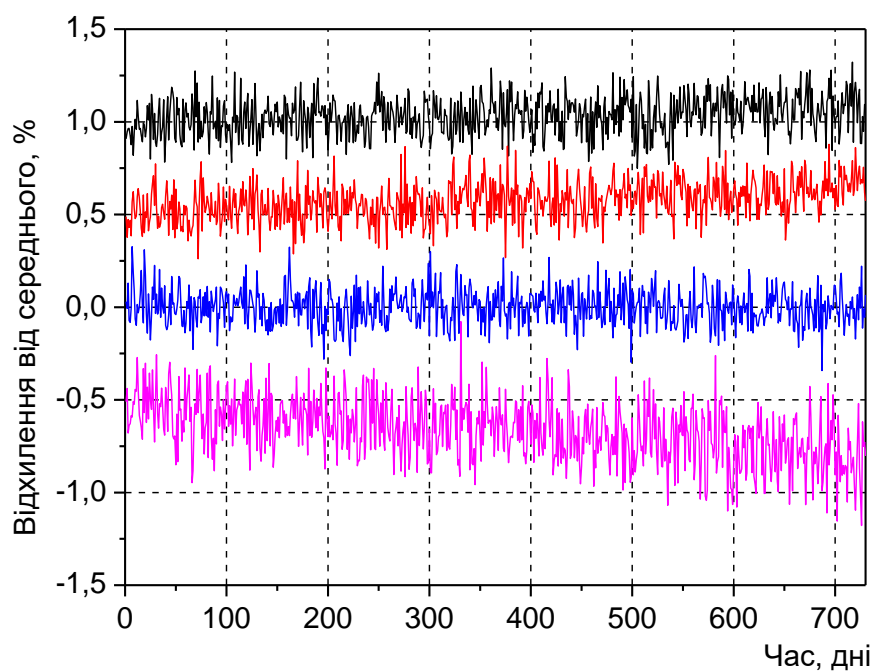


Рисунок 11.1 – Вихідні сигнали взаємодублюємих датчиків вимірювального каналу тиску

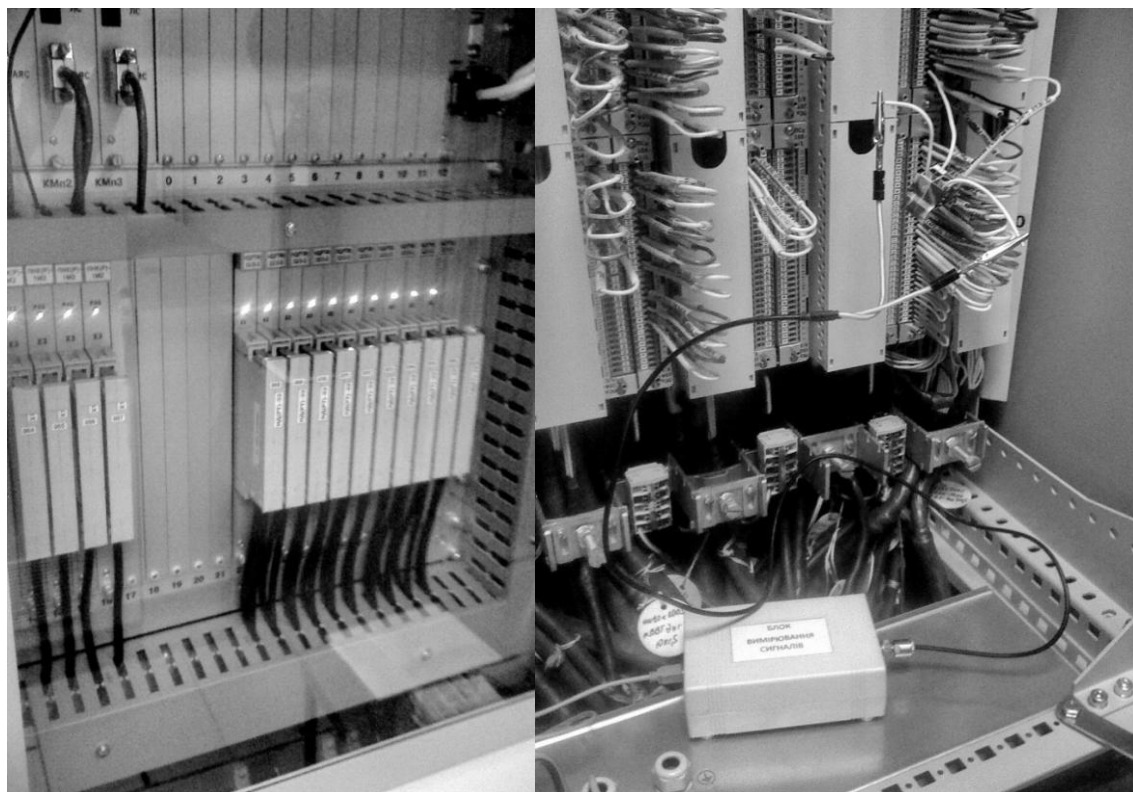


Рисунок 11.2 - Під'єднання блоку обробки вимірюваних сигналів до технологічного шкафа на ТСО

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 рисунку 3.2 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 $R_{ex} \geq 300$ кОм і $C_{ex} \leq 40$ 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.

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 використовувався Ковалем А. О. в експериментах.

При розробці вимірювальних каналів необхідно враховувати похибки всіх його складових: датчиків, перетворювачів (АЦП), пристроїв обробки і відображення інформації. 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 $\varepsilon_{псом}=10^{-6}\%$;
- похибка давача тиску $\varepsilon_p=0.5\%$;
- похибка блоку перетворення сигналів (БПС) для каналу тиску $\varepsilon_{БПС}=0.5\%$.

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 розподілена 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 суму 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: $\sigma_p=0.218\%$, $\sigma_K=0.173\%$, $\sigma_{\text{Ш}}=0,02\%$, $\sigma_{\text{ПЕОМ}}=5.78\times 10^{-6}\%$.

Отже, СКВ похибки ВКТ визначається як:

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

Одна з просумованих складових (σ_p) похибки розподілена нормально, а всі інші (σ_k) – рівномірно. Для визначення ексцесу 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 – σ_{Σ} або ентропійного коефіцієнта k_{Σ} і оцінка P_d довірчої ймовірності буде також мати відповідний інтервал невизначеності. Залежності ентропійного коефіцієнта k_{Σ} від співвідношення сумованих складових і їх ентропійних коефіцієнтів приведені в додатку Б. 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.

11.3 Обґрунтування вимог до точності методів визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску

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 ВКТ, наявність шкідливих неоднорідностей у вимірювальній лінії є причиною нестаціонарності вихідних сигналів ВКТ. В другому розділі приведена методика усунення нестаціонарності 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. Рациональна кількість членів ряду повинна бути $N = 30...40$ (рисунок 11.3а). З іншого боку, для забезпечення бази даних вхідними сигналами при навчанні нейронної мережі тривалість зазначеної реалізації повинна бути великою (до десяти хвилин).

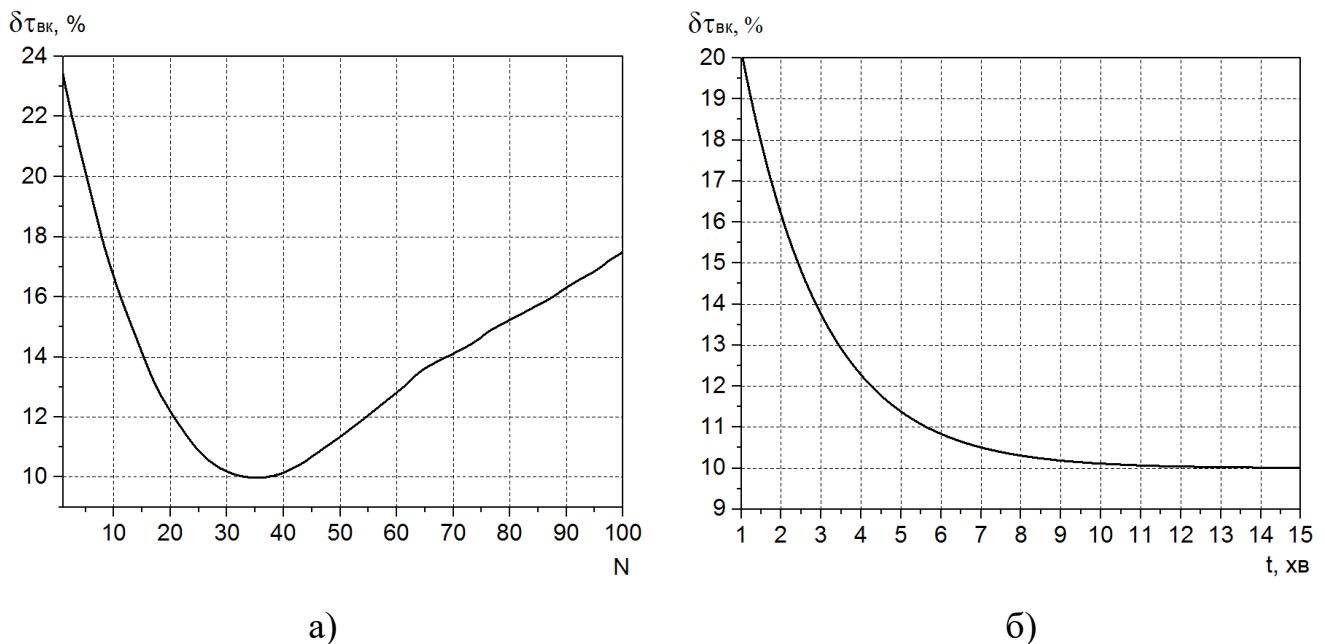


Рисунок 11.3 – Залежність величини відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від кількості членів ряду N , яким представлено вхідний сигнал при використанні методу розв'язання оберненої задачі вимірювань (а) та відносної похибки визначення постійної часу $\delta\tau_{вк}$ від інтервалу спостереження (б)

При такому часі гарантовано усувається нестационарність вихідного сигналу. Як було показано, для забезпечення похибки визначення постійної часу ВКТ методом розв'язання оберненої задачі вимірювань нейромережовим алгоритмом в процесі навчання $\delta\tau_{вк} \leq 15\%$ необхідно, щоб інтервал спостереження вихідного сигналу ВКТ був не менше 10 хвилин. Такий час дозволяє досягнути мінімальної похибки визначення постійної часу нейронною мережею (рисунок 11.3б).

На точність визначення постійної часу впливає рівень похибок вимірювання вихідних сигналів ВКТ. Чутливість удосконалених методів до систематичних δy_c та випадкових δy_e похибок вимірювання вихідних сигналів є різною (рисунок 11.4).

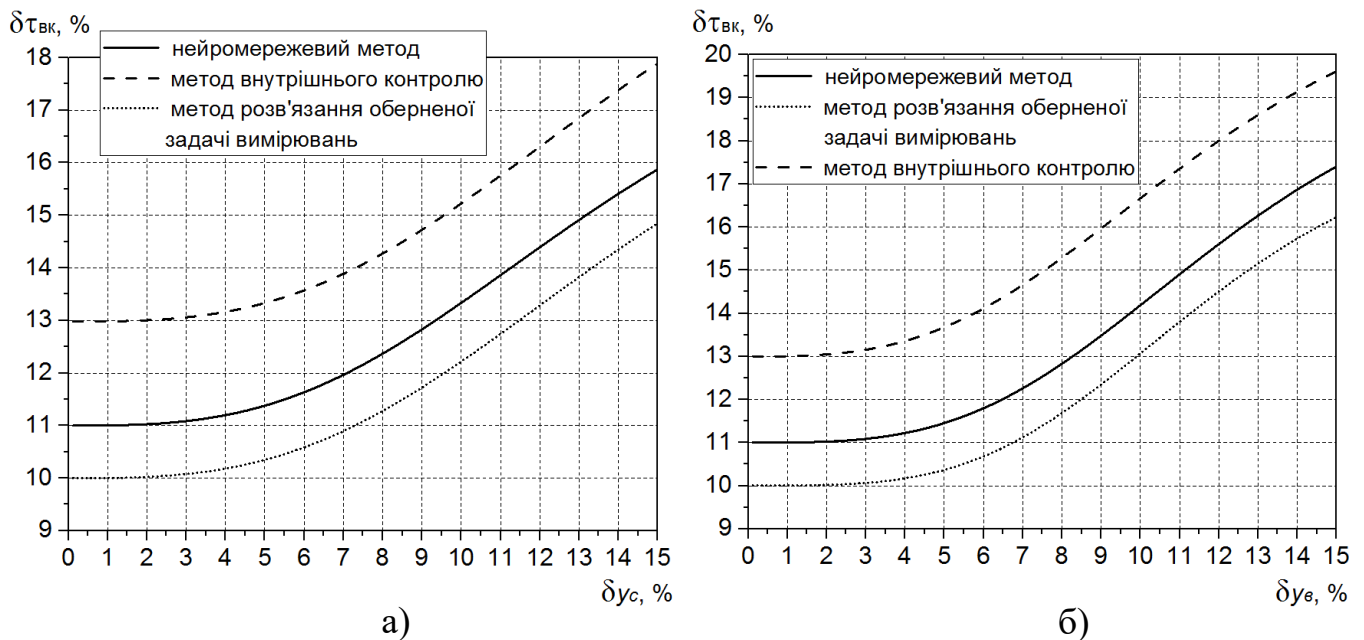


Рисунок 11.4 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від величини відносних випадкової δy_e (а) та систематичної δy_c (б) похибок вимірювання вихідного сигналу ВКТ

При наявності надійних апріорних даних найменші похибки визначення постійної часу $\delta\tau_{вк}$ досягаються в методі оберненої задачі вимірювань та нейромережовому 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

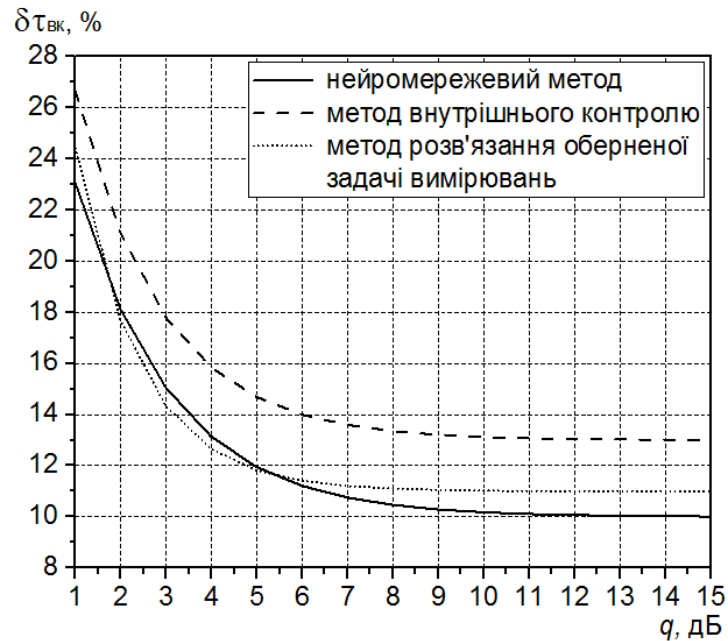
досягнення похибки визначення постійної часу ВКТ, що не перевищує 10 % ($\delta\tau_{\text{вк}} = 10\%$) необхідно, щоб систематична похибка вимірювання вихідного сигналу була не більшою 3,5% ($\delta y_c = 3.5\%$), а випадкова похибка приблизно 1% ($\delta y_\theta = 1\%$). Для методу внутрішнього контролю ці цифри становлять: $\delta\tau_{\text{вк}} = 13\%$, $\delta y_c = 3\%$, $\delta y_\theta = 3\%$, а для нейромережевого методу: $\delta\tau_{\text{вк}} = 11\%$, $\delta y_c = 3.7\%$, $\delta y_\theta = 5\%$.

Рівень зазначених похибок істотно залежить від відношення сигнал/шум на виході ВКТ (рисунок 11.5а). Мінімально допустиме відношення сигнал/шум повинно перевищувати 10 дБ, щоб задовольнити вимогам до похибки $\delta\tau_{\text{вк}} = 10\%$ для всіх розглянутих в роботі методів.

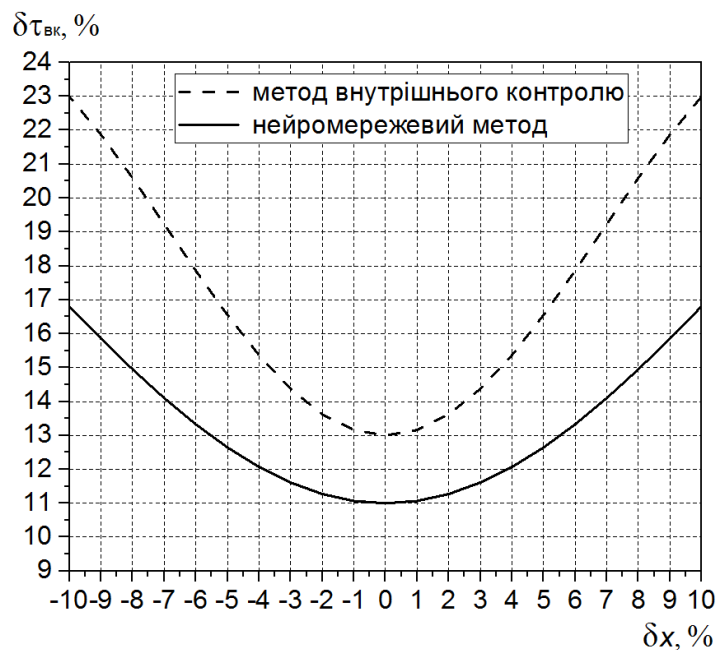
Оскільки в основу визначення постійної часу ВКТ покладено наявність бази даних відновлених вхідних сигналів, то необхідно висувати вимоги до точності їх відновлення. Залежність похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{\text{вк}}$ від похибки відновлення вхідних сигналів отримана шляхом математичного моделювання і показана на рисунку 11.5б. Якщо така похибка досягає 10%, то похибка визначення постійної часу ВКТ зростає приблизно на 50% (рисунок 11.5б). Для забезпечення похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{\text{вк}} \pm 1.5\%$ похибка відновлення вхідного сигналу δx 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 графіків зображених на рисунках 11.3...11.5 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 нестационарності випадкових процесів тиску потрібно визначати якість усунення зазначеної нестационарності, яка може впливати на точність визначення постійної часу. Критерій залишкової нестационарності у відсотках встановимо у вигляді: $\xi = \eta_{\text{тр}} + \eta_{\text{нер}}$, де

$\eta_{тр}$ - некомпенсована трендова складова нестационарного процесу;
 $\eta_{пер}$ - некомпенсована періодична складова нестационарного процесу. Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від залишкової нестационарності ξ приведена на рисунку 11.6.



(а)



б)

Рисунок 11.5 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від відношення сигнал/шум q (а) та від сумарної похибки відновлення вхідного сигналу δx (б)

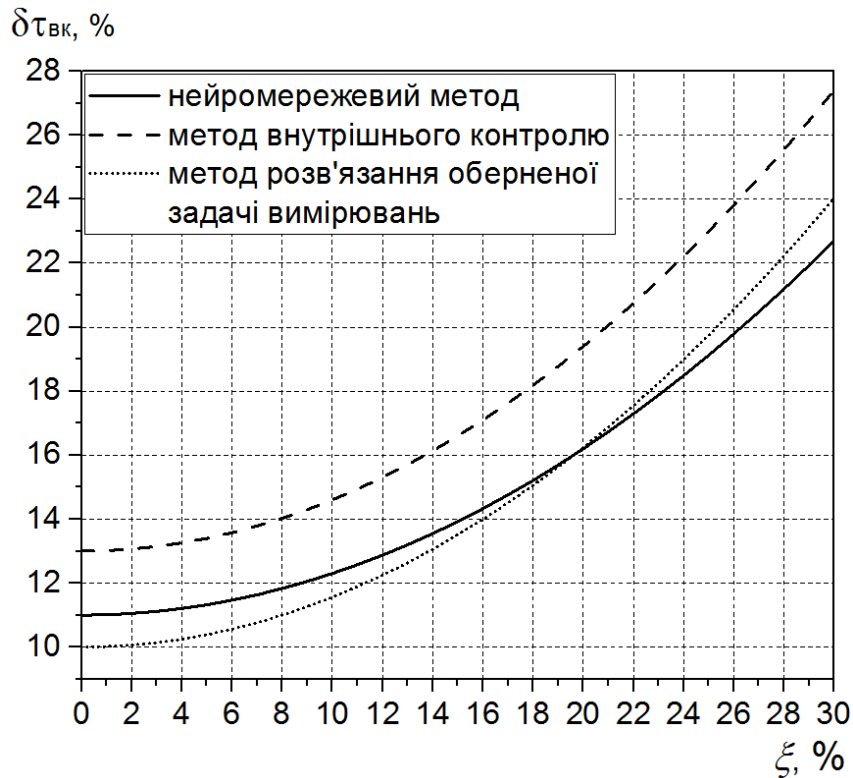


Рисунок 11.6 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу ВКТ $\delta\tau_{вк}$ від залишкової нестационарності ξ технологічного процесу

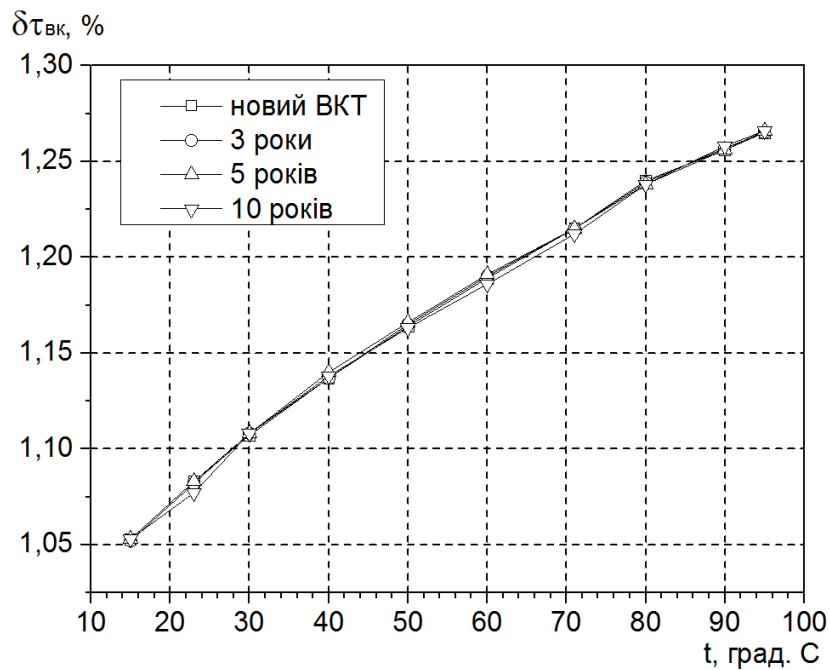


Рисунок 11.7 – Залежність відносної похибки визначення постійної часу нейромережевим методом від температури вхідної дії та "старіння" ВКТ

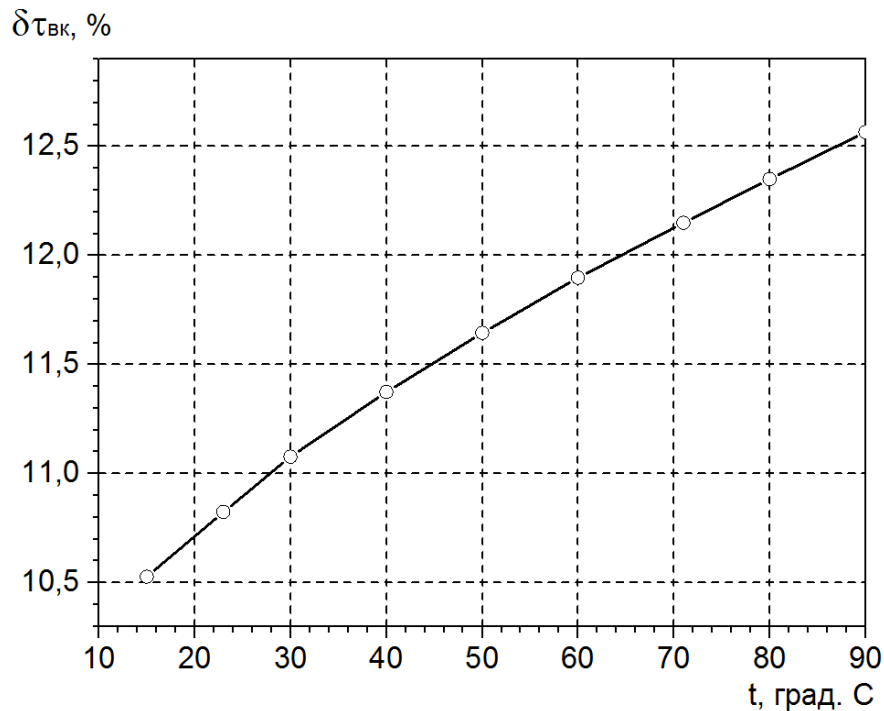


Рисунок 11.8 – Залежність усередненої відносної похибки визначення постійної часу ВКТ методом оберненої задачі вимірювань від температури вхідної дії

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 визначати постійну часу з точністю $\delta\tau_{вк} \leq 1.3\%$ (рисунок 11.7). Метод оберненої задачі вимірювань забезпечує визначення $\tau_{вк}$ у всьому температурному діапазоні теплоносія постійної часу з відносною похибкою $\delta\tau_{вк} \leq 12.5\%$ (рис.11.8).

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 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 розглянутих в дипломній роботі 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 ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваль А. О. Визначення постійної часу датчика при розв'язанні оберненої задачі вимірювань / А. О. Коваль, О. В. Полярус, Є. О. Поляков,
2. Коваль А. О. Динамічна нейромережева модель первинного перетворювача / А. О. Коваль, О. В. Полярус, А. О. Подорожняк // Вісник НТУ "ХП". – 2014. – №35. – С. 152–155.
3. Ming T. Internal Model Control / Ming., 2012. – (Chemical and Process Engineering).
4. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для оцінки адекватності моделі вимірювального перетворювача / А. О. Коваль // ІХ МНПК "Метрологія та вимірювальна техніка". – 2014. – С. 23-26.
5. Коваль А. О. Використання методу внутрішнього контролю для досліджень перехідних характеристик давачів тиску / А. О. Коваль // Український метрологічний журнал. – 2015. – №1. – С. 64–67.
6. 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.
7. Коваль А. О. Вплив "старіння" датчиків температури на їх динамічні характеристики / А. О. Коваль, О. В. Полярус // ХУПС. – 2014. – №6. – С. 123–126.
8. 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 "КП", ХНУРЕ, ННЦ "Інститут метрології". – 2014. – С. 79–83.
9. 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 "ХП". – 2015. – №35. – С. 152–156.

10. 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 "ХП". – 2010. – С. 98–105.

ДОДАТКИ

Додаток А

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]

$$\omega_n = \frac{\pi U_a}{2L} \sqrt{\frac{V_{FS}}{\frac{\pi^2}{4} [BC_t + \frac{BV_b}{\gamma P_b} + V_t] + V_{FS}}}, \quad (A.1)$$

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;

γ - 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 ΔV_t в

порожнині датчика до змінювання тиску, що породжує виникнення ΔV_t (для ідеальної рідини $C_t = 0$).

З формули (А.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:

$$y(t) = K \left[1 - \frac{\omega_n}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \arctg(\frac{\omega_d}{\alpha})) \right], \quad (\text{A.2})$$

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 ζ визначається за формулою:

$$\zeta = \frac{16\nu}{\omega_n d_s^2},$$

де ν - кінематична в'язкість рідини;

d_s - внутрішній діаметр вимірювальної лінії.

Аналіз формули (А.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

диференційними рівняннями першого порядку. Результат зазначених міркувань приведений на рисунку А.1

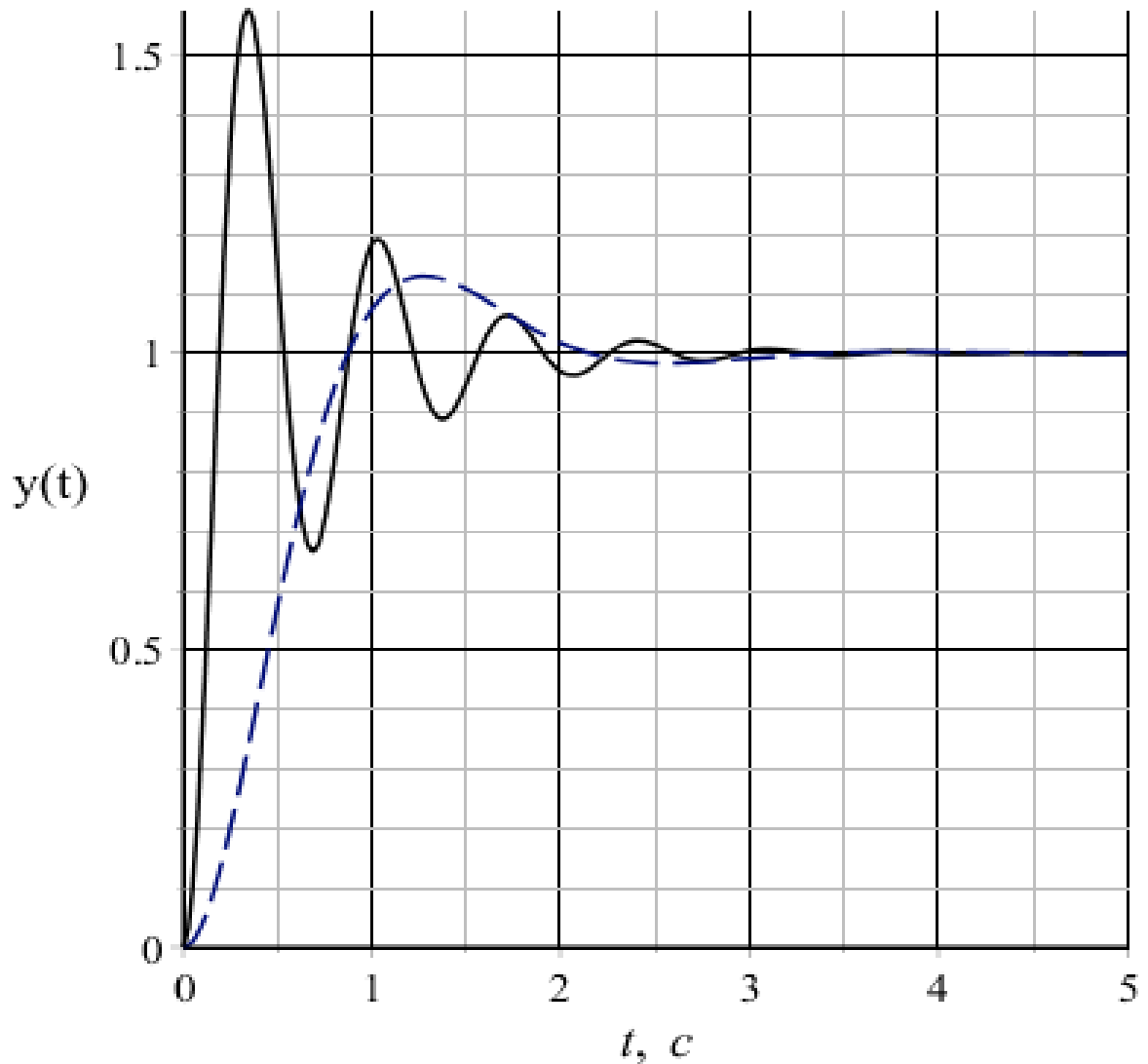


Рисунок А.1 - Динамічний відгук на виході вимірювальної лінії при різних значеннях піддатливості датчика тиску: $C_t = 0,01$ (суцільна лінія) і $C_t = 0,1$ (пунктирна лінія)

Графіки отримані при наступних числових значеннях параметрів:

$$U_a := 1481; L := 10; V_{fs} := 0.0785; B := 2 \cdot 10^9; V_t := 0.2; \gamma_a := 0.8;$$

$$P_b := 10^9; V_b := 0.0005; K := 1;$$

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

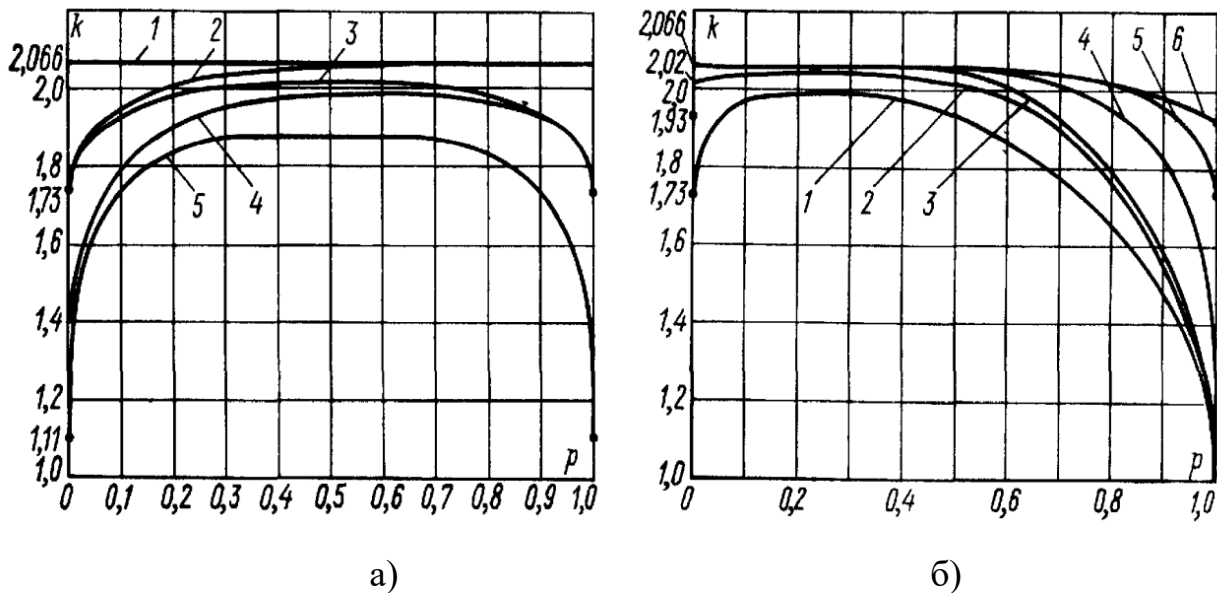


Рисунок Б1 - Графіки залежності ентропійного коефіцієнта $k\Sigma$ від співвідношення сумованих складових і їх ентропійних коефіцієнтів:

- а) крива 1 - відповідає сумуванню двох складових розподілених нормально; крива 2 - рівномірна з нормальною; крива 3 - дві складові розподілені рівномірно; крива 4 - арксинусоїдальна і рівномірна; крива 5 - два арксинусоїдальних розподіли;
- б) криві 1-3 відповідають сумуванню рівномірного, трикутного і нормального розподілу з дискретним двохзначним розподілом; криві 4-6 - сумування нормального розподілу відповідно з арксинусоїдальним, рівномірним і експоненціальним.