

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-503.56+681.514+628.538

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/08>**Бабіч В.Ф.**

Одеська національна академія харчових технологій

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ДИСКРЕТНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЛАНЦЮГА ЗА ДІЇ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕНЬ

Оптимальний процес горіння в котельних та інших установках відбувається за стехіометричного співвідношення горючої частини палива і повітря в топковій камері з коефіцієнтом надлишку повітря 1,01...1,05 за умови повного змішування палива і повітря в пальникових пристроях. При цьому в димових газах або повністю відсутні продукти недопалювання – водень, окисли вуглецю тощо, або в них містяться їх сліди на рівні порогів чутливості газоаналізаторів, тобто в концентраціях, значно менших від гранично допустимих.

Безперервна оптимізація процесу горіння в промислових установках можлива шляхом підтримання оптимального коефіцієнту надлишку повітря. Рішення цієї задачі можливе лише у разі використання високочутливих методів аналізу продуктів горіння, наприклад, хроматографічних, поріг чутливості яких складає 10^{-3} ... 10^{-4} об.% щодо водню та окису вуглецю.

Дискретний принцип роботи хроматографічного аналізатора-коректора, а також обмежений ресурс його роботи в умовах випадкових збурень з боку складу палива та витрат повітря вимагає визначення оптимального періоду дискретності вимірювання складу димових газів, за якого по дискретним відлікам можливе одержання відтворюючої функції.

Виконаний аналіз дає підстави стверджувати, що у випадках, коли автокореляційні функції вхідних сигналів включають гармонійні складові, а транспортне запізнювання в дискретному ланцюзі вимірювання перевищує постійну часу, на величину інтервалу дискретності необхідно накладати як обмеження, як за максимальною величиною згідно з теоремою В.А. Котельникова, так і обмеження за мінімальною величиною, згідно з яким величина інтервалу дискретності повинна бути більше часу запізнювання.

Ключові слова: склад димових газів, оптимізація процесу горіння, дискретний аналіз, автоматичний газовий хроматограф, автокореляційна функція.

Постановка проблеми. Під час спалювання газоподібних та рідких органічних палив в котельних установках, в установках вогневого знешкодження токсичних відходів хімічних технологій тощо в атмосферне повітря надходить велика кількість потенційно небезпечних компонентів у димових газах (окисли: вуглецю CO , азоту NO , сірки SO_2 та ін.). Хімічні речовини, що надходять в атмосферне повітря від роботи технологічних установок промислових підприємств, можуть трансформуватися з утворенням більш токсичних сполук.

Для мінімізації токсичних газових викидів у навколишнє середовище з пристроїв спалювання необхідно використовувати високочутливі датчики концентрації небезпечних складових компонентів недопалювання в димових газах, поріг

чутливості яких повинен складати 10^{-3} ... 10^{-4} об.%. При цьому можливе підтримання оптимального коефіцієнту надлишку повітря 1,01...1,05 в топковій камері в умовах змінного складу палива [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для аналітичного контролю складу продуктів горіння палива застосовують різні фізико-хімічні методи аналізу, в тому числі з цією метою широко використовується газова хроматографія, яка дозволяє отримати інформацію про індивідуальний і груповий склад продуктів горіння [1–4]. Для використання в автоматичних системах оптимізації процесу спалювання нами був розроблений високочутливий автоматичний газовий хроматографічний аналізатор-коректор з мікропроцесорним управлінням «Хромавтокор-5» [5]. За принципом дії він виконує

циклічні аналізи складників димових газів водню H_2 , азоту N_2 та окису вуглецю CO , концентрація яких представляється у вигляді хроматографічних піків, площі яких пропорційні концентраціям відповідних аналізованих газів, та формує коригуючі впливи в регулятор повітря. Для підвищення надійності і тривалості безперервної експлуатації приладу як датчик складу димових газів потрібно визначити оптимальний період повторення його аналізів, тобто оптимальний інтервал дискретності у часі T .

Величина періоду повторення аналізів повинна вибиратися такою, щоб за миттєвими значеннями функції входу $x(t)$ за мінімальної кількості відліків можна було отримати із заданою точністю відтворюючу функцію $y(t)$. Збільшення періоду повторення відліків призводить до зниження точності відтворення, зменшення – до надмірної кількості відліків, що знижує ресурс приладу, зокрема його елементів – термокаталітичного детектора і адсорбенту хроматографічної розділової колонки. Необхідно враховувати також обмеження на мінімальну величину періоду повторення аналізу: $T > T_a$. Це означає, що інтервал дискретності аналізу T не може бути меншим за мінімально допустимий час циклу аналізу хроматографа T_a . Величина часу T_a визначається конструктивними і режимними характеристиками приладу: довжиною хроматографічної розділової колонки, витратою газу-носія, видом адсорбенту тощо.

Для сигналів з обмеженим спектром справедлива теорема В.А. Котельникова [10], згідно з якою безперервний сигнал повністю відновлюється за дискретними відліками, якщо дотримується умова $T \leq \pi/\omega_{gr}$, де ω_{gr} – верхня гранична частота безперервного сигналу. Теорему, очевидно, слід розглядати як наближене твердження для реальних сигналів, що мають зменшувальні за модулем спектри при $\omega \rightarrow \infty$, але фактично не є обмеженими [12]. Визначення ω_{gr} при цьому має умовний характер і оцінюється, наприклад, за енергетичними характеристиками спектра сигналу [7].

У роботі [9] були виконані дослідження дискретних ланцюгів, що включають транспортне запізнювання і фіксуючу ланку, на вхід яких подається випадковий процес з автокореляційною функцією

$$R(\tau) = R(0)e^{-\alpha|\tau|} \quad (1)$$

У подібних вимірювальних ланцюгах спостерігається переважання транспортного запізнювання τ_u над постійною часу T_u , причому виконується умова

$$\frac{\tau_u}{T_u} > 1,5. \quad (2)$$

Аналітичні дослідження ланцюгів такого типу показали, що як у разі детермінованих вхідних сигналів, так і під час вхідних сигналів з автокореляційною функцією виду (1) додаткова помилка дискретного вимірювання у разі використання фіксуючої ланки нульового порядку мінімальна, якщо інтервал дискретності обмежений «зверху» і «знизу» [9]:

$$\frac{\pi}{\omega_{gr}} \geq T \geq \tau_u. \quad (3)$$

Формулювання цілей статті. Визначимо справедливості цього твердження для випадку, коли функція входу є випадковим процесом з автокореляційною функцією типу «нерегулярної качки», характерної для сигналів зі складу димових газів установок спалювання газоподібних та рідких органічних палив та відходів хімічних технологій

$$R(\tau) = R(0)e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \Omega\tau + \frac{\alpha}{\Omega} \sin \Omega\tau \right), \quad (4)$$

а також оцінимо доцільність адаптації властивостей фіксуючої ланки до несучої частоти процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відбірковий пристрій для подачі на аналіз димових газів розташовується в газоході установки якомога ближче до топкової камери. Аналізований газ перш ніж потрапити в детектор аналізатора, проходить через газохід в систему підготовки газу на аналіз.

Передавальні функції окремих включених послідовно елементів, що беруть участь у передачі інформації про склад аналізованого газу, мають вигляд:

– об'єму топкової камери і газоходу котельної установки до місця відбору газу на аналіз

$$W_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau_m s}; \quad (5)$$

– ліній транспортування аналізованого газу від газовідбірного пристрою до аналізатора

$$W_n(s) = e^{-\tau_n s}; \quad (6)$$

– фільтрів підготовки газу на аналіз

$$W_\phi(s) = \frac{1}{T_\phi s + 1} e^{-\tau_\phi s}; \quad (7)$$

– розділової хроматографічної колонки і детектора аналізатора

$$W_a(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} e^{-\tau_a s}; \quad (8)$$

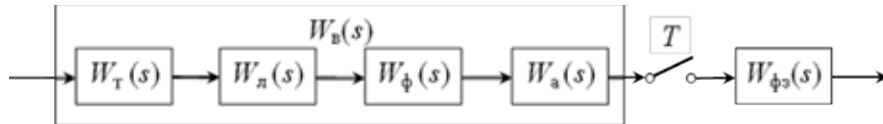


Рис. 1. Структурна схема дискретного вимірювального ланцюга складу димових газів

В автоматичному хроматографічному коректорі автоматичний дозатор, що є модулятором, розташований між фільтрами та колонкою. Віднесемо все транспортне запізнювання до безперервної частини ланцюга, умовно прийнявши розташування модулятора за колонкою (рисунок 1). Тоді загальний час запізнювання можна уявити як суму

$$\tau_u = \tau_m + \tau_n + \tau_\phi + \tau_a. \quad (9)$$

Встановлено, що постійна часу фільтрів пристрою підготовки газу значно перевищує постійні часу інших елементів.

Не припускаючи значної похибки, можна ланцюг послідовно включених ланок розглядати таким, що складається з двох елементів: ємнісної ланки – фільтра і ланки транспортного запізнювання з передавальною функцією

$$W_u(s) = \frac{K_u}{T_u s + 1} e^{-\tau_u s}, \quad (10)$$

де $K_u = K_m K_u$ – коефіцієнт передачі вимірювального ланцюга;

$T_u \cong T_\phi$ – постійна часу вимірювального ланцюга.

У дискретному вимірювальному ланцюгу складу димових газів роль модулятора виконує автоматичний дозуючий пристрій, що подає в моменти часу nT дозу газів на аналіз у автоматичний газовий хроматограф. Отримані в кожному циклі аналізу піки хроматограм відображають безперервні функції вмісту водню H_2 і окису вуглецю CO , модульовані гратчастою функцією з інтервалом повторення T . Перетворення дискретної інформації на неперервну виконується за допомогою екстраполятора, звичайно нульового порядку. Як екстраполятор застосовуються як аналогові фіксуючі ланки [6; 13], так і мікропроцесорні обчислювальні пристрої, що дозволяють зняти проблему розрядки фіксуючих конденсаторів загалом.

Передавальна функція фіксуючої ланки нульового порядку має вигляд [13]:

$$W_{\phi3}^0(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}. \quad (11)$$

Застосування фіксуючих ланок вищого порядку може покращити точність відновлення функції входу, розширити спектр вхідних сигналів [6; 13]. Фіксуюча ланка першого порядку, що більш точно апроксимує вхідну функцію, має передавальну функцію [7]:

$$W_{\phi3}^1(s) = T(1 + Ts) \frac{1 - e^{-sT}}{s}. \quad (12)$$

Для певного класу вхідних сигналів узагальнена фіксуюча ланка з дробовим коефіцієнтом K може більш точно відновлювати функцію входу в порівнянні з ланкою першого порядку [7]. Передавальна функція такої ланки має вигляд

$$W_{\phi3}^K(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-sT}) \left[1 - Ke^{-sT} + \frac{K}{sT} (1 - e^{-sT}) \right], \quad (13)$$

причому, при $K = 0$ вона відображає властивості ланки нульового порядку, а при $K = 1$ – ланки першого порядку. Вибір величини K визначається насамперед зміною несучої частоти вхідного сигналу і вимагає надання фіксуючій ланці властивостей адаптації до неї.

Оцінку точності дискретного вимірювального ланцюга виконаємо за дисперсією сигналу на виході умовної схеми (рисунок 2), що формує різницю вхідного випадкового і вихідного, перетвореного ланцюгом, сигналів:

$$D_\varepsilon^*(\omega) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} |1 - W^*(j\omega)|^2 S_{xx}^*(\omega) d\omega, \quad (14)$$

де $W^*(j\omega)$ – частотна характеристика дискретного вимірювального ланцюга (імпульсного фільтра);

$S_{xx}^*(\omega)$ – спектральна щільність потужності вхідного дискретного випадкового процесу $x^*(nT)$.

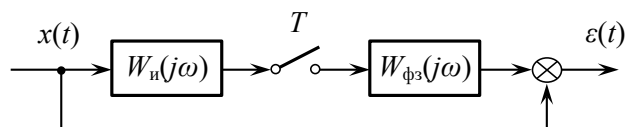


Рис. 2 Розрахункова схема дискретного вимірювального ланцюга

Дискретну передавальну функцію вимірювального ланцюга, що включає безперервну частину з передавальною функцією (10), модулятор з періодом повторення T і фіксуючу узагальнену ланку першого порядку, отримуємо, застосовуючи до виразу (10) модифіковане z -перетворення

$$W^*(z, m) = (1 - z^{-1})(1 - Kz^{-1})Z_m \left\{ \frac{W_u(s)}{s} \right\} + \frac{K}{T}(1 - z^{-1})^2 Z_m \left\{ \frac{W_u(s)}{s} \right\}, \quad (15)$$

де Z_m – символ операції модифікованого z -перетворення.

Виконавши Z_m -перетворення з урахуванням виразу (10), отримуємо наступне співвідношення

$$W^*(z, m) = (1 - z^{-1})(1 - Kz^{-1}) \left(\frac{1}{z-1} \right) + \frac{K}{T}(1 - z^{-1})^2 \left[\frac{e^{-m\omega_u T}}{\omega_u(z - e^{-m\omega_u T})} + \frac{T}{(z-1)^2} + \frac{m\omega_u T}{\omega_u(z-1)} \right], \quad (16)$$

де $m = 1 - \frac{\tau_u}{T}$; $\omega_u = \frac{1}{T}$.

Підінтегральний вираз $1 - W^*(j\omega)$ визначимо шляхом заміни змінної $z = e^{j\omega T}$. Після ряду перетворень виразу (16) отримуємо

$$1 - W^*(j\omega) = \frac{B_0 e^{3j\omega T} + B_1 e^{2j\omega T} + B_2 e^{j\omega T} + B_3}{e^{2j\omega T} (A_0 e^{j\omega T} + A_1)} = \frac{B_0 e^{j\omega T} + B_1 + B_2 e^{-j\omega T} + B_3 e^{-2j\omega T}}{A_0 e^{j\omega T} + A_1}, \quad (17)$$

де $B_0 = 1$; $B_1 = -\frac{K}{\beta}(e^{-\nu} + \nu - 1) - (e^{-\beta} - e^{-\nu} + 1)$;

$$B_2 = -\frac{K}{\beta} \left[(e^{-\beta} + 1)(1 - \nu) - e^{-\nu}(\beta - 2) \right] - (e^{-\nu} - e^{-\beta});$$

$$B_3 = -\frac{K}{\beta} \left[(e^{-\nu} - e^{-\beta}) + e^{-\beta}\nu - \beta e^{-\nu} \right];$$

$$A_0 = 1; \quad A_1 = -e^{-\beta}; \quad \beta = mT; \quad \nu = m\omega_u T.$$

Дискретна кореляційна функція випадкового процесу, характерного для зміни складу продуктів горіння, що надходить на вхід вимірювального ланцюга, отримана з виразу (4) шляхом підстановки $\tau = nT$.

$$R_{xx}(nT) = R(0)e^{-\alpha|nT|} \left(\cos \Omega nT + \frac{\alpha}{\Omega} \sin \Omega nT \right). \quad (18)$$

Дискретна спектральна щільність потужності дискретного випадкового процесу визначена з урахуванням (18) за співвідношенням

$$S_{xx}^*(z) = R_{xx}^*(z) + R_{xx}^*(z^{-1}) - R(0), \quad (19)$$

де $R_{xx}^*(z)$ – z -перетворення від кореляційної функції $R_{xx}(nT)$. З урахуванням перетворень окремих складових $S_{xx}^*(z)$ за таблицею 1 [10] отримуємо

$$R_{xx}^*(z) = R(0) \left[\frac{z(z - qb)}{z^2 - 2qbz + q^2} + \frac{czqa}{z^2 - 2qbz + q^2} \right] = R(0) \frac{z^2 + zq(ca - b)}{z^2 - 2qbz + q^2}, \quad (20)$$

$$R_{xx}^*(z^{-1}) = R(0) \left[\frac{z^{-1}(z^{-1} - qb)}{z^{-2} - 2qbz^{-1} + q^2} + \frac{cz^{-1}qa}{z^{-2} - 2qbz^{-1} + q^2} \right] = R(0) \frac{1 + zq(ca - b)}{1 - 2qbz^{-1} + q^2 z^2}, \quad (21)$$

де $q = e^{-\alpha T}$; $b = \cos \Omega T$; $a = \sin \Omega T$; $c = \frac{\alpha}{\Omega}$.

Розглядаючи спільно вирази (19)–(21), одержимо вираз для дискретної спектральної щільності:

$$S_{xx}^*(z) = R(0) \frac{z(D_0 z^2 + D_1 z + D_0)}{C_0 z^4 + C_1 z^3 + C_2 z^2 + C_1 z + C_0}, \quad (22)$$

де $D_0 = q[(ca - b) + q^2(ca + b)]$;

$$D_1 = 1 - 4cbqa^2 - q^4;$$

$$C_0 = q^2;$$

$$C_1 = -2qb(1 + q^2);$$

$$C_2 = 1 + 4q^2 b^2 + q^4.$$

Замінивши z на $e^{j\omega T}$, після перетворень одержаного виразу знайдемо вираз для функції спектральної щільності в частотній області

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{D_0 e^{2j\omega T} + D_1 e^{j\omega T} + D_0}{e^{j\omega T} |E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2|^2} = R(0) \frac{D_0 e^{j\omega T} + D_1 + D_0 e^{-j\omega T}}{|E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2|^2}, \quad (23)$$

де $E_0 = 1$; $E_1 = -2qb$; $E_2 = q^2$, а для отримання більш простого виразу знаменника використаємо співвідношення [8]:

$$e^{2j\omega T} (C_0 e^{2j\omega T} + C_1 e^{j\omega T} + C_2 + C_1 e^{-j\omega T} + C_0 e^{-2j\omega T}) = (24)$$

$$= e^{2j\omega T} (E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2) (E_0 e^{-2j\omega T} + E_1 e^{-j\omega T} + E_2).$$

Покажемо, що рівняння (23) при $\Omega = 0$ приводиться до рівняння дискретної спектральної щільності

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{1-q^2}{|e^{j\omega T} - q|^2}, \quad (25)$$

отриманої в роботі [9] для випадкового процесу з автокореляційною функцією (1). Для рівняння (23) при $\Omega = 0$

$$a = 0; \quad b = 1; \quad D_0 = -q(1-q^2);$$

$$D_1 = 1-q^4 = (1-q^2)(1+q^2);$$

$$E_0 = 1; \quad E_1 = 2q; \quad E_2 = q^2.$$

Підставляючи ці вирази в (23), отримуємо:

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{(1-q)(-qe^{j\omega T} + 1 + q^2 - qe^{-j\omega T})}{|e^{2j\omega T} - 2qe^{j\omega T} + q^2|^2} = (26)$$

$$= R(0) \frac{(1-q^2)|e^{j\omega T} - q|^2}{|e^{j\omega T} - q|^4},$$

Після скорочення чисельника і знаменника на $|e^{j\omega T} - q|^2$, одержимо шуканий вираз (25), що й треба було довести.

Вираз для відношення дисперсії вихідного сигналу цієї схеми до дисперсії вхідного сигналу отримаємо, вирішуючи спільно співвідношення (14), (17), (23):

$$\frac{D_e(\omega)}{R(0)} = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \left| \frac{B_0 e^{j\omega T} + B_1 + B_2 e^{-j\omega T} + B_3 e^{-2j\omega T}}{G_0 e^{3j\omega T} + G_1 e^{2j\omega T} + G_2 e^{j\omega T} + G_3} \right|^2 \times (27)$$

$$\times (D_0 e^{j\omega T} + D_1 + D_2 e^{-j\omega T}),$$

$$\text{де } G_0 = 1; \quad G_1 = -(2qb + e^{-\beta});$$

$$G_2 = q(q + 2be^{-\beta}); \quad G_3 = -q^2 e^{-\beta}.$$

Подібні інтеграли обчислюються за стандартною методикою у вигляді суми інтегралів

$$J_{m,k} = \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \frac{e^{j\omega k T}}{\left| M_m(e^{j\omega T}) \right|^2} d\omega, \quad (28)$$

$$\text{де } M_m(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^m M_{m-n}(e^{j\omega T}).$$

Позначимо

$$J_{3,k} = \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \frac{e^{j\omega k T}}{G_0 e^{3j\omega T} + G_1 e^{2j\omega T} + G_2 e^{j\omega T} + G_3} d\omega. \quad (29)$$

Виконавши ряд перетворень рівняння (27), а також з огляду на те, що для інтегралів виду (28) справедливе співвідношення

$$J_{m,k} = J_{m,-k}, \quad (30)$$

отримаємо вираз для визначення точності дискретного ланцюга:

$$\frac{D_e(\omega)}{R(0)} = (31)$$

$$= \frac{T}{2\pi} (2H_0 J_{3,4} + 2H_1 J_{3,3} + 2H_2 J_{3,2} + 2H_3 J_{3,1} + H_4 J_{3,0}),$$

де $H_0 = D_0 B_0 B_3$;

$$H_1 = D_0 (B_0 B_2 + B_1 B_3) + D_1 B_0 B_3;$$

$$H_2 = D_0 (B_1 B_3 + B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3) + D_1 (B_0 B_2 + B_1 B_3);$$

$$H_3 = D_0 (B_0 B_2 + B_1 B_3 + B_0^2 + B_1^2 + B_2^2 + B_3^2) + D_1 (B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3);$$

$$H_4 = D_0 (B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3) + D_1 (B_0^2 + B_1^2 + B_2^2 + B_3^2).$$

Згідно з таблицею 2.4 [8] з урахуванням прийнятих вище позначень одержимо розрахункові вирази

$$J_{3,0} = \frac{2\pi}{TF} (G_0^2 + G_3^2 + G_0 G_2 - G_1 G_3); \quad (32)$$

$$J_{3,1} = \frac{2\pi}{TF} (G_0 G_1 - G_2 G_3); \quad (33)$$

$$J_{3,2} = \frac{2\pi}{TF} [G_1^2 - G_2^2 - (G_0 G_2 - G_1 G_3)]; \quad (34)$$

$$J_{3,3} = \frac{2\pi}{TF G_0} (G_1^3 - G_1 G_2^2 - 2G_0 G_1 G_2 + G_0^2 G_3 + G_1^2 G_3 + G_2^2 G_3 + G_0 G_2 G_2 - G_1 G_3^2 - G_1^3); \quad (35)$$

$$J_{3,4} = \frac{2\pi}{TF G_0^2} (G_1^4 - G_1^2 G_2^2 + G_0^2 G_2^2 + G_0 G_2^3 + 3G_0 G_1^2 G_2 + 2G_0^2 G_1 G_3 + -G_0 G_2 G_3^2 + G_1 G_2^2 G_3 + +G_1^3 G_3 - G_1^2 G_3^2 - G_1 G_3^3); \quad (36)$$

$$F = [G_0^2 - G_3^2 - (G_0 G_2 - G_1 G_3)] [(G_0 + G_2)^2 - (G_1 + G_3)^2]. \quad (37)$$

Алгоритм розрахунку точності дискретного вимірювального ланцюга (31) був реалізований в середовищі Matlab 7.

Розрахунки були виконані для значень комплексів $\tau_u/T_u = 1,0 \dots 7,5$; $\alpha T_u = 0,01 \dots 0,10$; $\alpha/\Omega = 0,1 \dots 1,0$ і 10^8 при

$m = 0,0 \dots 0,8$, характерних для реальних паливоспалюючих установок.

Відношення α/Ω , рівне 10^8 , взяте для одержання граничного випадку $\Omega = 0$, коли автокореляційна функція не містить гармонійних складників. Досліджувався вплив порядку фіксуючої ланки K зі значеннями порядку 0, 0,5 і 1,0.

Як показують розрахунки, відношення $\frac{D_\varepsilon(\omega)}{R(0)}$

має мінімум при $m = 0,1 \dots 0,29$, більш яскраво виражений в області великих значень τ_u/T_u . Збільшення відношення α/Ω від 0,2 до 1,0 призводить до десятиразового збільшення точності вимірювання (рисунок 3).

Незначне зміщення величини m при десятикратній зміні несучих частот вхідного сигналу α і Ω доводить недоцільність адаптації інтервалу дискретності T до цих частот. Це означає, що доцільно приймати $T = (1,15 \dots 1,37) \cdot \tau$, що відповідає $m = 0,15 \dots 0,27$. Зі збільшенням відношення τ_u/T_u оптимальне значення параметра m зменшується, а зменшення добутку αT_u не має істотного впливу на характер зміни m_{opt} (рисунок 4). При цьому параметр m залишається позитивним, що

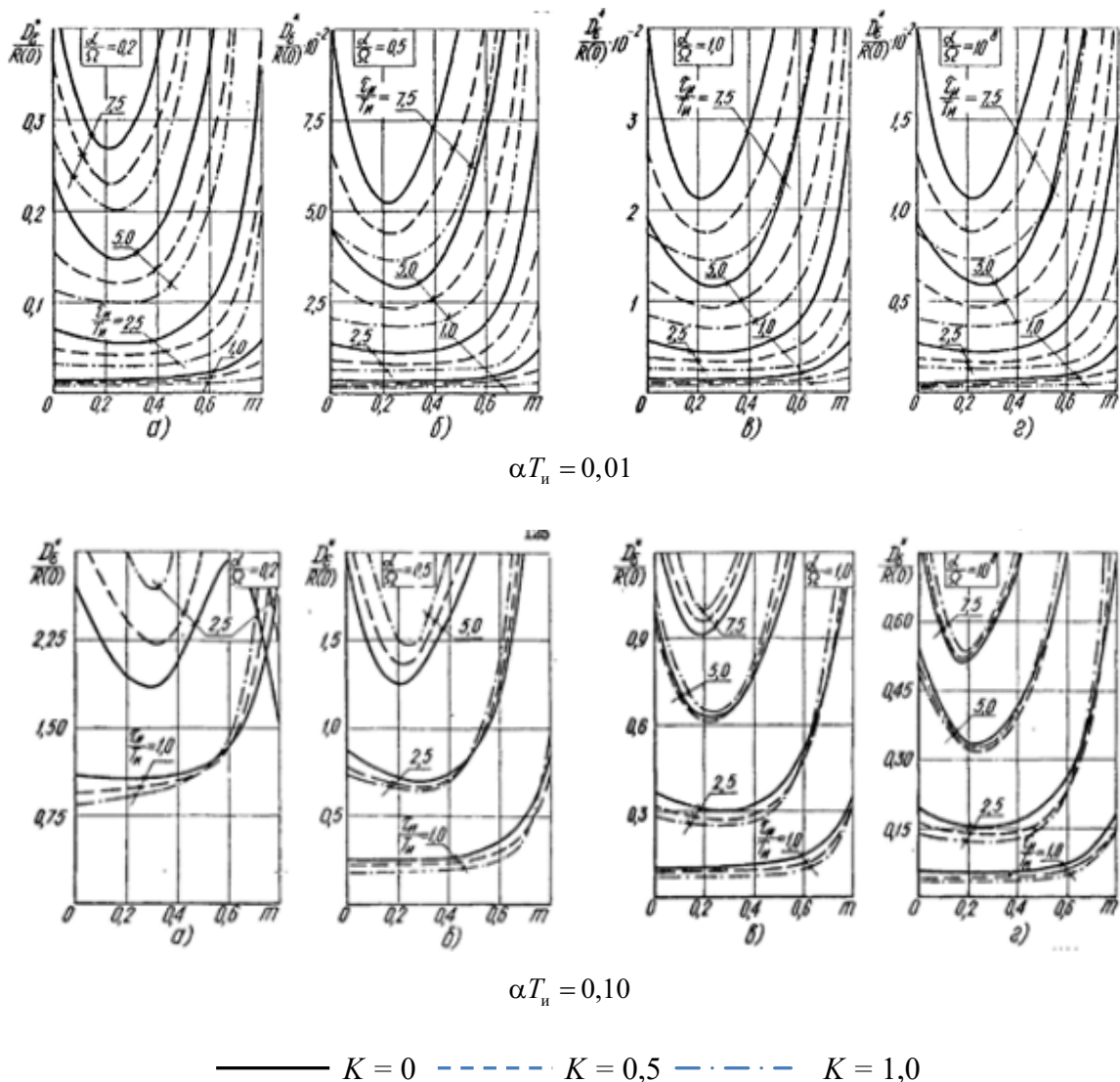


Рис. 3 Залежність відносної дисперсії помилки вимірювання від параметра m

означає виконання умови $T \geq \tau_u$. У разі невиконання цієї умови динамічна помилка вимірювання різко зростає.

Отже, за наявності в ланцюзі вимірювання транспортного запізнювання інтервал дискретності необхідно додатково обмежувати за мінімальною величиною, прийнявши умову

$$T \geq \tau_u. \quad (38)$$

Зміна порядку K фіксуєючої ланки може привести як до збільшення, так і до зменшення точності вимірювання (рисунок 5).

Теорема В.А. Котельнікова, виражена в прийнятих нами позначеннях відносного запізнювання m і визначальних комплексів $\alpha/T_u, \tau_u/T_u, \alpha/\Omega$ має вигляд:

$$D = \pi(1 - m), \quad (39)$$

$$\text{де } D = \frac{\left(\frac{\alpha}{T_u}\right)\left(\frac{\tau_u}{T_u}\right)}{\left(\frac{\alpha}{\Omega}\right)}.$$

Підвищення порядку фіксуєючої ланки збільшує точність вимірювання під час виконання більш жорсткої умови

$$D = 1 - m. \quad (40)$$

Залежність параметра D від визначальних комплексів наведена в таблиці 1.

Умову (39) можна виконати зміною як інтервалу дискретності, так і транспортного запізнювання в ланцюзі вимірювання. На рисунку 5 заштри-

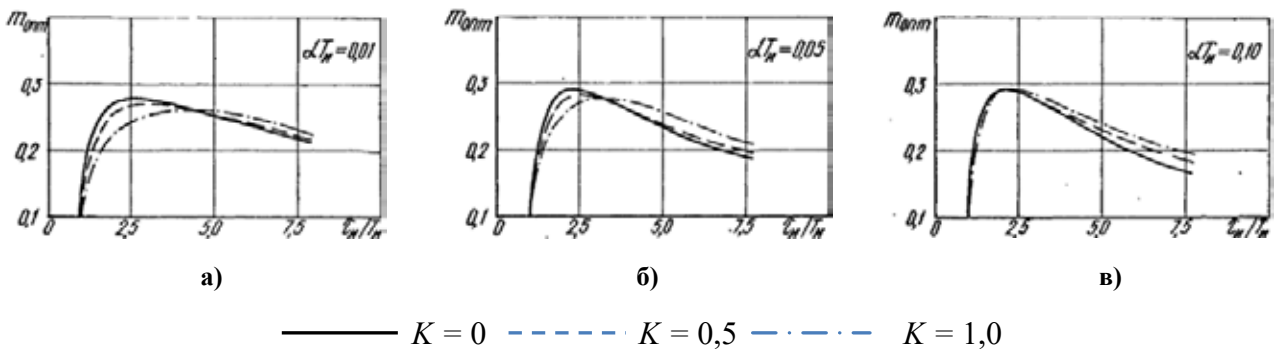


Рис. 4. Залежність оптимального значення параметра m від τ_u/T_u при $\alpha/\Omega = 0,1 \dots 1,0$

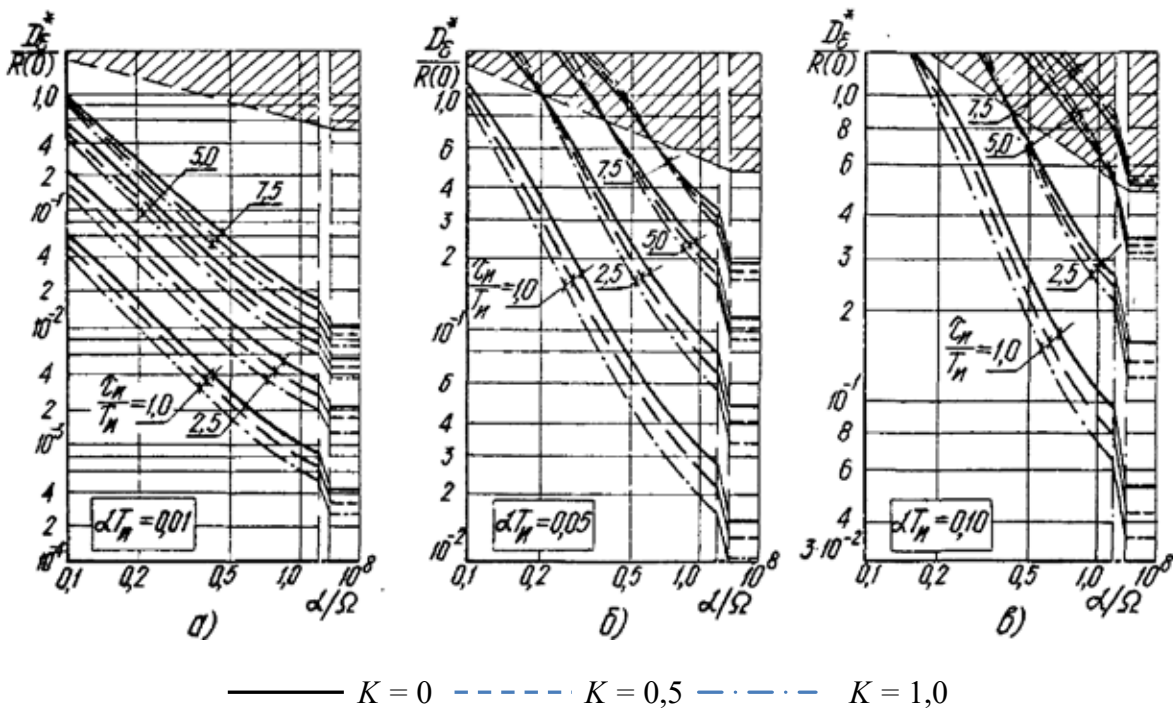


Рис. 5. Залежність мінімуму відносної дисперсії помилки від параметра α/Ω

Залежність параметра D від визначальних комплексів

αT_u	τ_u / T_u	α / Ω		
		0,20	0,50	1,0
0,01	1,0	0,050	0,025	0,010
	2,5	0,125	0,050	0,025
	5,0	0,250	0,100	0,050
	7,5	0,375	0,150	0,075
0,05	1,0	0,250	0,100	0,050
	2,5	0,625	0,250	0,125
	5,0	1,250	0,500	0,250
	7,5	1,375	0,750	0,375
0,10	1,0	0,500	0,200	0,100
	2,5	1,250	0,500	0,250
	5,0	2,500	1,000	0,500
	7,5	3,750	1,500	0,750

хована область, у якій недоцільне підвищення порядку фіксуєної ланки. Під час виконання умови (40) збільшення точності становить 10...50 відсотків, причому більший ефект досягається при $\tau_u / T_u = 1,0 \dots 2,5$ і α / Ω більше 0,3.

Висновки. Виконаний аналіз дає підстави стверджувати, що у випадках, коли автокореляційні функції вхідних сигналів включають гармонійні складники, а транспортне запізнювання

в дискретному ланцюзі вимірювання перевищує постійну часу, на величину інтервалу дискретності необхідно накладати як обмеження за максимальною величиною згідно з теоремою В.А. Котельникова, так і обмеження за мінімальною величиною, згідно з яким величина інтервалу дискретності повинна бути більше часу запізнювання. Ускладнення конструкції фіксуєної ланки звичайно не виправдовується одержаним ефектом.

Список літератури:

1. Гохберг Ж.-Г.Л. Исследование и оптимизация топочных процессов сжигания газа и мазута дискретным хроматографическим анализатором-корректором : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1968. 19 с.
2. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике. Москва : Энергия, 1980. 271 с.
3. Александров Ю.Б., Савельева Н.И. Совершенствование газохроматографического метода анализа газообразного топлива и продуктов его горения. *Ученые записки Казанского государственного университета. Том 151, кн. 1. Естественные науки*, 2009. С. 73–78.
4. Сажин В.А. Оптимизация систем управления процессом термического обезвреживания отходов. *В кн.: Сборник докл. Междунар. Конф. «Математические методы в технике и технологиях»*. Псков. 2009.
5. А.с. 1046662 (СССР). Автоматическое устройство для определения и корректировки полноты сжигания углеводородных смесей и газов. / В.Ф. Бабич, В.Ю. Вадов, В.С. Полоник. Заявл. 5.06.1981, №3298866/18-25; Опубл. В Б.И., 1983, № 37.
6. Догановский С.А., Иванов В.А. Устройства запаздывания и их применение в автоматических системах. Москва : Машиностроение, 1966 . 280 с.
7. Кузин Л.Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления. Москва : Машгиз, 1962. 684 с.
8. Лившиц Н.А., Пугачев В.И. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Москва : Советское радио, 1963. Кн. 1, 896 с., кн. 2, 484 с.
9. Полоник В.С. Исследование и оптимизация огневого обезвреживания горючесоержащих газовых выбросов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1974. 23 с.
10. Ротач В.Я. Импульсные системы автоматического регулирования. М.-Л.: Энергия, 1964. 224 с.
11. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. Москва : Наука, 1967. 432 с.
12. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, испр. и доп. Москва ; Энергия, 1979. 512 с.
13. Ту Ю.Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления: Пер. с англ. Под ред. В.В. Солодовникова. Москва : Машиностроение, 1964. 704 с.
14. Ялышев А.У., Разоренов О.И. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики. Москва : Машиностроение, 1981. 399 с.

Babich V.F. DETERMINATION OF DYNAMIC PRECISION DISCRETE MEASURING CIRCUIT UNDER THE ACTION OF RANDOM PERTURBATIONS

Optimal combustion process in the boiler and other installations to occur when the stoichiometric ratio of the combustible portion of fuel and air in the combustion chamber with the excess air ratio of 1.01 to 1.05... assuming complete mixing of fuel and air in the burner devices. At the same time in the flue gas or no products of incomplete combustion – hydrogen, oxides of carbon, etc., or they contain their footprints on the level of thresholds of sensitivity of gas analyzers, that is in concentrations much lower limit.

Continuous optimization of the combustion process in industrial installations possible by maintaining optimal air excess factor. The solution to this problem is possible only when using highly sensitive methods of analysis of combustion products, for example, chromatography, the sensitivity threshold is 10^{-3} ... 10^{-4} vol.% relative hydrogen and carbon monoxide.

Discrete principle of operation of a chromatographic analyzer corrector and limited resource of his work in terms of the random disturbances from the fuel and air flow requires the determination of the optimal period of discreteness measure the composition of flue gases, at which the discrete samples it is possible to obtain a reproducing function.

The analysis gives grounds to assert that in cases where the autocorrelation function of the input signals include harmonic components, and transport delay in the discrete-time measuring circuit exceeds the time constant, the magnitude of the interval of discreteness is necessary to impose restrictions as to the maximum size according to the theorem of V. A. Kotelnikov, and a restriction on the minimum value, whereby the spacing of the discontinuity must be greater than the time delay.⁷

Key words: *composition of flue gases, optimizing combustion process, discrete analysis, automated gas chromatograph, autocorrelation function.*