

Іносов Сергій Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, *orcid.org/0000-0001-8305-5514*
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Бондарчук Ольга Вячеславівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, *orcid.org/0000-0003-1893-1893*
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Ілларионов Валерій Миколайович

Кандидат технічних наук, доцент, *orcid.org/0000-0002-6952-9290*
Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ

НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ЗА ПЕРЕХІДНОЮ ФУНКЦІЄЮ РОЗІМКНЕНОГО КОНТУРА

Анотація. Актуальною залишається проблема оптимального настроювання ПІД алгоритму регулювання, що є базовим для систем автоматичного регулювання теплових об'єктів. Пропонується проста і наочна методика настроювання ПІД-регулятора по перехідній функції розімкненого контуру регулювання в часовій області, зручна для практичного використання. Оптимальний графік перехідної функції розімкненого контуру регулювання має бути ламаною прямою лінією із запізненням. Варіюючи сталі часу інтегрування і диференціювання ПІД-регулятора треба добитися, щоб графік перехідної функції являв собою пряму лінію. Варіюючи коефіцієнт пропорційності ПІД-регулятора треба встановити швидкість зростання (нахил графіка) перехідної функції 0,52 відносно її запізнення. Настроювання ПІД-регулятора за запропонованою методикою гарантує мінімально можливий час регулювання. Запропоновану методику настроювання параметрів ПІД-регулятора рекомендується використовувати як при комп'ютерному моделюванні динаміки автоматичного регулювання, так і на діючих САР.

Ключові слова: ПІД-регулятор; настроювання; перехідна функція; розімкнений контур; динаміка регулювання

Постановка проблеми

При автоматизації технологічних процесів широко використовуються системи автоматичного регулювання. Їх призначення – підтримувати на заданому рівні будь-які технологічні параметри (наприклад температуру). Переважна більшість систем автоматичного регулювання використовує принцип регулювання за відхиленням від завдання, з контуром негативного зворотного зв'язку [1; 2]. Як апаратне забезпечення використовують регулюючі мікроконтролери. Алгоритми регулювання наразі реалізуються програмно [3; 4; 9].

Переважає використання Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання, тому що він близький до теоретично досяжного ідеалу для реальних об'єктів [6]. Він став де-факто єдиним стандартним промисловим алгоритмом регулювання, який застосовується для регулювання будь-яких технологічних процесів, насамперед, теплових [5; 8; 10]. ПІД-регулятор має три основних параметри налаштування: K_p – коефіцієнт пропорційності, T_i – стала часу

інтегрування, T_d – стала часу диференціювання. Їм мають бути присвоєні чисельні значення, оптимальні для заданого об'єкта регулювання (так зване «настроювання» регулятора). Якщо настроювання не виконане (або виконане неправильно), якість регулювання може різко погіршитися, аж до втрати стійкості. Якість регулювання оцінюється за динамічними критеріями [1; 2]. Основним є час регулювання, який слід мінімізувати за рахунок правильного вибору алгоритму регулювання і настроювання його параметрів. Процес настроювання може ускладнюватися тим, що динамічні властивості реального технологічного об'єкта невідомі, а експерименти на діючому об'єкті трудомісткі. Бувають випадки, коли настроювання регуляторів перетворюється в серйозну інженерну проблему [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На рис. 1 представлена типова розрахункова структурна схема системи автоматичного регулювання (САР), наприклад температури [10].

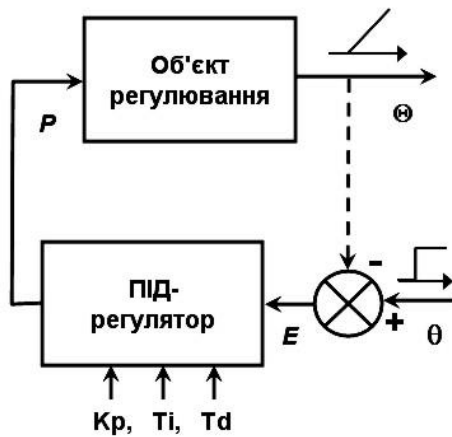


Рисунок 1 – Розрахункова структурна схема системи автоматичного регулювання температури

Контур регулювання включає об'єкт регулювання і ПІД-регулятор. Регульована величина Θ (температура в градусах) порівнюється із заданим Θ і вираховується розугодження E (блок порівняння показано перехрещеним колом). Залежно від розугодження регулятор коригує керуючий вплив P (потужність нагріву).

Математичними моделями, якими традиційно описують динамічні властивості лінійних інерційних стаціонарних об'єктів і регуляторів, є передаточні функції на базі перетворення Лапласа [1; 2].

Типова передаточна функція теплового об'єкта регулювання, що зв'язує температуру з потужністю нагріву, має вигляд:

$$W_0(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot T_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

де K – статичний коефіцієнт передачі об'єкта; T_3 – час запізнювання, T_1, T_2 – перша і друга сталі часу об'єкта.

Наведена модель об'єкта може вважатися універсальною, придатною для будь-яких теплових об'єктів, оскільки вона враховує всі істотні особливості таких об'єктів: статизм, наявність аперіодичних інерційностей (враховуються дві основні зі сталими часу T_1 і T_2), і наявність запізнювання T_3 , яке відносно мале в загальній інерційності об'єкта, але сильно обмежує запас стійкості САР. Навіть якщо об'єкт не має ідеального, «транспортного», запізнювання, передаточна функція $e^{-p \cdot T_3}$ інтегрально враховує всі малі інерційності, що не враховані двома основними сталими часу.

Передаточна функція ПІД-регулятора, що зв'язує розугодження з керуючим впливом, має вигляд:

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(T_d \cdot p + 1 + \frac{1}{T_i p} \right). \quad (2)$$

Параметри ПІД-регулятора: K_p – коефіцієнт пропорційності, T_i – стала часу інтегрування, T_d – стала часу диференціювання. Їм мають бути присвоєні чисельні значення, оптимальні для заданого об'єкта регулювання (так зване «настроювання» регулятора).

У теорії оптимальне настроювання виводиться з частотних характеристик розімкнутого контуру регулювання. Розімкнутий контур отримаємо, розриваючи (уявно або фізично) зворотний зв'язок, показаний на рис. 1 пунктиром.

Передаточна функція розімкнутого контуру $W(p)$ визначається як добуток передаточних функцій об'єкта регулювання $W_0(p)$ і регулятора $W_1(p)$:

$$W(p) = W_0(p) \cdot W_1(p). \quad (3)$$

Передаточну функцію можна інтерпретувати як формульне представлення амплітудо-фазо-частотної характеристики (АФЧХ), тобто залежність комплексного коефіцієнта підсилення від частоти. У цьому випадку замість комплексного аргументу p підставляється $j\omega$, де j – уявна одиниця, ω – кругова частота. Модуль від АФЧХ є амплітудно-частотною характеристикою, тобто залежністю підсилення амплітуди від частоти. Відповідний графік у логарифмічних координатах (рис. 2) називається логарифмічною амплітудо-частотною характеристикою (ЛАЧХ).

Параметри регулятора T_i і T_d налагоджують таким чином, щоб скорегувати дві основні інерційності об'єкта регулювання зі сталими часу T_1 T_2 і звести динамічні властивості розімкненого контуру регулювання до еквівалентного інтегрування. При цьому ЛАЧХ розімкненого контуру регулювання перетворюється в пряму лінію з нахилом -1 (рис. 2). Тобто підсилення в контурі зворотно-пропорційно круговій частоті ω .

Нескомпенсованим залишається запізнення в об'єкті T_3 . Запізнення не впливає на графік ЛАЧХ. Воно зазвичай значно менше, ніж основні інерційності T_1, T_2 , але саме запізнення є основним фактором, що обмежує запас стійкості САР, бо вносить додатковий зсув за фазою в контурі регулювання.

Саме з умови стійкості настроюється коефіцієнт пропорційності регулятора K_p . Збільшуючи K_p , можна підняти графік ЛАЧХ вгору (паралельно) і збільшити частоту перерізу ω_{np} . Частота перерізу є така, на якій підсилення (за амплітудою) синусоїдального сигналу в контурі стає меншим одиниці. Це верхня границя частотного діапазону ефективної роботи САР. Бажано її зробити якомога більшою.

Але збільшення ω_{np} обмежене втратою стійкості САР. При достатньо високій частоті запізнення T_3 досягає чверті періоду коливаний, що вносить додатковий зсув за фазою в контурі 90° , або

$\pi/2$ в радіанах. Ще 90° додається за рахунок інтегрування в контурі (еквівалентного). При сумарному фазовому зсуві 180° негативний зворотний зв'язок перетворюється на позитивний, і САР втрачає стійкість (коливання вказаної частоти починають зростати).

Для узагальнення графіка на рис. 2 використаємо теорію подібності і наш базовий параметр T_3 візьмемо за одиницю вимірювання безрозмірного часу. Тоді критичне значення (безрозмірне) $\omega_{пр}$ буде $1.57 (\pi/2)$. Саме цей критичний варіант ЛАЧХ_{рк} на границі стійкості відображено на рис. 2 точками. Загальновідомо, що оптимальним є трикратний запас стійкості за підсиленням (за амплітудою). При цьому гарантується максимально можлива швидкодія САР. Тобто оптимальне значення $\square_{пр}$ буде в три рази менше, а саме $0.52 (\pi/6)$. Саме цей оптимальний варіант ЛАЧХ відображено на рис. 2 суцільною лінією.

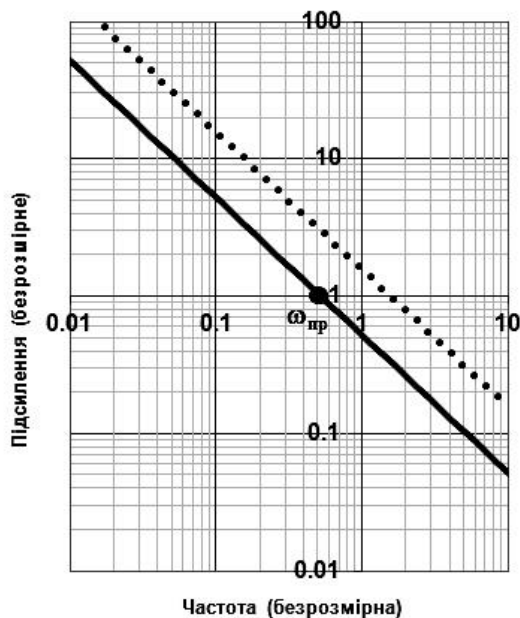


Рисунок 2 – Оптимальна логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) розімкненого контуру регулювання (суцільна лінія)

Мета статті

Оптимізація алгоритму регулювання за динамічними характеристиками розімкненого контуру в частотній області зручна і наочна в теорії, але непрактична для реальної настройки регуляторів. Метою дослідження є створення аналогічної наочної методики настроювання ПД-регулятора за динамічними характеристиками розімкненого контуру, але в часовій області (в реальному часі), зручною для практичного використання.

Виклад основного матеріалу

З динамічних характеристик розімкненого контуру найбільш зручна для реєстрації перехідна функція. Вхідним впливом є зміна завдання Θ стрибком. Реєструється графік зміни температури Θ при розімкненому контурі (рис. 1).

При реєстрації перехідної функції в реальній САР треба слідкувати, щоб змінні величини в системі не досягали конструктивних обмежень, а отже, щоб САР залишалася лінійною протягом всього експерименту. Для цього вхідний стрибок завдання не має бути надто великим. При комп'ютерному моделюванні динаміки автоматичного регулювання в часовій області такого обмеження нема.

Дослідження проводилося шляхом комп'ютерного моделювання динаміки регулювання в реальному часі в середовищі програмування VisSim (Visual Simulation). На рис. 3 – 7 наведено ілюструючі копії екрана.

Для узагальнення величину стрибка взято за одиницю вимірювання температури, а запізнення об'єкта T_3 взято за одиницю вимірювання часу, тому всі наступні графіки побудовані в безрозмірних координатах.

На рис. 3 наведена бажана перехідна функція розімкненого контуру регулювання (графік зростання температури при одиничному стрибку завдання і розімкненому контурі регулювання).

Перехідна функція розімкненого контуру (безрозмірна)

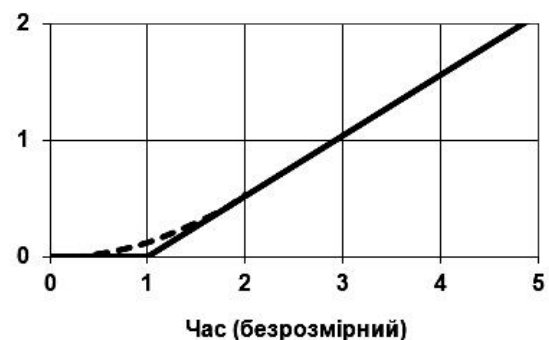


Рисунок 3 – Бажана перехідна функція розімкненого контуру регулювання

При оптимальному настроюванні параметрів регулятора динамічні властивості розімкненого контуру регулювання зводяться до еквівалентного інтегрування із запізненням. При цьому перехідна функція повинна мати запізнення, а потім зростати з постійною швидкістю (графік – ламана суцільна лінія). Запізнення в теплових об'єктах не є чистим (транспортним), тому ламана лінія реально буде згладженою (пунктир), але на подальші висновки це практично не впливає.

Рис. 4 ілюструє процедуру настроювання сталої часу інтегрування регулятора T_i по перехідній функції розімкненого контуру.

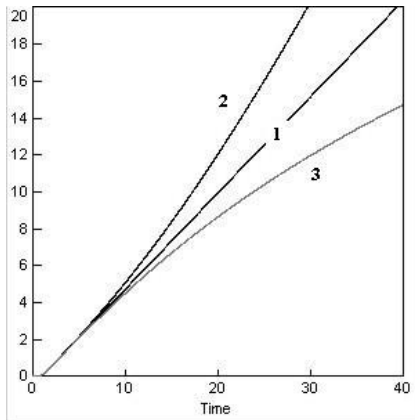


Рисунок 4 – Настроювання сталої часу інтегрування регулятора T_i по перехідній функції розімкненого контуру

Тривалість реєстрації цього графіка має в декілька разів перевищувати основну сталу часу об'єкта регулювання T_1 . Перехідна функція повинна зростати як пряма ліній при оптимальному значенні T_i (лінія 1). Викривлення в кінці графіка означає неправильну настройку T_i . Варіант 2 означає, що T_i потрібно збільшити. Варіант 3 означає, що T_i потрібно зменшити.

Рис. 5 ілюструє процедуру настроювання сталої часу диференціювання регулятора T_d по перехідній функції розімкненого контуру.

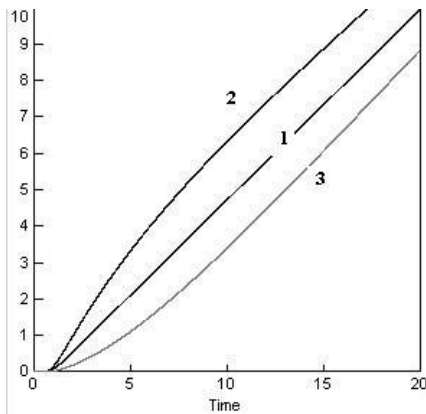


Рисунок 5 – Настроювання сталої часу диференціювання регулятора T_d по перехідній функції розімкненого контуру

Тривалість реєстрації цього графіка має в декілька разів перевищувати другу сталу часу об'єкта регулювання T_2 . Перехідна функція повинна зростати як пряма ліній при оптимальному значенні T_d (лінія 1). Викривлення на початку графіка означає неправильну настройку T_d . Варіант 3 означає, що T_d потрібно збільшити. Варіант 2 означає, що T_d потрібно зменшити.

Рис. 6 ілюструє процедуру настроювання коефіцієнта пропорційності регулятора K_p .

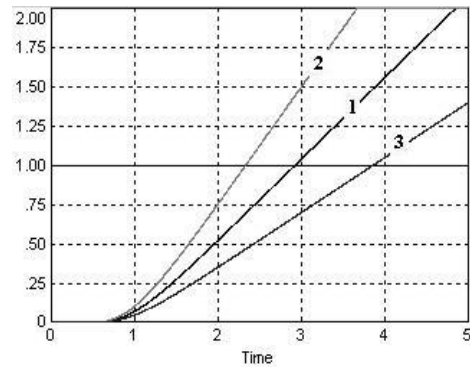


Рисунок 6 – Настроювання коефіцієнта пропорційності регулятора K_p по перехідній функції розімкненого контуру

Тривалість реєстрації цього графіка має в декілька разів перевищувати час запізнення об'єкта регулювання T_3 . Перехідна функція повинна зростати зі швидкістю $0.52 (\pi/6)$ при оптимальному значенні K_p (лінія 1). Це означає, що за час запізнення об'єкта T_3 (яке ми взяли за одиницю вимірювання безрозмірного часу) перехідна функція повинна зростати на 52% від вхідного стрибка. Інша швидкість зростання означає неправильне настроювання K_p . Варіант 3 означає, що K_p потрібно збільшити. Варіант 2 означає, що K_p потрібно зменшити.

Правильне настроювання регулятора за описаною методикою гарантує мінімально можливий час регулювання для цього об'єкта. На рис. 7 для ілюстрації наведена перехідна функція замкненого контуру регулювання при оптимальному настроюванні параметрів регулятора. Температура входить в допуск $\pm 5\%$ від заданого значення за час $3.5 \cdot T_3$ (T_3 – запізнення в об'єкті регулювання). Якщо перерегулювання трохи виходить за межі $+5\%$ від заданого значення, це означає що запізнення в об'єкті відрізняється від ідеальної моделі «чистого, транспортного» запізнення (ламана лінія на рис. 3 сильно згладжена). У такому випадку треба трохи скорегувати коефіцієнт пропорційності K_p у бік зменшення.

Звертаємо увагу на те, що настроїти всі параметри ПІД-регулятора по перехідній функції замкненого контуру (рис. 7), як це робиться традиційно, значно складніше, бо зміни параметрів взаємозалежно впливають на весь перехідний процес, а не на його окремі особливості, як у рекомендованій вище процедурі настроювання.

Запропоновану більш зручну методику настроювання параметрів ПІД-регулятора по перехідній функції розімкненого контуру рекомендується використовувати як при чисельному моделюванні динаміки автоматичного регулювання, так і на діючих САР.

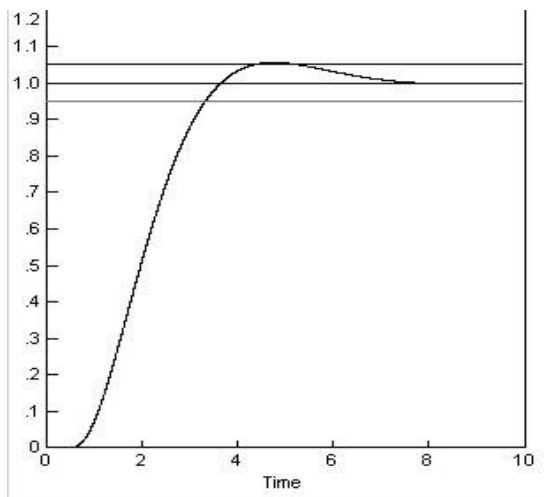


Рисунок 7 – Перехідна функція замкнутого контуру регулювання при оптимальному настроюванні параметрів регулятора

Висновки

- 1) Наразі актуальною залишається проблема оптимального настроювання ПД алгоритму регулювання, що є базовим для систем автоматичного регулювання теплових об'єктів.
- 2) Пропонується проста і наглядна методика настроювання ПД-регулятора по динамічних

характеристиках розімкнутого контуру регулювання в часовій області, зручна для практичного використання.

3) Оптимальний графік перехідної функції (реакції на стрибок) розімкнутого контуру регулювання повинен бути ламаною прямою лінією із запізненням (рис. 3).

4) Варіюючи сталу часу інтегрування ПД-регулятора T_i , треба випрямити графік перехідної функції в його кінці (рис. 4).

5) Варіюючи сталу часу диференціювання ПД-регулятора T_d , треба випрямити графік перехідної функції на початку (рис. 5).

6) Варіюючи коефіцієнт пропорційності ПД-регулятора K_p , треба задати швидкість зростання (нахил графіка) перехідної функції 0.52 відносно запізнення перехідної функції T_z (рис. 6).

7) Настроювання ПД-регулятора за запропонованою методикою гарантує мінімально можливий час регулювання 3.5 від часу запізнення T_z (рис. 7).

8) Запропоновану методику настроювання параметрів ПД-регулятора рекомендується використовувати як при комп'ютерному моделюванні динаміки автоматичного регулювання, так і на діючих САР.

Список літератури

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Ладанюк А. П., Архангельська К. С. Теорія автоматичного керування. Ч. 1. : конспект лекцій. Київ: НУХТ, 2007. 102 с.
3. Зімчук І. В., Іщенко В. І., Канкін І. О. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідкуючих систем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. № 1.
4. Иносов С. В. Калькулятор алгебры решетчатых функций. *Труды 15-й международной конференции по автоматическому управлению «АВТОМАТИКА-2008»*. Одесская национальная морская академия. 2008. С. 232.
5. Иносов С. В., Соболевська Т. Г., Самойленко Н. И., Сідун К. В. Дослідження температурних збурень для систем автоматизації опалення будівель. *Управління розвитком складних систем*. 2012. № 6. С. 159–161.
6. Иносов С. В., Корнієнко В. М. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 13. С. 104–108.
7. Иносов 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.
8. Иносов 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.
9. Иносов 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.
10. Иносов 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.

Стаття надійшла до редколегії 15.05.2021

Inosov Sergei

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

Bondarchuk Olga

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

Illarionov Valeriy

Teacher-Methodist of Special Disciplines, orcid.org/0000-0002-6952-9290
Kyiv Electromechanical Professional College, Kyiv

ADJUSTMENT OF A PID REGULATOR USING TRANSIENT FUNCTION OF THE OPEN CONTROL LOOP

Abstract. The problem of optimal adjustment of a PID regulator, which is basic algorithm for automatic control systems for thermal plants, remains relevant. A simple and practical method of adjustment the PID regulator, using the transient function of the open control loop in the time domain is offered, convenient for practical use. The optimal graph of the transient function of the open control loop should be a broken straight line with delay. By varying time constants of the integration and differentiation channels of the PID regulator, the graph of the transient function of the open control loop should be straightened, that is converted to a straight line with delay. Varying the proportionality factor of the regulator, the growth rate (slope of the graph) of the transient function should be made 0.52, relative to its delay. Adjusting the PID regulator according to the proposed method guarantees the minimal possible regulation time. The proposed method for adjusting the parameters of a PID regulator is recommended to be used both for the computer simulation of the regulation dynamics and for operating systems of automatic control.

Keywords: PID controller; adjustment; transient function; open control loop; regulation dynamics

References

1. Popovich, M. G., Kovalchuk, V. A. (2007). Theory of automatic control: Textbook. K.: Lybid, 656.
2. Ladaniuc, A. P., Arkhangelskaya, K. S. (2007). Theory of automatic control (part 1): Abstract of lectures. K: KNUCA, 102.
3. Zimchuk, I. V., Ishchenko, V. I., Kankin, I.O. (2015). Synthesis of algorithms of digital control for automatic tracking systems. *System research and information technologies*, 1, 32–38.
4. Inosov, S.V. (2008). Calculator for algebra of sampled functions. *Proceedings of the 15th international conference on automatic control "AUTOMATION-2008"*, Odessa national Maritime Academy, 232.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

Посилання на публікацію

- APA Inosov, Sergei, Bondarchuk, Olga, Illarionov, Valeriy, (2021). Adjustment of a PID regulator using transient function of the open control loop. *Management of Development of Complex Systems*, 46, 167–172, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.167-172.
- ДСТУ Іносов С. В., Бондарчук О. В. Ілларіонов В. М. Налаштування ПІД-регулятора за перехідною функцією розімкненого контура. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 46. С. 167 – 172, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.167-172.