

УДК 681.586.773

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ МАТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Й. Стенцель, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ),
О. Поркуян, доктор технічних наук, професор кафедри,
К. Черкас, кандидат технічних наук, докторант кафедри,
К. Літвінов, аспірант кафедри,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Северодонецьк

За дослідження систем автоматичного контролю та управління вихідна координата може змінюватися як за часом, так і за впливними координатами, яких 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, що випливають за одночасної зміни як контролювального параметра, так і різних впливних параметрів, які містяться в межах, зумовлених технологічними вимогами. Для дослідження таких похибок вимірювання та управління пропонується метод інтегральної матриці, який дозволяє за результатами поточного контролю технологічних параметрів визначити похибку вимірювання, що призведе до підвищення якості роботи технологічного процесу. Суть методу полягає в тому, що дія контролювального параметра та впливних параметрів на вихідну координату надається відповідними гілками вимірювального перетворення, які об'єднуються в матрицю, а похибки вимірювання визначаються інтегральним методом як різниця площин дійсних та поточних значень вихідної координати.

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 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.

Ключові слова: вимірювання, похибка, параметр, інтеграл, матриця, перетворення, метод, функціонал, контроль, управління.
Keywords: measurement, error, parameter, integral, matrix, transformation, method, functional, control, management.

Технологічний процес, незалежно від галузі промисловості (хімічної, нафтопереробної, енергетичної, машинобудівної тощо), здійснюється згідно з регламентом, у якому наводяться фізичні параметри, притаманні тому чи іншому технологічному процесу, наприклад, температура, тиск, рівень, витрати, концентрації тощо. У технологічному регламенті ці параметри нормуються з відповідними відхиленнями у таких формах:

1. Указується дозволений діапазон зміни контрольованого фізичного параметра, наприклад, від «а» до «в» (рис. 1), де «а= $A-c_1$ » — мінімальне граничне значення технологічного параметра; «в= $A+c_2$ » — 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 максимально граничному значенню «в». У багатьох технологічних регламентах хімічної, нафтопереробної та машинобудівної 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'єкта вимірювального контролю — ОВК) є різко нелінійною або знизу, або зверху, як показано на рис. 1 (криві 1 і 3).

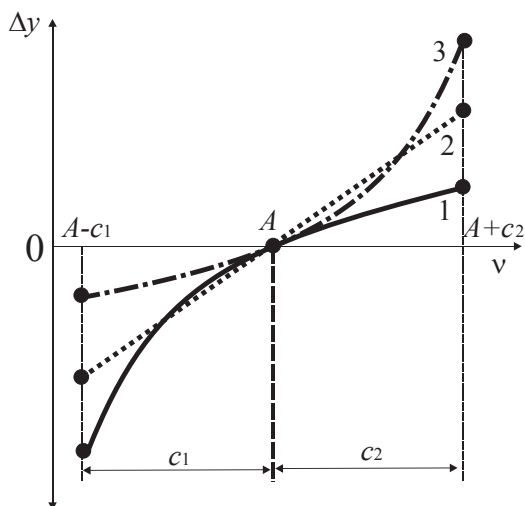


Рис. 1. Дозволений діапазон зміни технологічного параметра

Fig. 1. Allowed range of technological parameter change

2. Указується дозволений діапазон зміни контрольованого фізичного параметра у такий спосіб: $A_{-c_1}^{+c_2}$, де c_1 —нижня гранично дозволена зміна технологічного параметра «А», c_2 —верхня гранично дозволена зміна цього параметра. Якщо $c_1=c_2=c_0$, то цей дозволений діапазон зміни технологічного параметра записується у виді: $A_0 \pm c_0$, 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 за підвищення фізичного параметра технологічного процесу, а якщо $c_1 < c_2$, навпаки — нелінійність ОВК збільшується за зменшення 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 тієї чи іншої фізичної величини, у визначеному в технологічному регламенті діапазоні нормальної роботи ОВК, контролюється за показаннями вимірювальних приладів (давачів), які 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, у процесі конверсії природного газу у паровому риформінгу виробництва аміаку за номінальної температури конверсії $T_0 = 980$ °С допустиме граничне відхилення температури дорівнює ± 10 °С, що становить 1,02 % від номінального значення температури конверсії. Як відомо [1, 2], для вимірювального контролю температури $T_0 = 980$ °С не-

обхідно використати термометр з абсолютною похибкою, не меншою від 0,2 °С. З метою вирішення такого завдання діапазон вимірювання (ДВ) засобу вимірювального контролю (ЗВК) необхідно зменшити навколо номінального значення температури, яке дорівнює 980 °С. Як правило, ДВ установлюється в межах від 950 °С до 1000 °С і становить 50 °С, а граничне відхилення температури конверсії дорівнює 20 %, що дозволяє використовувати ЗВК з абсолютною похибкою вимірювання 4 °С. Рівень рідини в технологічних апаратах (випарних установках, ректифікаційних колонах, абсорберах, сепараторах, ємностях для зберігання рідких хімічних речовин і нафтопродуктів) є важливим фізичним параметром, за яким розраховуються не лише такі фізичні параметри, як маса, густина, кількість, але й визначається стабільність протікання технологічних процесів, У випадку виходу рівня за гранично допустимі межі, як правило, повинна спрацьовувати попереджувальна сигналізація, а у критичних ситуаціях — аварійне блокування.

Під час вимірювального контролю 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 —допустимо граничне відхилення рівня. У цьому випадку завдання зводиться до розглянутого вище;

- 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 %) значеннями 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, оскільки вони призначені для формування попереджувальної сигналізації і у протиаварійних системах захисту (ПАЗ).

Мета статті — дослідження похибок вимірювання систем автоматичного контролю та управління технологічних об'єктів за одночасної зміни масиву впливних факторів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Оскільки для ЗВК, що використовуються в ПАЗ, мають достатньо невеликі ДВ і повинні мати достатньо низьку похибку вимірювання (ПВ), виникає завдання забезпечення високої точності спрацьовування ПАЗ, ураховуючи, що на ЗВК впливають

як внутрішні, так і зовнішні впливні фактори. Особливо це стосується комп'ютерно-інтегрованих систем контролю та управління технологічним процесом (КІСКУ ТП), для яких важливим є точність спрацьовування попереджувальної сигналізації та аварійного блокування.

Відомо [3, 4], що зміна внутрішніх і зовнішніх факторів призводить до відхилення показання вимірювального параметра від його дійсного значення та появи додаткових похибок вимірювання (ДПВ). За збільшення (або зменшення) впливального фактора залежність вихідного сигналу y від зміни деякого впливального фактора v та вхідної вимірювальної величини x може бути як лінійною, так і нелінійною. Окрім того, може бути одночасна дія декількох впливних факторів, що призводить або до передчасного спрацьовування попереджувальної сигналізації, або до її значного запізнення, яке викликає аварійне блокування ОВК. У процесі вимірювання відповідний потенціал (тепловий, механічний, енергетичний чи концентраційний) перетворюється в електричний, механічний чи інший сигнали, у результаті чого на виході вимірювального каналу формується сигнал y_i , який, за відомих нормованих значень впливних 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 за дії впливального фактора на одну перетворювальну ланку напрямком зміни її вихідного сигналу, як правило, є відомим, то за його одночасної дії на декілька перетворювальних ланок напрямком зміни вихідного сигналу вимірювального каналу може бути непередбачуваним (випадковим), що призводить до невизначеності дії попереджувальної сигналізації чи аварійного блокування ОВК.

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

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

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 із області реологічного переходу (у нашому випадку із перетворювальної ланки) за час t .

Процес перенесення теплової енергії від ОВК до її перетворювача (наприклад, теплової енергії середовища з температурою T до термопари)

описується таким градієнтним рівнянням:

$$c_p \rho \partial T / \partial \vartheta = \operatorname{div} (D_T \operatorname{grad} T - c_p \rho v_T T) + \gamma_T(t), \quad (2)$$

де ϑ — 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, ураховуючи, що конвекційна складова відсутня, градієнтне рівняння перенесення приймає вид:

$$k_E \partial E / \partial \xi = \operatorname{div} (D_E \operatorname{grad} E) + \gamma_E(t), \quad (3)$$

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 таку форму [6–8]:

* 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

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

* 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 [9]. Якщо час $\partial \theta$, $\partial \vartheta$ і $\partial \xi$ є лінійною функцією відносно напрямку перенесення ∂x , то за відповідних умов рівняння функціональних перетворень спрощується, оскільки 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 $d \varphi_c / dt$ дорівнюють нулю, то згідно з методом нульового градієнта [10, 11] рівняння (7) можна розділити на систему таких 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 передавання; τ_c — стала часу стоку потенціалу; k_0 — деяка стала (наприклад, коефіцієнт перетворення потенціалу φ_0).

За граничних початкових умов розв'язком першого рівняння системи (8) стане:

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

де x — товщина зони перенесення імпульсу потенціалу.

За нульових початкових умов 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 виді:

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

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

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

Статичну характеристику процесу перенесення потенціалу можна отримати за $t = \infty$. Як видно з рівнянь (11) і (12), у загальному випадку статичні характеристики функціональних ланок нелінійні. Лінійними можна вважати статичні характеристики за малих аргументів експоненціальної функції

$$\exp(-x k_\varphi v_\varphi / D_\varphi)$$

або функції *Erfurt* [12]

$$\operatorname{erf}\left(x / 2\sqrt{D_\varphi \theta}\right).$$

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 впливні фактори, зміна яких призводить до появи похибок вимірювання. Один і той же впливний 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 частини — 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, оскільки призводить до мінімізації додаткової похибки вимірювання, а у критичному випадку — до повної її компенсації. Завдання полягає в тому, щоби визначити перетворювальні ланки з позитивним та від'ємним напрямками впливу того чи іншого зовнішнього та внутрішнього фактора на результат вимірювання каналу з метою оптимізувати (мінімізувати) загальну додаткову похибку вимірювання. Окрім того, це призводить до нерівномірного розподілення похибок уздовж діапазону вимірювання.

У процесі проектування ЗВК, як правило, додаткові похибки вимірювання оцінюють на стадії виготовлення макетного зразка за результатами його досліджень, які виконуються за умовами технічного завдання на проектування. Якщо додаткові похибки значні, то у ЗВК уводять відповідні компенсатори, які сліdkують за зміною того чи іншого впливного фактора і виробляють сигнал, який призводить до часткової компенсації дії цього фактора на результат перетворення. Такий спосіб зменшення похибок недостатньо досконалий, оскільки:

1. призводить до ускладнення ЗВК через необхідність введення відповідних компенсаторів і систем введення компенсувальних сигналів;

2. дія впливних факторів на процес перетворення корисного сигналу може бути нелінійною, яку важко компенсувати за допомогою лінійних компенсаторів;

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

Звідси випливає, що доцільним є теоретичне та експериментальне дослідження дії основних впливних факторів на стадії розроблення ескізного

та технічного проектів на процес перетворень вимірювальних каналів з метою вибору такої елементної бази перетворювальних ланок, які б забезпечували мінімальні додаткові похибки вимірювання. Для вирішення цього завдання пропонується метод, заснований на принципі інтегральної матриці.

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

На структурній схемі жирними лініями показано основні перетворювальні ланки, на які чинять дію впливні фактори. Вхідна вимірювальна величина φ діє на перший перетворювач з коефіцієнтом перетворення k_1 , вихідний сигнал якого 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 якого оцінюється дійсне значення вхідного сигналу φ . Коефіцієнти перетворень є функціями зовнішніх і внутрішніх впливних факторів, тобто $k_1 = f(T_1, P_1, F_1, T_2, P_2)$, $k_2 = f(\varepsilon, T_1, \varphi)$, $k_3 = f(\omega, \rho, T_2, R, P_2)$; ... ; $k_n = f(T_1, R_1, U, R, E)$.

Із наведеного видно, що коефіцієнти перетворення мають спільні впливні фактори як T_1, T_2, P_2, R . Залежності коефіцієнтів перетворень за зміни впливних параметрів можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Тому в загальному випадку функції для коефіцієнтів перетворень можна розкласти у ряд Тейлора [13]. Як показано у [4], достатньо обмежуватися першими трьома складовими цього ряду: мультиплікативною, нелінійною квадратичною та нелінійною кубічною. 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. За подальшого дослідження приймемо, що нелінійні складові похибок є незначними, якими можна знехтувати. Тоді за дії впливних факторів для коефіцієнтів перетворення маємо:

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

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

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

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

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

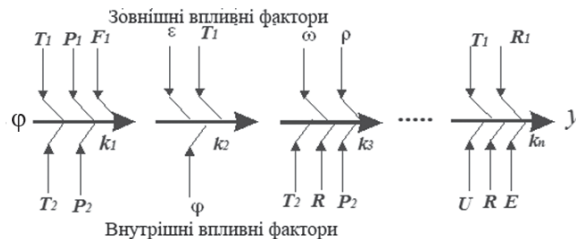


Рис. 2. Структурна схема функціональних перетворень

Fig. 2. Structural scheme of functional transformations

Для номінальних значень коефіцієнтів перетворення отримуємо:

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

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

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

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

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 впливних факторів.

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

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

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

Тоді для кожної ланки каналу маємо:

$$y_{10} = (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_1 = K_0\varphi_1$$

$$y_{n0} = (k_{10}k_{20}k_{30} \dots k_{n0})x_n = K_0\varphi_n \quad (24)$$

За реальних умов експлуатації впливні фактори є змінними величинами, внаслідок 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 впливних факторів. У цьому випадку вихідна координата y приймає різні значення навіть за $\varphi = \text{const}$. Для такого випадку кожне значення вхідної координати описуватиметься такою матрицею:

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

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

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

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

Розрахунок результату вимірювального контролю виконується за таким алгоритмом:

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

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

$$y_1 = r_1 T_1 \epsilon \omega \dots T_1 + r_2 P_1 T_1 \rho \dots R_1 + r_3 F_1 \varphi T_2 \dots U + r_4 T_2 O R_0 R_0 + \dots r_n P_2 P_2 E - r_i P_1 T_1 R \dots E \dots, \quad (27)$$

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 впливних факторів.

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

- ♦ для мультиплікативної складової

$$\Delta y_M = \alpha_1 \Delta T_1 + \alpha_2 \Delta P_1 + \alpha_3 \Delta F_1 + \alpha_4 \Delta \epsilon + \alpha_5 \Delta \omega + \alpha_6 \Delta \rho + \alpha_7 \Delta T_2 + \alpha_8 \Delta \varphi + \alpha_9 \Delta U + \alpha_{10} \Delta R + \alpha_{11} \Delta R_1 + \alpha_{12} \Delta E + \alpha_{13} \Delta P_2$$

- ♦ для нелінійної квадратичної складової

$$\Delta y_{H2} = \beta_1 (\Delta T_1 \Delta \epsilon + \Delta T_1 \Delta \omega + \Delta \epsilon \Delta \omega) + \beta_2 (\Delta P_1 \Delta T_1 + \Delta P_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta R_1) + \beta_3 (\Delta F_1 \Delta \varphi + \Delta F_1 \Delta T_2 + \Delta F_1 \Delta U + \dots) + \dots$$

- ♦ для нелінійної кубічної складової

$$\Delta y_{H3} = \gamma_1 (\Delta T_1 \Delta \epsilon \Delta \omega + \dots) + \gamma_2 \left(\Delta P_1 \Delta T_1 \Delta \rho + \Delta P_1 \Delta T_1 \Delta R_1 + \dots \right) + \dots$$

де α, β, γ — коефіцієнти.

Іншим завданням може бути визначення похибок уздовж діапазону вимірювання за одночасної дії на СКУ різних впливних факторів. Якщо на вхід СКУ надходить корисний сигнал φ , а на систему одночасно діють впливні фактори v_i , то діапазон вимірювання деформується і може приймати різні форми, як показано на рис. 3.

Із рисунка видно, що діапазон вимірювання під дією впливних факторів перетворюється в умовний циліндр з постійним (рис.3, а) і змінним радіусом (рис. 3, б), який залежить від дії того чи іншого впливного фактора, і може приймати різні форми. Якщо у першому випадку, коли похибка розподіляється рівномірно вздовж діапазону вимірювання, для зменшення похибки можна вводити 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 СКУ за відомою зміною впливних 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 виді ультразвукового рівнеміра рідини, який є однією функціональною ланкою, має вихідну координату, якою є час t_B перетворення,

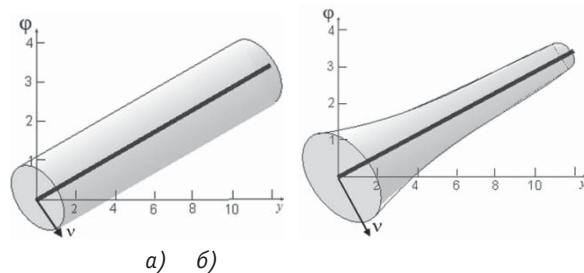


Рис. 3. Розподілення додаткових похибок уздовж діапазону вимірювання за зміни впливних факторів: а — лінійній; б — нелінійній
Fig. 3. Distribution of additional errors along the measurement range when changing the influential factors: a — linear; b — nonlinear

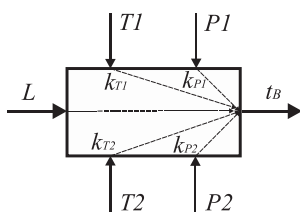


Рис. 4. Структурна схема перетворень за одночасної зміни тиску і температури

Fig. 4. Structural scheme of transformations with simultaneous change of pressure and temperature

вхідну координату, якою є лінійний розмір L (рівень рідини), зовнішні впливні фактори: температуру T_1 навколишнього середовища та атмосферний тиск P_1 , — а також внутрішні впливні фактори: температуру P_2 і тиск T_2 газового середовища [16]. Структурну схему такого функціонального перетворення наведено на рис. 4. Приймаємо, що впливні фактори незалежні й можуть діяти одночасно. Завдання полягає у визначенні складових похибок вимірювання, які зумовлені дією кожного впливного фактора окремо за діапазоном вимірювання.

Приймаючи до уваги, що ОВКУ було налагоджено за нормальних умов, структурну схему для визначення додаткових похибок вимірювання, зумовлених зміною впливових факторів, можна описати таким матричним рівнянням:

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

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 у такий спосіб:

- ▶ температура і тиск одночасно підвищуються;
- ▶ температура і тиск одночасно знижуються;

- ▶ температура підвищується, а тиск одночасно знижується;
- ▶ температура знижується, а тиск одночасно підвищується.

Отже, 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 за одночасної зміни тиску та температури повітря на 25 % від їх номінальних значень. Розподілення мультиплікативної складової похибки за зміни 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 — 12 м. Розподілення нелінійної квадратичної складової похибки за одночасної зміни тиску та температури показано на рис. 6 для тих же значень рівня.

Розподілення нелінійної складової похибки вимірювання за одночасної зміни тиску і температури наведено на рис. 7, а загальної — на рис. 8.

Результати моделювання статичних характеристик рівнеміра за одночасного підвищення температури і тиску від мінімального до максимального значення наведено на рис. 9, де крива 1 — $T1 = 253 \text{ K}$ і $P1 = 121,3 \text{ кПа}$; крива 2 — $T2 = 273 \text{ K}$ і $P2 = 111,3 \text{ кПа}$; крива 3 — $T3 = 293 \text{ K}$ і $P3 = 101,3 \text{ кПа}$; крива 4 — $T4 = 313 \text{ K}$ і $P2 = 91,3 \text{ кПа}$; крива 5 — $T5 = 333 \text{ K}$ і $P1 = 81,3 \text{ кПа}$. Аналогічні результати моделювання за одночасного збільшення тиску та зменшення температури наведено на рис. 10.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що за одночасного зменшення тиску і температури середня відносна похибка на кожні 10 % складає 3,5 %, а за їх збільшення — 2,2 %. За одночасного збільшення

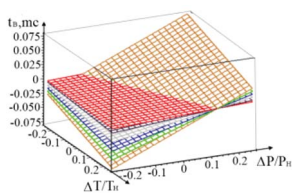


Рис. 5. Результати моделювання мультиплікативної складової похибки

Fig. 5. Modeling results multiplicative constituent errors

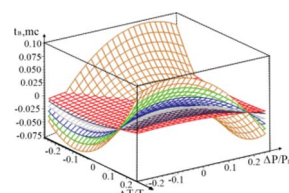


Рис. 6. Результати моделювання нелінійної квадратичної складової похибки

Fig. 6. Modeling results nonlinear quadratic constituent errors

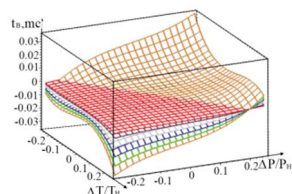


Рис. 7. Результати моделювання нелінійної кубічної складової похибки

Fig. 7. Modeling results nonlinear cubic constituent errors

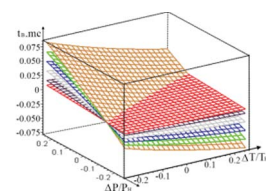


Рис. 8. Результати моделювання загальної похибки

Fig. 8. Modeling results total error

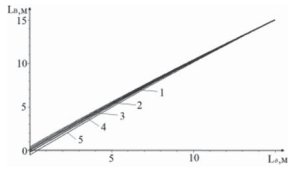


Рис. 9. Результати моделювання статичних характеристик за одночасного підвищення тиску й температури

Fig. 9. Modeling results static characteristics with simultaneous increase of pressure and temperature

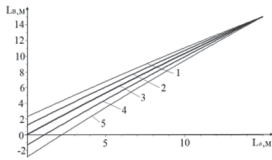


Рис. 10. Результати моделювання статичних характеристик за підвищення тиску та зменшення температури

Fig. 10. Modeling results static characteristics with pressure increase and temperature reduction

тиску та зменшення температури відносна похибка на кожні 10 % складає 7,3 %, а за зменшення тиску та збільшення температури на таку ж величину — 5,1 %.

Якщо на ОВКУ одночасно діють три впливні фактори: z_1, z_2 і z_3 (наприклад, температура T , тиск P і напруга U), — то такий засіб можна описати таким 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 у 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 передавання; $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3$.

Для такої матриці маємо:

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

Якщо прийняти, що $y = \sum_1^i y_i$, де $i = 1, 2, \dots, 6$, то рівняння (35) можна записати у такий спосіб: $y_1 = k_{11}k_{22}k_{33}L$, $y_2 = k_{12}k_{23}k_{32}L$, $y_3 = k_{13}k_{22}k_{31}L$, $y_4 = -k_{11}k_{22}k_{33}L$, $y_5 = -k_{13}k_{22}k_{31}L$, $y_6 = -k_{11}k_{23}k_{33}L$. Кожне рівняння описує деяку вимірювальну гілку, яка складається із трьох функціональних перетворювальних ланок. Для розглядуваного ОВКУ таких ланок є 6, які паралельно з'єднані, як показано на рис. 11.

Оскільки вихідна координата ОВКУ $y = y_0 \pm \Delta y$, де y_0 — номінальне значення; $\pm \Delta y$ — абсолют-

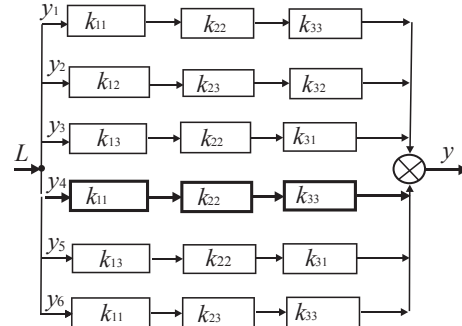


Рис. 11. Узагальнена структурна схема ОВКУ для тримірної задачі відповідно до матриці (34)

Fig. 11. Generalized structural scheme OMCM for a three-dimensional problem according to the matrix (34)

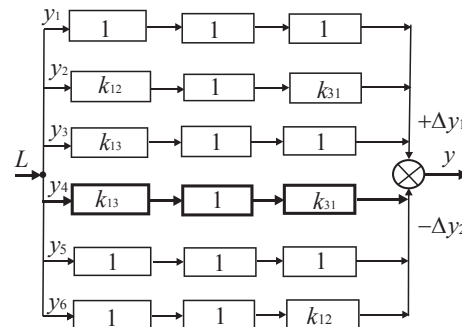


Рис. 12. Структурна схема ОВКУ для тримірної задачі відповідно до матриці (36)

Fig. 12. Structural scheme OMCM for a three-dimensional problem according to the matrix (36)

на похибка, а кожний коефіцієнт перетворення $k_{ij} = k_{00} \pm \Delta k_{ij}$, то, розклавши рівняння (35) у ряд Тейлора та обмежившись лише лінійними складовими, отримуємо таке рівняння для загальної абсолютної похибки у такій формі:

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

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

цієнт перетворення.

Оскільки за реальних умов 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 з'являються 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 передавання 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 вид, показаний на рис. 12.

Тоді узагальнене рівняння для похибки вимірювання приймає такий вид:

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

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


ВИСНОВКИ

Вимірювальні кола технічних засобів контролю та управління, як правило, складаються із двох і більше динамічних ланок, на кожну з яких діють різноманітні як внутрішні, так і зовнішні впливні фактори. Наприклад, для контролю зміни температурного поля в газових реакторах установлюються термомпари в шарах каталізатора як за їх висотою, так і за діаметром. Незважаючи на практичну ідентичність термомпар, на кожну з них впливає низка різних факторів, таких 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 термомпарі, перш ніж перетворитися в термоелектрорушійну

силу (термоЕРС), проходить одну або декілька зон реологічних переходів (металевого та керамічного захисту, прошарку газу чи теплопровідного наповнювача, спаю термомпари). За кожного реологічного переходу теплова енергія зазнає відповідне перетворення, що призводить до втрати теплової енергії або до додаткового її накопичення за рахунок внутрішніх джерел тепла. Навіть у спаї термомпари має місце втрата теплової енергії на рух електронів, а останніх — на термоЕРС внаслідок електричних параметрів електродів. Із цього випливає, що кожне вимірювальне коло можна вважати як багатопараметричний об'єкт вимірювання, на який чинять відповідну дію різноманітні фактори. Під час експлуатації технологічних об'єктів контролю та управління важливим є завдання визначення основних, найбільш сильних впливних факторів, їх кількість, а в багатьох випадках, і компенсувальні дії з метою розроблення систем їх компенсації. Матричний метод дослідження похибок вимірювання є найбільш ефективним, який дозволяє не лише визначати найбільш сильні впливні фактори у поточному режимі роботи ТОК, але й їх кількість і напрямок дії того чи іншого впливного фактора. Оскільки масиви впливних факторів можна подати у виді матриць функціональних перетворень, то похибки вимірювань теж являтимуть матриці, які можна описати відповідними інтегральними матрицями, за допомогою яких є можливість розділити їх на низку тримірних систем та оптимізувати процес вимірювання за допомогою тримірного інтегрального функціонала.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Технологический регламент производства аммиака мощностью 1360 т/сутки по проекту фирмы ТЕС. — Северодонецк: Изд-во «Радянська Донецчина» г. Донець (Technologicheskij reglament proizvodstva ammiaka moshhnost'ju 1360 t/sutki po projektu firmy TES. — Severodonetsk: Izd-vo «Radjans'ka Donechchina» g. Doneck). — 1979. — 534 с/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 (Stencel' J.I., Porkuyan O.V. Komp'yuterno-integrovanі systemy upravlinnya khimiko-technologichny'my' procesamy'. Ch1. Vy'robny'cztva konversiyi pry'rodnogo gazu. — Lugans'k, Vy'd-vo Sxidno-ukr. nacz.. un-tu). — 2014. — 350 с/с.
3. Дудников Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов [Текст] / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривсунов, А.М. Цирлин. — М.: Химия (), 1970. — 312 с/с.
4. Обозовський С.С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки (Загальні питання теорії похибок) [Текст] / С.С. Обозовський. — К.: УМК ВО (Obozovs'ky'j S. S. Teorety'chni osnovy` informacijno-vy'miryval'noyi tekhniki` (Zagal'ni py'tannya teoriyi roxy'bok) [Tekst] / S. S. Obozovs'ky'j. — К.: УМК ВО), 1991. — 223 с/с. ISBN 5-7763-0667-1.
5. Гораздовський Т.Я. Наукові основи реології [Текст] / Т.Я. Гораздовський // Монографія. — Луганск: Изд.-во Вост.- нац. ун-та им. В. Даля (Gorazdovs'ky'j T.Ya. Naukovi osnovy` reologiyi [Tekst] / T. Ya. Gorazdovsky'j // Monografiya. — Lugansk: Y'zd.-vo Vost. — nacz. un-ta y'm. V. Dalya). 2012. — 775 с/с.
6. Стенцель Й.І. Математичне моделювання хімічних процесів на основі теорії реологічних переходів [Текст] / Й.І. Стенцель // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. №5(111). Ч.2 (Stencel' J.I. Matematy'chne modelyuvannya khimichny'x procesiv na osnovi teoriyi reologichny'x perexodiv [Tekst] / J.I. Stencel' // Visny'k SNU im. Volody'my'ra Dalya. № 5(111). Ch.2), — 2007. — С/С. 91—97.

7. 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» (Porkuyan O.V., Stencel' J.I., Prokaza O.I. Reologichni modeli texnologichnogo kontrolyu parametriv z vnutrishnimy`zv'yazkamy` u vy`robnuy`chzvi amiachnoyi selitry`. Vestny`k nacy`onal'nogo texny`cheskogo uny`versy`teta «ХПУ»). — 2010, № 12, С/С. — 21—23.
8. Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І. Дослідження вимірального контролю технологічних параметрів при реологічних перетвореннях хімічних процесів. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. «Електроенергетика і преобразовательная техника». — Харків: НТУ «ХПИ» (Stencel' 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 texnichnogo uny`versy`tetu «Хarkivs`ky`j politexnichny`j insty`tut». Zbirny`k naukovy`x prac`. «Elektroenergety`ka y` preobrazovatel'naya texny`ka». — Харків: NTU «ХПИ»). — 2011. — № 19. — С/С. 31—37.
9. Стенцель Й.І. Фотоколориметричні газоаналізатори. Монографія. [Текст] / Й. І. Стенцель. — К.: НМК ВО (Stencel' J. I. Fotokolory`metry`chni gazoanalizatory`. Monografiya. [Tekst] / J. I. Stencel`. — К.: НМК ВО), 1992. — 124 с/с.
10. 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 (Stencel' J. I. Matematy`chne modelyuvannya ul`trazvukovy`x rıvнемiriv na osnovi teoriyi reologichny`x perexodiv [Tekst] / J. I. Stencel', A.V. Tomson, A.V. Ryabichenko // Materialy` drugoyi vseukrayins`koyi naukovo-prakty`chnoyi internet-konferenciyi «Aktual`ni problemy` suchasnoyi nauky`. Ch1. — Ky`yiv). — 2006. С/С. 78—81.
11. 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
12. Стенцель Й.І. Математичні моделі ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів рівня речовин [Текст] / Й.І. Стенцель, А.В. Томсон // Вопросы химии и химической технологии (Stencel' J. I. Matematy`chni modeli ul`trazvukovy`x p`yezoelektry`chny`x peretvoryuvachiv rıvnya rechovy`n [Tekst] / J.I. Stencel', A.V. Tomson // Voprosu ху`му`y` y` ху`му`cheskoj texnologiy`y). — 2007. — №4. — С/С. 182—185. ISSN 0321-4095.
13. 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. «Електроенергетика преобразовательная техника». — Харків: НТУ «ХПИ» (Stencel' J.I. Fyzy`chni modeli peretvoren`v ul`trazvukovy`x zasobax kontrolyu rıvnya ridy`ny` ridy`nny`x seredovy`shh [Tekst] / J.I. Stencel', A.V. Ryabichenko, K.A. Litvinov // Visny`k Nacional'nogo texnichnogo uny`versy`tetu «Хarkivs`ky`j politexnichny`j insty`tut». Zbirny`k naukovy`x prac`. «Elektroenergety`ka preobrazovatel'naya texny`ka». — Харків: NTU «ХПИ»). — № 19. 2011. С/С. 3—18. ISSN 2079-4525.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. — М.: Высш. шк. (Lykov A. V. Teorija teploprovodnosti [Tekst] / A. V. Lykov. — М.: Vyssh. shk.), — 1967. — 599 с/с.
15. Воробьев Н.Н. Теория рядов [Текст] / Н.Н. Воробьев. — М.: Изд-во «Наука» (Vorob'ev N. N. Teorija rjadov [Tekst] / N.N. Vorob'ev. — М.: Izd-vo «Nauka»). — 1975. — 367 с/с.
16. 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» (Gnoevskij L.S., Kamenskij G.A., Jel'sgol'c L.Je. Matematicheskie osnovy teorii upravlyaemyh sistem [Tekst] / L.S. Gnoevskij, G.A. Kamenskij, L.Je. Jel'sgol'c. — М.: Izd-vo «Nauka»). — 1989. — 512 с/с.
17. 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 (Ryabichenko A.V. Ul`trazvukovy`j rıvнемir 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 с/с.
18. Стенцель Й.І., Поркуян О.В., Проказа О.І. Основи теорії багатопараметричних об'єктів керування з реологічними переходами. Науковий журнал «Технологічні комплекси», Луцьк (Stencel' J.I., Porkuyan O.V., Prokaza O.I. Osnovy` teoriyi bagatoparmetry`chny`x ob'yektiv keruvannya z reologichny`mu` perexodamy`. Naukovy`j zhurnal «Texnologichni komplekxy», Lucz`k), — 2010. — № 2. — С/С. 46—51. 

Отримано / received: 04.10.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.Г. Архіповим (Україна).
Prof. O.G. Arhipov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.