

УДК 681.2.66 (0754.8)

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Й. Стенцель, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління,
К. Літвінов, аспірант кафедри,
О. Проказа, кандидат технічних наук, доцент кафедри,
А. Рябіченко, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Северодонецьк

Сучасні методи розрахунку перехідних процесів складних систем контролю та регулювання є наближеними, що призводить до значних похибок вимірювального контролю та автоматичного регулювання. Для розрахунку перехідних процесів та їх дослідження пропонується використати метод квадратур, за допомогою якого складні динамічні системи ідентифікуються до другого порядку з новими сталими часу. Описано методи визначення сталих часу ідентифікованої системи. Показано, що сталі часу такої системи повністю визначаються дійсною та уявною частотними характеристиками.

Modern methods for calculation of transients in complex systems control and regulation are approximate, which leads to sig-

nificant errors of measuring control and automatic regulation. For the calculation of transients and their research are encouraged to use the method of quadratures by which complex dynamic systems are identified up to the second order with a new time constants. Describes methods for determining the time constant of the identified system. It is shown that the time constants of the system are completely determined by the real and imaginary frequency characteristics. Since the curves of transients, which are calculated by the method of quadratures, always have a point of maximum change in the process variable, then it is possible to determine by the position the accuracy of the measuring control. This is important in the development of application software for processes of the measurement information processing in computer-integrated systems of control.

Ключові слова: метод, перехідний процес, система, контроль, регулювання, квадратура, рівняння, точність.
Keywords: method, transient, system, control, regulation, quadrature, equation, accuracy.

Технологічні процеси в хімічній, нафтохімічній, харчовій, інших галузях господарства, як правило, є інерційними та характеризуються такими параметрами, як часом чистого запізнення, значним у багатьох випадках, часом перехідного процесу, аперіодичністю, коливальністю тощо. Усі технологічні процеси забезпечуються інформаційно-вимірювальними системами (ІВС), системами автоматичного регулювання (САР), сигналізації та блокування. Ці системи також є інерційними та описуються відповідними динамічними характеристиками. Якщо час перехідного процесу технологічного об'єкта контролю та управління (ТОКУ) у (5–10) разів перевищує такий же час ІВС, інерційністю останньої можна з певною вірогідністю знехтувати за оцінювання точності контролю чи управління. У всіх інших випадках, з метою підвищення точності й достовірності вимірювального контролю (ВК) та управління, інерційністю нехтувати не можна. У реальних технологіч-

них процесах практично немає статичних режимів, а зміна витрат теплових і матеріальних потоків призводить до появи перехідних процесів вихідних координат ТОКУ, за якими оцінюються якісні показники роботи об'єкта й визначаються налагоджувальні параметри регуляторів САР. Окрім того, технологічні процеси супроводжуються реологічними перетвореннями імпульсу маси, енергії та кількості руху, які також належать до інерційних. Отже, ТОКУ можуть описуватися диференціальними рівняннями високого порядку, що не мають аналітичного розв'язку, або наявні методи є наближеними і не забезпечують відповідної точності розрахунку перехідних процесів.

Методи розрахунку перехідних процесів САР описано у значній кількості наукових праць [1–5]. До основних з них належать такі: метод коренів (класичний), зворотного перетворення Лапласа [6] і частотні, серед яких є метод трапецій [7]. До найбільш

точних належить класичний метод, але проблема його використання пов'язана з відсутністю способів визначення коренів диференціального рівняння високого порядку. Така сама проблема стосується й методу зворотного перетворення Лапласа, незважаючи на те, що його широко використовують в програмному забезпеченні комп'ютерно-інтегрованих систем контролю та управління технологічними процесами (КІСКУ ТП). Частотні методи засновано на інтегруванні дійсної (ДЧХ) чи уявної (УЧХ) частотних характеристик, але вимагають великих витрат часу для розрахунку перехідних процесів. Окрім того, точність розрахунку є недостатньо високою, оскільки ці методи засновано на розділенні ДЧХ на елементарні площини (наприклад, трапеції), для кожної з яких розраховується частковий перехідний процес. Звідси випливає, що зі збільшенням кількості таких елементарних площин, а відповідно точності перехідного процесу, збільшується й час розрахунку таких процесів. Питанням точності перехідних процесів ІВК та САР приділяють значну увагу. Це видно з того, що практично у всіх дисертаційних роботах з автоматизації процесів керування є розділи щодо досліджень динамічної та статичної точності. Для оцінювання точності таких систем, як правило, використовують принципи випадкових процесів (випадкових функцій і випадкового контролю), виконують оцінку однорідності дисперсій, визначають кореляційні функції та середнє квадратичне відхилення σ . Абсолютну похибку системи визначають за формулою: $\Delta = \pm k\sigma$, де k — коефіцієнт Стюдента [8, 9]. При цьому використовують метод найменших квадратів з метою визначення деякого дійсного значення випадкової функції чи контролю. Оскільки випадкові функції змінюються в часі, то з метою підвищення точності контролю та регулювання в сучасних КІСКУ ТП виконують розрахунки перехідних процесів (у більшості випадків використовують метод зворотного перетворення Лапласа) з метою визначення швидкості зміни вихідних координат; відхилення їх від деякого значення, прийнятого за дійсне; максимальної амплітуди відхилення цих координат від деяких їхніх номінальних значень за технологічним регламентом; відповідних похибок ВК. Чим більшим є час опрацювання вимірювальної інформації, тим більшою є амплітуда зміни вихідної координати, а значить, тим більшою є похибка ВК вихідних координат. Отже, зменшення часу розрахунку перехідних процесів є важливим науково-практичним завданням.

Мета статті — дослідження перехідних процесів ІВК і САР, що описуються лінійними диферен-

ціальними рівняннями високого порядку. За реальних виробничих умов на ТОКУ постійно впливають різноманітні зовнішні та внутрішні чинники, які призводять до динамічної зміни вихідних координат цього об'єкта як за величиною, так і за швидкістю їх руху. Ліквідацію дії цих чинників здійснюють САР, які формують певну протидію за відповідним законом. Якщо впливний чинник визначено ще на вході до ТОКУ (наприклад, зміну витрати матеріального чи теплового потоку, температури тощо), то його дію на об'єкт можна врахувати ще до зміни тієї чи іншої вихідної координати шляхом внесення випереджувального сигналу до регулятора САР. У цьому разі точність регулювання підвищується, оскільки амплітуда зміни вихідної координати є невеликою. Внаслідок того, що у багатопараметричному ТОКУ одночасно можуть змінюватися як вхідні, так і впливні координати, то, зазвичай, врахувати та визначити їхній вплив є достатньо складною задачею, оскільки не всі вхідні параметри можна контролювати. Тому у більшості випадків технологічні процеси ведуть за зміною вихідних координат. За такого способу управління ТОКУ вимірювальному контролю підлягають вихідні, вхідні і деякі впливні координати. Якщо змінюється той чи інший впливний параметр (наприклад, витрата матеріального потоку), реакція на цю зміну з'явиться на виході ТОКУ лише через час, що називається часом перебування ϑ_{Π} [10]. Сигнал вихідної координати, який сприймається вимірювальним перетворювачем, за лінією зворотного зв'язку САР подається на регулятор, який формує відповідний коригувальний сигнал. Останній змінює вхідну координату (наприклад, витрату матеріального чи теплового потоку) до того моменту, поки вихідна координата не повернеться до попереднього значення. Із цього випливає, що через ТОКУ знову проходить впливний параметр протягом часу ϑ_{Π} . З метою формування управлінських чи контролювальних сигналів, які б враховували час проходження збурень через технологічний об'єкт, використовують різні методи, до яких належить метод розрахунку перехідних процесів, основною вимогою до яких є мінімум часу цього розрахунку та його точність.

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СКЛАДНИХ ІВК ТА САР МЕТОДОМ КВАДРАТУР

Уперше метод квадратур для розрахунку перехідних процесів описано в [11, 12]. Суть його полягає в тому, що до рівняння ДЧХ складної ІВК чи САР вводиться додатковий поліном, який є різницею поліномів знаменника та чисельника ДЧХ.

Припустимо, що передавальна функція ІВК чи САР описується таким диференціальним рівнянням високого порядку:

$$\tau_n^n \frac{d^n y}{dt^n} + \tau_{n-1}^{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \tau_i^i \frac{d^i y}{dt^i} + \dots + \tau_3^3 \frac{d^3 y}{dt^3} + \tau_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \tau_1 \frac{dy}{dt} + y = k \left(\xi_m^m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + \xi_\zeta^\zeta \frac{d^\zeta x}{dt^\zeta} + \dots + \xi_2^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \xi_1 \frac{dx}{dt} + x \right) \quad (1)$$

де τ_n, ξ_m — сталі часу перехідного процесу; $n = 0, 1, 2, \dots, i, m = 0, 1, 2, \dots, \zeta$; y — вихідна координата ІВК чи САР; x — вхідна координата; t — час перехідного процесу; k — коефіцієнт передавання системи.

Передавальна функція таких систем має вид: $W(s) = Y(s) / X(s)$, де $Y(s), X(s)$ — вихідна та вхідна координати ТОКУ, перетворені за Лапласом; s — оператор Лапласа. У частотній області за $k = 1$ маємо:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \text{Re}(\omega) - j \text{Im}(\omega) = \frac{C(\omega)}{B(\omega)} - j \frac{D(\omega)}{B(\omega)} \quad (2)$$

де $\text{Re}(\omega), \text{Im}(\omega)$ — ДЧХ та УЧХ відповідно; ω — кутова частота; $C(\omega), B(\omega), D(\omega)$ — поліноми.

Згідно з методом квадратур ДЧХ записуємо у такий спосіб:

$$\text{Re}(\omega) = \frac{C(\omega)}{B(\omega)} = \frac{B(\omega) - K(\omega)}{B(\omega)} = 1 - \frac{K(\omega)}{B(\omega)} \quad (3)$$

де $K(\omega) = B(\omega) - C(\omega)$ — доповнювальний поліном.

Як показали дослідження, поліном $K(\omega)$ завжди має спільний множник ω^2 . Тобто його можна записати так: $K(\omega) = \omega^2 N_2(\omega)$, де $N_2(\omega)$ — поліном з вільним членом. Отже, рівняння (3) набуває такої форми:

$$\text{Re}(\omega) = 1 - \omega^2 N_2(\omega) \quad (4)$$

Якщо ІВК чи САР описується диференціальним рівнянням другого порядку: $\tau_2^2 (d^2 y / dt^2) + \tau_1 (dy / dt) + y = kx$, де τ_1, τ_2 — сталі часу, то за $k = 1$ $\text{Re}(\omega) = 1 - \omega^2 \tau_2^2$. Порівнюючи це рівняння з (3), бачимо, що для систем другого порядку $N_2(\omega) = \tau_2^2$. На рис. 1, а показано ДЧХ, яка є характерною для систем другого та вищого порядку.

Із рівняння (3) і рис. 1,а видно, що за $\text{Re}(\omega_{\text{п}}) = 0$ $N_2(\omega_{\text{п}}) = 1 / \omega_{\text{п}}^2$, а для системи другого порядку $N_2(\omega_{\text{п}}) = \tau_2^2 = 1 / \omega_{\text{п}}^2$, де $\omega_{\text{п}}$ — частота переходу ДЧХ через частотну вісь. Отже, для системи другого порядку стала часу $\tau_2 = 1 / \omega_{\text{п}}$. Із цього випливає висновок, що коефіцієнт передавання k впливає лише на амплітуду ДЧХ за $\omega = 0$ і не впливає на положення частоти переходу $\omega_{\text{п}}$. Оскільки для полінома $N_2(\omega)$ вільним членом є τ_2^2 , можна записати таку рівність: $N_2(\omega) = H_{2k}^k(\omega) + \tau_2^2$. Якщо пло-

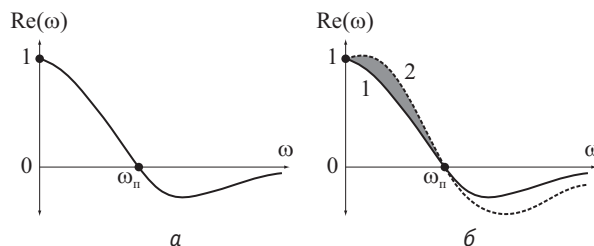


Рис. 1. ДЧХ системи другого і вищого порядку (а) і принцип ідентифікації системи високого порядку другим (б)

Fig. 1. The RFC for system of the second and higher order (a) and the identification principle for the system of high-order by second (b)

ща під кривою функції $H_{2k}^k(\omega)$ є незначною (відносно до площі під кривою $\text{Re}(\omega) = f(\omega)$), складовою $H_{2k}^k(\omega)$ можна знехтувати, і систему ідентифікувати рівнянням другого порядку. Тоді подальша робота полягає у визначенні сталої часу τ_1 . Для цього можна скористатися УЧХ. Оскільки УЧХ САР за каналом регулювання завжди має спільним множником частоту ω , рівняння (2) запишемо у такий спосіб: $\text{Im}(\omega) = D(\omega) / B(\omega) = \omega N_1(\omega)$. Для системи другого порядку маємо: $\text{Im}(\omega) = \omega \tau_1$ або $\tau_1 = \text{Im}(\omega) / \omega$. Для такої системи рівняння для множника $N_1(\omega)$ має вид: $N_1(\omega) = \tau_1 / [(1 - \omega^2 \tau_2^2)^2 + (\omega \tau_1)^2]$. Для

визначеної вище частоти переходу $\omega_{\text{п}}$ отримуємо: $N_1(\omega_{\text{п}}) = 1 / \omega_{\text{п}}^2 \tau_1$, звідки стала часу $\tau_1 = 1 / \omega_{\text{п}}^2 N_1(\omega_{\text{п}})$. Як показують дослідження, всі криві ДЧХ, незалежно від сталої часу τ_1 , проходять через такі дві точки: за $\text{Re}(0) = 1$ і $\text{Re}(\omega_{\text{п}}) = 0$. На рис. 1, б показано реальну 1 і ідентифіковану 2 другим порядком криві ДЧХ. Різниця площ між цими кривими характеризує точність ідентифікації за методом квадратур. Як показано у [13, 14], поведінка системи в динамічному режимі роботи практично визначається частотами в діапазоні від 0 до $\omega_{\text{п}}$. Вищі частоти, як правило, чинять незначний вплив на роботу ІВК та САР. Тому за визначення точності перехідного процесу достатньо знайти площу під реальною ДЧХ в діапазоні частот від 0 до $\omega_{\text{п}}$ та площу між кривими реальної та ідентифікованими ДЧХ. Для визначення сталої часу τ_1 пропонується такий алгоритм:

1. Описують ІВК чи САР у формі диференціального рівняння високого порядку і визначають сталі часу перехідного процесу.

2. Визначають передавальну функцію ІВК чи САР, ДЧХ і УЧХ та розраховують графіки: $\text{Re}(\omega) = f(\omega)$ й $\text{Im}(\omega) = g(\omega)$.

3. За ДЧХ визначають частоту переходу $\omega_{\text{п}}$, за якою визначають сталу часу ідентифікованої системи $\tau_{21} = 1 / \omega_{\text{п}}$.

4. За формулою для УЧХ визначають поліном $N_1(\omega)$ та його значення за частоти переходу ω_{Π} .

5. За формулою $\tau_{11} = 1/\omega_{\Pi}^2 N_1(\omega_{\Pi})$ визначають сталу часу ідентифікованої системи.

6. Записують диференціальне рівняння ідентифікованої ІВС і САР у такій формі:

$$\tau_{21}^2 (d^2 y / dt^2) + \tau_{11} (dy / dt) + y = kx. \quad (5)$$

7. Визначають відношення τ_{11} / τ_{21} і за відповідними формулами розраховують перехідні процеси.

Якщо різниця між реальною та ідентифікованою ДЧХ є великою, то у діалоговому режимі, змінюючи сталу часу τ_{11} , потрібно домогтися мінімуму цієї різниці.

Аналізуючи рівняння $\tau_{11} = 1/\omega_{\Pi}^2 N_1(\omega_{\Pi})$, можна зробити такі висновки. Якщо $\tau_{21}^2 = 1/\omega_{\Pi}^2$, рівняння приводиться до такої форми: $\tau_{11} = \tau_{21}^2 N_1(\omega_{\Pi})$ або

$$\tau_{11} / \tau_{21}^2 = N_1(\omega_{\Pi}). \quad (6)$$

Корені квадратного рівняння (5) визначаються за формулами:

* за аперіодичного перехідного процесу:

$$p_{1,2} = -\tau_{11} / 2\tau_{21}^2 \pm \sqrt{(\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2 - 1/\tau_{21}^2}; \quad (7)$$

* за коливального перехідного процесу:

$$p_{1,2} = -\tau_{11} / 2\tau_{21}^2 \pm \sqrt{1/\tau_{21}^2 - (\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2}, \quad (8)$$

де $\alpha = \tau_{11} / 2\tau_{21}^2$ — ступінь загасання перехідного процесу; $\omega_0 = \sqrt{1/\tau_{21}^2 - (\tau_{11} / 2\tau_{21}^2)^2}$ — власна частота коливальності системи.

Порівнюючи рівняння (6) і (7) та (8), видно, що між ними є відповідна подібність. Якщо рівняння (5) поділити на 2, приходимо до таких рівностей:

► для ступеня загасання:

$$\alpha = N_1(\omega_{\Pi}) / 2. \quad (9)$$

► для власної частоти коливальності перехідного процесу:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{\Pi}^2 - [N_1(\omega_{\Pi}) / 2]^2}. \quad (10)$$

Підставивши рівняння (9) у (10), маємо:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_{\Pi}^2 - \alpha^2} = \omega_{\Pi} \sqrt{1 - (\alpha / \omega_{\Pi})^2}. \quad (11)$$

Із рівнянь (9) і (11) видно, що параметри перехідних процесів ІВС та САР повністю визначаються частотою переходу ДЧХ через частотну вісь та поліномом $N_1(\omega)$. Перехідний процес, розрахований за рівнянням (5), можна використовувати за дійсний за визначення точності ІВС і САР. Відомо [15], що крива перехідного процесу об'єкта другого порядку в загальному випадку має форму, показану на рис. 2.

Характерним для перехідного процесу об'єкта другого порядку є наявність на її кривій точок «а»,

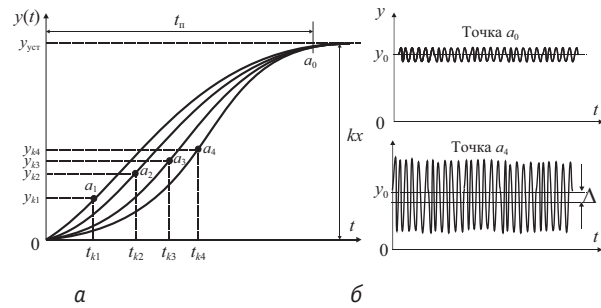


Рис. 2. Графіки перехідних процесів ІВС і САР (а) і трендові криві за зміни максимальної швидкості руху вимірювальної координати (б)

Fig. 2. The graphs of transients IMS and SAR (a) and trend curves by the change of maximum speed movement of the measuring coordinates (b)

в яких швидкість руху вихідного сигналу є максимальною. Зі збільшенням в ІВС чи САР кількості послідовно з'єднаних динамічних ланок крива перехідного процесу зміщується праворуч, а відповідно зміщуватиметься точка максимальної швидкості, наприклад, від «а₁» до «а₄», як показано на рис. 2, а, що призводить до збільшення вихідної координати від y_{k1} до y_{k4} , а відповідно до зростання динамічної похибки вимірювального контролю. Графіки перехідних процесів, показані на рис. 2, а, є характерними для стаціонарних процесів, коли час перехідного процесу є значно меншим від часу зміни впливального параметра. У багатопараметричних ТОКУ на вихідну координату одночасно впливають багато впливних чинників, які призводять до того, що ця координата змінюється за час θ , який є значно меншим від часу t_{Π} . У таких випадках час перехідного процесу координати y може змінюватися, наприклад, від t_{k1} до t_{k4} , а координата y від y_{k1} до y_{k4} . Якщо $\theta \geq t_{\Pi}$, характер трендової кривої має вид, поданий на рис. 2, б. За $\theta < t_{\Pi}$ відхилення вихідної координати може стати суттєвим, що призводить до збільшення похибки вимірювального контролю. Так, наприклад, для точки «а₀» трендова крива має незначне відхилення (рис. 2, б верхній), а для точки «а₄» це відхилення є суттєвим, що призводить до появи похибки вимірювального контролю Δ .

ВИСНОВКИ

Показано, що складну систему вимірювального контролю чи автоматичного регулювання, яка складається з лінійних динамічних елементів та описується диференціальним рівнянням високого порядку, можна привести до систем другого порядку (квадратур). Причому перша квадратура є основною і може бути використана для розрахунку перехідного процесу.

Доведено, що стали часу ідентифікованого диференціального рівняння першої квадратури визначаються за дійсною та уявною частотними характеристиками реальної складної системи вимірювального контролю чи регулювання. За ДЧХ реальної системи визначається стала часу, яка є множником другої похідної цього рівняння, а за УЧХ — стала часу, яка є множником першої похідної. Окрім того показано, що ступінь загасання коливальної системи визначається поліно-

мом УЧХ. Оскільки криві перехідних процесів, розраховані за методом квадратур, завжди мають точку максимального руху технологічного параметра, за її положенням можна визначати точність вимірювального контролю чи регулювання, що є важливим за розроблення прикладного програмного забезпечення процесів опрацювання вимірювальної інформації в комп'ютерно-інтегрованих системах контролю та управління технологічними процесами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Бесекаерский В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] // В.А. Бесекаерский, Е.П. Попов. — М.: Наука (Besekerskij V.A., Popov E.P. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija. Moscow: Nauka), 1972. — 768 с/р.
2. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления [Текст] // А.А. Воронов. — М.: Энергия (Voronov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Jenergija), 1980. — 312 с/р.
3. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование [Текст] // Н.Н. Иващенко. — М.: Машиностроение (Ivashhenko N.N. Avtomaticheskoe regulirovanie. Moscow: Mashinostroenie), 1978. — 736 с/р.
4. Нетушил А.В. Теория автоматического управления [Текст] // Под ред. А.В. Нетушила. — М.: Высшая шк. (Netushil A.V. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Vysshaja shk.), 1983. — 488 с/р.
5. Фельбаум А.А. Методы теории автоматического управления [Текст] // А.А. Фельбаум, А.Г. Бутковский. — М.: Наука (Fel'baum A.A., Butkovskij A.G. Metody teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Nauka), 1971. — 743 с/р.
6. Макаров И.М. Линейные автоматические системы [Текст] // И.М. Макаров, Б.М. Менский. — М.: Машиностроение (Makarov I.M., Menskij B.M. Linejnye avtomaticheskie sistemy. Moscow: Mashinostroenie), 1982. — 504 с/р.
7. Солодовников В.В. Частотный метод построения переходных процессов [Текст] // В.В. Солодовников, Ю.И. Топчеев, Г.В. Крутикова. — М.: ГИТТЛ (Solodovnikov V.V., Topcheev J.I., Krutikova G.V. Chastotnyj metod postroenija perehodnyh processov. Moscow: GITTL), 1955. — 196 с/р.
8. Уланов Г.М. Статистические и информационные вопросы управления по возмущению [Текст] // Г.М. Уланов. — М.: Энергия (Ulanov G.M. Statisticheskie i informacionnye voprosy upravlenija po vozmushheniju. Moscow: Jenergija), 1970. — 256 с/р.
9. Уланов Г.М. Динамическая точность и компенсация возмущений в системах автоматического управления [Текст] // Г.М. Уланов. — М.: Машиностроение (Ulanov G.M. Dinamicheskaja tochnost' i kompensacija vozmushhenij v sistemah avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Mashinostroenie), 1971. — 260 с/р.
10. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления [Текст] // В.С. Пугачев. — М.: Физматгиз (Pugachev V.S. Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Fizmatgiz), 1960. — 884 с/р.
11. Стенцель Й.И. Автоматизация технологических процессов химических производств [Текст] // Й.И. Стенцель. — К.: ІСДО (Stencel' J.I. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobnictv. Kiev: ISDO), 1995. — 360 с/р.
12. Стенцель Й.И. Розрахунок перехідних процесів складних систем регулювання методом квадратур [Текст] // Й.И. Стенцель, І.Є. Киричук, О.В. Савельєва // Наук.-техн. збірник «Автоматизація технологічних процесів та промислової екології». — Київ (Stencel' J.I., Kirichuk I.E., Savel'eva O.V. (1997). Rozrahunok perehidnih procesiv skladnih sistem reguljuvannja metodom kvadratur. Nauk.-tehn. zbirnik «Avtomatizacija tehnologichnih procesiv ta promislova ekologija»), 1997. — № 1. — С/Р. 2—5.
13. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации [Текст] // Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. — М.: Химия (Polockij L.M., Lapshenkov G.I. Avtomatizacija himicheskix proizvodstv. Teorija, raschet i proektirovanie sistem avtomatizacii. Moscow: Himija), 1987. — 296 с/р.
14. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] // Г.Ф. Зайцев. — К.: Высшая шк. Главное изд-во (Zajcev G.F. Teorija avtomaticheskogo upravlenija i regulirovanija. Kiev: Vysshaja shk. Glavnoe izd-vo), 1989. — 431 с/р.
15. Стенцель Й.И. Автоматизация технологических процессов химических производств [Текст] // Й.И. Стенцель, О.В. Поркуян — Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля (Stencel' J.I., Porkujan O.V. Avtomatizacija tehnologichnih procesiv himichnih virobnictv. Lugans'k: vid-vo Shidnoukr. nac. un-tu im. V.Dalja), 2010. — 300 с/р. ❏

Отримано / received: 12.02.2015.

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