

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ МАТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Черкас К. В., Літвінов К. А

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

Стенцель И. И., Поркуян О.В., Черкас К. В., Літвінов К. А.

INVESTIGATION OF DEVELOPMENTS MEASURING CONTROL AND MANAGEMENT MATRIX METHOD

Stencel Y.I., Porkoyan O.V., Cherkas K. V., Litvinov K. A.

При дослідженні систем автоматичного контролю та управління вихідна координата може змінюватися як за часом, так і впливовими координатами, котрих може бути декілька. Сучасна теорія похибок вимірювання, як правило, базується на інваріантно-автономному принципі дослідження похибок вимірювання. У реальних системах вимірювального контролю та управління мають місце похибки, котрі виникають при одночасній зміні як контролюючого параметра, так і різних впливових параметрів, котрі знаходяться в межах, зумовлених технологічними умовами. Для дослідження таких похибок вимірювання та

управління пропонується метод інтегральної матриці, котрий дозволяє за результатами поточного контролю технологічних параметрів визначити похибку вимірювання, що приведе до підвищення якості роботи технологічного процесу. Суть методу полягає в тому, що дія контролюючого параметра та впливових параметрів на вихідну координату надається відповідними гілками вимірювального перетворення, котрі об'єднуються в матрицю, а похибки вимірювання визначаються інтегральним методом як різниця площин дійсних та поточних значень вихідної координати.

При исследовании систем автоматического контроля и управления выходная координата может изменяться как за временем, так и возмущающими координатами, которых может быть много. Современная теория погрешностей измерения, как правило, базируется на инвариантно-автономном принципе исследования погрешностей измерения. У реальных системах измерительного контроля и управления имеют место погрешности, которые возникают при одновременном изменении как контролирующего параметра, так и различных возмущающих параметров, которые находятся в границах, обусловленных технологическими условиями. Для исследования таких погрешностей измерения и

управления предлагается метод интегральной матрицы, который позволяет по результатам текущего контроля технологических параметров определить погрешность измерения, что приведет к повышению качества работы технологического процесса. Сущность метода состоит в том, что действие контролирующего параметра и возмущающих параметров на выходную координату представляется соответствующими ветками измерительного преобразования, которые объединяются в матрицу, а погрешности измерения определяются интегральным методом как разность объемов действительных и текущих значений выходной координаты.

In the study of automatic control and management, the output coordinate can vary both over time and perturbing coordinates, which can be beaten a lot. The modern theory of measurement errors, as a rule, is based on the invariant-autonomous principle of investigating measurement errors. Real measuring and control systems have errors that occur when the control parameter changes simultaneously, and various perturbing parameters, which are within the limits determined by technological conditions. To study such measurement and control errors, we propose a method of an integral matrix, which allows to determine

Ключові слова: вимірювання, похибка, параметр, інтеграл, матриця, перетворення, метод, функціонал, контроль, управління.

Ключевые слова: измерение, погрешность, параметр, интеграл, матрица, преобразование, метод, функционал, контроль, управление.

Keywords: measurement, error, parameter, integral, matrix, transformation, method, functional, control, management.

Технологічний процес не залежно від галузі промисловості (хімічній, нафтопереробній, енергетичній, машинобудівній тощо) виконується згідно з регламентом, у котрому приводяться фізичні параметри, притаманні тому чи іншому технологічному процесу, наприклад, температура, тиск, рівень, витрати, концентрації тощо. У технологічному регламенті ці параметри нормуються з відповідними відхиленнями в наступних формах:

1. Вказується дозволений діапазон зміни контрольованого фізичного параметра, наприклад, від «а» до «б» (рис.1), де «а= $A-c_1$ » - мінімальне граничне значення технологічного параметра; «б= $A+c_2$ » - максимальне граничне значення параметра. У цьому разі номінальне значення контрольованого технологічного параметра є невідомим і може бути рівним як мінімально граничному значенню «а», так і максимальному граничному значенню «б». У багатьох технологічних регламентах хімічних, нафтопереробних та машинобудівних галузей промисловості діапазон зміни фізичного параметра вказується у такій формі – « $A+c_1$ », або « $A-c_2$ », де A - номінальне значення параметра; c_1, c_2 - допустимі граничні відхилення параметра « A ». Як правило, таке нормування допустимої зміни технологічного параметра є характерним для випадків, коли статична характеристика технологічного процесу (далі об'єкту вимірювального контролю - ОВК) є різко нелінійною або знизу, або зверху як показано на рис. 1, криві 1 і 3.

the measurement error by the results of the current monitoring of technological parameters, leading to an increase quality of work technological process. The essence of the method is, that the action of the controlling parameter and perturbing parameters on the output coordinate is represented by the corresponding branches of the measurement transformation, which are combined into a matrix, and measurement errors are determined integrally by the difference of the volumes of the actual and current values of the output coordinate.

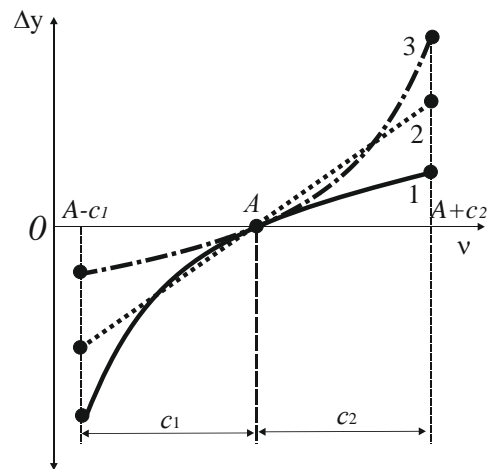


Рис. 1 – Дозволений діапазон зміни технологічного параметра

2. Вказується дозволений діапазон зміни контрольованого фізичного параметра таким чином: $A_{-c_1}^{+c_2}$, де c_1 – нижня гранично дозволена зміна технологічного параметра « A », c_2 – верхня гранично дозволена зміна цього параметра. Якщо $c_1=c_2=c_0$, то цей дозволений діапазон зміни технологічного параметра записується у вигляді: $A_0 \pm c_0$, де A_0 – номінальне значення технологічного параметра. Якщо $c_1 \neq c_2$, то це свідчить, що статична характеристика є нелінійною. Якщо $c_1 > c_2$, то значна нелінійність статичної характеристики ОВК спостерігається при підвищенні фізичного параметра технологічного процесу, а при $c_1 < c_2$

навпаки – нелінійність ОВК збільшується при зменшенні цього параметра. Якщо $c_1 = c_2$, то приймається, що статична характеристика ОВК у гранично допустимому діапазоні вимірювального контролю є лінійною або квазілінійною.

На практиці ці гранично допустимі зміни тої чи іншої фізичної величини у визначеному в технологічному регламенті діапазоні нормальної роботи ОВК контролюється за показаннями вимірювальних приладів (давачів), котрі мають свій діапазон вимірювання і характеризуються відповідною похибкою (абсолютною, відносною або приведеною до певного діапазону). Допустимі за технологічним регламентом діапазони зміни фізичного параметра ОВК можуть бути як дуже малими, так і дуже великими. Наприклад, при конверсії природного газу у паровому риформінгу виробництва аміаку при номінальній температурі конверсії $T_0=980^{\circ}\text{C}$ допустиме граничне відхилення температури дорівнює $\pm 10^{\circ}\text{C}$, що становить 1,02% від номінального значення температури конверсії. Як відомо [1, 2], для вимірювального контролю температури $T_0=980^{\circ}\text{C}$ необхідно використати термометр з абсолютною похибкою не меншою $0,2^{\circ}\text{C}$. З метою вирішення такої задачі діапазон вимірювання (ДВ) засобу вимірювального контролю (ЗВК) необхідно зменшити навколо номінального значення температури, яке дорівнює 980°C . Як правило, ДВ устанавлюється в межах від 950°C до 1000°C і становить 50°C , а граничне відхилення температури конверсії дорівнює 20%, що дозволяє використовувати ЗВК з абсолютною похибкою вимірювання 4°C . Рівень рідини в технологічних апаратах (випарних установках, ректифікаційних колонах, абсорберах, сепараторах, ємностях для зберігання рідких хімічних речовин і нафтопродуктів є важливим фізичним параметром, за котрим розраховуються не тільки такі фізичні параметри, як маса, густина, кількість, але й визначається стабільність протікання технологічних процесів. При виході рівня за гранично допустимі межі, як правило, повинна спрацювати попереджувальна сигналізація, а в критичних ситуаціях – аварійне блокування. При вимірювальному контролі рівня рідини в технологічних апаратах можуть мати місце два варіанти:

- рівень рідини стабілізується на заданому регламентом значенні, наприклад, $L_0 \pm \Delta L$, де L_0 - номінальне значення рівня; ΔL - допустиме граничне відхилення рівня. У цьому випадку задача зводиться до вищезрозглянутої.

- рівень рідини в апараті обмежується від деякого мінімального, (наприклад, 20%) до деякого максимального значення (наприклад, 80%). У цьому випадку для поточного контролю рівня між нижнім (20%) та верхнім (80%) значенням рівня використовується рівнемір з ДВ від 0 до 100% з невисокою точністю, а для вимірювального контролю рівня в області граничних його значень (20% і 80%) повинні використовуватися ЗВК рівня з достатньо вузьким ДВ і високою точністю, так як

вони призначені для формування попереджувальної сигналізації і в протиаварійних системах захисту (ПАЗ).

Мета статті – дослідження похибок вимірювання систем автоматичного контролю та управління технологічних об'єктів при одночасній зміні масиву впливових факторів.

Так для ЗВК, котрі використовуються в ПАЗ і мають досить невеликі ДВ і повинні мати достатньо низьку похибку вимірювання (ПВ), виникає задача забезпечення високої точності спрацювання ПАЗ, враховуючи, що на ЗВК впливають як внутрішні так і зовнішні впливові фактори. Особливо це стосується комп'ютерно-інтегрованих систем контролю та управління технологічним процесом (КІСКУ ТП), для котрих важливим є точність спрацювання попереджувальної сигналізації та аварійного блокування.

Відомо [3, 4], що зміна внутрішніх і зовнішніх факторів приводить до відхилення показання вимірювального параметра від його дійсного значення та появи додаткових похибок вимірювання (ДПВ). При збільшенні (або зменшенні) впливового фактора залежність вихідного сигналу y від зміни деякого впливового фактора v та вхідної вимірювальної величини x може бути як лінійною, так і нелінійною. Окрім того, може бути одночасна дія декількох впливових факторів, що призводить або до передчасного спрацювання попереджувальної сигналізації, або до її значного запізнення, котре викличе аварійне блокування ОВК. У процесі вимірювання відповідний потенціал (тепловий, механічний, енергетичний чи концентраційний) перетворюється в електричний, механічний чи інший сигнал, у результаті чого на виході вимірювального каналу формується сигнал y_i , котрий при відомих нормованих значеннях впливових факторів приймається за дійсне значення вимірювального параметра. Один і той же зовнішній і внутрішній фактор може змінювати вихідний сигнал як одного, так і декількох перетворювальних ланок. Якщо при дії впливового фактора на одну перетворювальну ланку напрямок зміни її вихідного сигналу, як правило, є відомих, то при його одночасній дії на декілька перетворювальних ланок напрямок зміни вихідного сигналу вимірювального каналу може бути непередбачуваним (випадковим), що приводить до невизначеності дії попереджувальної сигналізації чи аварійного блокування ОВК.

Згідно з теорією реологічних переходів і перетворень [5, 6] процеси перенесення імпульсу потенціалу описуються наступним градієнтним рівнянням:

$$k_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \text{div}(D_{\varphi} \text{grad } \varphi - k_{\varphi} v \varphi) + \gamma(t), \quad (1)$$

де φ - потенціал перенесення енергії, маси чи кількості руху; θ - час перенесення деякого потенціалу; k_{φ} - коефіцієнт; D_{φ} - ефективний коефіцієнт перенесення імпульсу енергії, маси та

кількості руху; v швидкість конвекційної складової руху; $\gamma(t)$ - швидкість виведення (стоку) перетвореного потенціалу з області реологічного переходу (у нашому випадку з перетворюючої ланки) за час t .

Процес перенесення теплової енергії від ОВК до її перетворювача (наприклад, теплової енергії середовища з температурою T до термопари) описується наступним градієнтним рівнянням:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial g} = \text{div}(D_T \text{grad } T - c_p \rho v_T T) + \gamma_T(t), \quad (2)$$

де g - час перенесення теплової енергії; c_p, ρ - питома теплоємність і густина середовища; a - коефіцієнт температуропровідності середовища; v_T - швидкість конвекційної складової руху теплового потоку; $\gamma_T(t)$ - швидкість виведення (стоку, наприклад, термоЕРС) результату перетворення теплової енергії за час t .

Для енергії випромінювання, враховуючи, що конвекційна складова є відсутньою, градієнтне рівняння перенесення приймає вигляд:

$$k_E \frac{\partial E}{\partial \xi} = \text{div}(D_E \text{grad } E) + \gamma_E(t), \dots \dots (3)$$

де E - енергія випромінювання за час ξ ; k_E - коефіцієнт; D_E - ефективний коефіцієнт перенесення енергії випромінювання; $\gamma_E(t)$ - швидкість виведення (стоку) результату перетворення енергії випромінювання за час t .

Вихідний сигнал первинного перетворювача є джерелом енергії для вторинного і так далі, поки на виході останнього перетворювача вимірювального каналу не створиться відповідний сигнал, придатний для реєстрації чи використання в системах автоматичного контролю чи управління. Якщо перенесення енергії проходить в одному напрямку, то рівняння перенесення приймають наступну форму [7-9]:

- потенціалу

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{D_\varphi}{k_\varphi} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{k_\varphi} \gamma_\varphi(t); \quad (4)$$

- теплової енергії

$$\frac{\partial T}{\partial g} + \frac{D_T}{c_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + v_T T = \frac{1}{c_p \rho} \gamma_T(t); \quad (5)$$

- енергії випромінювання

$$\frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{D_E}{k_E} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{k_E} \gamma_E(t). \quad (6)$$

Виведення (стік) теплової енергії, маси чи кількості руху з ОВК, як правило, описується звичайним диференціальним рівнянням першого, другого і значно рідше вищого порядку з власними сталими часу [10]. Якщо час $\partial \theta$, ∂g і $\partial \xi$ є лінійною функцією відносно напрямку перенесення

∂x , то при відповідних умовах рівняння функціональних перетворень спрощується, так як можна записати, що $\partial \theta = \partial x / v_\varphi$, де v_φ - швидкість перенесення енергії. Так, наприклад, для рівняння перенесення імпульсу потенціалу маємо:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_\varphi \frac{v_\varphi}{D_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \left(\tau_\varphi \frac{d^2 \varphi_C}{dt^2} + \frac{d\varphi_C}{dt} \right); \quad (7)$$

Якщо прийняти, що на границі цього імпульсу похідні $\partial \varphi / \partial x$ і $d\varphi_C / dt$ є рівними нулю, то згідно з методом нульового градієнта [11, 12] рівняння (7) можна розділити на систему наступних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{D_\varphi}{k_\varphi v_\varphi} \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} + \varphi(x) = k_x \varphi_0; \\ \tau_C \frac{d\varphi_C}{dt} + \varphi_C = k_0 \varphi(x), \end{cases} \quad (8)$$

де φ_0 - початковий потенціал перенесення (потенціал джерела); k_x коефіцієнт передачі; τ_C - стала часу стоку потенціалу; k_0 - деяка стала (наприклад, коефіцієнт перетворення потенціалу φ_0).

При граничних початкових умовах рішенням першого рівнянь системи (8) буде:

$$\varphi(x) = k_x \varphi_0 \exp(-x k_\varphi v_\varphi / D_\varphi), \quad (9)$$

де x - товщина зони перенесення імпульсу потенціалу.

При нульових початкових умовах для другого рівняння системи (8) отримуємо:

$$\varphi_C(t) = k_0 \varphi(x) [1 - \exp(-t / \tau_C)]. \quad (10)$$

Підставивши рівняння (9) у (10), отримуємо математичну модель функціонального перетворення у такому вигляді:

$$\varphi_C(t) = K_\varphi \varphi_0 \exp\left(-\frac{x k_\varphi v_\varphi}{D_\varphi}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right)\right]. \quad (11)$$

Якщо $\partial \theta \neq \partial x / v_\varphi$, то рівняння (11) приймає таку форму:

$$\varphi_C(t) = K_\varphi \varphi_0 \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_\varphi \theta}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_C}\right)\right]. \quad (12)$$

Статичну характеристику процесу перенесення потенціалу можна отримати при $t = \infty$. Як видно з рівнянь (11) і (12), у загальному випадку статичні характеристики функціональних ланок є нелінійними. Лінійними можна рахувати статичні характеристики при малих аргументах експоненціальної функції $\exp(-x k_\varphi v_\varphi / D_\varphi)$ або функції Erfurt $\text{erf}(x / 2\sqrt{D_\varphi \theta})$ [13].

СУТЬ МАТРИЧНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ.

Якщо вимірювальний канал має n перетворювальних ланок, то він описуватиметься n

рівняннями перенесення імпульсу потенціалу температури, маси, енергії та кількості руху. На кожну перетворювальну ланку діють як внутрішні, так і зовнішні впливові фактори, зміна котрих приводить до появи похибок вимірювання. Один і той же впливовий фактор може одночасно діяти на декілька перетворювальних ланок, наприклад температура навколишнього середовища T . У результаті такої дії температурні похибки функціональних ланок можуть бути:

- однонаправленими, тобто збільшувати або зменшувати результат вимірювання, у результаті чого загальна додаткова похибка вимірювального каналу буде максимальною, тобто

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_n = \Delta y_{\max}; \quad (13)$$

- різнонаправленими, тобто додаткові похибки вимірювання частини функціональних ланок можуть збільшувати результат вимірювання, а частина – зменшувати, у результаті чого загальна додаткова похибка вимірювального каналу буде мінімальною, тобто

$$\Delta y_{\Sigma} = -\Delta y_1 + \Delta y_2 - \dots + \Delta y_n = \Delta y_{\min}. \quad (14)$$

Очевидно, що другий варіант розподілення додаткових похибок є найбільш оптимальним, так як приводить до мінімізації додаткової похибки вимірювання, а в критичному випадку – до повної її компенсації. Задача полягає в тому, щоби визначити перетворювальні ланки з позитивним та від'ємним напрямком впливу того чи іншого зовнішнього та внутрішнього фактора на результат вимірювання каналу з метою оптимізувати (мінімізувати) загальну додаткову похибку вимірювання. Окрім того, це приводить до нерівномірного розподілення похибок уздовж діапазону вимірювання.

При проектуванні ЗВК, як правило, додаткові похибки вимірювання оцінюють на стадії виготовлення макетного зразку за результатами його досліджень, котрі виконуються за умовами технічного завдання на проектування. Якщо додаткові похибки є значними, то у ЗВК вводять відповідні компенсатори, котрі слідкують за зміною того чи іншого впливового фактора і виробляють сигнал, який приводить до часткової компенсації дії цього фактора на результат перетворення. Такий спосіб зменшення похибок є недостатньо досконалим, так як:

1. приводить до ускладнення ЗВК через необхідність уведення відповідних компенсаторів і систем уведення компенсуючих сигналів;

2. дія впливових факторів на процес перетворення корисного сигналу може бути нелінійною, котру важко компенсувати з допомогою лінійних компенсаторів;

3. так як технологічні процеси, як правило, протікають у динамічних режимах, то у таких же режимах протікають і дії впливових факторів, а пристрої компенсації мають свої динамічні характеристики, то їх несумісність може спонукати до резонансних явищ, котрі викличуть значні динамічні похибки вимірювання.

Звідси випливає, що доцільним є теоретичне та експериментальне дослідження дії основних

впливових факторів на стадії розробки ескізного та технічного проектів на процес перетворень вимірювальних каналів з метою вибору такої елементної бази перетворювальних ланок, котрі б забезпечували мінімальні додаткові похибки вимірювання. Для вирішення цієї задачі пропонується метод, заснований на принципі інтегральної матриці.

Нехай структурна схема функціональних перетворень системи вимірювального контролю та управління має чотири функціональні перетворення, як показано на рис. 2.

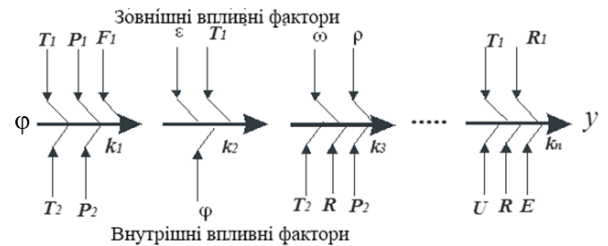


Рис. 2 – Структурна схема функціональних перетворень

На структурній схемі жирними лініями показані основні перетворювальні ланки, на які чинять дію впливові фактори. Вхідна вимірювальна величина φ діє на перший перетворювач з коефіцієнтом перетворення k_1 , вихідний сигнал котрого подається на другий перетворювач з коефіцієнтом перетворення k_2 і так далі. На виході останнього перетворювача з коефіцієнтом k_n створюється вихідний сигнал y , за величиною котрого оцінюється дійсне значення вхідного сигналу φ . Коефіцієнти перетворень є функціями зовнішніх і внутрішніх впливових факторів, тобто $k_1 = f(T_1, P_1, F_1, T_2, P_2)$, $k_2 = f(\varepsilon, T_1, \varphi)$, $k_3 = f(\omega, \rho, T_2, R, P_2)$ і $k_n = f(T_1, R_1, U, R, E)$. З наведеного видно, що коефіцієнти перетворення мають спільні впливові фактори як T_1, T_2, P_2, R . Залежності коефіцієнтів перетворень при зміні впливових параметрів можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Тому в загальному випадку функції для коефіцієнтів перетворень можна розкласти в ряд Тейлора [14]. Як показано в [4], достатньо обмежуватися першими трьома складовими цього ряду: мультиплікативною, нелінійною квадратичною та нелінійною кубічною складовою. Причому нелінійна квадратична та нелінійна кубічна складові для системи контролю та управління (СКУ), як правило, повинні мати протилежну дію, що забезпечує зменшення сумарної похибки вимірювання. При подальшому дослідженні приймемо, що нелінійні складові похибок є незначними, якими можна знехтувати. Тоді при дії впливових факторів для коефіцієнтів перетворення маємо:

$$\Delta k_1 = r_{11}\Delta T_1 + r_{12}\Delta P_1 + r_{13}\Delta F_1 + r_{14}\Delta T_2 + r_{15}\Delta P_2 = \Delta k_{11} + \Delta k_{12} + \Delta k_{13} + \Delta k_{14} + \Delta k_{15}; \quad (15)$$

$$\Delta k_2 = r_{21}\Delta\varepsilon + r_{22}\Delta T_1 + r_{23}\Delta\varphi = \Delta k_{21} + \Delta k_{22} + \Delta k_{23}; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta k_3 &= r_{31}\Delta\omega + r_{32}\Delta\rho + r_{33}\Delta T_2 + r_{34}\Delta R + r_{35}\Delta P_2 = ; \\ &= \Delta k_{31} + \Delta k_{32} + \Delta k_{33} + \Delta k_{34} + \Delta k_{35} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dots\dots\dots \\ \Delta k_n &= r_{n1}\Delta T_1 + r_{n2}\Delta R_1 + r_{n3}\Delta U + r_{n4}\Delta R + r_{n5}\Delta E = , \\ &= \Delta k_{n1} + \Delta k_{n2} + \Delta k_{n3} + \Delta k_{n4} + \Delta k_{n5} \end{aligned} \quad (18)$$

де $r_{11}, \dots, r_{15}; r_{21}, \dots, r_{23}; r_{31}, \dots, r_{35}; r_{n1}, \dots, r_{n5}$ - коефіцієнти впливу.

Для номінальних значень коефіцієнтів перетворення отримуємо:

$$\begin{aligned} k_{10} &= r_{11}T_{10} + r_{12}P_{10} + r_{13}F_{10} + r_{14}T_{20} + r_{15}P_{20} = ; \\ &= k_{11}^0 + k_{12}^0 + k_{13}^0 + k_{14}^0 + k_{15}^0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$k_{20} = r_{21}\varepsilon_0 + r_{22}T_{10} + r_{23}\varphi_0 = k_{21}^0 + k_{22}^0 + k_{23}^0; \quad (20)$$

$$\begin{aligned} k_{30} &= r_{31}\omega_0 + r_{32}\rho_0 + r_{33}T_{20} + r_{34}R_0 + r_{35}P_{20} = ; \\ &= k_{31}^0 + k_{32}^0 + k_{33}^0 + k_{34}^0 + k_{35}^0 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dots\dots\dots \\ k_{n0} &= r_{n1}T_{10} + r_{n2}R_{10} + r_{n3}U_0 + r_{n4}R_0 + r_{n5}E_0 = , \\ &= k_{n1}^0 + k_{n2}^0 + k_{n3}^0 + k_{n4}^0 + k_{n5}^0 \end{aligned} \quad (22)$$

де $T_{10}, P_{10}, F_{10}, T_{20}, P_{20}, \varepsilon_0, \varphi_0, \omega_0, \rho_0, R_0, R_{10}, U_0, E_0$ - номінальні значення впливових факторів.

Якщо канал вимірювання розділений на n функціональних ланок, то рівняння номінальної статичної характеристики може бути подано в такій матричній формі [15]:

$$\begin{vmatrix} y_{10} \\ y_{20} \\ y_{30} \\ \dots \\ y_{n0} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{20} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{30} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{n0} \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \dots \\ \varphi_n \end{vmatrix}. \quad (23)$$

де y_{n0} і φ_n - вихідна та вхідна величина для n -ї ланки каналу відповідно; $k_{10}, k_{20}, \dots, k_{n0}$ - номінальні коефіцієнти перетворення.

Тоді для кожної ланки каналу маємо:

$$\begin{aligned} y_{10} &= (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_1 = K_0\varphi_1 \\ &\dots\dots\dots \\ y_{n0} &= (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_m = K_0\varphi_n \end{aligned} \quad (24)$$

У реальних умовах експлуатації впливові фактори є змінними величинами, за рахунок чого коефіцієнти перетворення $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ відхиляються від їх номінальних значень, що призводить до відповідної зміни вихідної координати y на величину похибки $\pm\Delta y_i$, де i - кількість впливових факторів. У цьому випадку вихідна координата y приймає різні значення навіть при $\varphi = const$. Для такого випадку кожне значення вхідної координати описуватиметься наступною матрицею:

$$|y_1| = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1(i-1)} & k_{1i} \\ k_{2i} & k_{21} & \dots & k_{2(i-2)} & k_{2(i-1)} \\ k_{3(i-1)} & k_{3i} & \dots & k_{3(i-3)} & k_{3(i-2)} \\ k_{4(i-2)} & k_{4(i-1)} & \dots & k_{4(i-4)} & k_{4(i-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{(n-1)(i-2)} & k_{(n-1)(i-2)} & \dots & k_{(n-1)i} & k_{(n-1)} \\ k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{ni} & k_{n1} \end{vmatrix} * |\varphi_1|. \quad (25)$$

З рівняння (25) можна визначити дію кожного впливового параметра, а також їх сукупності на вихідну координату СКУ. Так як часткові коефіцієнти перетворення є змінними величинами і залежать від відхилення впливових факторів, тобто $k_{ni} = k_{(ni)0} \pm \Delta k_{ni}$, то, враховуючи лінійність статичної характеристики, можна записати матричне рівняння для похибки при $\varphi_1 = const$ у такій формі:

$$|\Delta y_1| = \begin{vmatrix} \Delta k_{11} & \Delta k_{12} & \dots & \Delta k_{1(i-1)} & \dots & \Delta k_{1i} \\ \Delta k_{2i} & \Delta k_{21} & \dots & \Delta k_{2(i-2)} & \dots & \Delta k_{2(i-1)} \\ \Delta k_{3(i-1)} & \Delta k_{3i} & \dots & \Delta k_{3(i-3)} & \dots & \Delta k_{3(i-2)} \\ \Delta k_{4(i-2)} & \Delta k_{4(i-1)} & \dots & \Delta k_{4(i-4)} & \dots & \Delta k_{4(i-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta k_{n2} & \Delta k_{n3} & \dots & \dots & \dots & \Delta k_{n1} \end{vmatrix} * |\varphi_1|, \quad (26)$$

де Δy_1 - абсолютна похибка, яка зумовлена зміною впливових параметрів; Δk_{ni} - зміна часткових коефіцієнтів функціонального перетворення.

Розрахунок результату вимірювального контролю виконується за таким алгоритмом:

$$y_1 = \left[\begin{aligned} &\left(k_{11}k_{21} \dots k_{n1} + k_{12}k_{22} \dots k_{n2} + \right. \\ &\left. + k_{13}k_{23} \dots k_{n3} + k_{14}k_{24} \dots k_{n4} + \right. \\ &\left. + \dots + k_{1i}k_{2i}k_{3i}k_{4i} \dots k_{ni} \right) - \\ &\left(k_{1i}k_{2(i-1)} \dots k_{n2} + k_{1(i-1)}k_{2(i-2)} * \right. \\ &\left. - \dots k_{n3} + \dots + k_{14}k_{22} \dots k_{ni} + k_{13}k_{21} * \right. \\ &\left. \dots k_{ni} + \dots \right) \end{aligned} \right] \cdot \varphi_1. \quad (27)$$

Кожна складова рівняння (27) є еквівалентним передавальним коефіцієнтом за впливовими параметрами. Так, наприклад, для структурної схеми рис. 2 маємо наступне рівняння:

$$y_1 = r_1 T_1 \varepsilon \omega \dots T_1 + r_2 P_1 T_1 \rho \dots R_1 + r_3 F_1 \varphi T_2 \dots U + r_4 T_2 0 R_0 R_0 + \dots r_n P_2 P_2 E - r_{ii} P_1 T_1 R \dots E - \dots, \quad (27)$$

де $r_1 = r_{11}r_{21}r_{31} \dots r_{n1}$; $r_2 = r_{12}r_{22}r_{32} \dots r_{n2}$; $r_3 = r_{13}r_{23}r_{33} \dots r_{n3}$; $r_4 = r_{14}r_{24}r_{34} \dots r_{n4}$ є сталими величинами, незалежними від зміни впливових факторів.

Після диференціювання рівняння (27) за змінними впливовими параметрами отримуємо:

- для мультиплікативної складової

$$\begin{aligned} \Delta y_M &= \alpha_1 \Delta T_1 + \alpha_2 \Delta P_1 + \alpha_3 \Delta F_1 + \alpha_4 \Delta \varepsilon + \\ &+ \alpha_5 \Delta \omega + \alpha_6 \Delta \rho + \alpha_7 \Delta T_2 + \alpha_8 \Delta \varphi + \alpha_9 \Delta U + ; \\ &+ \alpha_{10} \Delta R + \alpha_{11} \Delta R_1 + \alpha_{12} \Delta E + \alpha_{13} \Delta P_2 \end{aligned} \quad (28)$$

- для нелінійної квадратичної складової

$$\begin{aligned} \Delta y_{H2} = & \beta_1(\Delta T_1 \Delta \varepsilon + \Delta T_1 \Delta \omega + \Delta \varepsilon \Delta \omega) + \\ & + \beta_2(\Delta P_1 \Delta T_1 + \Delta P_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta R_1) + \dots ; \quad (29) \\ & + \beta_3(\Delta F_1 \Delta \varphi + \Delta F_1 \Delta T_2 + \Delta F_1 \Delta U + \dots) + \dots \end{aligned}$$

- для нелінійної кубічної складової

$$\begin{aligned} \Delta y_{H3} = & \gamma_1(\Delta T_1 \Delta \varepsilon \Delta \omega + \dots) + \\ & + \gamma_2 \left(\begin{aligned} & \Delta P_1 \Delta T_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta T_1 \Delta R_1 + \\ & + \Delta T_1 \Delta \rho \Delta R_1 + \dots \end{aligned} \right) + \dots \quad (30) \end{aligned}$$

де α, β, γ - коефіцієнти.

Іншою задачею може бути визначення похибок вздовж діапазону вимірювання при одночасній дії на SKU різних впливових факторів. Якщо на вхід SKU поступає корисний сигнал φ , а на систему одночасно діють впливові фактори v_i , то діапазон вимірювання деформується і може приймати різні форми, як показано на рис. 3.

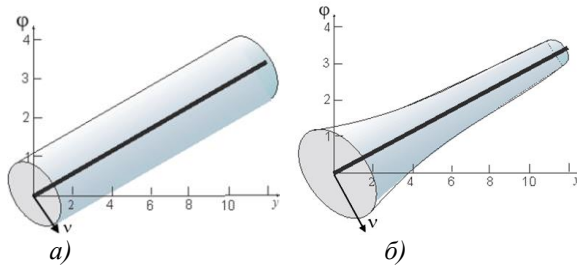


Рис. 3 – Розподілення додаткових похибок уздовж діапазону вимірювання при зміні впливових факторів: а – лінійній; б – нелінійній

З рисунка видно, що діапазон вимірювання під дією впливових факторів перетворюється в умовний циліндр з постійним (рис.3, а) і змінним радіусом (рис. 3, б), котрий залежить від дії того чи іншого впливового фактора, і може приймати різні форми. Якщо у першому випадку, коли похибка розподіляється рівномірно вздовж діапазону вимірювання, для зменшення похибки можна увести достатньо прості компенсатори, то в другому – вони приймають доволі складну форму і практично є неефективними. У цьому випадку ефективною є програмна компенсація похибки вимірювання вздовж діапазону SKU за відомою зміною впливових факторів. Для реалізації такого принципу компенсації додаткових похибок необхідно скористатися методами дослідження багатопараметричних ОВКУ, до яких відноситься й запропонований та описаний нижче метод інтегральної матриці. Розглянемо об'єкт вимірювального контролю та управління у вигляді ультразвукового рівнеміра рідини, який являє собою одну функціональну ланку, має вихідну координату, якою є час t_B перетворення, вхідну координату, якою є лінійний розмір L (рівень рідини), зовнішні впливові фактори: температура T_1 навколишнього середовища та атмосферний тиск P_1 , а також внутрішні впливові фактори – температура T_2 і тиск P_2 газового середовища [15]. Структурна схема такого функціонального перетворення приведена на

рис. 4. Приймаємо, що впливові фактори є незалежними і можуть діяти одночасно. Задача полягає у визначенні складових похибок вимірювання, котрі зумовлені дією кожного впливового фактора окремо за діапазоном вимірювання.

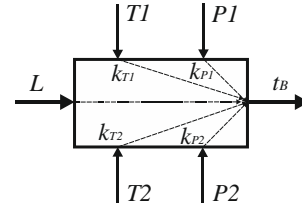


Рис. 4 – Структурна схема перетворень при одночасній зміні тиску і температури

Приймаючи до уваги, що ОВКУ був налагодженим при нормальних умовах, то структурну схему для визначення додаткових похибок вимірювання, зумовлених зміною впливових факторів, можна описати наступним матричним рівнянням:

$$\Delta t_B = \begin{bmatrix} \Delta k_{T1} & \Delta k_{T2} \\ \Delta k_{P1} & \Delta k_{P2} \end{bmatrix} \cdot L \quad (31)$$

де $\Delta k_{T1}, \Delta k_{T2}, \Delta k_{P1}, \Delta k_{P2}$ - відхилення коефіцієнтів перетворень від нормованих значень, які залежать від T_1, T_2 і P_1, P_2 .

Відносно нормованого значення температура і тиск можуть змінюватися таким чином:

- температура і тиск одночасно підвищуються;
- температура і тиск одночасно понижуються;
- температура підвищується, а тиск одночасно понижується;
- температура понижується, а тиск одночасно підвищується.

Таким чином, рівняння (25) можна записати в такій формі:

$$t_B = (k_{T1} \cdot k_{P2} - k_{T2} \cdot k_{P1}) L. \quad (32)$$

Розрахунок складових та загальної похибки вимірювання виконано при одночасній зміні тиску та температури повітря на 25% від їх номінальних значень. Розподілення мультиплікативної складової похибки при зміні тиску та температури середовища показано на рис. 5 для рівня: червоний – 2 м; фіолетовий - 4 м; сірий - 6 м; синій – 8 м; зелений – 10 м; жовтий – 12м. Розподілення нелінійної квадратичної складової похибки при одночасній зміні тиску та температури показані на рис. 6 для тих же значень рівня.

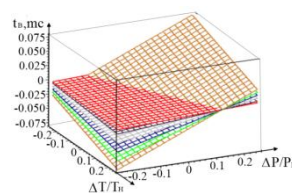


Рис. 5 – Результати моделювання мультиплікативної складової похибки

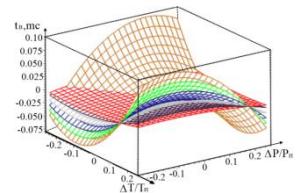


Рис. 6 – Результати моделювання нелінійної квадратичної складової похибки

Розподілення нелінійної складової похибки вимірювання при одночасній зміні тиску і температури приведене на рис. 7, а загальної – на рис. 8.

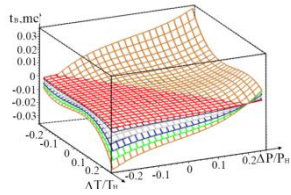


Рис. 7 – Результати моделювання нелінійної кубічної складової похибки

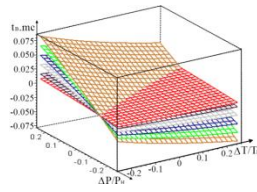


Рис. 8 – Результати моделювання загальної похибки

Результати моделювання статичних характеристик рівнеміра при одночасному підвищенні температури і тиску від мінімального до максимального значення наведені на рис. 9, де крива 1 - $T_1 = 253K$ і $P_1 = 121,3кПа$; крива 2 - $T_2 = 273K$ і $P_2 = 111,3кПа$; крива 3 - $T_3 = 293K$ і $P_3 = 101,3кПа$; крива 4 - $T_4 = 313K$ і $P_4 = 91,3кПа$; крива 5 - $T_5 = 333K$ і $P_5 = 81,3кПа$. Аналогічні результати моделювання при одночасному збільшенні тиску та зменшенні температури приведені на рис. 10.

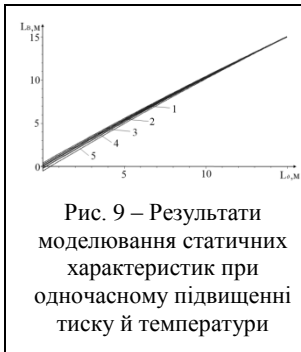


Рис. 9 – Результати моделювання статичних характеристик при одночасному підвищенні тиску й температури

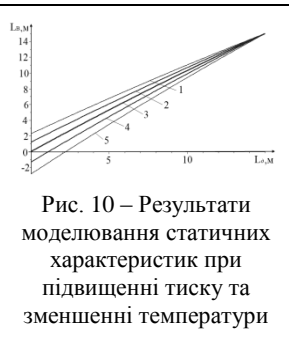


Рис. 10 – Результати моделювання статичних характеристик при підвищенні тиску та зменшенні температури

Аналіз результатів моделювання показує, що при одночасному зменшенні тиску і температури середня відносна похибка на кожні 10 % складає 3,5%, а при їх збільшенні – 2,2. При одночасному збільшенні тиску та зменшенні температури відносна похибка на кожні 10 % складає 7,3%, а при зменшенні тиску та збільшенні температури на таку ж величину – 5,1%.

Якщо на ОВКУ одночасно діють три впливові фактори: z_1 , z_2 і z_3 (наприклад, температура T , тиск P і напруга U), то такий засіб можна описати наступним матричним рівнянням:

$$t_B = \begin{vmatrix} k_{T0} & k_{T1} & k_{T2} \\ k_{P1} & k_{P0} & k_{P2} \\ k_{U2} & k_{U1} & k_{U0} \end{vmatrix} \cdot L. \quad (33)$$

З метою спрощення матрицю (33) запишемо в такій формі:

$$y = t_B = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{12} & k_{11} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{23} & k_{21} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{32} & k_{31} \end{vmatrix} \cdot L \quad (34)$$

де k_{ij} - коефіцієнти передачі; $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$.

Для такої матриці маємо:

$$y = \begin{pmatrix} k_{11}k_{22}k_{33} + k_{12}k_{23}k_{32} + k_{13}k_{23}k_{31} \\ -k_{13}k_{22}k_{31} - k_{12}k_{22}k_{32} - k_{11}k_{23}k_{33} \end{pmatrix} L. \quad (35)$$

Якщо прийняти, що $y = \sum_{i=1}^6 y_i$, де $i=1, 2, \dots, 6$,

то рівняння (35) можна записати таким чином: $y_1 = k_{11}k_{22}k_{33}L$, $y_2 = k_{12}k_{23}k_{32}L$, $y_3 = k_{13}k_{22}k_{31}L$, $y_4 = -k_{11}k_{22}k_{33}L$, $y_5 = -k_{13}k_{22}k_{31}L$, $y_6 = -k_{11}k_{23}k_{33}L$. Кожне рівняння описує деяку вимірювальну вітку, яка складається з трьох функціональних перетворювальних ланок. Для розглядуваного ОВКУ таких ланок є 6, котрі є паралельно з'єднаними, як показано на рис. 11.

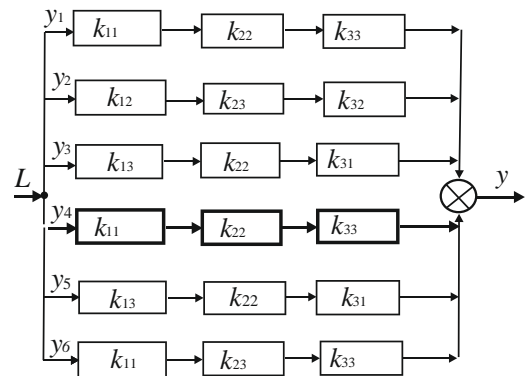


Рис. 11 – Узагальнена структурна схема ОВКУ для трьохмірної задачі відповідно до матриці (34)

Так як вихідна координата ОВКУ $y = y_0 \pm \Delta y$, де y_0 - номінальне значення; $\pm \Delta y$ - абсолютна похибка, а кожний коефіцієнт перетворення $k_{ij} = k_{00} \pm \Delta k_{ij}$, то розклавши рівняння (35) у ряд Тейлора та обмежившись тільки лінійними складовими, отримуємо наступне рівняння для загальної абсолютної похибки у такій формі:

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 - \Delta y_4 - \Delta y_5 - \Delta y_6 = \Delta k_{ij} L, \quad (36)$$

$$\text{де } \Delta k_{ij} = \begin{pmatrix} \Delta k_{11} + \Delta k_{22} + \Delta k_{33} + \Delta k_{12} + \Delta k_{23} + \\ + \Delta k_{32} + \Delta k_{13} + \Delta k_{22} + \Delta k_{31} - \\ - \Delta k_{11} - \Delta k_{22} - \Delta k_{33} - \Delta k_{12} - \Delta k_{23} - \\ - \Delta k_{32} - \Delta k_{13} - \Delta k_{22} - \Delta k_{31} \end{pmatrix}$$

коефіцієнт перетворення.

Так як у реальних умовах експлуатації ОВКУ $x_1 \neq x_2 \neq x_3 \neq x_4 \neq x_5 \neq x_6$ і напрямок дії прямого та зворотного ходу може бути один і той же, то $\Delta k_{ij} \neq 0$, а значить появляются похибки вимірювання. Якщо прийняти, що номінальні значення коефіцієнтів прямого перетворення $k_{11} = k_{22} = k_{33} = 1$ і зворотного перетворення $k_{21} = k_{22} = k_{23} = 1$, то узагальнений коефіцієнт передачі ОВКУ приводиться до такої форми:

$$K = \begin{vmatrix} 1 & k_{12} & k_{13} \\ 1 & 1 & 1 \\ k_{31} & 1 & 1 \end{vmatrix} = (k_{31}-1)(k_{12}-k_{13}) \quad (36)$$

Для цього прикладу структурна схема ОВКУ приймає вигляд, показаний на рис. 12.

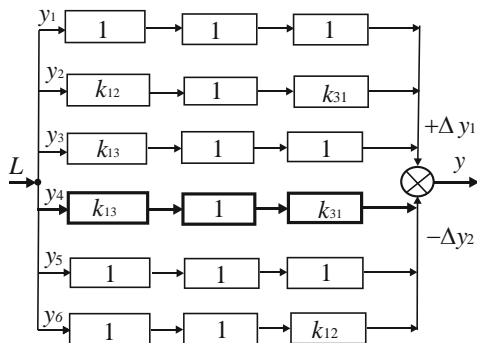


Рис. 12 – Структурна схема ОВКУ для трьохмірної задачі відповідно до матриці (36)

Тоді узагальнене рівняння для похибки вимірювання приймає наступний вигляд:

$$\Delta y = (\Delta y_1 - \Delta y_2) = (k_{31}-1)(k_{12}-k_{13})\Delta L \quad (37)$$

Рівняння (37) показує, від яких перетворювальних ланок можуть виникати похибки вимірювання. Якщо коефіцієнт перетворення $k_{12} = k_{13}$, то абсолютна похибка вимірювання $\Delta y = 0$. Звідси впливає інваріантний спосіб зменшення похибки вимірювання, котрий полягає в тому, що необхідно добитися такого значення коефіцієнта перетворення k_{12} або k_{13} , при котрому ця похибка була б інваріантною до деякого мінімального значення.

ВИСНОВКИ

Вимірювальні кола технічних засобів контролю та управління, як правило, складаються з двох і більше динамічних ланок, на кожен з котрих діють різноманітні як внутрішні, так і зовнішні впливові фактори. Наприклад, для контролю зміни температурного поля в газових реакторах

установлюються термопари шарах каталізатора як за їх висотою, так і за діаметром. Незважаючи на практичну ідентичність термопар, на кожен з них впливає низка різних факторів як температури реакції, швидкість руху газового потоку, його температури, щільність каталізатора в місті розташування термометра та багато інших. Окрім того, теплова енергія в тій чи іншій точці шару каталізатора у кожній термопарі перш ніж перетвориться в термоелектрорушійну силу (термоЕРС) проходить одну або декілька зон реологічних переходів (металевого та керамічного захисту, прошарку газу чи теплопровідного наповнювача, спаю термопари). При кожному реологічному переході теплова енергія терпить відповідне перетворення, що приводить до втрати теплової енергії, або до додаткового її накопичення за рахунок внутрішніх джерел тепла. Навіть у спаї термопари має місце втрата теплової енергії на рух електронів, а останніх – на термоЕРС за рахунок електричних параметрів електродів. З цього випливає, що кожне вимірювальне коло можна рахувати як багатопараметричний об'єкт вимірювання, на котрий чинять відповідну дію різноманітні фактори. При експлуатації технологічних об'єктів контролю та управління важливою є задача визначення основних, найбільш сильних впливових факторів, їх кількість, а в багатьох випадках, і компенсуючі дії з метою розробки систем їх компенсації. Матричний метод дослідження похибок вимірювання є найбільш ефективним, котрий дозволяє не тільки визначати найбільш сильні впливові фактори у поточному режимі роботи ТОК, але й їх кількість і напрямок дії того чи іншого впливового фактора. Так як масиви впливових факторів можна подати у вигляді матриць функціональних перетворень, то похибки вимірювань теж являтимуть матрицями, котрі можна описати відповідними інтегральними матрицями, з допомогою котрих є можливість розділити їх на низку тримірних систем та оптимізувати процес вимірювання за допомогою тримірного інтегрального функціоналу.

Список використаних джерел / REFERENCES

1. Технологический регламент производства аммиака мощностью 1360 т/сутки по проекту фирмы ТЕС. – Северодонецк: Изд-во «Радянська Донеччина» г. Донецк. – 1979. – 534 с.
2. Стенцель Й. І., Поркуян О. В. Комп'ютерно-інтегровані системи управління хіміко-технологічними процесами. Ч1. Виробництва конверсії природного газу. – Луганськ, Вид-во Східно-укр. нац. ун-ту. -2014.- 350 с.
3. Дудников Е.Г. Построение математических моделей хіміко-технологических объектов [Текст] / Е. Г. Дудников, В. С. Балакирев, В. Н. Кривсунов, А. М. Цирлин. – М.: Химия, 1970. – 312 с. Библиогр. 158.
4. Обозовський С. С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки (Загальні питання теорії похибок) [Текст] / С. С. Обозовський. – К.: УМК ВО, 1991. - 223 с. Библиогр. 67 назв. ISBN 5-7763-0667-1.
5. Гораздовський Т. Я. Наукові основи реології [Текст] /Т. Я. Гораздовский // Монографія.- Луганск: Изд.-во Вост.- нац. ун-та им. В. Даля. 2012. – 775 с.
6. Стенцель Й. І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів [Текст] / Й. І. Стенцель //Вісник СХУ ім. Володимира Даля. №5(111). Ч.2, - 2007. – с.91-97.
7. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних

- переходів. Вісник Східноук.нац університету. Науковий збірник. №5 (111), Ч.2.- 2007. – с.91-97.
8. Поркуян О.В., Стенцель Й.І., Проказа О.І. Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри. Вестник национального технического университета «ХПИ». - 2010, № 12-, с. – 21 –23.
 9. Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І. Дослідження вимірювального контролю технологічних параметрів при реологічних перетвореннях хімічних процесів. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – Харків: НТУ «ХПИ» -№19. – 2011. – С. 31-37.
 10. Стенцель Й. І. Фотоколориметричні газоаналізатори. Монографія. [Текст] / Й. І. Стенцель. – К.: НМК ВО, 1992. – 124 с.
 11. Стенцель Й. І. Математичне моделювання ультразвукових рівнемірів на основі теорії реологічних переходів [Текст] / Й. І. Стенцель, А. В. Томсон, А. В. Рябіченко //Матеріали другої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції „Актуальні проблеми сучасної науки”. Ч1. – Київ 2006. с.78-81.
 12. Litvinov K. A. Research into Rheological transmutations in a Piezoceramic ultrasonic Sensor of Fluid Level Contrjl / K. A. Litvinov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. № 4/5 (82). – 2016. – P. 4-11. ISSN 1729-3774. DOI:10.15587/1729-4061.2016.74844
 13. Стенцель Й. І. Математичні моделі ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів рівня речовин [Текст] / Й. І. Стенцель, А. В. Томсон // Вопросы химии и химической технологии. - 2007. - №4. – С. 182-185. ISSN 0321-4095.
 14. Стенцель Й. І. Фізичні моделі перетворень в ультразвукових засобах контролю рівня рідини рідинних середовищ [Текст] / Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко, К. А. Літвінов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. “Электроэнергетика преобразовательная техника”. – Харків: НТУ “ХПИ” - №19. 2011. С. 3-18. ISSN 2079-4525.
 15. Лыков А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
 16. Воробьев Н. Н. Теория рядов [Текст] / Н. Н. Воробьев. – М.: Изд-во «Наука». – 1975. – 367 с.
 17. Гноевский Л. С., Каменский Г. А., Эльсгольц Л. Э. Математические основы теории управляемых систем [Текст] / Л. С. Гноевский, Г. А. Каменский, Л. Э. Эльсгольц. – М.: Изд-во «Наука». – 1989. – 512 с.
 18. Рябіченко А. В. Ультразвуковий рівнемір з компенсуючим сприймаючим сигналом [Текст] / А. В. Рябіченко. Дис. на здобуття вч. ступеня канд.. техн. наук спеціальність 05.11.13. – Вінниця, 2012. – 213 с.
 19. Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І. Основи теорії багатопараметричних об'єктів керування з реологічними переходами. Науковий журнал «Технологічні комплекси», Луцьк, №2, 2010. –с.46-51.
 1. Tehnologicheskij reglament proizvodstva ammiaka moshhnost'ju 1360 t/sutki po proektu firmy TES. – Severodoneck: Izd-vo «Radjans'ka Donechchina» g. Doneck. – 1979. – 534 s.
 2. Stencil` J. I., Porkuyan O. V. Komp'yuterno-integrovanri sy'stemy` upravlinnya ximiko-technologichny`my` procesamy`. Ch1. Vy`robny`cztva konversiyi pry`rodnogo gazu. – Lugans`k, Vy`d-vo Sxidno-ukr. nacz.. un-tu. - 2014.- 350 s.
 3. Dudnikov E.°G. Postroenie matematicheskikh modelej himiko-tehnologicheskikh ob#ektov [Tekst] / E. G. Dudnikov, V. S. Balakirev, V. N. Krivsunov, A. M. Cirlin. – M.: Himija, 1970. – 312 s. Bibliogr. 158.
 4. Obozovs`ky`j S. S. Teorety`chni osnovy` informacijno-vy`miryval`noyi texniki` (Zagal`ni py`tannya teoriyi poxy`bok) [Tekst] / S. S. Obozovs`ky`j. – K.: UMK VO, 1991. - 223 s. Bibliogr. 67 nazv. ISBN 5-7763-0667-1.
 5. Gorazdovs`ky`j T. Ya. Naukovi osnovy` reologiyi [Tekst] /T. Ya. Gorazdovs`ky`j // Monografiya.- Lugansk: Y`zd-vo Vost.- nacz. un-ta y`m. V. Dalya. 2012. – 775 c.
 6. Stencil` J. I. Matematy`chne modelyuvannya ximichny`x procesiv na osnovi teoriyi reologichny`x perexodiv [Tekst] / J. I. Stencil` //Visny`k SNU im. Volody`my`ra Dalya. #5(111). Ch.2, - 2007. – s.91-97.
 7. Stencil` J.I. Matematy`chne modelyuvannya ximichny`x procesiv na osnovi teoriyi reologichny`x perexodiv. Visny`k Sxidnouk.nacz universy`tetu. Naukovy`j zbirny`k. #5 (111),.Ch.2.- 2007. – s.91-97.
 8. Porkuyan O.V., Stencil` J.I., Prokaza O.I. Reologichni modeli texnologichnogo kontrolyu parametriv z vnutrishnimy` zv'yazkamy` u vy`robny`cztvi amiachnoyi selitry`. Vestny`k nacy`onal`nogo texny`cheskogo uny`versy`teta «XPY`». - 2010, # 12-, s. – 21 –23.
 9. Stencil` J.I., Porkuyan O.V., Prokaza O.I. Doslidzhennya vy`miryval`nogo kontrolyu texnologichny`x parametriv pry` reologichny`x peretvorennyax ximichny`x procesiv. Visny`k Nacional`nogo politexnichnogo universy`tetu «Xarkivs`ky`j politexnichny`j insty`tut». Zbirny`k naukovy`x prac`j. «Elektroenergety`ka y` preobrazovatel`naya texny`ka». – Xarkiv: NTU «XPI» -#19. – 2011. – S. 31-37.
 10. Stencil` J. I. Fotokolory`metry`chni gazoanalizatory`. Monografiya. [Tekst] / J. I. Stencil`. – K.: NMK VO, 1992. – 124 s.
 11. Stencil` J. I. Matematy`chne modelyuvannya ul`trazvukovy`x rivnemiriv na osnovi teoriyi

- reologichny`x perexodiv [Tekst] / J. I. Stencil`, A. V. Tomson, A. V. Ryabichenko //Materialy` drugoyi vseukrayins`koyi naukovoprakty`chnoyi internet-konferenciyi „Aktual`ni problemy` suchasnoyi nauky”. Ch1. – Ky`yiv 2006. s.78-81.
12. Litvinov K. A. Research into Rheological transmutations in a Piezoceramic ultrasonic Sensor of Fluid Level Contrjl / K. A. Litvinov. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. № 4/5 (82). – 2016. – P. 4-11. ISSN 1729-3774. DOI:10.15587/1729-4061.2016.74844
 13. Stencil` J. I. Matematy`chni modeli ul`trazvukovy`x p`yezoelektry`chny`x peretvoryuvachiv rivnya rechovy`n [Tekst] / J. I. Stencil`, A. V. Tomson // Voprosy xy`my`y` y` xy`my`cheskoj texnologiy`. - 2007. - #4. – S. 182-185. ISSN 0321-4095.
 14. Stencil` J. I. Fizy`chni modeli peretvoren` v ul`trazvukovy`x zasobax kontrolyu rivnya ridy ny` ridy`nny`x seredovy`shh [Tekst] / J. I. Stencil`, A. V. Ryabichenko, K. A. Litvinov // Visny`k Nacional`nogo texnichnogo univerty`tetu “Xarkivs`ky`j politexnichny`j insty`tut”. Zbirny`k naukovy`x prac`. “Elektroenergety`ka preobrazovatel`naya texny`ka”. – Xarkiv: NTU “XPI” - #19. 2011. S. 3-18. ISSN 2079-4525.
 15. Lykov A. V. Teorija teploprovodnosti [Tekst] / A. V. Lykov. – M.: Vyssh. shk., 1967. – 599 s.
 16. Vorob`ev N. N. Teorija rjadov [Tekst] / N. N. Vorob`ev. – M.: Izd-vo «Nauka». – 1975. – 367 s.
 17. Gnoevskij L. S., Kamenskij G. A., Jel`sgol`c L. Je. Matematicheskie osnovy teorii upravljaemyh sistem [Tekst] / L. S. Gnoevskij, G. A. Kamenskij, L. Je. Jel`sgol`c. – M.: Izd-vo «Nauka». – 1989. – 512 s.
 18. Ryabichenko A. V. Ul`trazvukovy`j rivnemir z kompensuyuchy`m spry`jmayuchy`m sy`gnalom [Tekst] / A. V. Ryabichenko. Dy`s. na zdobuttya vch. stupenya kand. texn. nauk special`nist` 05.11.13. – Vinny`cya, 2012. – 213 s.
 19. Stencil` J.I., Porkuyan O.V., Prokaza O.I. Osnovy` teoriiy` bagatoparmetry`chny`x ob`yektiv keruvannya z reologichny`my` perexodamy`. Naukovy`j zhurnal «Texnologichni kompleksty`», Lucz`k, #2, 2010. –s.46-51.