

Шуть О. Ф., Тришкін В. Я. /к. т. н./,
Левчук І. Л. /к. т. н./, Блонський С. Д. /к. т. н./
ДВНЗ «Український державний хіміко-
технологічний університет»

Експрес-метод налаштування ПІ-регулятора для статичних та астатичних об'єктів із запізненням

Запропоновано новий експрес-метод розрахунку налаштувань пропорційно-інтегрального регулятора для одноємкісних статичних та астатичних об'єктів із запізненням для оптимального перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням. Залежності параметрів налаштувань регулятора від динамічних характеристик об'єктів отримано на основі експериментально-статистичних даних у вигляді рівнянь. Іл. 3. Табл. 1. Бібліогр.: 8 найм.

Ключові слова: об'єкт, запізнення, астатичний, метод, автоматизована система регулювання, налаштування, регулятор, перехідний процес, оптимальний

There suggested new express-method of adjustment of proportional-and-integral controller for single capacity static and astatic objects with delay for optimal transition process with 20 % overcontrolling. Dependencies of adjusting parameters of regulator on the dynamic characteristics of the object are obtained on the base of experimentative-statistical data in the form of equations.

Keywords: object, delay, astatic, method, automatic system of regulation, adjustment, regulator, transition process, optimal

Україна є енергодефіцитною державою, яка на сьогодні лише на половину задовольняє потреби в паливі та енергії, що є негативним чинником впливу на її енергетичну безпеку. Зниження рівня енергетичної залежності як складової енергетичної безпеки залежить, в першу чергу, від заходів щодо зменшення частки загального імпорту паливно-енергетичних ресурсів, яке повинно здійснюватися, в тому числі і за рахунок зниження енергоємності виготовленої продукції.

Резерви зниження енергоємності виготовленої продукції досить великі. На одиницю валової внутрішньої продукції Україна затрачує в 3,5-4,5 разів більше енергетичних ресурсів, ніж в інших розвинутих країнах світу [1].

В сучасних умовах та в перспективі один із найважливіших шляхів зниження енергоємності – удосконалення існуючих автоматичних систем регулювання (АСР), основним елементом яких є регулятор.

Постановка проблеми та її актуальність

Особливістю переважної більшості промислових об'єктів є наявність запізнення по каналам керування та збурення. Для опису процесів, що протікають в таких об'єктах використовується статичні та астатичні динамічні моделі 1-го порядку із запізненням [2]. Для керування такими об'єктами використовуються типові ПІ-регулятори. Але відомо [3], що при збільшенні відношення запізнення до постійної часу

об'єкта (τ/T) якість керування в таких системах різко погіршується. В свою чергу якість процесу керування визначається точністю налаштування параметрів регулятора.

Тому одним із головних актуальних шляхів підвищення якості роботи промислових АСР є розробка і впровадження ефективних методик налаштування регуляторів.

Аналіз досліджень та публікацій

В наш час не існує загальної методики оцінки параметрів регуляторів. Серед інженерних методів розрахунку налаштувань регуляторів одні є більш точними, заснованими на використанні активних частотних методів ідентифікації об'єктів, але трудомісткими для розрахунку [3, 4], інші більш простими, але наближеними [5].

Проводяться подальші роботи по вдосконаленню методики формульного визначення параметрів налаштування. Так в роботі [6] представлена методика автоматичної оптимізації параметрів налаштування безпосередньо включеної в роботу замкненої системи автоматичного регулювання, заснована на використанні нових формул для розрахунку параметрів налаштування регуляторів по коефіцієнтах передавальної функції об'єкту регулювання. Але представлена методика охоплює лише незначний клас АСР.

У роботі [7] представлена методика формульного пошуку оптимальних параметрів АСР, але тільки для пропорційних регуляторів.

Мета роботи

Розробка експрес-методу визначення параметрів налаштувань ПІ-регулятора для одноємкісних статичних і астатичних об'єктів керування із запізненням, які забезпечать отримання перехідних процесів регулювання з мінімальним значенням максимального динамічного відхилення та мінімальним часом перехідного процесу, що відповідає оптимальному типовому процесу з 20 %-вим перерегулюванням і мінімальним часом першого напівперіоду, який поєднує в собі високу швидкодію при обмеженій коливальності.

Розв'язання задачі дослідження

При розробці експрес-методу визначення налаштування параметрів регуляторів для забезпечення заданого перехідного процесу АСР, були вибрані наступні показники якості (рис. 1): ступінь затухання $\psi = 0,9$; перерегулювання 20 %; мінімум динамічного відхилення.

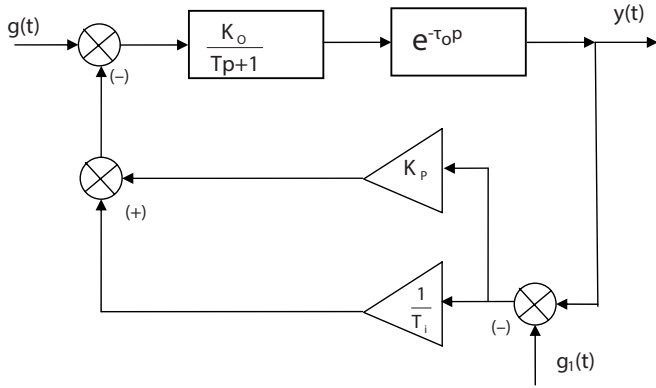


Рис. 1. Структурна схема АСР статичного об'єкту з ПІ-регулятором

Розглянемо статичний одноємкісний об'єкт. Перехідні процеси регулювання одержані шляхом моделювання АСР за допомогою пакету Matlab/Simulink відповідно до структурної схеми, представленої на рис. 1. Враховуючи, що для забезпечення максимальної швидкодії регулятора, тобто мінімального часу регулювання, необхідно встановлювати максимальне граничне значення коефіцієнта підсилення регулятора K_p [4], то в кожному дослідженні при моделюванні АСР вказана вимога виконувалась беззаперечно. При перевищенні граничного значення K_p спотворюється перехідний процес регулювання, тобто починаються коливання регульованого параметра вище лінії заданого значення або плюсові амплітуди коливання параметра щодо заданого значення значно більше мінусових.

В якості об'єкту дослідження обрано АСР з динамічними характеристиками, що охоплюють максимально широкий клас:

- коефіцієнт передачі об'єкту $K_o = 0,1 \div 4 \%$
- постійна часу $T = 3 \div 55$ хв.;

- відношення часу запізнення до постійної часу $\tau/T = 0,03 \div 0,6$.

В результаті експериментів була встановлена залежність значення граничного коефіцієнта підсилення регулятора K_p , при якому досягається мінімум динамічного відхилення, від співвідношення τ/T і значення коефіцієнта передачі об'єкту K_o . Використовуючи цю залежність, була розрахована величина K_p , значення якої встановлювалось на моделі і, змінюючи час ізодрому T_i , отримували перехідний процес з заданими показниками якості, з абсолютною похибкою, що не перевищує $\pm 0,1 \%$.

Зібраний статистичний матеріал при моделюванні АСР з одноємкісними статичними об'єктами із запізненням опрацьовувався з використанням методу найменших квадратів та методу ітераційно-нейромережевої ідентифікації, після чого були одержані відповідні рівняння регресії.

Експериментальним шляхом було визначено, що найточніше залежність добутку коефіцієнта підсилення регулятора K_p на коефіцієнт передачі об'єкту K_o від величини співвідношення τ/T виражає залежність:

$$K_p \cdot K_o = 0,9234 \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)^{-0,9527} \quad (1)$$

Коефіцієнт кореляції одержаного рівняння регресії (1) близький до одиниці і це рівняння може бути використано у всьому, вказаному вище, діапазоні зміни динамічних характеристик статичних об'єктів керування.

Отже, рівняння для розрахунку граничного значення коефіцієнта підсилення регулятора, що забезпечує його оптимальну швидкодію, в остаточному виді представлено як

$$K_p = \frac{0,9234 \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)^{-0,9527}}{K_o} \quad (2)$$

При подальшому проведенні досліджень було встановлено, що залежність часу ізодрому T_i від співвідношення τ/T максимально точно виражається показовою функцією вигляду

$$\frac{1}{T_i} = A \cdot \left(\frac{\tau}{T}\right)^B, \quad (3)$$

де A і B – постійні коефіцієнти.

При цьому коефіцієнт A залежить від значення постійної часу T об'єкту керування і ця залежність виражається лінійним рівнянням

$$A = b_0 + b_1 \cdot T, \quad (4)$$

де b_0 і b_1 – постійні коефіцієнти рівняння регресії.

З метою підвищення точності розрахунку значення часу ізодрому, величина якого змінюється в межах від 0,01 до 100 хв. для вказаних вище діапазонів в зміні динамічних характеристик об'єктів, вирішено було одержати два одна-

кових рівняння регресії, але з різними значеннями коефіцієнтів.

Для діапазону зміни відношення $\tau/T = 0,03 \div 0,2$ одержано рівняння для розрахунку часу ізодрому

$$1/T_i = \left[(-0,0286 + 0,81869 \cdot T) \cdot (\tau/T)^{1,7944} \right] \frac{K_o}{0,4}. \quad (5)$$

Для діапазону зміни відношення $\tau/T = 0,2 \div 0,6$ розрахунок часу ізодрому виконують за рівнянням

$$1/T_i = \left[(0,0023 + 0,55139 \cdot T) \cdot (\tau/T)^{1,5313} \right] \frac{K_o}{0,4}. \quad (6)$$

За приведеними рівняннями (5) і (6) розраховують значення часу ізодрому, що забезпечує отримання оптимального перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням за умови, що коефіцієнт підсилення регулятора K_p розрахований за рівнянням (2).

Базове значення коефіцієнта передачі об'єкту в розрахунках прийнято $K_o = 0,4 \%$. При моделюванні АСР було встановлено, що при збільшенні коефіцієнта передачі об'єкту від базового значення в n раз для отримання однакового виду перехідного процесу необхідно відповідно в n раз збільшити час ізодрому, що в рівняннях (5) і (6) відображено діленням на коефіцієнт 0,4.

Розглянемо астатичний одноемкісний об'єкт. Дослідження АСР з астатичними об'єктами здійснювали за аналогічним алгоритмом з використанням структурної схеми, представленої на рис. 1, в якій для моделювання об'єкту керування використано інтегральну ланку замість аперіодичної ланки першого порядку. Коефіцієнт передачі астатичних об'єктів прийнятий постійним $K_o = 1 \%$, а інерційність такого об'єкту характеризується часом запізнення t і умовною сталою часу або часом розгону астатичного об'єкту T_a . Динамічні характеристики досліджуваних астатичних об'єктів змінювали довільно в наступних межах: час розгону об'єкту $T_a = 3 \div 55$ хв.; відношення часу запізнення до часу розгону $\tau/T_a = 0,03 \div 0,6$.

Залежності оптимальних параметрів налаштування ПІ-регуляторів від динамічних характеристик астатичних об'єктів шукали за формою такого ж вигляду, як вони були одержані для статичних об'єктів.

Для розрахунку коефіцієнта підсилення регулятора K_p , що забезпечує перехідний процес з оптимальною швидкістю, одержано рівняння регресії вигляду

$$K_p = 0,852 \cdot \left(\tau/T_a \right)^{-1,01429}. \quad (7)$$

Подальший пошук залежностей налаштування часу ізодрому регулятора T_i , який забезпечує

отримання перехідного процесу з заданими показниками якості, здійснювали при значеннях коефіцієнта підсилення регулятора K_p , розрахованого за рівнянням (7).

З метою підвищення точності розрахунку значень часу ізодрому T_i по аналогії з статичними об'єктами весь досліджуваний діапазон відношення τ/T_a розбили на дві ділянки і відповідно одержали два рівняння регресії.

Для значень відношення $\tau/T_a = 0,03 \div 0,2$ одержано наступне рівняння регресії

$$1/T_i = (0,2649 + 3,8265 \cdot T_a) \cdot \left(\tau/T_a \right)^{2,0037}. \quad (8)$$

Для розрахунку часу ізодрому регулятора, що забезпечує отримання перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням при відношенні $\tau/T_a = 0,2 \div 0,6$, одержано рівняння регресії

$$1/T_i = (-0,0499 + 3,8493 \cdot T_a) \cdot \left(\tau/T_a \right)^{2,003}. \quad (9)$$

При перевірці отриманих рівнянь регресії на адекватність було встановлено, що максимальна відносна похибка визначення часу ізодрому T_i за рівняннями (5) складає 4,7 % при цьому $T = 50$ хв. В результаті для відношення $\tau/T_a = 0,05$ отримуємо перехідний процес з 16,6 % перерегулюванням, замість очікуваного 20 % перерегулювання. Тому граничним значенням використання рівняння (5) є відношення $\tau/T = 0,03$. При більших значеннях цього відношення похибка розрахунків T_i значно зменшується і середня арифметична відносна похибка складає близько $\pm 1 \%$.

Для астатичних об'єктів відносні похибки розрахунку часу ізодрому T_i за рівняннями (8) та (9) складають менше 0,5 % при будь-яких значеннях відношення τ/T_a та часу розгону T_a .

Отримані результати використовуються при пуско-наладочних роботах АСК переділу ректифікації НСІ у виробництві полікристалічного кремнію на ПрАТ «Завод напівпровідників», що підтверджено відповідним актом впровадження.

Виконаний порівняльний аналіз для передаточної функції по каналу «температура в резервуарі флегми – витрата толуолу на охолодження», яка відповідно експертним даним, має вигляд $W(p) = \frac{0,5}{10p+1} e^{-5p}$ з найбільш поширеними методами [3-5, 8].

Розраховані параметри налаштування регуляторів по методикам [3-5, 8] представлені в таблиці. Графіки перехідних процесів по каналу збурення зображені на рис. 2, а по каналу завдання – рис. 3.

Параметри налаштування регуляторів

	Експрес-метод	Метод Копеловича [5]	Графоаналітичний метод [3]	Метод Коена-Куна [8]	Метод Циглера-Нікольса [4]
k_p	3,58	0,7	2,69	3,77	3,43
T_i	2,39	7	6,528	8,29	4,15

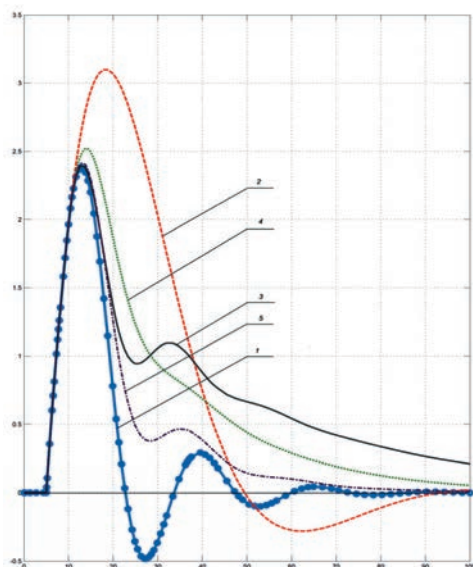


Рис. 2. Перехідні процеси по каналу збурення:

- 1 – експрес-метод; 2 – метод Копеловича;
- 3 – графоаналітичний метод; 4 – метод Коена-Куна;
- 5 – метод Циглера-Нікольса

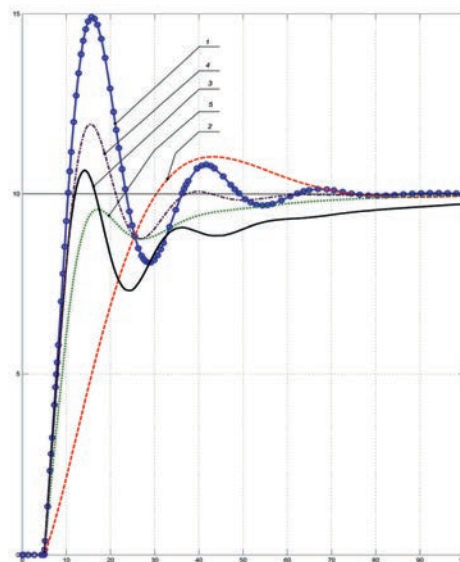


Рис. 3. Перехідні процеси по каналу завдання:

- 1 – експрес-метод; 2 – метод Копеловича;
- 3 – графоаналітичний метод; 4 – метод Коена-Куна;
- 5 – метод Циглера-Нікольса

Як видно з рис. 2, 3 перехідний процес, розрахований по запропонованому експрес-методу, забезпечує показники якості для оптимального перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням.

Висновки

1. Отриманий експрес-метод параметрів налаштування ПІ-регулятора для одноємкісних статичних і астатичних об'єктів керування для оптимального перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням.
2. Практичне використання отриманих залежностей параметрів налаштувань ПІ-регулятора не потребує додаткових розрахунків або побудови додаткових залежностей для пошуку оптимальних налаштувань.

Бібліографічний список

1. Структурний аналіз енергоспоживання в Україні / М. А. Садиков, Е. В. Дмитренко // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Вестник НТУ «ХПИ», 2009. – № 35.
2. Параметрична ідентифікація моделей динаміки тарілчастих апаратів / О. Ф. Шуть,

С. Д. Блонський, Д. В. Гусев // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – № 3. – С. 158-160.

3. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.
4. Zigler J. C. and Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. // ASME Transactions. – 1942. – Vol. 64, 8. – P. 759.
5. Копелович А. П. Автоматическое регулирование в черной металлургии. Краткий справочник. – М.: Металлургиздат, 1963. – 408 с.
6. Сметана А. З. Автоматическая и автоматизированная настройка регуляторов теплоэнергетических процессов // Теплоэнергетика. – 2004. – № 11. – С. 47-52
7. Коцемир И. А. Алгоритм и программа расчета оптимальной настройки систем регулирования с П-регуляторами // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2009. – № 28. – С. 412-420
8. Cohen G. H., Coon G. A. Theoretical consideration of retarded control // ASME Transactions. – 1953. – Vol. 75. – P. 827-834.

Поступила 21.04.2015