

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ КОЛИВАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Виконаний аналіз технологічних процесів як динамічних об'єктів і показана складність вимірювального контролю. Розрахунок перехідних процесів в сучасних системах контролю відноситься до основної задачі, котра базується на методі зворотного перетворення Лапласа. Для розрахунку перехідних процесів пропонується використовувати частотний метод квадратур, який є простим у використанні і потребує незначного розрахункового часу. Наведено результати дослідження динамічних характеристик системи вимірювального контролю п'ятого порядку з коливальною ланкою.

Ключові слова: технологія, метод, перехідний процес, контроль, квадратура, рівняння, точність, регулювання.

A. RYABICHENKO

East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl

THE RESEARCH OF DYNAMIC PROCESSES OF OSCILLATORY SYSTEMS OF MEASURING CONTROL BY THE METHOD OF QUADRATURES

The analysis of the technological processes as dynamic objects fulfilled and shows the complexity of measuring control. Calculation of transients in modern control systems refers to the main task, which is based on the method of the inverse Laplace transform. For the calculation of transients is proposed to use the frequency method of quadratures, which is simple to use and requires a small calculation time. The results of the study the dynamic characteristics of the system measurement control a fifth-order with oscillation link are shown.

Keywords: technology, method, transient, control, quadrature, equation, accuracy, regulation.

Вступ. Системи вимірювального контролю більшості технологічних параметрів в хімічній, нафтопереробній, харчовій, енергетичній та інших галузях промисловості [1-3] через дію на них різних впливових факторів, які змінюються в часі, відносяться до динамічних. Окрім того, процеси перенесення імпульсу енергії, маси чи кількості руху теж є динамічним, оскільки до складу таких систем входять ті чи інші інерційні елементи (динамічні ланки), котрі ускладнюють цей процес, провокуючи в них коливальні режими роботи. У результаті цього точність таких коливальних систем вимірювального контролю (СВК) зменшується. Такі СВК можна розділити на квазістатичні, коли на статичний (усталений) режим роботи накладаються загасаючі чи не загасаючі коливання впливових факторів, СВК, котрі працюють за динамічним принципом роботи, коли технологічний параметр контролюється за швидкістю наростання або спадання перехідного процесу, заданим часом цього процесу або значенням зміни технологічного параметра в часі. Для зменшення похибки СВК, котрі працюють в квазістатичному режимі, широко використовуються різні принципи фільтрації змінного в часі контрольованого параметра [4 - 6]. У СВК, котрі працюють за динамічним принципом роботи (наприклад, системи аналітичного контролю) будь-яке відхилення від нормованого перехідного процесу призводить до появи похибки вимірювального контролю. Особливу роль такі СВК відіграють в сучасних комп'ютерно-інтегрованих системах контролю та управління (КІСКУ), у котрих динамічні характеристики відносяться до основних показників якості роботи технологічного апарату. Інерційність СВК залежить не тільки від власних динамічних характеристик, але й характеру реологічного переходу контрольованої величини технологічного процесу в іншу форму вимірювального сигналу, наприклад, електричну [7-9]. У залежності від швидкості зміни контрольованого технологічного параметра вихідний сигнал СВК може приймати як аперіодичний, так і коливальний характер, а в деяких випадках ставати нестійким, що призводить до необґрунтованого рішення щодо протікання процесу в технологічному апараті. Як правило, технологічні параметри змінюються в часі за рахунок дії внутрішніх і зовнішніх впливових факторів, що призводить до погіршення точності перетворення, викликаючи тим самим відповідні динамічні відхилення як за амплітудою, так і за фазою. Складні технологічні СВК, як правило є нелінійними, та при незначних змінах впливових факторів у першому наближенні можна описувати лінійними диференціальними рівняннями. Якщо СВК описуються лінійним диференціальним рівнянням високого порядку, то вони характеризуються як дійсними, так і комплексними коренями. У сучасних КІСКУ для розрахунків перехідних процесів, фільтрації чи визначення розрахункових технологічних параметрів у більшості випадків використовують алгебраїчний метод зворотного перетворення Лапласа [10]. Дослідження роботи КІСКУ технологічними процесами в хімічній промисловості показують, що використання цього методу в багатьох випадках призводить до необґрунтованих похибок вимірювального контролю. Результати спостережень за роботою таких КІСКУ показують, що при дії на об'єкт контролю впливових факторів з невеликою швидкістю, похибки вимірювального контролю знаходяться в дозволених межах. У той же час, коли швидкість дії таких факторів зростає - ця похибка значно збільшується. Таким чином, розробка та дослідження методів, котрі забезпечують високу точність і швидкодію розрахунку перехідних процесів є важливою науково-

практичною задачею.

Мета статті і постановка досліджень. Метою статті є дослідження динамічних характеристик СВК, котрі описується лінійним диференціальним рівнянням високого порядку з комплексними коренями, методом квадратур. Розрахунок перехідних процесів складних систем автоматичного регулювання методом квадратур був описаний в [7,11]. Метод відноситься до частотних і дозволяє розкласти частотну передавальну функцію СВК будь-якої складності на складові другого порядку, котрі називаються квадратурами. Оскільки лінійне квадратичне рівняння розв'язується відомими аналітичними залежностями, то точність розрахунку є достатньо високою та визначається тільки кількістю використаних квадратур. Як показують дослідження систем автоматичного регулювання [12], для багатьох практичних задач можна використовувати тільки першу квадратуру, яка дозволяє розраховувати перехідний процес системи з точністю 5-7 відсотків. Відомі частотні методи розрахунку перехідних процесів [13, 14], котрі засновані на розділенні дійсної чи уявної частотної характеристики на трапеції, розрахунку часткових перехідних процесів для кожної такої трапеції та подальшому їх підсумовуванні. Такі методи є достатньо складними, потребують великого розрахункового часу й не знайшли практичного використання в сучасних КІСКУ. Дослідження методу зворотного перетворення Лапласа показали відповідні його недоліки. По-перше, кількість розкладань складної передавальної функції на елементарні динамічні ланки першого порядку є обмеженим і складає не більша чотирьох, по-друге, значна складність розрахунку призводить у багатьох випадках до суттєвого погіршення їх точності. По-третє, розрахунковий час методу значно збільшується з підвищенням порядку передавальної функції. Тому задача дослідження полягає у використанні методу квадратур для розрахунку перехідних процесів СВК, які описуються лінійним диференціальним рівнянням високого порядку з комплексними коренями.

Математичні моделі методу квадратур. Розглянемо передавальну функцію СВК, яка описується наступним рівнянням високого порядку:

$$W(s) = \frac{k}{\tau_n^n s^n + \dots + \tau_i^i s^i + \dots + \tau_2^2 s^2 + \tau_1 s + 1}, \quad (1)$$

де $\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$ - сталі часу; k - коефіцієнт передачі; s - оператор Лапласа.

Уводячи в (1) заміну $s = j\omega$, де ω - кругова частота, отримуємо наступні рівняння для:

- дійсної частотної характеристики (ДЧХ):

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{\sum_{n_p=0}^{n_p} \tau_{n_p}^{n_p} \omega^{n_p}}{\left(\sum_{n_p=0}^{n_p} \tau_{n_p}^{n_p} \omega^{n_p} \right)^2 + \omega^2 \left(\sum_{n_n=1}^{n_n} \tau_{n_n}^{n_n} \omega^{n_n-1} \right)^2}; \quad (2)$$

- уявної частотної характеристики (УЧХ):

$$\operatorname{Im}(\omega) = j\omega \frac{k \sum_{n_n=1}^{n_n} \tau_{n_n}^{n_n} \omega^{n_n-1}}{\left(\sum_{n_p=0}^{n_p} \tau_{n_p}^{n_p} \omega^{n_p} \right)^2 + \omega^2 \left(\sum_{n_n=1}^{n_n} \tau_{n_n}^{n_n} \omega^{n_n-1} \right)^2}, \quad (3)$$

де τ_{n_n}, τ_{n_p} - сталі часу; n_n, n_p - кількість непарних і парних складових поліномів.

У рівняннях (2) і (3) виконаємо такі позначення: $A(\omega) = \sum_{n_p=0}^{n_p} \tau_{n_p}^{n_p} \omega^{n_p}$,

$B(\omega) = \left(\sum_{n_p=0}^{n_p} \tau_{n_p}^{n_p} \omega^{n_p} \right)^2 + \omega^2 \left(\sum_{n_n=1}^{n_n} \tau_{n_n}^{n_n} \omega^{n_n-1} \right)^2$ і $D(\omega) = \omega \sum_{n_n=1}^{n_n} \tau_{n_n}^{n_n} \omega^{n_n-1}$. Уведемо додатковий поліном

$K(\omega) = B(\omega) - A(\omega)$ звідки $A(\omega) = B(\omega) - K(\omega)$. Тоді рівняння (2) і (3) приймають наступний вигляд:

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{A(\omega)}{B(\omega)} = k \frac{B(\omega) - K(\omega)}{B(\omega)} = k \left(1 - \frac{K(\omega)}{B(\omega)} \right); \quad (4)$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = jk\omega \frac{D(\omega)}{B(\omega)}. \quad (5)$$

Не важко бачити, що поліном $K(\omega)$ має спільним множником квадрат частоти ω^2 , котрий можна винести за дужки, тобто $K(\omega) = \omega^2 P(\omega)$. Підставивши останню рівність в (4) і позначивши $N_2(\omega) = P(\omega) / B(\omega)$, отримуємо:

$$\operatorname{Re}(\omega) = k(1 - \omega^2 N_2(\omega)). \quad (6)$$

У рівнянні (5) позначимо $N_1(\omega) = D(\omega) / B(\omega)$. Тоді маємо:

$$\operatorname{Im}(\omega) = jk\omega N_1(\omega). \quad (7)$$

З врахуванням (6) і (7) рівняння частотної передавальної функції приймає наступну форму:

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) - j \operatorname{Im}(\omega) = k[(1 - \omega^2 N_2(\omega)) - j\omega N_1(\omega)]. \quad (8)$$

Для порівняння приведемо передавальну функцію системи другого порядку:

$$W_2(s) = \frac{k}{\tau_2^2 s^2 + \tau_1 s + 1}. \quad (9)$$

Замінивши в (9) оператор Лапласа s на частотний $j\omega$ і розділивши частотну передавальну функцію на ДЧХ та УЧХ, отримуємо:

$$W_2(j\omega) = k[\operatorname{Re}_2(\omega) - j \operatorname{Im}_2(\omega)] = k[(1 - \omega^2 \tau_2^2) - j\omega \tau_1]. \quad (10)$$

Якщо порівняти рівняння (8) з (10), то бачимо їх подібність. Звідси робимо висновок, що функції $N_1(\omega)$ і $N_2(\omega)$ характеризують деякі узагальнені сталі часу τ_{1i} і τ_{2i}^2 де $i = 1, 2, \dots, n$ - номер квадратури, котрі залежать від сталих часу складної СВК і частоти ω . Таким чином, можна зробити наступний висновок: СВК будь-якого порядку можна розділити на складові другого порядку (квадратури). Кожна квадратура описується передавальною функцією другого порядку, тобто $W_{2i}(s) = k_i / (\tau_{2i}^2 s^2 + \tau_{1i} s + 1)$, де k_i - коефіцієнт передачі; τ_{1i}, τ_{2i} - сталі часу i -ої квадратури. Оскільки лінійні диференціальні рівняння другого порядку мають аналітичні рішення, то вони є зручними для їх практичного використання.

Математичні моделі СВК, яка описується лінійним диференціальним рівнянням високого порядку з комплексними коренями. Прийемо, що СВК описується диференціальним рівнянням n -'ятого порядку:

$$\tau_5^5 \frac{d^5 y}{dt^5} + \tau_4^4 \frac{d^4 y}{dt^4} + \tau_3^3 \frac{d^3 y}{dt^3} + \tau_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_1 \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (11)$$

де τ_1, \dots, τ_5 - сталі часу; y, x - вихідна та вхідна координати системи відповідно; - час перехідного процесу; k - коефіцієнт передачі.

Частотна передавальна функція системи має вигляд:

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) - j \operatorname{Im}(\omega), \quad (12)$$

де

$$\operatorname{Re}(\omega) = k \frac{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)}{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)^2 + \omega^2 (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)^2} = \frac{A(\omega)}{B(\omega)}; \quad (13)$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = k \frac{\omega (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)}{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)^2 + \omega^2 (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)^2} = \frac{D(\omega)}{B(\omega)}. \quad (14)$$

Рівняння (12) запишемо через квадратури:

$$W(j\omega) = k(1 - \omega^2 N_{2i}(\omega)) - jk\omega N_{1i}(\omega), \quad (15)$$

де

$$N_{1i}(\omega) = \frac{(\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)}{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)^2 + \omega^2 (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)^2}; \quad (16)$$

$$N_{2i}(\omega) = \frac{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)^2 + \omega^2 (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)^2 - (1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)}{(1 - \tau_2^2 \omega^2 + \tau_4^4 \omega^4)^2 + \omega^2 (\tau_1 - \tau_3^3 \omega^2 + \tau_5^5 \omega^4)^2}. \quad (17)$$

Нехай СВК складається з наступних трьох динамічних ланок:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{\tau_{21}^2 s^2 + \tau_{11} s + 1}, \quad W_2(s) = \frac{k_2}{\tau_{22}^2 s^2 + \tau_{12} s + 1} \quad \text{і} \quad W_3(s) = \frac{k_3}{\tau_{13} s + 1}.$$

Прийемо такі значення параметрів динамічних ланок: $k_1 = 0,945$; $k_2 = 0,94$, $k_3 = 1,126$, $\tau_{11} = 25$, $\tau_{21} = 36$, $\tau_{12} = 16$, $\tau_{22} = 6$, $\tau_{13} = 20$. Перша динамічна ланка є коливальною, так як відношення сталих часу $\tau_{11} / \tau_{22} = 0,695 < 2$. ДЧХ і УЧХ такої системи приведені на рис. 1,а і 1,б відповідно.

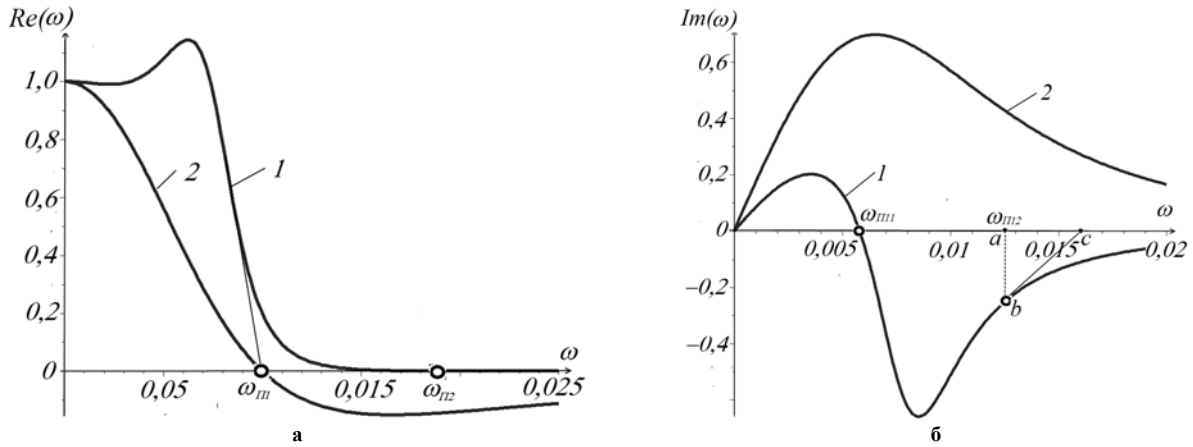


Рис. 1. Графіки ДЧХ (а) і УЧХ (б): криві 1 – для реальної СВК, криві 2 – для першої квадратури

Так як згідно з умовою задачі система є п'ятого порядку з коливальною динамічною ланкою другого порядку, то ДЧХ є складною як показано на рис. 1,а (крива 1). Вище вказувалося, що за ДЧХ можна визначити сталі часу квадратур, котрі є множником до другої похідної відповідної квадратури. Якщо провести дотичну до цієї ДЧХ з точки максимальної швидкості її зміни, то точка, в котрій ця дотична перетинає частотну вісь, є тією частотою переходу $\omega_{\pi 11}$, за якою визначається стала часу першої квадратури: $\tau_{21} = 1/\omega_{\pi 11}$. Така ж стала часу для другої квадратури визначається за частотою переходу $\omega_{\pi 12}$ (перехід ДЧХ на рисунку не видно) за формулою: $\tau_{22} = 1/\omega_{\pi 12}$. Сталі часу, які є множниками для похідних першого порядку квадратур, визначаються за УЧХ, як показано на рис. 1,б (крива 1). Так як УЧХ реальної системи має частоту переходу через частотну вісь при частоті $\omega_{\pi 111}$, то стала часу першої квадратури $\tau_{11} = 1/\omega_{\pi 111}$, а другої - $\tau_{12} = 1/\omega_{\pi 112}$. Характерним для методу квадратур є те, що стала часу τ_{12} другої квадратури визначається з умови рівності приростів від точки «b» при підході до тієї точки й після цієї точки, а фактично, коли сторони «ab» і «ac» трикутника «abc» є рівними. Таким чином, систему п'ятого порядку з коливальною ланкою з достатньою для практики точністю можна ідентифікувати наступною системою двох квадратур:

- для першої квадратури:

$$\tau_{21} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \tau_{11} \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k1(x); \quad (18)$$

- для другої квадратури:

$$\tau_{22} \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \tau_{12} \frac{dy_2}{dt} + y_2 = k \frac{dx}{dt}, \quad (19)$$

де y_1 і y_2 – змінна координата першої та другої квадратури відповідно.

Загальна крива перехідного процесу СВК описуватиметься як сума перехідних процесів двох квадратур: $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$. Друга та наступні квадратури розглядаються як системи за швидкістю зміни вхідної координати. Для першої квадратури $\tau_{11} = 175,25$ і $\tau_{21} = 100,0$, а для другої – відповідно: $\tau_{12} = 79$ і $\tau_{22} = 53$. Не трудно бачити, що дві квадратури є коливальними. Перехідний процес першої квадратури можна розрахувати за формулою [12]:

$$y_1(t) = k1(x) \{1 - \exp(\alpha_1 t) [\cos(\omega_{10} t) + (\alpha_1 / \omega_{10}) \sin(\omega_{10} t)]\}, \quad (20)$$

де $\alpha_1 = -\tau_{11} / 2\tau_{21}^2$ - ступінь загасання перехідного процесу першої квадратури;

$$\omega_{10} = \sqrt{\frac{1}{\tau_{21}^2} - \left(\frac{\tau_{11}}{2\tau_{21}^2}\right)^2} \text{ - власна частота коливань першої квадратури.}$$

Перехідний процес другої квадратури розраховується за формулою:

$$y_2(t) = k1(x) \{ \exp(\alpha_2 t) [(1 - \cos(\omega_{20} t)) + (\alpha_2 / \omega_{20}) \sin(\omega_{20} t)] \}, \quad (21)$$

де $\alpha_2 = -\tau_{12} / 2\tau_{22}^2$ - ступінь загасання перехідного процесу другої квадратури;

$$\omega_{20} = \sqrt{\frac{1}{\tau_{22}^2} - \left(\frac{\tau_{12}}{2\tau_{22}^2}\right)^2} \text{ - власна частота коливань другої квадратури.}$$

На рис. 2,а приведені графіки залежностей функцій, за котрими визначаються сталі часу квадратур: $\tau_{1i} = f(N_1(\omega))$ (крива 1) і $\tau_{2i} = f(\sqrt{N_1(\omega)})$ (крива 2). Показані характерні точки, котрі визначають сталі часу першої квадратури. Особливу увагу привертає крива залежності $\tau_{2i} = f(\sqrt{N_1(\omega)})$.

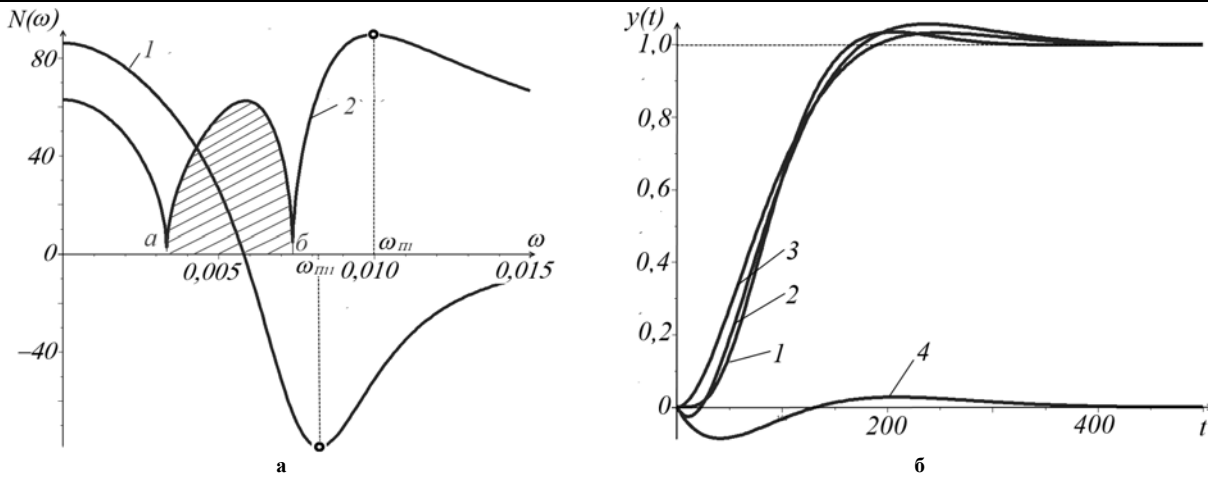


Рис. 2. Графіки залежності $N_1(\omega)$ і $\sqrt{N_2(\omega)}$ (а) та криві перехідних процесів СВК (б)

Як показали дослідження СВК в області частот, які розташовані від точки «а» до точки «б», в цій області спостерігається наявність роботи системи в резонансному режимі. ДЧХ, яка відповідає резонансній області частот, показана на рис. 3,а. На рис. 2,б приведені криві перехідних процесів СВК, розрахованих за методом квадратур (крива 2 – сумарний перехідний процес, крива 1 – перехідний процес першої квадратури і крива 3 – перехідний процес другої квадратури) і методом зворотного перетворення Лапласа (крива 1), який приведено для порівняння з методом квадратур. Аналізуючи криві рис. 2,б, можна зробити наступні висновки. Враховуючи, що метод зворотного перетворення Лапласа теж відноситься до наближених, та порівнюючи криву 1 перехідного процесу, розраховану за методом зворотного перетворення Лапласа, і криву 3 для першої квадратури бачимо, що вони достатньо близькі, з чого робимо висновок, що для практичного використання можна обмежуватися тільки першою квадратурою. Похибки розрахунку кривих перехідного процесу методом квадратур і зворотного перетворення Лапласа приведені на рис. 3,б.

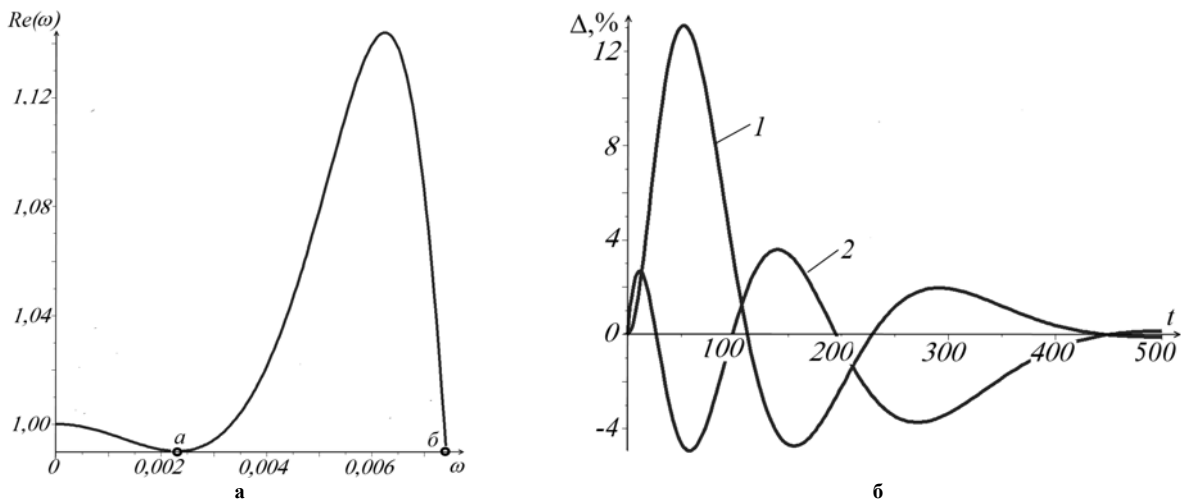


Рис. 3. Графік ДЧХ для області резонансних частот (а) і похибки розрахунку перехідних процесів (б)

На рис. 3,б крива 1 є графіком розрахунку перехідного процесу, коли використовується тільки перша квадратура. З рисунка видно, що похибка розрахунку у цьому випадку близька до 12 відсотків. Якщо використати дві квадратури, то ця похибка зменшується приблизно до 4 відсотків.

Висновки. Дослідження динамічних характеристик системи вимірювального контролю високого порядку, до складу котрої входить коливальна ланка другого порядку, з достатньою для практичного використання точністю можна виконувати за методом квадратур. Приведені частотні характеристики реальної СВК п'ятого порядку з коливальною ланкою і розроблена методика визначення сталих часу відповідних квадратур. Показано, що перехідні процеси, розраховані за методом квадратур і зворотного перетворення Лапласа є достатньо близькими поміж собою. Це дозволяє зробити висновок, що метод квадратур повністю може замінити метод зворотного перетворення Лапласа. Якщо останній метод, як правило, обмежується кількістю коренів характеристичного рівняння передавальної функції, то метод квадратур такого обмеження не має. Чим складнішою є СВК чи система автоматичного регулювання, тим більша похибка розрахунку перехідного процесу за методом зворотного перетворення Лапласа і тим більша тривалість цього розрахунку. Перевагою методу квадратур є те, що в ньому використовуються квадратури,

які описуються диференціальними рівняннями другого порядку, які мають аналітичні рішення не залежно від характеру перехідного процесу (аперіодичний чи коливальний). Оскільки тривалість розрахунку перехідних процесів є незначною, то його рекомендується використовувати в комп'ютерно-інтегрованих системах вимірювального контролю та управління.

Література

1. Перов В. Л. Управление химико-технологическими системами / В. Л. Перов, А. Ф. Егоров, А. Ю. Хабарин. – М. : МХТИ им. Д.И.Менделеева, 1981. – 52 с.
2. Обновленский П. А. Основы автоматики и автоматизации химических производств / П. А. Обновленский, П. А. Коротков, А. Л. Гуревич. – М.-Л. : Химия, 1965. – 608 с.
3. Анисимов И. В. Основы автоматического управления технологическими процессами нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности / И. В. Анисимов. – Л. : Химия, 1967. – 123с.
4. Бойко Н. П. Системы автоматического управления на базе микро-ЭВМ / Н. П. Бойко, В. К. Стеклов. – К. : Техника, 1989. – 182 с.
5. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов / Под ред. проф. Е. Г. Дудникова. – М. : Химия, 1987. – 368 с.
6. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 448 с.
7. Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв / Й. І. Стенцель. – К. : ІСДО, 1995. – 360 с.
8. Стенцель Й. І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування / Й. І. Стенцель – К. : ІСДО, 1993. – 328 с.
9. Таганов И. Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса / И. Н. Таганов. – Л. : Химия, 1979. – 203 с.
10. Гноевский Л. С. Математические основы теории управляемых систем / Л. С. Гноевский, Г. А. Каменский, Л. Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1969. – 512 с.
11. Стенцель Й. І. Розрахунок перехідних процесів складних систем регулювання методом квадратур / Й. І. Стенцель, І. Є. Киричук, О. В. Савельєва. – Наук.-техн. збірник «Автоматизація технологічних процесів та промислової екології». Вип. 1. – Київ, 1997. – С. 2-5.
12. Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2010. – 300 с.
13. Солодовников В. В. Частотный метод построения переходных процессов / В. В. Солодовников, Ю. И. Топчеев, Г. В. Крутикова. – М. : ГИТТЛ, 1955. – 196 с.
14. Крутов В. И. Основы теории автоматического регулирования / В. И. Крутов, Ф. М. Данилов, П. К. Кузьмик. – М. : Машиностроение, 1984. – 368 с.

References

1. Perov V. L. Upravlenie himiko-tehnologicheskimi sistemami / V. L. Perov, A. F. Egorov, A. Ju. Habarin. – М. : МХТИ им. Д.И.Менделеева, 1981. – 52 с.
2. Obnovlenskij P. A. Osnovy avtomatiki i avtomatizacii himicheskikh proizvodstv / P. A. Obnovlenskij, P. A. Korotkov, A. L. Gurevich. – М.-Л. : Himija, 1965. – 608 s.
3. Anisimov I. V. Osnovy avtomaticheskogo upravlenija tehnologicheskimi processami neftehimicheskoi i neftepererabatyvajushhej promyshlennosti / I. V. Anisimov. – L. : Himija, 1967. – 123 s.
4. Bojko N. P. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija na baze mikro-JeVM / N. P. Bojko, V. K. Steklov. – К. : Tehnika, 1989. – 182 s.
5. Avtomaticheskoe upravlenie v himicheskoi promyshlennosti: Uchebnik dlja vuzov / Pod red. prof. E. G. Dudnikova. – М. : Himija, 1987. – 368 s.
6. Kafarov V. V. Metody kibernetiki v himii i himicheskoi tehnologii / V. V. Kafarov. – М. : Himija, 1985. – 448 s.
7. Stencil' J. I. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobniectv / J. I. Stencil'. – К. : ISDO, 1995. – 360 s.
8. Stencil' J. I. Matematichne modeljuvannja tehnologichnih ob'ektiv keruvannja / J. I. Stencil' – К. : ISDO, 1993. – 328 s.
9. Taganov I. N. Modelirovanie processov masso- i jenergoperenosa / I. N. Taganov. – L. : Himija, 1979. – 203 s.
10. Gnoevskij L. S. Matematicheskie osnovy teorii upravljaemyh sistem / L. S. Gnoevskij, G. A. Kamenskij, L. Je. Jel'sgol'c. – М. : Nauka, 1969. – 512 s.
11. Stencil' J. I. Rozrahnok perehidnih procesiv skladnih sistem reguljuvannja metodom kvadratur / J. I. Stencil', I. E. Kirichuk, O. V. Savel'eva. – Nauc.-tehn. zbirnik «Avtomatizacija tehnologichnih procesiv ta promislova ekologija». Vip. 1. – Київ, 1997. – С. 2-5.
12. Stencil' J. I. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobniectv / J. I. Stencil', O. V. Porjukan. – Lugansk: vid-vo SNU im. V.Dalja, 2010. – 300 s.
13. Solodovnikov V. V. Chastotnyj metod postroenija perehodnyh processov / V. V. Solodovnikov, Ju. I. Topcheev, G. V. Krutikova. – М. : GITTL, 1955. – 196 s.
14. Krutov V. I. Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovanija / V. I. Krutov, F. M. Danilov, P. K. Kuz'mik. – М. : Mashinostroenie, 1984. – 368 s.

Рецензія/Peer review : 22.1.2015 р.

Надрукована/Printed :24.1.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією