

Іносов Сергій Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Бондарчук Ольга Вячеславівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів,

<https://orcid.org/0000-0003-1893-1893>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ПРИЧИН ПОМИЛКОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

***Анотація.** Для оптимального настроювання регулятора температури треба знати динамічні властивості об'єкта регулювання, які виявляються, як правило, за результатами експерименту в ході процедури ідентифікації динамічних параметрів об'єкта регулювання. Метою дослідження є аналіз можливих причин помилкової ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання. Можливою помилкою на стадії постановки задачі може стати невдалий вибір параметрів, що ідентифікуються. Їх необхідний і достатній перелік включає статичний коефіцієнт передачі об'єкта, основну і додаткову сталі часу об'єкта, запізнення. Слід враховувати можливу сильну нелінійність виконавчого пристрою і компенсувати її при розрахунках. У процесі експерименту не слід допускати великих відхилень температури від робочого режиму з метою уникнення впливу невеликої нелінійності об'єкта регулювання. Для опрацювання результатів експерименту слід використовувати перевірені універсальні алгоритми автоматичної оптимізації. Як критерій мінімізації рекомендується брати логарифм середньоквадратичного відхилення між експериментальним графіком температури і відповідним розрахунковим графіком на моделі. Якщо в результаті ідентифікації отримано однакові або близькі значення основних сталих часу об'єкта, це може бути результатом помилки автоматичного пошуку, який «застраг» у локальному мінімаксі.*

***Ключові слова:** об'єкт регулювання; ідентифікація параметрів; регулювання температури; динаміка автоматичного регулювання*

Постановка проблеми

При автоматизації технологічних процесів широко використовуються системи автоматичного регулювання. Їх призначення – підтримувати на заданому рівні будь-які технологічні параметри (наприклад температуру) [2; 3; 5]. Переважна більшість систем автоматичного регулювання використовує принцип регулювання за відхиленням від завдання, з контуром негативного зворотного зв'язку.

Переважно використовується Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання, тому що він близький до теоретично досяжного ідеалу для теплових об'єктів [3]. Він став де-факто єдиним стандартним промисловим алгоритмом регулювання, який застосовується для регулювання будь-яких технологічних процесів, насамперед теплових. Якість регулювання оцінюється за динамічними критеріями, основним з яких є час регулювання. Його слід мінімізувати за

рахунок правильного вибору чисельних значень параметрів настроювання ПІД-регулятора. Для їх розрахунку треба знати чисельні значення динамічних параметрів даного об'єкта регулювання. Процедура визначення останніх за результатами експерименту називається «ідентифікація динамічних параметрів об'єкта» [9 – 12]. Проблемою є нетривіальність цієї задачі, що провокує можливість зробити низку суттєвих помилок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

ПІД-регулятор має три основні параметри настроювання: K_p – коефіцієнт пропорційності; T_i – стала часу інтегрування; T_d – стала часу диференціювання [3; 7; 8]. Для розрахунку їх оптимальних значень необхідно і достатньо знати значення чотирьох динамічних параметрів об'єкта регулювання [3; 7]: K – статичний коефіцієнт передачі об'єкта; T_1 , T_2 – основна і додаткова сталі часу об'єкта; T_3 – запізнення об'єкта.

При цьому розуміється, що динаміка об'єкта моделюється передаточною функцією (передаточні функції є математичними моделями, якими традиційно описують динамічні властивості лінійних інерційних стаціонарних динамічних об'єктів [1]. Передаточну функцію можна інтерпретувати як формульний вираз амплітудо-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) об'єкта, тобто залежність комплексного коефіцієнта підсилення від частоти) $Wo(p)$, що зв'язує температуру (регульована величина) з потужністю нагріву (керуючий вплив):

$$Wo(p) = \frac{Ke^{-pT3}}{(T1p+1)(T2p+1)}, \quad (1)$$

де p – комплексний аргумент.

Наведена модель об'єкта (1) може вважатися універсальною [3; 7], придатною для розрахунку динаміки регулювання будь-яких теплових об'єктів, оскільки вона враховує всі суттєві особливості таких об'єктів: статизм, наявність аперіодичних інерційностей (враховуються дві основні зі сталими часу $T1$ і $T2$), а також наявність запізнення $T3$, яке інтегрально враховує всі сталі часу об'єкта вищого порядку і транспортне запізнення (якщо воно є).

Для розрахунку використовуються такі формули [7]:

$$Kp = F \cdot \frac{T1+T2}{K \cdot T3}, \quad (2)$$

$$Ti = T1 + T2,$$

$$Td = F \cdot \frac{T1 \cdot T2}{T1 + T2},$$

де F – корегуючий множник; $F = 0,4$ (перерегулювання неприпустиме); $F = 0,5$ (допускається перерегулювання).

Вказані формули дають точний результат при будь-яких чисельних значеннях динамічних параметрів об'єкта.

Можливою помилкою на стадії постановки задачі може бути невдалий вибір параметрів, що ідентифікуються. Якщо параметрів менше (наприклад, не враховується $T2$, або $T3$, або $T2$ і $T3$ разом), точність результату ідентифікації будь-яким методом буде незадовільною.

Якщо ж параметрів більше, наприклад, враховуються вищі сталі часу об'єкта $T4$, $T5$, як у формулі (3)), то породжується надлишкова і неоднозначна інформація, задача значно ускладнюється без необхідності.

Мета дослідження

Метою дослідження є аналіз можливих причин помилкового розв'язання задачі ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання.

Виклад основного матеріалу

Для отримання необхідних даних попередньо проводиться експеримент на реальному об'єкті, в ході якого потужність нагріву варіюється. Найбільш поширені варіанти: а) зміна нагріву «стрибком»; б) періодичне ввімкнення-вимкнення нагріву в ході процесу релейного двопозиційного регулювання температури. Останній варіант будемо розглядати як ілюструючий приклад. Реєструються осцилограми зміни потужності нагріву і температури, отримані періодичною вибіркою, у вигляді числових послідовностей.

Якщо реєструється не потужність нагріву безпосередньо, а непрямий керуючий вплив (наприклад, електрична напруга на електронагрівачі), слід врахувати можливу сильну нелінійність, яка при цьому вводиться (наприклад, потужність нагріву пропорційна квадрату електричної напруги), і компенсувати її при розрахунках.

У ході експерименту не слід допускати великих відхилень температури від робочого режиму. Інакше вплив невеликої нелінійності об'єкта регулювання (яка завжди може бути) може викликати суттєві помилки в результатах ідентифікації.

Для ілюстрації прикладу експеримент імітувався на комп'ютерній моделі в програмному середовищі Visual Simulation. Об'єкт регулювання (електропід для гартування сталі) моделювався передаточною функцією

$$Wo(p) = \frac{K}{(T1p+1)(T2p+1)(T4p+1)(T5p+1)} \quad (3)$$

з такими чисельними значеннями параметрів: $K = 18$ град/кВт; $T1 = 20$ хв; $T2 = 10$ хв; $T4 = 1,3$ хв; $T5 = 0,7$ хв.

Задумано перевірити, чи процедура ідентифікації дійсно зможе замінити вищі сталі часу $T4$, $T5$ на еквівалентне запізнення $T3$, а також виявити основні сталі часу $T1$, $T2$ і статичний коефіцієнт передачі об'єкту K .

Для імітації похибки вимірювання 1 град. значення температури на моделі округлялися до цілих чисел.

На рис. 1 наведено структурну схему процедури ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання, що реалізована в електронних таблицях EXCEL.

Експериментальна осцилограма потужності нагріву (у вигляді числової послідовності) пропускається через комп'ютерну модель об'єкта. Використовувалась універсальна модель теплового об'єкта (1). Модель має невідомі параметри K , $T1$, $T2$, $T3$, яким спочатку були присвоєні такі довільні значення: $K=15$ град/кВт, $T1=25$ хв, $T2=0$ хв, $T3=0$ хв.

Отже, як перше наближення використано найпростіший варіант, що враховує лише основну сталу часу T_1 .

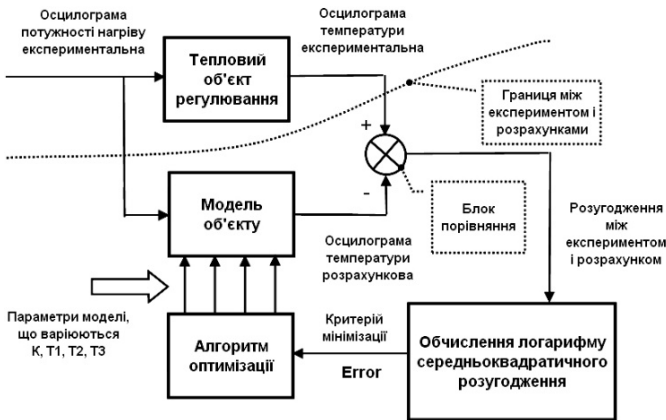


Рисунок 1 – Структурна схема процедури ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання

На виході моделі об'єкта отримаємо розрахункову осцилограму зміни температури (у вигляді числової послідовності). Вона, звичайно, відрізняється від експериментальної (рис. 2). Для пошуку правильних значень параметрів K , T_1 , T_2 , T_3 було використано алгоритм оптимізації. Слід користуватися перевіреними універсальними оптимізаторами. Використання емпіричних методів не дасть задовільної точності. Для ілюстрації прикладу було використано алгоритм оптимізації електронних таблиць EXCEL з назвою «Пошук рішення». Цей алгоритм автоматично підібрав значення параметрів K , T_1 , T_2 , T_3 таким чином, щоб мінімізувати інтегральне значення (Egog) розугодження розрахункових і експериментальних осцилограм температури. Розугодження вираховується як різниця відповідних числових послідовностей. Критерій мінімізації Egog розраховується як логарифм (десятковий) середньоквадратичного значення розугодження і є дійсним безрозмірним числом. Логарифмування використане для звуження діапазону зміни критерію мінімізації. Це полегшує роботу алгоритму оптимізації і покращує наочність графіків рис. 4, 5. Нульове значення Egog відповідає середньоквадратичному розугодженню 1 град і прийнятій похибці вимірювання температури.

На рис. 2 наведено осцилограми температури та потужності нагріву до оптимізації. Осцилограми температури на моделі і в експерименті різко відрізняються, навіть за формою.

Чисельне значення критерію мінімізації Egog дорівнює 2,07, що відповідає середньоквадратичному розугодженню понад 100 град.

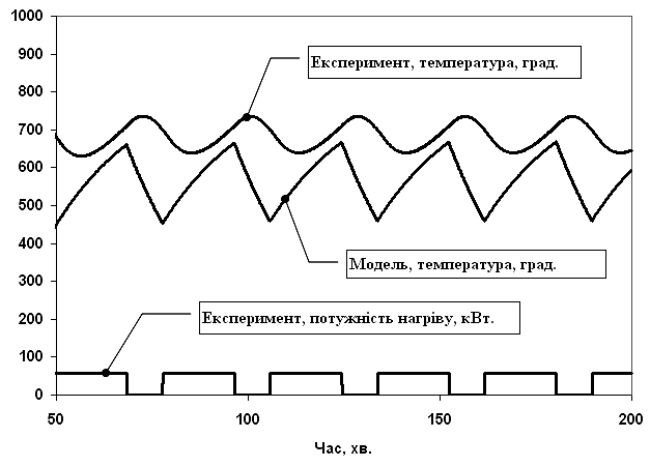


Рисунок 2 – Осцилограми температури та потужності нагріву в режимі релейного двопозиційного регулювання температури до оптимізації

Після запуску алгоритму оптимізації значення критерію мінімізації Egog різко зменшується майже до нуля, що відповідає середньоквадратичному розугодженню в межах похибки вимірювання (1 град). При цьому розрахункова осцилограма температури практично не відрізняється на графіку від експериментальної, а параметрам моделі K , T_1 , T_2 , T_3 присвоюються шукані значення: $K = 18$ град/кВт, $T_1 = 20$ хв, $T_2 = 10,5$ хв, $T_3 = 1,9$ хв.

Отже, описана процедура ідентифікації дійсно замінює суму вищих сталих часту об'єкта T_4 , T_5 на еквівалентне запізнення T_3 , виявляє основні сталі часу T_1 , T_2 , а також статичний коефіцієнт передачі K , з високою точністю. Функція відгуку такої оптимізаційної задачі (залежність критерію мінімізації Egog від параметрів K , T_1 , T_2 , T_3) має чітко виражений глобальний мінімум, що гарантує однозначність розв'язання оптимізаційної задачі.

Але в процесі дослідження виявлена ще одна нетривіальна можлива причина неправильної ідентифікації динамічних параметрів об'єкта регулювання.

Графік функції відгуку запропонованої оптимізаційної задачі у п'ятивимірному просторі представити неможливо, тому ілюструючі рис. 3 – 5 є різними двовимірними перетинами цього графіка. Знайти глобальний мінімум, відмічений як № 1 на рис. 3 – 5, ручним перебиранням значень параметрів практично неможливо. Доводиться використовувати алгоритм автоматичної оптимізації. Але автоматичний пошук глобального мінімуму ускладнюється наявністю так званого «яру». Місце точок «дна яру» в координатах T_1 , T_2 – пряма лінія, (рис. 3, пунктир). При невдалому виборі початкових значень параметрів K , T_1 , T_2 , T_3 алгоритм оптимізації «застрягає» в локальному мінімаксі на дні «яру» (відмічений як № 2 на рис. 3 – 6). Методом спроб встановлено, що рух по дну «яру»

(пунктирна лінія на рис. 3 – 6) відповідає зміні співвідношення $T2/T1$ при збереженні їх суми $T2 + T1$. Параметри K і $T3$ при цьому не змінюються, мають оптимальні значення і їх можна не враховувати при дослідженні особливостей «яру». Глобальний мінімум № 1 досягається на дні «яру». Для ілюстрації прикладу при $T2/T1 = 0,5$ (рис. 5).

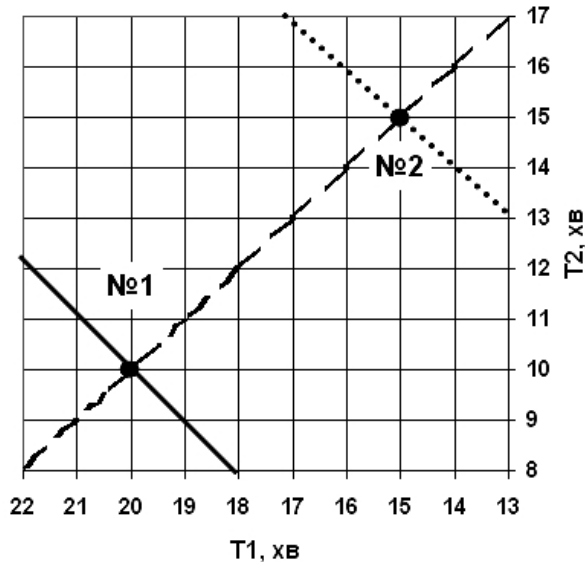


Рисунок 3 – Місце точок «дна яру» функції відгуку задачі оптимізації (пунктир)

Суцільною лінією на рис. 3, 4 показано поперечний перетин «яру» в точці № 1. Точковою лінією на рис. 3, 4 показано поперечний перетин «яру» в точці № 2. D – поперечне відхилення від дна «яру» (в хв).

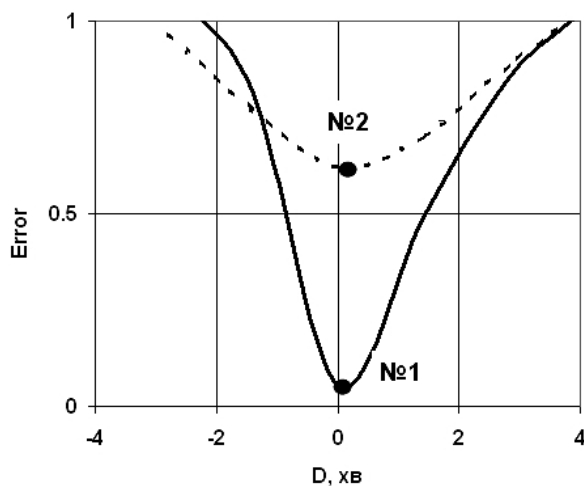


Рисунок 4 – Поперечні перетини «яру» в точках № 1 і № 2

На рис. 5 показано профіль дна «яру» за висотою (для наочності на рис. 3, 5 графіки подовжені для значень $T2 > T1$, хоча на практиці в цьому випадку просто міняють місцями нумерацію). Точка № 2 – це локальний мінімакс (максимум по дну

«яру» і мінімум у поперечному перетині). У локальному мінімаксі № 2 дно «яру» має нульовий нахил, тому алгоритм оптимізації в цій точці вважає пошук завершеним і «застрягає». Цей варіант відповідає співвідношенню $T2/T1 = 1$.

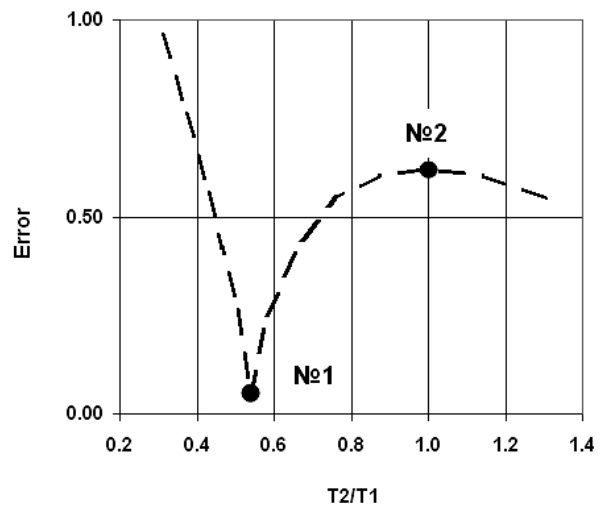


Рисунок 5 – Профіль дна «яру» за висотою

Що ж робити, якщо алгоритм оптимізації «застряг» в локальному мінімаксі № 2 на дні «яру»?

Треба допомогти алгоритму оптимізації, коректуючи отримані значення параметрів $T1$, $T2$ так, щоб вони суттєво різнилися, але щоб їх сума $T1+T2$ залишилася незмінною. Після цього процедуру оптимізації треба запустити заново. Можливо, знадобиться декілька спроб для знаходження правильного результату (глобального мінімуму № 1).

Висновки

1. Можливою помилкою на стадії постановки задачі може стати невдалий вибір параметрів, що ідентифікуються. Їх перелік має включати статичний коефіцієнт передачі об'єкта K , основну і додаткову сталі часу об'єкта $T1$, $T2$, запізнення $T3$. Ці параметри можуть бути ідентифіковані однозначно і достатньо точно для подальшого розрахунку ПІД-регулятора. Якщо параметрів менше, точність результату ідентифікації будь-яким методом буде незадовільною. Якщо ж параметрів більше, то породжується надлишкова і неоднозначна інформація, задача значно ускладнюється без необхідності.

2. Якщо реєструється не потужність нагріву безпосередньо, а непрямий керуючий вплив (наприклад, електрична напруга на електронагрівачі), слід врахувати можливу сильну нелінійність, яка при цьому вводиться, і компенсувати її при розрахунках.

3. У ході експерименту не слід допускати великих відхилень температури від робочого режиму. Інакше вплив невеликої нелінійності об'єкта

регулювання (яка завжди може бути) призведе до суттєвих помилок результату ідентифікації.

4. Для опрацювання результатів експерименту слід використовувати перевірені універсальні алгоритми автоматичної оптимізації. Використання емпіричних методів не дасть задовільної точності.

5. Як критерій мінімізації рекомендується брати логарифм середньоквадратичного відхилення між експериментальним графіком температури і відповідним розрахунковим графіком на моделі. Логарифмування допомагає зменшити діапазон зміни критерію мінімізації, що полегшує роботу автоматичного оптимізатора і покращує наочність.

6. Якщо в результаті ідентифікації отримані однакові або близькі значення основних сталих часу об'єкта T_1 , T_2 , то необхідно ставитися до цього факту з підозрою. Це може бути результатом помилки автоматичного пошуку, який «застряг» в локальному мінімаксі. Треба допомогти алгоритму оптимізації, корегуючи отримані значення параметрів T_1 , T_2 так, щоб вони суттєво різнилися, але щоб їх сума T_1+T_2 залишилася незмінною. Після цього алгоритм оптимізації треба запустити заново. Можливо, знадобиться декілька спроб для знаходження правильного результату (глобального мінімуму).

Список літератури

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Либідь, 2007. 656 с.
2. Іносов С. В., Соболевська Т. Г., Самойленко М. І., Сідун К. В. Дослідження температурних збурень для систем автоматизації опалення будівель. *Управління розвитком складних систем*. 2012. № 6. С. 159 – 161.
3. Іносов С. В., Корнієнко В. М. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 13. С. 104 – 108.
4. Іносов С. В., Корнієнко В. М., Гречуха В. В. Алгоритм автоматичного настроювання пропорційно-інтегрального регулятора з використанням бігармонійного пробного збурення. *Управління розвитком складних систем*. 2014. № 19. С. 104 – 108.
5. Іносов С. В., Скіданов В. М., Соболевська Т. Г., Сідун К. В. Синфазні і противофазні збурення в двоконтурній системі зв'язного регулювання. *Управління розвитком складних систем*. 2016. № 27. С. 176 – 181.
6. Іносов С. В., Самойленко М. І. Синтез і аналіз динаміки цифрового алгоритму регулювання теплового технологічного об'єкту з великим кроком квантування в часі. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 36. С. 204–208.
7. Іносов С. В., Бондарчук О. В. Зв'язок похибок вимірювання температури з динамікою регулювання теплового об'єкту. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 35. С. 162 – 166.
8. Іносов С. В., Бондарчук О. В., Ілларионов В. М. Настроювання ПІД-регулятора за перехідною функцією розімкненого контура. *Управління розвитком складних систем*. 2021. № 46. С. 167 – 172.
9. Іносов С. В., Бондарчук О. В. Дискретизація динамічної моделі теплового об'єкту регулювання з великим кроком квантування в часі. *Управління розвитком складних систем*. 2017. № 31. С. 190 – 195.
10. Іносов С. В. Ідентифікація системи стихійного електроопалення в районній електромережі. Праці міжнародної науково-технічної конференції “Сучасна автоматизація: проблеми і перспективи”, *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2008, 541 с.
11. Іносов С. В. Статистична ідентифікація моделі автоматизованої системи централізованого теплопостачання. *Управління розвитком складних систем*. 2010. № 2. С. 67 – 69.
12. Федоришин Р, Кльось С., Савицький В., Масняк О. Ідентифікація об'єкта регулювання та побудова його моделі за допомогою ПЛК. *Energy engineering and control systems (JEECS)*, Львів, 2016. Вип. 2. № 2. С. 69 – 78.

Стаття надійшла до редколегії 10.05.2023

Inosov Sergei

PhD, Associate professor, Department of Process Automation, <https://orcid.org/0000-0001-8305-5514>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Bondarchuk Olga

PhD, Associate professor, Department of Process Automation, <https://orcid.org/0000-0003-1893-1893>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

ANALYSIS OF POSSIBLE REASONS OF ERRONIOUS IDENTIFICATION OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF A CONTROLLED THERMAL PLANT

Abstract. For optimal adjustment of the temperature regulator, it is necessary to know the dynamic properties of the controlled plant, which are mainly obtained from an experiment, in the procedure of identifying the dynamic parameters of the controlled plant. The purpose of the study is to analyze possible causes of erroneous identification of dynamic parameters of the plant. A possible mistake may be an unsuccessful selection of parameters, being identified. Their necessary and sufficient list

includes static coefficient of transmission, the main and additional time constants, time delay. Possible strong nonlinearity of the actuator should be taken into account to compensate it in calculations. During the experiment, it is desirable not to allow large temperature deviations from the normal operating mode, to avoid the influence of possible small nonlinearity of the controlled plant. To process the results of the experiment, verified universal automatic optimization algorithms should be used. As a minimization criterion, it is recommended to use the logarithm of the mean square deviation between the experimental temperature oscillogram and the corresponding calculated oscillogram on the model. If, as the result of identification, equal or close values of the main time constants are obtained, this may be the result of a fault of the automatic search procedure, which is "stuck" in a local minimax. The values should be diversified, to help the automatic optimizer.

Keywords: controlled plant, identification of the parameters, temperature control, dynamics of automatic control

References

1. Popovich, M. G, Kovalchuk, V. A. (2007). Theory of automatic control: Textbook. Kyiv : Lybid, 656.
2. Inosov, S. V., Sobolevska, T. G., Samoilenko, M. I., Sidun, K. V. (2012). Study of temperature disturbances in automation systems for heating buildings. *Management of development of complex systems*, 6, 159–161.
3. Inosov, S. V., Kornienko, V. M. (2013). Optimization of the algorithm for automatic control of thermal processes. *Management of development of complex systems*, 13, 104–108.
4. Inosov, S. V., Kornienko, V. M., Grechucha, V. V. (2014). An adaptation algorithm for proportional-integral action controller with biharmonic trial disturbance. *Management of development of complex systems*, 19, 104–108.
5. Inosov, S. V., Skidanov, V. M., Sobjlevska, T. G., Sidun, K. V. (2016). In-phase and antiphase disturbances in a two-loop system of connected control. *Management of development of complex systems*, 27, 176–181.
6. Inosov, S. V., Samoilenko, M. I. (2018). Synthesis and analysis of dynamics of digital algorithm of regulation of thermal technological plant with big step of quantization in time. *Management of development of complex systems*, 36, 204–208.
7. Inosov, S. V., Bondarchuk, O. V. (2018). Relationship between temperature measurement errors and the dynamics of thermal plant control. *Management of development of complex systems*, 35, 162–166.
8. Inosov, S. V., Bondarchuk, O. V., Illarionov, V. M. (2021). Adjustment of a PID regulator using transient function of the open control loop. *Management of development of complex systems*, 46, 167–172.
9. Inosov, S., Bondarchuk, O. (2017). Discretization of the dynamic model of a thermal plant regulation with large quantization step in time. *Management of development of complex systems*, 31, 190–195.
10. Inosov, S. (2008). Identification of the system of spontaneous electro-heating in the regional power grid. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Modern automation problems and prospects. *Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design*, 541.
11. Inosov, S. (2010). Statistical identification of the model of the automated system of centralized heat supply. *Management of development of complex systems*, 2, 67–69.
12. Fedoryshyn, R., Klos, S., Savytskyi, V., Masniak, O. (2016). Identification of Controlled Plant and Development of Its Model by Means of PLC. *Energy engineering and control systems (JEECS)*, 2, 2, 69–78.

Посилання на публікацію

- APA Inosov, Sergei, Bondarchuk, Olga. (2023). Analysis of possible reasons of erroneous identification of the dynamic parameters of a controlled thermal plant. *Management of Development of Complex Systems*, 54, 132–137, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.132-137.
- ДСТУ Іносів С. В., Бондарчук О. В. Аналіз можливих причин помилкової ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2023. № 54. С. 132 – 137, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.132-137.