

Література

1. Кокшарев К.И. Частотно-территориальное планирование сетей четвертого поколения / К.И. Кокшарев // Мат. 63-й НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов СПб ГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Часть I, 21 – 25 февраля 2011, Санкт-Петербург. – 2011. — С. 5 – 8.
2. Частотно-территориальное планирование сетей подвижной радиосвязи [Электронный ресурс] / EMCLab. – Режим доступа к статье: <http://giprosvjaz.by/emclab/node/99>
3. Михайлов П.А. Разработка системы частотно-территориального планирования сетей подвижной и фиксированной радиосвязи на базе геоинформационных технологий: дис. кандидата техн. наук: 1999 / Михайлов П.А. – Санкт-Петербург, 1999. – 172 с.
4. Одоевский С. Планирование и оптимизация сетей беспроводной связи / С. Одоевский, В. Степанец // Технологии. Первая миля. – 2010. – № 2. – С. 28 – 31.
5. Драганов В.М. Методическое руководство к лабораторной работе № 65. Элементы частотно-территориального планирования сетей сотовой связи / Драганов В.М., Маковеев Д.А. – О.: ОНАС, 2009. – 32 с.
6. Гриценко А.А. Программное обеспечение частотно-территориального планирования сетей профессиональной подвижной радиосвязи / А.А. Гриценко, В.А. Жиров // Инфосфера. – 2010. – № 2. – С. 90 – 92.
7. INFOTEL [Электронный ресурс] / INFOTEL. – Режим доступа к статье: <http://www.rpls.ru/product.html>
8. ATDI [Электронный ресурс] / ATDI Eurasia. – Режим доступа к информации: <http://www.atdi.ru/>

Reference

1. Koksharev K.I. Chastotno-territorial'noe planirovanie setej chetvertogo pokolenija / K.I. Koksharev // Mat. 63-j NTK professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov SPb GUT im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha. Chast' I, 21 – 25 fevralja 2011, Sankt-Peterburg. – 2011. — S. 5 – 8.
2. Chastotno-territorial'noe planirovanie setej podvizhnoj radisvjazi [Jelektronnyj resurs] / EMCLab. – Rezhim dostupa k stat'e: <http://giprosvjaz.by/emclab/node/99>
3. Mihajlov P.A. Razrabotka sistemy chastotno-territorial'nogo planirovanija setej podvizhnoj i fiksirovannoj radisvjazi na baze geoinformacionnyh tehnologij: dis. kandidata tehn. nauk: 1999 / Mihajlov P.A. – Sankt-Peterburg, 1999. – 172 s.
4. Odoevskij S. Planirovanie i optimizacija setej besprovodnoj svjazi / S. Odoevskij, V. Stepanec // Tehnologii. Pervaja milja. – 2010. – № 2. – S. 28 – 31.
5. Draganov V.M. Metodicheskoe rukovodstvo k laboratornoj rabote № 65. Jelementy chastotno-territorial'nogo planirovanija setej sotovoj svjazi / Draganov V.M., Makoveenko D.A. – O.: ONAS, 2009. – 32 s.
6. Gricenko A.A. Programmnoe obespechenie chastotno-territorial'nogo planirovanija setej professio-nal'noj podvizhnoj radisvjazi / A.A. Gricenko, V.A. Zhiron // Infosfera. – 2010. – № 2. – S. 90 – 92.
7. INFOTEL [Jelektronnyj resurs] / INFOTEL. – Rezhim dostupa k stat'e: <http://www.rpls.ru/product.html>
8. ATDI [Jelektronnyj resurs] / ATDI Eurasia. – Rezhim dostupa k informacii: <http://www.atdi.ru/>

Рецензія/Peer review : 9.1.2015 р. Надрукована/Printed : 24.1.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 681.2.66 (0754.8)

О.І. ПРОКАЗА

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄКТІВ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ З ЗАПІЗНЕННЯМ МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Технологічні об'єкти, а також системи контролю та регулювання працюють в динамічних режимах для управління якими широко використовуються розрахунки перехідних процесів. Сучасні методи розрахунку таких процесів є наближеними, що призводить до значних похибок вимірювального контролю та регулювання. Показано, що підвищити точність розрахунку можна шляхом використання методу квадратур. В статті розглянуто систему управління третього порядку з запізненням і показано вплив часу чистого запізнення на характер перехідних процесів. Описані методи визначення сталих часу ідентифікованої системи.

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

Е. PROKAZA

East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl

THE CALCULATION OF TRANSIENTS OBJECTS THE THIRD-ORDER WITH DELAY BY THE METHOD OF QUADRATURES

Technological objects, as well as systems of regulating and control are operated in dynamic modes to control which are widely used calculations of transients. Modern methods of calculation of such processes are approximate, which leads to significant errors of measuring control and regulation. It is shown that increase the accuracy of the calculation may be achieved by use of the method of quadratures. The article deals with the control system of the third-order with delay and shows the effect of time pure delay on the character of transients. Describes methods for determining the time constant of the identified system.

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

Вступ. Технологічні процеси хімічної, нафтохімічної, нафтопереробної, харчової, фармацевтичної, енергетичної та інших галузей промисловості є інерційними, у багатьох випадках нелінійними, з широким діапазоном зміни сталих часу та часу чистого запізнення (ЧЧЗ). Як правило, вони є багатовимірними й мають n вихідних координат, які підлягають стабілізації, m вхідних координат, з допомогою котрих виконують цю стабілізацію та z впливових. Останні іноді використовують для зменшення їх впливу на вихідні координати. За вихідними, вхідними та основними впливовими координатами будуються інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), роль яких полягає в отриманні інформації про характер зміни технологічних параметрів, для побудови систем автоматичного регулювання (САР), розрахунку значень технологічних параметрів, котрі не вимірюються засобами вимірювального контролю (ЗВК), формуванні дозволених меж їх зміни тощо. ІВС широко використовуються в комп'ютерно-інтегрованих системах контролю та управління (КІСКУ) різноманітними технологічними процесами (ТП), а також в системах обліку матеріальних і теплових потоків. Перехідні процеси широко використовуються в КІСКУ для визначення швидкості руху технологічних параметрів, налагоджувальних параметрів регуляторів, формування способів фільтрації вимірювальної інформації. Методи розрахунку перехідних процесів, на яких базується програмне забезпечення сучасних КІСКУ, є наближеними, за рахунок чого точність їх розрахунку є невеликою, що призводить до зменшення ефективності роботи технологічного об'єкта контролю та управління (ТОКУ), збільшення енергоспоживання та зменшення якості продукції. Тому підвищення точності ІВС та САР є актуальною задачею.

Мета статті і постановка досліджень. Метою статті є дослідження перехідних процесів технологічних об'єктів контролю та управління (ТОКУ), ІВС та САР, котрі описуються лінійними диференціальними рівняннями третього порядку з запізненням методом квадратур [1-2]. Як правило, до таких ТОКУ відносяться порівняно прості технологічні апарати, наприклад, кожухотрубні теплообмінники, рідинні реактори, абсорбери, випарні установки тощо. Такі ТОКУ характеризуються не тільки інерційністю, але й значним часом чистого запізнення, котрим нехтувати не можна. Більшість ІВС теж описуються рівняннями третього порядку, наприклад, вимірювальний контроль (ВК) температури, витрат, концентрацій тощо. САР, як правило, описуються рівняннями третього та вищого порядку з запізненнями. Як відомо [3-5], при вимірювальному контролі технологічних параметрів проходять реологічні перетворення, котрі описуються градієнтними диференціальними рівняннями перенесення імпульсу енергії, маси та кількості руху. Результатом такого перенесення є отримання нових енергетичних чи матеріальних потоків з новими параметрами, наприклад, при контролі температури матеріального потоку термоелектричним перетворювачем, витрати матеріального чи теплового потоку методом змінного перепаду тиску тощо. Окрім того потрібно враховувати, що сигнал вимірювальної інформації в КІСКУ запам'ятовується, обробляється за відповідним програмним алгоритмом і тільки після цього поступає на засоби індикації та реєстрацію. Враховуючи, що дія впливових факторів теж є інерційною, то в ІВС можуть виникати резонансні режими, котрі призводять до різкої зміни вихідної координати, а відповідно, до появи похибки вимірювального контролю. Задача дослідження полягає в тому, щоби використати перехідні процеси для зменшення похибки вимірювального контролю.

Розробка динамічної моделі перехідного процесу ТОКУ третього порядку з запізненням методом квадратур. У сучасних КІСКУ, до складу котрих входять ТОКУ, ІВС і САР, розрахунок перехідних процесів у більшості випадків виконується за методом зворотного перетворення Лапласа або класичним методом і значно рідше використовуються частотні методи, що пов'язано з великим часом їх розрахунку. Похибка розрахунку перехідного процесу за відомими методами [6-8] може складати від 10 до 40%. Причому час чистого запізнення, як правило, не враховується. За рахунок цього ці методи у багатьох сучасних КІСКУ не використовуються для розрахунку оптимальних налагоджень регуляторів САР чи зменшення похибки ВК. Як показали дослідження різних методів розрахунку перехідних процесів, найбільш придатний для використання в КІСКУ є метод квадратур.

Нехай ТОКУ, ІВС чи САР (далі об'єкт) описується диференціальним рівнянням третього порядку з запізненням:

$$\tau_3^3 \frac{d^3 y}{d(t-\xi)^3} + \tau_2^2 \frac{d^2 y}{d(t-\xi)^2} + \tau_1 \frac{dy}{d(t-\xi)} + y = kx, \quad (1)$$

де τ_1, τ_2, τ_3 - сталі часу; y, x - відповідно вихідна та вхідна координати відповідно; k - коефіцієнт передачі; t - час перехідного процесу; ξ - час чистого запізнення.

Передавальна функція такої системи має вигляд:

$$W(s) = k \frac{\exp(-\xi s)}{(\tau_3^3 s^3 + \tau_2^2 s^2 + \tau_1 s + 1)}, \quad (2)$$

де s - оператор Лапласа.

Функцію $\exp(-\xi s)$ розкладемо у ряд Тейлора та обмежимося першими чотирма його членами. У результаті маємо: $\exp(-\xi s) = 1 - \xi s + (\xi s)^2 / 2 - (\xi s)^3 / 6$, або в частотній області

$$\exp(-j\omega\xi) = [1 - 0,5\omega^2\xi^2] - j\omega\xi[1 - 0,17\omega^2\xi^2], \quad (3)$$

де ω - кругова частота об'єкта.

З врахуванням (3) рівняння частотної передавальної функції об'єкта має вигляд:

$$W(j\omega) = k \frac{[1 - 0,5(\omega\xi)^2] - j\omega\xi[1 - 0,17(\omega\xi)^2]}{[1 - \omega^2\tau_2^2] + j\omega[\tau_1 - \omega^2\tau_3^3]} = \text{Re}(\omega) - j \text{Im}(\omega). \quad (4)$$

Дійсна частотна характеристика (ДЧХ) об'єкта описується таким рівнянням:

$$\text{Re}(\omega) = k \frac{(1 - 0,5\omega^2\xi^2)(1 - \omega^2\tau_2^2) - \omega^2\xi(1 - 0,17\omega^2\xi^2)(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)}{(1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)^2}. \quad (5)$$

Рівняння для уявної частотної характеристики (УЧХ) має вигляд:

$$\text{Im}(\omega) = k\omega \frac{\xi(1 - 0,17\omega^2\xi^2)(1 - \omega^2\tau_2^2) + (\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)(1 - 0,5\omega^2\xi^2)}{(1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)^2}. \quad (6)$$

Оскільки рівняння для ДЧХ та УЧХ є відношенням поліномів, то рівняння (4) запишемо таким чином:

$$W(j\omega) = k \left[\frac{C(\omega)}{B(\omega)} - j \frac{D(\omega)}{B(\omega)} \right] = k \left[\left(1 - \frac{K(\omega)}{B(\omega)} \right) - j \frac{D(\omega)}{B(\omega)} \right], \quad (7)$$

де $C(\omega)$, $B(\omega)$, $D(\omega)$ - поліноми:

$$C(\omega) = (1 - 0,5\omega^2\xi^2)(1 - \omega^2\tau_2^2) - \omega^2\xi(1 - 0,17\omega^2\xi^2)(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3);$$

$$B(\omega) = (1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)^2;$$

$$D(\omega) = \omega[\xi(1 - 0,17\omega^2\xi^2)(1 - \omega^2\tau_2^2) + (\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)(1 - 0,5\omega^2\xi^2)].$$

Поліном $K(\omega) = B(\omega) - C(\omega)$ - називається додатковим і для лінійних динамічних систем має спільний множник ω^2 . Для розглядуваного об'єкта поліном має вигляд:

$$K(\omega) = \omega^2[(\tau_1^2 - \tau_2^2 + \xi\tau_1 + 0,5\xi^2) - \omega^2(2\tau_3^3\tau_1 + \xi\tau_3^3 + 0,17\xi^3\tau_1 + 0,5\xi^2\tau_2^2) + \omega^4(\tau_3^6 + 0,17\xi^3\tau_3^3)]. \quad (8)$$

З рівняння (7), враховуючи додатковий поліном, маємо:

$$\text{Re}(\omega) = k[1 - K(\omega)/B(\omega)] = k[1 - \omega^2 N_2(\omega)], \quad (9)$$

де

$$N_2(\omega) = (B_0 - \omega^2 B_1 + \omega^4 B_2)/B_3, \quad (10)$$

де

$$B_0 = \tau_1^2 - \tau_2^2 + \xi\tau_1 + 0,5\xi^2; \quad B_1 = 2\tau_3^3\tau_1 + \xi\tau_3^3 + 0,17\xi^3\tau_1 + 0,5\xi^2\tau_2^2; \quad B_2 = \tau_3^6 + 0,17\xi^3\tau_3^3;$$

$$B_3 = (1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)^2.$$

Виходячи з (7), для УЧХ маємо:

$$\text{Im}(\omega) = D(\omega)/B(\omega) = \omega N_1(\omega), \quad (11)$$

де

$$N_1(\omega) = \frac{[\xi(1 - 0,17\omega^2\xi^2)(1 - \omega^2\tau_2^2) + (\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)(1 - 0,5\omega^2\xi^2)]}{(1 - \omega^2\tau_2^2)^2 + \omega^2(\tau_1 - \omega^2\tau_3^3)^2}. \quad (12)$$

Враховуючи (10) і (12), рівняння (7) набуває такого вигляду:

$$W(j\omega) = k[1 - \omega^2 N_2(\omega)] - j\omega N_1(\omega). \quad (13)$$

Оскільки $N_1(\omega)$ і $N_2(\omega)$ є деякими сталими часу залежними від частоти ω , то передавальна функція (13) описує наступне диференціальне рівняння другого порядку:

$$N_2(\omega) \frac{d^2 y}{dt^2} + N_1(\omega) \frac{dy}{dt} + y = kx. \quad (14)$$

Рівняння (14) називається квадратурним, так як об'єкти, котрі описуються лінійними диференціальними рівняннями високого порядку можна описати сукупністю диференціальних рівнянь другого порядку (квадратурами). Для стійких об'єктів другого порядку можна записати, що при $N_1(\omega)/N_2(\omega) \geq 2$ перехідний процес об'єкта є аперіодичний, а при $N_1(\omega)/N_2(\omega) < 2$ - коливальним. Задача полягає в тому, щоби визначити ці узагальнені сталі часу. З [9-11] відомо, що для об'єктів другого та вищого порядку ДЧХ перетинає частотну вісь у деякій точці $\omega = \omega_{\Pi}$ при $\text{Re}(\omega_{\Pi}) = 0$. Тоді з (9) маємо: $1 - \omega_{\Pi}^2 N_2(\omega_{\Pi}) = 0$. Звідки

$$N_2(\omega_{\Pi}) = 1/\omega_{\Pi}^2. \quad (15)$$

Оскільки для диференціального рівняння другого порядку $\omega_{\Pi}^2 = 1/\tau_2^2$ - є множителем біля другої похідної, то стала часу $\tau_2 = 1/\sqrt{N_2(\omega_{\Pi})}$. З аналізу рівняння (15) випливає, що при частоті переходу ω_{Π} функція $N_2(\omega_{\Pi})$ описує сталу часу, яка є множителем біля другої похідної ідентифікованого

диференціального рівняння або першої квадратури. Таким чином, приймаючи, що $N_2(\omega_{\Pi}) = \tau_{2M}^2$, рівняння першої квадратури приймає наступну форму:

$$\tau_{12}^2 \frac{d^2 y}{d(t-\xi)^2} + \tau_{11} \frac{dy}{d(t-\xi)} + y = kx, \quad (16)$$

де τ_{11}, τ_{12} - сталі часу першої квадратури.

Наближено сталу часу τ_{1M} можна знайти з умови критичного стану об'єкта, при якому $\tau_{1M} / \tau_{2M} = 2$ або $\tau_{1M} = 2\tau_{2M}$. Після цього на одному графіку розраховуються ДЧХ реального об'єкта за рівнянням (5) і ДЧХ, визначеного за рівнянням (16). Якщо між цими ДЧХ є велика різниця, то в діалоговому режимі змінюється стала часу τ_{1M} до тих пір, поки ця різниця не стане мінімальною.

Рівняння (16) для першої квадратури з врахуванням ЧЧЗ запишемо таким чином:

$$W_1(j\omega) = k \left[(1 - \omega^2 N_{12}(\omega)) - j\omega N_{11}(\omega) \right], \quad (17)$$

де

$$N_{11}(\omega) = \frac{\xi(1 - 0,17\omega^2 \xi^2)(1 - \omega^2 \tau_{12}^2) + \tau_{11}(1 - 0,5\omega^2 \xi^2)}{(1 - \omega^2 \tau_{12}^2)^2 + \omega^2 \tau_{11}^2}; \quad (18)$$

$$N_{12}(\omega) = \frac{(0,5\xi^2 + \xi\tau_{11} - \tau_{12}^2 - \tau_{11}^2) - \omega^2(0,5\xi^2 \tau_{12}^2 + 0,17\xi^3 \tau_{11})}{(1 - \omega^2 \tau_{12}^2)^2 + \omega^2 \tau_{11}^2}. \quad (19)$$

ДЧХ першої квадратури описується таким рівнянням:

$$\text{Re}_1(\omega) = k \frac{(1 - 0,5\omega^2 \xi^2)(1 - \omega^2 \tau_{12}^2) - \omega^2 \tau_{11} \xi(1 - 0,17\omega^2 \xi^2)}{(1 - \omega^2 \tau_{12}^2)^2 + \omega^2 \tau_{11}^2}. \quad (20)$$

Рівняння для УЧХ першої квадратури має такий вигляд:

$$\text{Im}(\omega) = k\omega \frac{\xi(1 - 0,17\omega^2 \xi^2)(1 - \omega^2 \tau_{12}^2) + \tau_{11}(1 - 0,5\omega^2 \xi^2)}{(1 - \omega^2 \tau_{12}^2)^2 + \omega^2 \tau_{11}^2}. \quad (21)$$

Оскільки при $\omega = \omega_{\Pi}$ $\text{Re}_1(\omega_{\Pi}) = 0$, то знаходимо сталу часу ідентифікованого об'єкта:

$$\tau_{12} = 1 / \omega_{\Pi}. \quad (22)$$

Нехай передавальна функція реального об'єкта третього порядку з запізненням описується наступним рівнянням:

$$W(j\omega) = k \frac{\exp(-j\omega\xi_i)}{((1 - \omega^2 \tau_2^2) + j\omega(\tau_1 - \omega^2 \tau_3^3))}. \quad (23)$$

Прийmemo, що такий об'єкт характеризується наступними параметрами: ЧЧЗ $\xi = 0; 2; 4; 6; 8$ с, сталі часу: $\tau_1 = 15$ с, $\tau_2 = 5$ с, $\tau_3 = 2$ с, коефіцієнт передачі $k = 1$. Функцію $\exp(-j\omega\xi_i)$ розкладемо у ряд Тейлора та обмежимося першими чотирма його членами. Тоді рівняння частотної передавальної функції має вигляд:

$$W(j\omega) = \frac{(1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2) - j\omega\xi_i(1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2)}{(1 - 25\omega^2) + j\omega(15 - 8\omega^2)} = \text{Re}(\omega) - j \text{Im}(\omega). \quad (24)$$

ДЧХ описується таким рівнянням:

$$\text{Re}(\omega) = \frac{(1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2)(1 - 25\omega^2) - \omega^2 \xi_i(1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2)(\tau_1 - 8\omega^2)}{(1 - 25\omega^2)^2 + \omega^2(15 - 8\omega^2)^2}. \quad (25)$$

Рівняння для УЧХ має вигляд:

$$\text{Im}(\omega) = \omega \frac{\xi_i(1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2)(1 - 25\omega^2) + (15 - 8\omega^2)(1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2)}{(1 - 25\omega^2)^2 + \omega^2(15 - 8\omega^2)^2}. \quad (26)$$

Графіки залежностей $\text{Re}(\omega) = f(\omega)$ і $\text{Im}(\omega) = f(\omega)$ для реального об'єкта з різним ЧЧЗ приведені на рис. 1.

З рис. 1,а видно, що збільшення ЧЧЗ об'єкта приводить до зміщення кривих ДЧХ вліво, а відповідно зменшується частота переходу цієї характеристики через частотну вісь. При збільшенні ЧЧЗ графіки УЧХ теж зміщуються вліво. Якщо $\xi \geq 2$ с, то перехідні процеси об'єкта стають коливальними, так як ці графіки перетинають частотну вісь. Рівняння (23) запишемо таким чином:

$$W_1(j\omega) = k \left[\frac{C_1(\omega)}{B_1(\omega)} - j \frac{D_1(\omega)}{B_1(\omega)} \right] = k \left[(1 - \omega^2 N_{12}(\omega)) - j\omega N_{11}(\omega) \right], \quad (27)$$

де $C_1(\omega) = (1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2)(1 - 25\omega^2) - \omega^2 \xi_i(1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2)(15 - 8\omega^2);$

$$\begin{aligned}
 B_1(\omega) &= (1 - 25\omega^2)^2 + \omega^2(15 - 8\omega^2)^2; \\
 D_1(\omega) &= \omega \left[\xi_i (1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2) (1 - 25\omega^2) + (15 - 8\omega^2) (1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2) \right]; \\
 N_{12}(\omega) &= \frac{(0,5\xi_i^2 + 15\xi_i - 200) + \omega^2(240 - 12,5\xi_i^2 - 8\xi_i - 2,55\xi_i^3) - \omega^4(64 + 1,36\xi_i^3)}{(1 - 25\omega^2)^2 + \omega^2(15 - 8\omega^2)^2}; \\
 N_{11}(\omega) &= \frac{\left[\xi_i (1 - 0,17\omega^2 \xi_i^2) (1 - 25\omega^2) + (15 - 8\omega^2) (1 - 0,5\omega^2 \xi_i^2) \right]}{(1 - 25\omega^2)^2 + \omega^2(15 - 8\omega^2)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

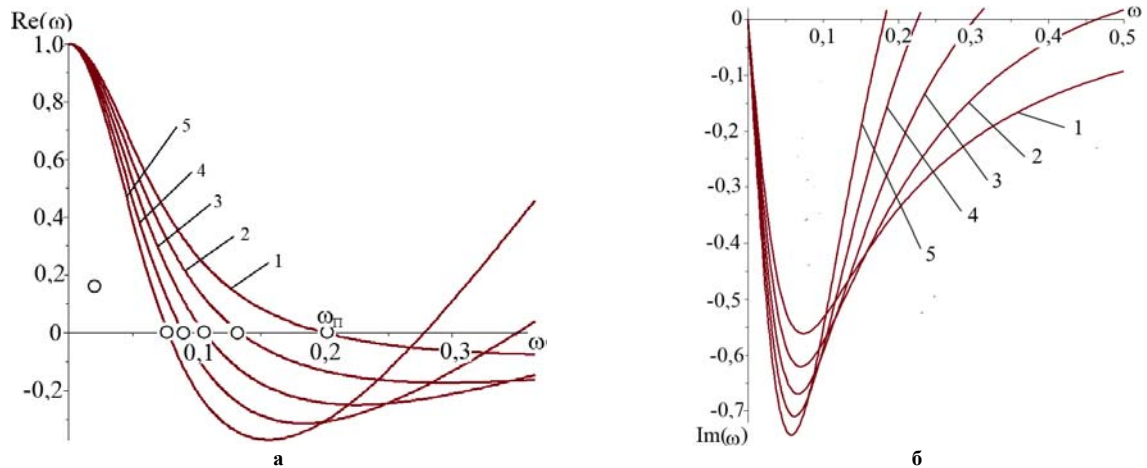


Рис. 1. Графіки ДЧХ (а) і УЧХ (б) для ЧЧЗ: 1 - $\xi_1 = 0$; 2 - $\xi_2 = 2c$; 3 - $\xi_3 = 4c$; 4 - $\xi_4 = 6c$ і 5 - $\xi_5 = 8c$

На рис. 2 приведені графіки залежностей $N_{12}(\omega) = f(\omega)$ (а) і $N_{11}(\omega) = f(\omega)$ (б) для значень ЧЧЗ: 1 - $\xi_1 = 0$; 2 - $\xi_2 = 2c$; 3 - $\xi_3 = 4c$; 4 - $\xi_4 = 6c$ і 5 - $\xi_5 = 8c$.

З графіків рис. 2, а і б видно, що зі збільшенням ЧЧЗ амплітуда цих залежностей збільшується. Характерними для цих залежностей є точки a_{N2} і a_{N1} . Можна рахувати, що амплітуди функцій $N_{12}(\omega_{02})$ і $N_{11}(\omega_{01})$ для частот, котрі відповідають цим точкам є практично незалежними від ЧЧЗ. Аналіз залежностей $N_{12}(\omega_{02})$ і $N_{11}(\omega_{01})$ у точках a_{N2} і a_{N1} показує, що площі під прямокутниками, обмеженими пунктирними лініями, практично є рівними поміж собою, а відношення сталих часу, визначеними за частотами в точках a_{N2} і a_{N1} , є рівним відношенню, знайденому за формулою $N_{11}(\omega_{a_{N1}}) / \sqrt{N_{12}(\omega_{a_{N2}})}$. Це підтверджує висновок про те, що за частотами в точках a_{N2} і a_{N1} можна визначити сталі часу $\tau_{11} = 1 / \omega_{a_{N1}}$ і $\tau_{12} = 1 / \omega_{a_{N2}}$ ідентифікованого об'єкта. Для розглядуваної задачі $\tau_{11} = 9,6c$, $\tau_{12} = 3,87c$, а відношення $\tau_{11} / \tau_{12} = \omega_{a_{N2}} / \omega_{a_{N1}} = 9,6 / 3,87 = 2,48$. Звідси випливає, що найбільш оптимальним і мало залежним від зміни часу чистого запізнення буде ідентифікований об'єкт з відношенням сталих часу рівним 2,48.

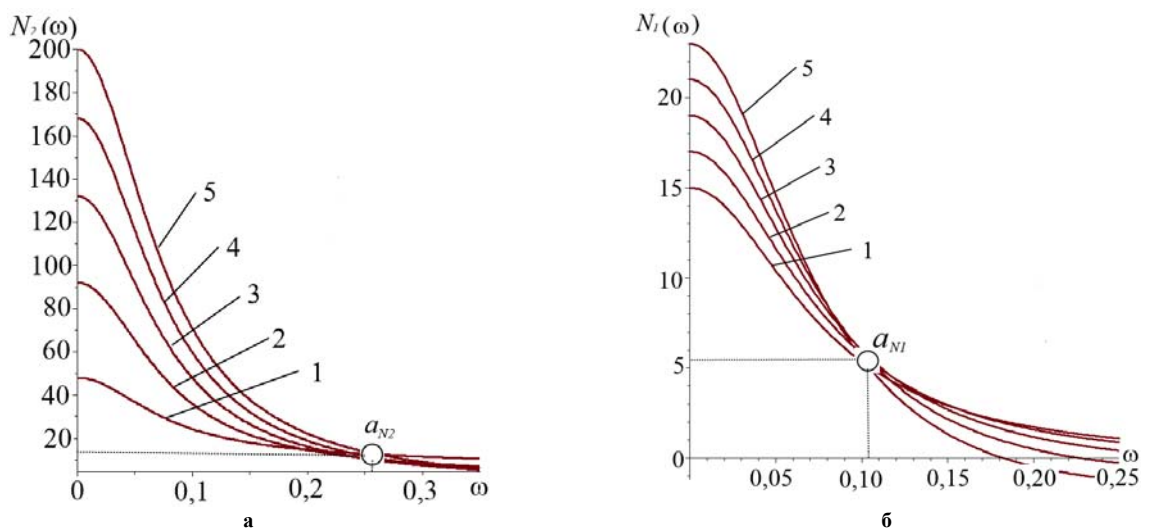


Рис. 2. Графіки залежностей $N_{12}(\omega) = f(\omega)$ і $N_{11}(\omega) = f(\omega)$

На рис. 3,а приведені ДЧХ розраховані за рівнянням (20) (тонкі лінії) для ідентифікованого об'єкта з ЧЧЗ відповідно рівним: 1- $\xi_1 = 0$; 2 - $\xi_2 = 2 c$; 3 - $\xi_3 = 4 c$; 4 - $\xi_4 = 6 c$ і 5 - $\xi_5 = 8 c$ і за рівнянням (25) (жирні лінії) для тих же значень часу запізнення. Як видно з рис. 3,а криві (тонкі та жирні) практично співпадають. Причому сталі часу ідентифікованого об'єкта τ_{11} залишаються сталими незалежно від часу чистого запізнення. З метою порівняння на рис. 3,б приведені такі ж дослідження, але для ідентифікованого об'єкту вилучено ланку чистого запізнення.

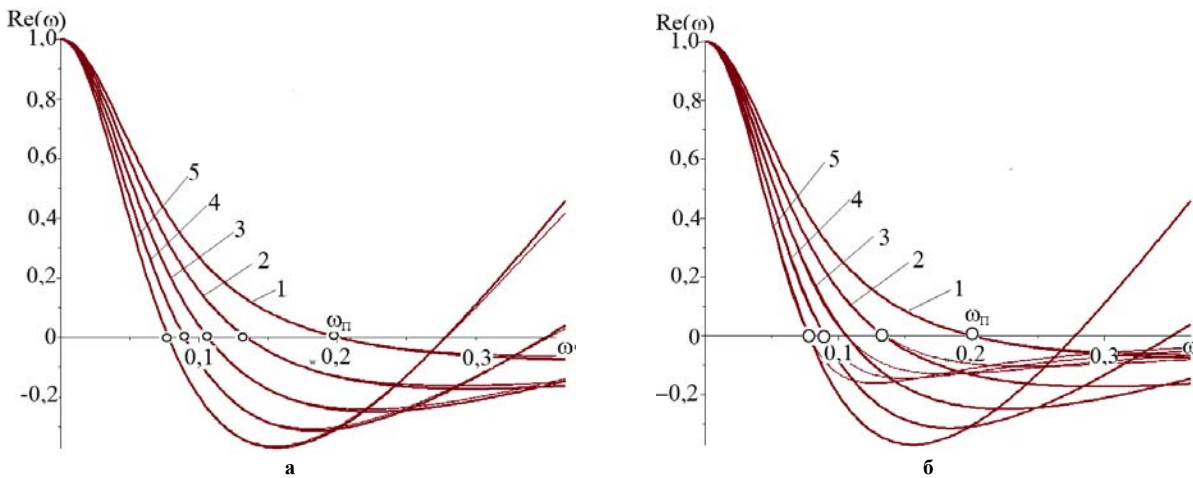


Рис. 3. Графіки ДЧХ реального та ідентифікованого об'єкта з врахуваннями ЧЧЗ (а) і без його врахування (б) для значень ЧЧЗ: 1 - $\xi_1 = 0$; 2 - $\xi_2 = 2 c$; 3 - $\xi_3 = 4 c$; 4 - $\xi_4 = 6 c$; 5 - $\xi_5 = 8 c$

У цьому випадку криві ДЧХ обох об'єктів до точок частоти переходу ω_{Π} співпадають з достатньо високою точністю, а далі відхилення кривих ДЧХ ідентифікованого об'єкта є суттєвим, а сталі часу τ_{11} і τ_{12} є змінними та залежать від часу ξ_i як показано на рис. 4. Як показано в [11], високочастотна область мало впливає на характер перехідних процесів, тому відхилення ДЧХ ідентифікованого об'єкта (тонкі лінії на рис. 3,б) від таких же кривих реального об'єкта не викликає суттєвих динамічних похибок.

Якщо об'єкт третього порядку з запізненням ідентифікується першою квадратурою без запізнення, то зі збільшенням ЧЧЗ реального об'єкта сталі часу відповідно збільшуються як показано на рис. 4,а. У той же час відношення сталих часу τ_{11} / τ_{12} , яке визначає характер перехідного процесу, зменшується нелінійно як показано на рис. 4,б.

З рис. 4,а видно, що стала часу τ_{11} ідентифікованого об'єкта без запізнення зі збільшенням ЧЧЗ пропорційно зростає. У той час як залежність сталої часу τ_{12} при зростанні ЧЧЗ є нелінійною. Відношення сталих часу, яке характеризує характер перехідного процесу ідентифікованого об'єкту, зі збільшенням ЧЧЗ зменшується за експоненціальним законом.

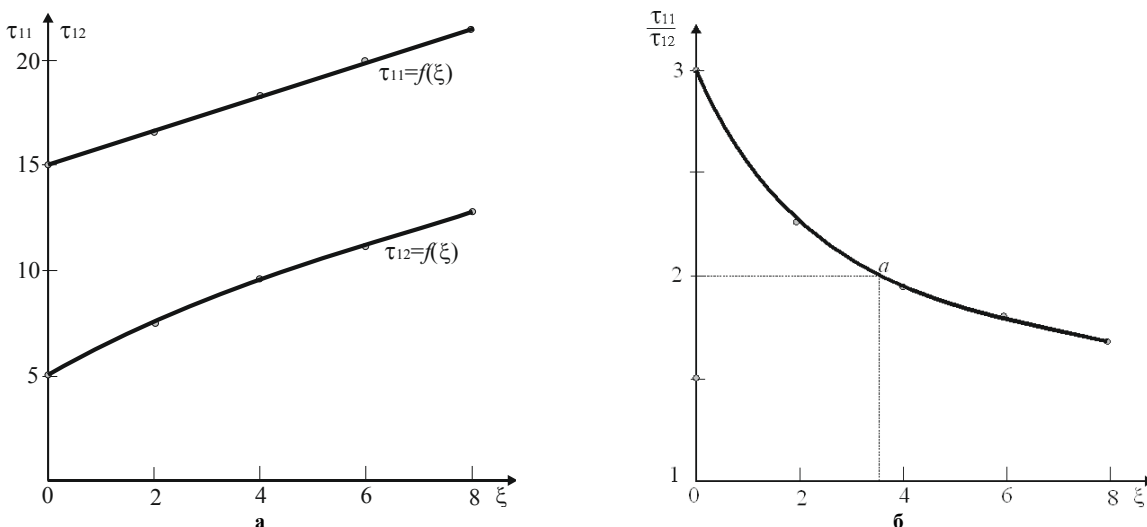


Рис. 4. Графіки залежності сталих часу ідентифікованого об'єкту від зміни часу чистого запізнення

Висновки. Показано, що складну ІВС, САР чи ТОКУ, які складаються з лінійних динамічних елементів та описуються диференціальним рівнянням високого порядку, можна привести до систем другого порядку (квадратур). Причому перша квадратура є основною і може бути використана для розрахунку

перехідного процесу. Доказано, що сталі часу ідентифікованого диференціального рівняння першої квадратури визначаються за дійсною та уявною частотними характеристиками реальної складної ІВС, САР та ТОКУ. За ДЧХ реальної системи визначається стала часу, яка є множником другої похідної цього рівняння, а за УЧХ – стала часу, яка є множником першої похідної. Вперше виконано дослідження динамічного об'єкта, який описується лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з запізненням. Установлено, що при ідентифікації такого об'єкта методом квадратур сталі часу першої квадратури з таким же часом чистого запізнення практично не залежать від часу запізнення в широкому діапазоні його зміни. Цей висновок має суттєве практичне значення, так як дає змогу підвищувати точність розрахунку перехідних процесів шляхом уведення в систему управління деякої фіктивної ланки чистого запізнення. Показано, що реальний об'єкт третього порядку з запізненням можна ідентифікувати диференціальним рівнянням першої квадратури без запізнення. У цьому випадку сталі часу цієї квадратури змінюються практично пропорційно зміні часу чистого запізнення. Це дозволяє уводити поправку в розрахунки перехідних процесів та підвищити точність ІВС та САР.

Література

1. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв / Стенцель Й.І., Поркуян О.В. – Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Далі, 2010. – 300 с.
2. 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. – 1997. – С. 2-5.
3. Стенцель Й. І. Основи теорії багатопараметричних об'єктів керування з реологічними переходами / Й. І. Стенцель, О. В. Поркуян, О. І. Проказа // *Технологічні комплекси*. – 2010. – № 2. – С. 46–51.
4. Поркуян О. В. Реологічні моделі технологічного контролю параметрів з внутрішніми зв'язками у виробництві аміачної селітри / О. В. Поркуян, Й. І. Стенцель, О. І. Проказа // *Збірник наукових праць «Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». «Електроенергетика та перетворювальна техніка»*. – 2010. – № 12. – С. 21–28.
5. Stentsel I. Research of the system of neutralization process control in the production of ammonium nitrate on the basis of rheologic transitions principles / I. Stentsel, O. Porkuyan, E. Prokaza // *An International journal on motorization, vehicle, operation, energy efficiency and mechanical engineering “TEKA Commission of motorization and Energetics in Agriculture”*. – 2012. – Vol. 12, № 4. – P. 274-278.
6. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления / А. А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – Т.1. – 312 с.
7. Нетушил А. В. Теория автоматического управления / Под ред. А. В. Нетушила. – М.: Высшая шк., 1983. – 488 с.
8. Макаров И. М. Линейные автоматические системы / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
9. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов – М.: Наука, 1972. – 768 с.
10. Фельбаум А. А. Методы теории автоматического управления / А. А. Фельбаум, А. Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 743 с.
11. Солодовников В. В. Частотный метод построения переходных процессов / В. В. Солодовников, Ю. И. Топчиев, Г. В. Крутикова. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 196 с.

References

1. Stencil' J.I. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobniectv / Stencil' J.I., Porkujan O.V. – Lugansk: vid-vo Shidnoukr. nac. un-tu im. V.Dalja, 2010. – 300 s.
2. Stencil' J. I. Rozrahunok perehidnih procesiv skladnih sistem reguljuvannja metodom kvadratur / J. I. Stencil', I. E. Kirichuk, O. V. Savel'eva // *Nauk.-tehn. zbirnik «Avtomatizacija tehnologichnih procesiv ta promislava ekologija»*. Vip. 1. – 1997. – S. 2-5.
3. Stencil' J. I. Osnovi teorii bagatoparametrichnih ob'ektiv keruvannja z reologichnimi perehodami / J. I. Stencil', O. V. Porkujan, O. I. Prokaza // *Tehnologichni kompleksi*. – 2010. – № 2. – S. 46–51.
4. Porkujan O. V. Reologichni modeli tehnologichnogo kontrolju parametriv z vnutrishnimi zv'jazkami u virobniectvi amiachnoi selitri / O. V. Porkujan, J. I. Stencil', O. I. Prokaza // *Zbirnik naukovih prac' «Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». «Elektroenergetika ta peretvorjuval'na tehnika»*. – 2010. – № 12. – S. 21–28.
5. Stentsel I. Research of the system of neutralization process control in the production of ammonium nitrate on the basis of rheologic transitions principles / I. Stentsel, O. Porkuyan, E. Prokaza // *An International journal on motorization, vehicle, operation, energy efficiency and mechanical engineering “TEKA Commission of motorization and Energetics in Agriculture”*. – 2012. – Vol. 12, № 4. – R. 274-278.
6. Voronov A. A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija / A. A. Voronov. – M.: Jenergija, 1980. – T.1. – 312 s.
7. Netushil A. V. Teorija avtomaticheskogo upravlenija / Pod red. A. V. Netushila. – M.: Vysshaja shk., 1983. – 488 s.
8. Makarov I. M. Linejnye avtomaticheskie sistemy / I. M. Makarov, B. M. Menskij. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 504 s.
9. Besekerskij V. A. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija / V. A. Besekerskij, E. P. Popov – M.: Nauka, 1972. – 768 s.
10. Fel'baum A. A. Metody teorii avtomaticheskogo upravlenija / A. A. Fel'baum, A. G. Butkovskij. – M.: Nauka, 1971. – 743 s.
11. Solodovnikov V. V. Chastotnyj metod postroenija perehodnyh processov / V. V. Solodovnikov, Ju. I. Topcheev, G. V. Krutikova. – M.: GITTL, 1955. – 196 s.