

УДК 004:519.2

DOI DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.1/17>

**Іносов С.В.**

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

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Гаврюков О.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-6377-4180>

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Бондарчук О.В.**

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

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Луценко В.Ю.**

<https://orcid.org/0000-0002-9727-5574>

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Самойленко М.І.**

<https://orcid.org/0000-0001-9410-6962>

Київський національний університет будівництва і архітектури

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ПРОГРАМНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ СИЛЬНО НЕЛІНІЙНОГО ТЕПЛООВОГО ОБ'ЄКТУ (НА ПРИКЛАДІ ПРОПАРЮВАЛЬНОЇ КАМЕРИ)

Теплова обробка – найбільш розповсюджений метод прискорення твердіння бетону. Теплову обробку бетону здійснюють переважно в пропарювальних камерах циклічної дії. Цей об'єкт об'єкт регулювання має суттєві особливості. Автоматичне регулювання температури не стабілізує, а програмне, з відпрацюванням заданого графіку прогріву. Об'єкт регулювання суттєво нелінійний, але стаціонарний, динамічні властивості якого не змінюються за весь період експлуатації. Відсутні суттєві зовнішні збурення, крім основного – зміни завдання в часі. Але це основне збурення повністю детерміноване і контрольоване. Об'єкт регулювання фактично одноємнісний, з несуттєвими (у порівнянні з переважаючою основною інерційністю) паразитними інерційностями (запізненням, тощо). В цьому частковому випадку має сенс відмовитись від регулювання виключно за відхиленням з використанням традиційного пропорційно-інтегрально-диференціюючого (ПІД) –регулятора. Рекомендується основне регулювання реалізувати по основному збуренню – зміною завдання (за розімкненою схемою). Але для компенсації неконтрольованих малих остаточних помилок регулювання має сенс залишити пропорційний (П) канал регулювання за відхиленням через негативний зворотній зв'язок. Використання диференціюючого (Д) і інтегруючого (І) каналів регулювання в даному частковому випадку не має сенсу. Коефіцієнт пропорційності  $K_p$  рекомендується змінювати в ході технологічного процесу в зростаючій залежності від температури. Це потрібно для компенсації нелінійності об'єкта регулювання. За технологічними вимогами (для інтенсивного перемішування пару) зміни подачі пару повинні відбуватися в двопозиційному режимі (відкрито-закрито) за рахунок широтно-імпульсної модуляції. Додатковою перевагою запропонованого алгоритму регулювання є максимально економне використання ресурсу роботи виконавчого механізму і клапана подачі пару.

**Ключові слова:** автоматизація, пропарювальна камера, нелінійний об'єкт, програмне регулювання, синтез, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Теплова обробка – найбільш розповсюджений метод прискорення твердіння бетону [1]. Теплову обробку бетону здійснюють переважно в пропарювальних камерах циклічної дії. Регулятор температури програмно регулює температуру в камері по заданому гра-

фіку. Автоматичне регулювання температури не стабілізує, а програмне, з відпрацюванням заданого графіку прогріву. Об'єкт регулювання суттєво нелінійний, але стаціонарний, динамічні властивості якого не змінюються за весь період експлуатації. Відсутні суттєві зовнішні збурення, крім основного – зміни завдання в часі. Але це основне збурення повністю детерміноване і контрольоване. Об'єкт регулювання фактично одноємнісний, з несуттєвими (у порівнянні з переважаючою основною інерційністю) паразитними інерційностями (запізненням, тощо). В цьому частковому випадку має сенс відмовитись від регулювання виключно за відхиленням з використанням традиційного пропорційно-інтегрально-диференціюючого (ПІД) –регулятора. Рекомендується основне регулювання реалізувати по основному збуренню – зміною завдання (за розімкненою схемою). Але для компенсації неконтрольованих малих остаточних помилок регулювання має сенс залишити пропорційний (П) канал регулювання за відхиленням через негативний зворотній зв'язок. Використання диференціюючого (Д) і інтегруючого (І) каналів регулювання в даному частковому випадку не має сенсу. Коефіцієнт пропорційності  $K_p$  рекомендується змінювати в ході технологічного процесу в зростаючій залежності від температури. Це потрібно для компенсації нелінійності об'єкта регулювання. За технологічними вимогами (для інтенсивного перемішування пару) зміни подачі пару повинні відбуватися в двопозиційному режимі (відкрито-закрито) за рахунок широтно-імпульсної модуляції. Додатковою перевагою запропонованого алгоритму регулювання є максимально економне використання ресурсу роботи виконавчого механізму і клапана подачі пару.

© Іносов С.В., Гаврюков О.В., Бондарчук О.В. та ін., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



фіку. Рівномірний підйом температури до 85° за 2 години, стабілізація температури на 8 годин, рівномірне зменшення температури за 2 години. Традиційно використовується двопозиційний релейний алгоритм регулювання [2], але він дає незадовільно велику динамічну похибку регулювання. Спроба замінити його на пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм регулювання з широтно-імпульсним модулятором (ШІМ), що є сучасним рішенням для теплових об'єктів [3], нашою виходило на проблему, пов'язану з сильною нелінійністю [4] об'єкту регулювання.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Традиційно розрахункову модель теплового об'єкту регулювання апріорно відносять до класу лінійних інерційних стаціонарних (ЛІС) і описують передаточною функцією  $W(p)$  [2]. Найбільш універсальна і разом з тим зручна для будь-яких теплових об'єктів передаточна функція виду [5]:

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-ps}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)} \quad (1)$$

Для пропарювальних камер основна стала часу  $T_1$  суттєво більша від часу запізнення  $\tau$  і другої сталої часу  $T_2$ , тому, як правило, використовується спрощена модель пропарювальної камери у вигляді передаточної функції першого порядку:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)} \quad (2)$$

$K$  – статичний коефіцієнт передачі об'єкту.

Передаточна функція (2) зв'язує температуру з керуючим впливом (подачею пара). Основним зовнішнім збуренням є програмна зміна завдання за заданим графіком (нагрів, витримка, охолодження).

Як виявилось, такий підхід надто грубий (навіть як перше наближення). Пропарювальну камеру неможливо адекватно описати лінійною інерційною стаціонарною (ЛІС) моделлю. Об'єкт має суттєво нелінійні властивості. Нелінійні ефекти настільки значні, що призводять до якісно нових явищ. Навіть лінеаризація не може допомогти, бо по мірі прогріву локальні властивості об'єкту (для малих відхилень) суттєво змінюються. Тим більш неприпустимо використання лінійних моделей для опису глобальних властивостей об'єкту в усьому робочому діапазоні температур.

На рис. 1 наведено сімейство перехідних функцій об'єкту регулювання для різних амплітуд скачка керуючого впливу – ступені відкриття клапану подачі пара.

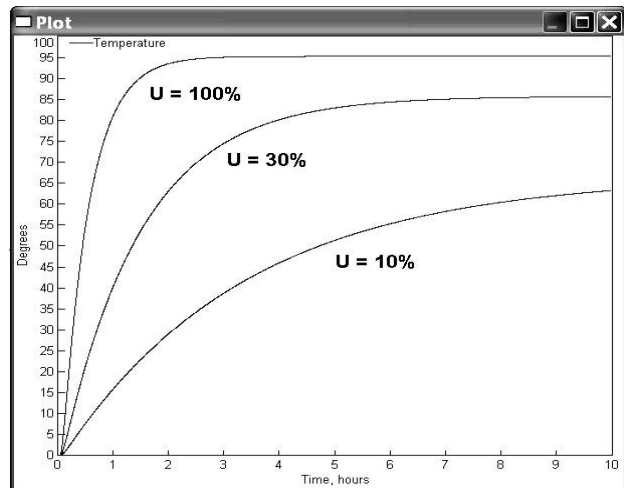


Рис. 1. Сімейство перехідних функцій пропарювальної камери при різних амплітудах скачка керуючого впливу  $U$

Перехідна функція – це графік зростання температури в градусах при відкритті клапану подачі пари стрибком і збереження в подальшому його положення незмінним. Керуючий вплив  $U$  може варіюватися від 0% (повністю закрито) до 100% (повністю відкрито).

Для лінійного об'єкту всі перехідні функції (при різних величинах вхідного стрибка) повинні бути геометрично подібними. Кінцеві температури повинні бути пропорційними ступені відкриття клапану. Очевидно, для пропарювальної камери ця умова неможлива. По мірі прогріву температура в камері прямує до певної межі, близької до температури пари. Очевидно, збільшуючи ступінь відкриття клапану, ми можемо тільки прискорити нагрів, але майже не зможемо вплинути на кінцеву температуру. Форма кривої перехідної функції суттєво залежить від амплітуди стрибка керуючого впливу, умова подібності перехідних функцій суттєво порушується. Тобто, об'єкт регулювання не може вважатися лінійним.

Практично вказані особливості об'єкту регулювання не дозволяють використовувати регулятори з постійним налаштуванням в усьому робочому діапазоні температур. По мірі прогріву об'єкту його лінеаризовані для малих відхилень коефіцієнт передачі і стала часу зменшуються на порядок, що вимагає відповідної зміни параметрів налаштування регулятора в ході технологічного процесу.

**Постановка завдання.** В роботі пропонується динамічна модель об'єкту регулювання, яка враховує його нелінійні особливості. Запропонована модель використовується для синтезу спеціалізованого високоточного алгоритму регулювання.

**Виклад основного матеріалу.** Модель пропарювальної камери як об'єкту регулювання найбільш наглядно представляється у вигляді теплового ланцюга (рис. 2).

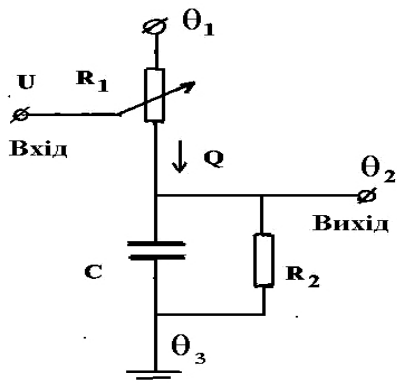


Рис. 2. Модель пропарювальної камери як об'єкту регулювання у вигляді теплового ланцюга

де:

- U – Керуючий вплив, ступінь відкриття клапана
- $\theta_2$  – Температура в камері, регульована величина
- $\theta_1$  – Температура пара в магістралі
- $\theta_3$  – Температура зовнішнього середовища
- C – Теплоємність камери з виробами
- Q – Приток тепла в камеру
- $R_1$  – Тепловий опір клапана
- $R_2$  – Тепловий опір витоку тепла в зовнішнє середовище

Модель суттєво нелінійна. Керуючий вплив на приток тепла в камеру реалізується параметрично, шляхом зміни теплового опору клапана в залежності від ступеня його відкриття.

Модель адекватно враховує наступні характерні особливості об'єкту регулювання:

- при відкриванні клапана на постійну величину температура камери зростає за експонентою, як в лінійному об'єкті, але стала часу цієї експоненти суттєво залежить від ступеня відкриття клапана.
- усталена температура майже не залежить від ступеню відкриття клапана, а визначається, в першу чергу, температурою пару. Ступінь відкриття клапана суттєво впливає на швидкість нагріву, але не на усталену температуру.
- по мірі прогріву камери маніпуляції клапаном все менше впливають на зміни температури.
- для підтримання усталеної температури достатньо незначного притоку тепла, що покриває втрати тепла в зовнішнє середовище.
- сильне форсування подачі тепла потрібне для прискорення процесу початкового прогріву.
- для малих відхилень від робочого режиму, об'єкт можна розглядати як лінійний нестационарний

(так звана лінеаризація об'єкту), у якого стала часу і статичний коефіцієнт передачі суттєво зменшуються в ході прогріву камери.

– для врахування малих паразитних інерційностей (датчика, виконавчого пристрою і т.п.), які можуть викликати нестійкість регулювання при сильному зворотному зв'язку, в модель додатково введені (на рис. 2 не показані) блок запізнення на 0.05 год. і аперіодичний блок першого порядку із сталою часу 0.05 год.

Задача системи автоматичного регулювання: необхідно так маніпулювати відкриттям клапана, щоб зростання температури відбувалося за заданим графіком (рівномірне зростання від 0 до 85 градусів на протязі 2 годин, потім стабілізація температури на досягнутому рівні).

Ідея синтезу алгоритму регулювання наступна.

Пропарювальна камера циклічної дії є фактично однозмінним об'єктом регулювання з несуттєвими (у порівнянні з основною інерційністю) паразитними інерційностями (запізненням і т.п.). Для таких об'єктів, якщо вони лінійні і стаціонарні, теоретично оптимальним є пропорційний алгоритм в контурі регулювання за відхиленням від завдання.

Але нашому частковому випадку, коли об'єкт регулювання сильно нелінійний, пропорційний регулятор без адаптації (з фіксованим налаштуванням в усьому робочому діапазоні температур) принципово не може забезпечити хорошу якість регулювання. Причина полягає в зміні динамічних властивостей об'єкту регулювання по мірі прогріву.

Але, на щастя, перевагою є те, що об'єкт регулювання стаціонарний, зі стабільними динамічними властивостями, які не змінюються за весь період експлуатації.

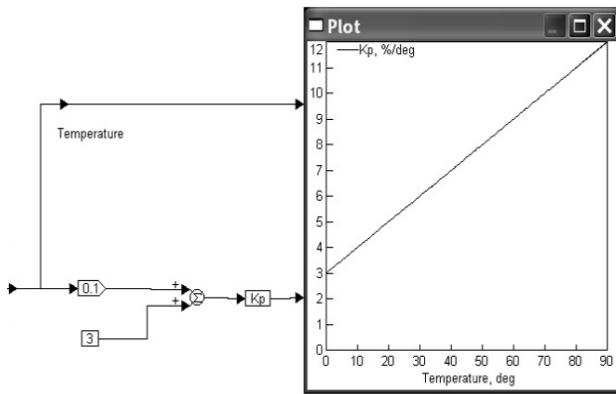
Крім того, відсутні суттєві зовнішні збурення, крім основного – зміни завдання в часі. Але це суттєве збурення повністю детерміноване і контрольоване.

Тому має сенс відмовитись від регулювання виключно за відхиленням з використанням традиційного пропорційно-інтегрально-диференціуючого (ПІД) –регулятора з фіксованою настройкою [3, 6].

Рекомендуємо основне регулювання реалізувати за основним збуренням, тобто за зміною завдання (за розімкненою схемою).

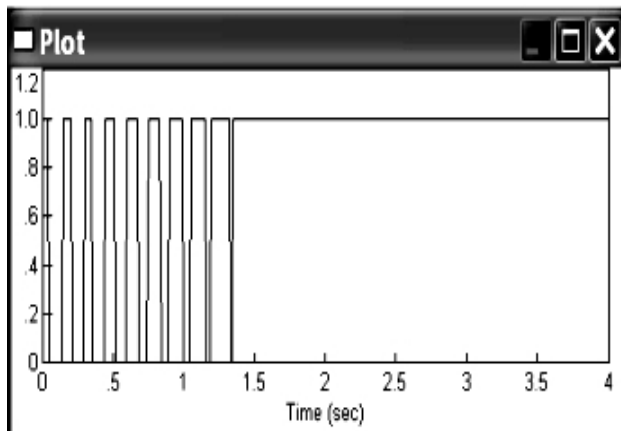
Але для компенсації неконтрольованих малих залишкових похибок регулювання має сенс використовувати пропорційний канал регулювання за відхиленням через негативний зворотній зв'язок.





**Рис. 6. Внутрішня структура блоку автонстроювання коефіцієнту пропорційності  $K_p$ . Залежність  $K_p$  від температури**

На рис. 7 представлено графік включень-виключень виконавчого механізму для синтезованого остаточного варіанту алгоритму регулювання. Як бачимо, клапан подачі пари відкривався-закривався всього 10 раз. Тобто ресурс роботи клапана і виконавчого механізму витрачається максимально економно, що є додатковою перевагою запропонованого алгоритму регулювання.



**Рис. 7. Графік включень-виключень подачі пари**

### Висновки

1. При регулюванні температури в пропарювальній камері циклічної дії маємо справу з суттєвими особливостями об'єкту регулювання.

2. Система автоматичного регулювання не стабілізує, а програмна, з відпрацюванням заданого графіку прогріву. Температура змінюється в широкому діапазоні.

3. Об'єкт регулювання сильно нелінійний.

4. Об'єкт регулювання стаціонарний, динамічні властивості якого не змінюються за весь період експлуатації.

5. Відсутні суттєві зовнішні збурення, крім основного – зміни завдання в часі. Але це основне збурення повністю детерміноване і контролюване.

6. Об'єкт регулювання фактично одноємнісний, з незначними (у порівнянні з переважаючою основною інерційністю) паразитними інерційностями (запізненням, тощо).

7. В цьому частковому випадку має сенс відмовитися від регулювання виключно за відхиленням з використанням традиційного пропорційно-інтегрально-диференціюючого (ПІД) –регулятора.

8. Рекомендується основне регулювання виконувати за основним збуренням – зміною завдання (за розімкненою схемою). Але для компенсації неконтрольованих малих залишкових похибок регулювання має сенс залишити пропорційний (П) канал регулювання за відхиленням через негативний зворотній зв'язок. Використання диференціюючого (Д) і інтегруючого (І) каналів регулювання в даному частковому випадку не має сенсу.

9. Коефіцієнт пропорційності  $K_p$  рекомендується змінювати в ході технологічного процесу в зростаючій залежності від температури. Це потрібно для компенсації нелінійності об'єкта регулювання.

10. За технологічними вимогами (для інтенсифікації перемішування пари) зміни керуючого впливу повинні виконуватися в двопозиційному режимі (відкрито-закрито) за рахунок широтно-імпульсної модуляції.

11. Додатковою перевагою запропонованого алгоритму регулювання є максимально економне використання ресурсу роботи виконавчого механізму і клапана подачі пари.

### Список літератури:

1. Коц І.В. Тепловологісна обробка бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівання: монографія/ І.В.Коц, О.П.Колісник – Вінниця: ВНТУ, 2013. 114с.
2. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник для ВУЗів. К.: Либідь, 1997, 315 с.
3. С.В. Іносов, В.М. Корниенко. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами Управління розвитком складних систем. № 13, 2013, с. 104-108.

4. Євстифєєв В.О. Теорія автоматичного керування. – Ч.1. – Безперервні лінійні та нелінійні системи: Навчальний посібник для ВУЗів. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2006. 288 с.

5. Іносов 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.

6. Іносов С. В., Бондарчук О. В. Ілларионов В. М. Настроювання ПІД-регулятора за перехідною функцією розімкненого контура. Управління розвитком складних систем. Київ, 2021. № 46. с. 167–172.

7. Чумак Л. І., Бацун І. О. Математичне моделювання процесу теплової обробки ніздрювато-бетонних виробів в автоклаві. Вісник ПДАБА. № 11–12 листопад – грудень 2011, с. 54–58.

**Inosov S.V., Gavryukov O.V., Bondarchuk O.V., Lutsenko V.Yu., Samoylenko M.I. SYNTHESIS OF AN ALGORITHM OF PROGRAMMED CONTROL FOR A STRONGLY NONLINEAR PLANT (BY THE EXAMPLE OF A CURING PIT)**

*Heat treatment is the most common method of accelerating the hardening of concrete. Heat treatment of concrete is carried out mainly in steaming chambers of cyclic action. This object of control has significant features. Automatic temperature control is not stabilizing, but programmatic, with the development of a given heating schedule. The control object is significantly nonlinear, but stationary, the dynamic properties of which do not change during the entire period of operation. There are no significant external disturbances, except for the main one – changes in the task over time. But this main disturbance is fully deterministic and controlled. The control object is actually single-capacitive, with insignificant (compared to the prevailing main inertia) parasitic inertias (delay, etc.). In this particular case, it makes sense to abandon control exclusively by deviation using a traditional proportional-integral-differentiator (PID) controller. It is recommended to implement the main regulation according to the main disturbance – a change in the task (in an open circuit). But to compensate for uncontrolled small final regulation errors, it makes sense to leave the proportional (P) regulation channel for the deviation due to negative feedback. The use of differentiating (D) and integrating (I) regulation channels in this particular case does not make sense. The proportionality coefficient  $K_p$  is recommended to be changed during the technological process in an increasing dependence on the temperature. This is necessary to compensate for the nonlinearity of the regulated object. According to technological requirements (for intensive steam mixing), changes in the steam supply should occur in a two-position mode (open-closed) due to pulse-width modulation. An additional advantage of the proposed regulation algorithm is the most economical use of the operating resource of the actuator and the steam supply valve.*

**Keywords:** Automation, curing pit, non-linear plant, programmed control, algorithm, synthesis.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026