

## АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 622.232.72:004.942

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2023-104-5>

### СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТИСКОМ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ В ТУНЕЛЬНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ ВИПАЛЮВАННЯ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ

#### **Бубликов Андрій Вікторович,**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754  
Scopus Author ID: 55998596600

#### **Надточий Володимир Валентинович,**

старший викладач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-3987-5608

#### **Продан Богдан Шихахмедович,**

здобувач групи 151м-21-1  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0009-0007-3650-4648

**Метою** є визначення закономірностей процесу автоматичного керування тиском газоповітряної суміші в тунельній печі, що дозволять адаптувати процес керування тиском під змінні умови роботи печі, зокрема під зміну тиску газоповітряної суміші в газопроводі її подачі в піч перед регулюючим клапаном.

**Метод.** Для отримання характеристик тунельної печі як об'єкта керування з метою аналізу на їх основі закономірностей процесу керування використане імітаційне моделювання процесів переміщення газоповітряної суміші (ГПС) у тунельній печі. За вихідні дані взяті реальні технічні характеристики трубопроводів і тунельної печі. Для дослідження системи автоматичного керування тиском газоповітряної суміші в тунельній печі використані методи сучасної теорії автоматичного керування. Дослідження проведені на основі обчислювальних експериментів із використанням комп'ютеризованих методів апроксимації даних і синтезу систем автоматичного керування.

**Результати.** У процесі дослідження отримані такі наукові результати:

- для кожного режиму роботи системи автоматичного керування (відпрацювання уставки або компенсація збурення) є оптимальні налаштування ПІ-регулятора, що забезпечують максимальну швидкодію системи без перевищення максимального допустимого диференціала за часом керівного впливу;
- для кожної величини збурення є свої оптимальні параметри ПІ-регулятора, за яких максимальне значення фактичного диференціала керівного впливу дорівнює своєму максимальному допустимому рівню. Установлено, що оптимальні коефіцієнти підсилення як пропорційної складової частини, так і інтегральної складової частини регулятора залежать від величини збурення зворотно й експоненційно;
- установлено, що з високою точністю (відносна похибка не перевищує 1%) залежності оптимальних параметрів ПІ-регулятора від величини збурення апроксимуються ступеневими поліномами четвертого порядку.

**Практичне значення.** Запропоновано вдосконалений спосіб синтезу системи автоматичного керування тиском газоповітряної суміші в тунельній печі за допомогою спеціалізованих комп'ютерних інструментів, який передбачає подальше дослідження критеріїв якості роботи системи керуванні від параметрів налаштування регулятора. Це дозволить поліпшити критерії якості перехідних процесів під час автоматичного керування тиском газоповітряної суміші в тунельній печі.

**Ключові слова:** тиск газоповітряної суміші, тунельна піч, ПІ-регулятор.

**Bublikov Andrii, Nadtochy Volodymyr, Prodan Bohdan. Synthesis and study of the system of automatic control of the pressure of the gas-air mixture in the tunnel furnace for the firing of ceramic bricks**

The **objective** is to determine the regularities of the process of automatic control of the pressure of the gas-air mixture in the tunnel furnace, which will allow to adapt the process of pressure control to the changing conditions of the furnace, in particular, to the change of the pressure of the gas-air mixture in the gas pipeline of its supply to the furnace before the control valve.

**Method.** In order to obtain the characteristics of the tunnel furnace as a control object in order to analyze the regularities of the control process based on them, simulation modeling of the processes of movement of the gas-air mixture (GAM) in the tunnel furnace was used. At the same time, the real technical characteristics of pipelines and tunnel furnace are taken as initial data. The methods of the modern theory of automatic control were used to study the system of automatic control of pressure in the tunnel furnace. The research was conducted on the basis of computational experiments using computerized methods of data approximation and synthesis of automatic control systems.

**The results.** The following scientific results were obtained during the research:

- for each mode of operation of the automatic control system (working out the set point or compensation of disturbance) there are optimal settings of the PI controller, which ensure the maximum speed of the system without exceeding the maximum permissible differential by the time of the control influence;

- for each disturbance value, there are optimal parameters of the PI controller, at which the maximum value of the actual differential of the control influence is equal to its maximum permissible level. At the same time, it was established that the optimal gain coefficients of both the proportional component and the integral component of the regulator depend on the magnitude of the disturbance inversely and exponentially;

- it was established that with high accuracy (the relative error does not exceed 1%), the dependence of the optimal parameters of the PI controller on the disturbance value is approximated by power polynomials of the fourth order.

**Practical meaning.** An improved method of synthesis of the system of automatic pressure control of the gas-air mixture in the tunnel furnace with the help of specialized computer tools is proposed, which involves further research of the quality criteria of the control system from the settings of the regulator. This will improve the quality criteria of transient processes during automatic pressure control of the gas-air mixture in the tunnel furnace.

**Key words:** gas-air mixture pressure, tunnel furnace, PI regulator.

**Вступ.** На обсяг випуску в Україні окремих керамічних виробів (керамічні плитки, цегли тощо) значно впливає будівельна галузь – саме від темпів її розвитку залежить обсяг виготовлення будівельних матеріалів.

Протягом 2012–2015 років виробництво керамічної плитки скоротилось на 27,8% [1]. Передусім це пов'язано зі значною політичною й економічною кризою, що сталася в ці роки, а також із кардинальним перерозподілом ринку експорту. За ці роки спостерігалось суттєве зменшення економічної активності населення, отже, і попиту в будівельній галузі.

Починаючи з 2015 року з'явилася незначна тенденція в бік збільшення об'ємів виробництва керамічних виробів. Це було пов'язано з відкладеним очікуванням бізнесу щодо початку нових проєктів у будівельній галузі. Будівельна галузь – одна з найбільш перспективних в Україні, для її розвитку є все необхідне – багато природних ресурсів для виготовлення будівельних матеріалів, досить застарілий житловий фонд країни, що потребує масштабної модернізації.

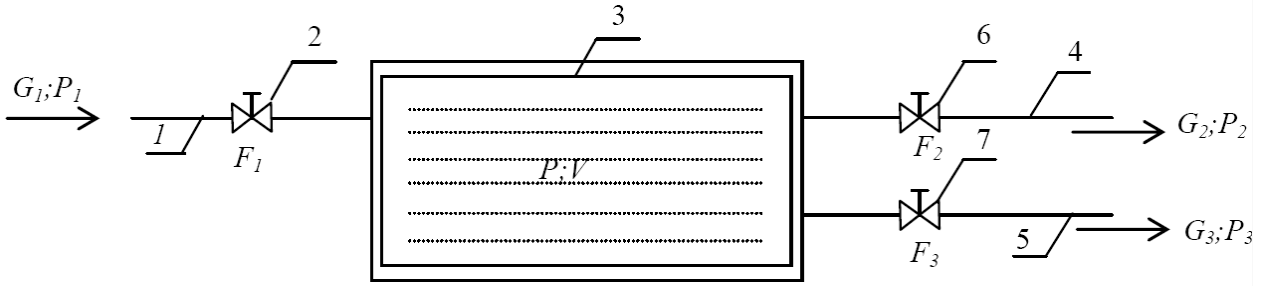
Але тенденція щодо зростання будівельної галузі й обсягів виробництва будівельних матеріалів (як і керамічних виробів) за останні декілька років практично зникла. Так, за три місяці 2020 року було вироблено 226,2 тис. кубометрів цегли керамічної (на 12,2% менше,

ніж за січень – березень 2019 року) [2]. А взагалі за 2020 рік було вироблено 1,43 млн кубометрів цегли керамічної (на 19,2% менше, ніж за 2019 рік) [3]. Це пов'язано зі значним сповільненням темпів реформ в Україні та розчаруванням бізнесу щодо сподівання появи прозорого й чесного ринку та правил гри у країні. Ситуація ще більше погіршилася після вторгнення Росії в Україну.

Але будівельна галузь, як і галузь виробництва будівельних матеріалів (зокрема, керамічних виробів), з урахуванням вищенаведених чинників, надовго будуть залишатись одним із найбільш перспективних напрямів розвитку економіки України в післявоєнний період.

Отже, зважаючи на це, автоматизація процесів виготовлення керамічних виробів в Україні з метою підвищення продуктивності підприємств і якості виготовленої ними продукції є актуальним питанням.

**Метод.** Математичний опис тунельної печі здійснений стосовно системи автоматичного керування тиском у тунельної печі у процесі випалу. Розглядається математичний опис тунельної печі як об'єкта автоматичного керування за тиском газоповітряної суміші (далі – ГПС) з урахуванням розрідження димових газів (далі – ДГ) і нагрітих газів (далі – НГ). На рисунку 1 представлена загальна схема тунельної печі



**Рис. 1.** Схема тунельної печі випалу керамічної цегли як об’єкта автоматичного керування за тиском ГПС:  $P_1$  – тиск перед вентилям трубопроводу подачі ГПС;  $P_2, P_3$  – тиск, відповідно, ДГ та НГ після вентилів трубопроводів видалення ДГ на НГ із печі;  $V$  – об’єм печі;  $F_i$  – площа поперечного перетину отвору  $i$ -го клапана; 1 – трубопровід підведення ГПС; 2, 6, 7 – регулюючі вентиля; 3 – тунельна піч; 4 – трубопровід відведення ДГ; 5 – трубопровід відведення НГ

як об’єкта автоматичного керування, на основі якої створена імітаційна модель [4].

Математичне рівняння, що описує динаміку утворення перепадів тисків у трубопроводах та печі [4], виглядає так:

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP}{dt} = \mu_1 F_1 k_a \sqrt{\frac{P_1(P_1 - P)}{RT}} - \mu_2 F_2 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_2)}{RT}} - \mu_3 F_3 k_a \sqrt{\frac{P(P - P_3)}{RT}}, \quad (1)$$

де  $P$  – тиск у зоні випалу тунельної печі, кПа.

Розшифровка параметрів у рівнянні (1) наведена в таблиці 1.

Коефіцієнт  $k_a$  в рівнянні (1) розраховується за формулою:

$$k_a = \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}},$$

де  $k$  – коефіцієнт адіабати для метану за 20 °С (див. табл. 1).

Отже, якщо реалізовувати модель об’єкта керування на основі рівняння (3.1), то маємо сім параметрів, що можуть змінюватися в часі в ході технологічного процесу випалу цегли, як-от: тиск ГПС у печі  $P$ , тиск ГПС перед регулюючим вентилям у трубопроводі подачі ГПС у піч  $P_1$ ; тиск ДГ за регулюючим вентилям у трубопроводі видалення ДГ із печі  $P_2$ ; тиск НГ за регулюючим вентилям у трубопроводі видалення НГ із печі  $P_3$ ; площа поперечного перетину отвору регулюючого клапана у трубопроводі подачі ГПС у піч  $F_1$ ; площа поперечного перетину отвору регулюючого клапана у трубопроводі видалення ДГ із печі  $F_2$ ; площа поперечного перетину отвору регулюючого клапана у трубопроводі видалення НГ із печі  $F_3$ .

Таблиця 1

**Параметри імітаційної моделі об’єкта керування**

№	Найменування параметра	Позначення параметра	Значення параметра
1	Коефіцієнт регулюючого вентиля на трубопроводі подачі газоповітряної суміші (ГПС) у піч	$\mu_1$	0,75
2	Коефіцієнт регулюючого вентиля на трубопроводі видалення димових газів (ДГ) із печі	$\mu_2$	0,11
3	Коефіцієнт регулюючого вентиля на трубопроводі видалення нагрітих газів (НГ) із печі	$\mu_3$	0,75
4	Абсолютна температура ГПС, К	$T$	293
5	Газова постійна для природного газу (метану), $m^2/c^2 \cdot K$	$R$	52,89
6	Об’єм ГВС, що поступає в піч, $m^3$	$V_2$	54,3
7	Номінальний тиск ГВС перед регулюючим вентилям, кПа	$P_{10}$	4
8	Задане розрідження НГ на виході, кПа	$P_{30}$	0,8
9	Коефіцієнт адіабати для метану за 20 °С	$k$	1,32
10	Фактичний діаметр прохідного отвору регулюючого клапана у трубопроводі подачі ГПС у піч, м	$d_{\phi 1}$	0,25
11	Фактичний діаметр прохідного отвору регулюючого клапана у трубопроводі видалення ДГ із печі, м	$d_{\phi 2}$	0,1
12	Фактичний діаметр прохідного отвору регулюючого клапана у трубопроводі видалення ГГ із печі, м	$d_{\phi 3}$	0,25

Керованою величиною є тиск ГПС у печі  $P$ , а керуючим сигналом є площа поперечного перетину отвору регулюючого клапана у трубопроводі подачі ГПС у піч  $F_1$ , що розраховується за формулою:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot d_{\phi 1}^2}{4}, \quad (2)$$

де  $d_{\phi 1}$  – фактичний діаметр прохідного отвору регулюючого клапана у трубопроводі подачі ГПС у піч, м (див. табл. 1).

Інші змінні у формулі (1), а саме –  $P_1, P_2, P_3, F_2$  та  $F_3$ , є збурюючими впливами на систему автоматичного керування тиском у тунельній печі.

Насправді керівним сигналом у системі автоматичного керування є сигнал на привод заслінки регулюючого клапана у трубопроводі подачі ГПС у тунельну піч. Отже, потрібний перехід від положення заслінки клапана до площі поперечного перетину. Із цією метою проведена апроксимація експериментальної статичної характеристики регулюючого клапана.

**Результати.** Для синтезу системи автоматичного керування тиском ГПС у тунельній печі використаний один із розповсюджених спеціалізованих комп'ютерних інструментів, що дозволяє автоматизувати розрахунок регулятора (застосунок "PID Tuner" математичного пакету MATLAB [5]). Установлено, що через неврахування в роботі застосунку обмеження за швидкістю зміни в часі керівного впливу на об'єкт автоматизації усталено пропонуються неоптимальні налаштування регулятора. Отже, з метою пошуку оптимальних параметрів регулятора на основі цього застосунку проведено дослідження залежності основного критерію якості роботи системи керування (максимальна швидкодія без перевищення припустимого рівня диференціала за часом керівного впливу – 5%/с) від параметрів регулятора. Кожне налаштування ПІ-регулятора під час синтезу системи автоматичного керування та її подальшого дослідження надалі будемо ототожнювати з певним рівнем швидкодії системи керування (часом наростання перехідного процесу на виході системи), за умови завдання максимального рівня робастності в інструменті "PID Tuner".

З метою визначення оптимального налаштування ПІ-регулятора за критерієм максимальної швидкодії системи керування за умови відсутності перевищення допустимого максимального рівня диференціала за часом керівного впливу шляхом обчислювальних експериментів отримані залежності рівня диференціала від рівня швидкодії системи (рисунок 2).

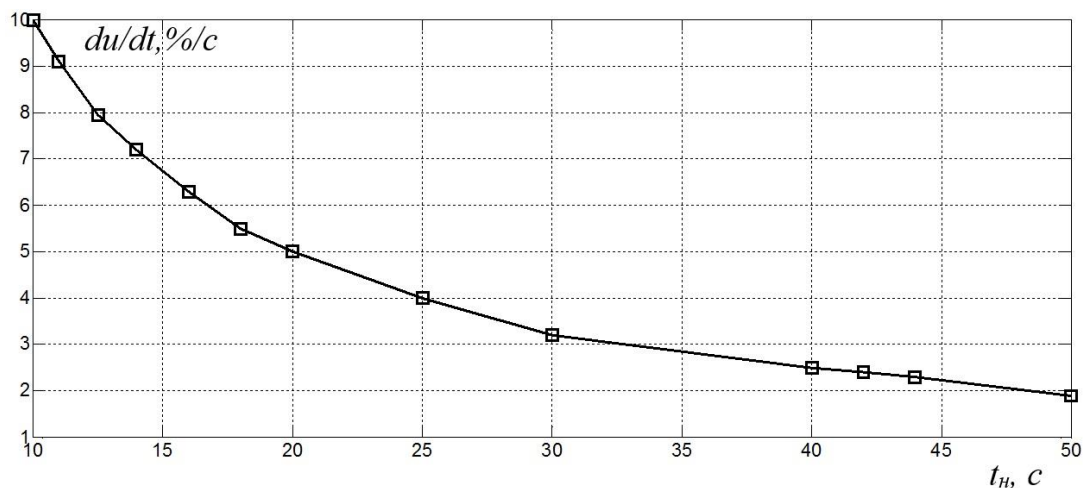
Аналіз рисунка 2 (а) дозволяє зробити висновок, що залежність максимального диференціала за часом керівного впливу від часу наростання перехідного процесу, який визначає рівень швидкодії системи керування за її синтезу, є зворотною та близькою до експоненціальної форми. Також можна зробити висновок, що максимально допустимому значенню диференціала за часом керівного впливу 5%/с відповідає час наростання 20 с. Саме за умови завдання такого часу наростання за синтезу системи керування через PID Tuner будемо мати максимальну швидкодію системи керування за компенсації збурення без перевищення допустимого рівня швидкості зміни в часі керівного впливу.

Аналіз рисунка 2 (б) дозволяє зробити висновок, що залежність максимального диференціала за часом керівного впливу від часу наростання перехідного процесу, який визначає рівень швидкодії системи керування за її синтезу, є зворотною та суттєво нелінійною. Після часу наростання 40 с спостерігається різке зменшення диференціала керівного впливу нижче припустимого рівня 5%/с. Отже, для забезпечення максимальної швидкодії системи керування під час відпрацювання зміни уставки без перевищення допустимої швидкості зміни в часі керівного впливу за синтезу системи з використанням застосунку "PID Tuner" потрібно задавати час наростання 42 с.

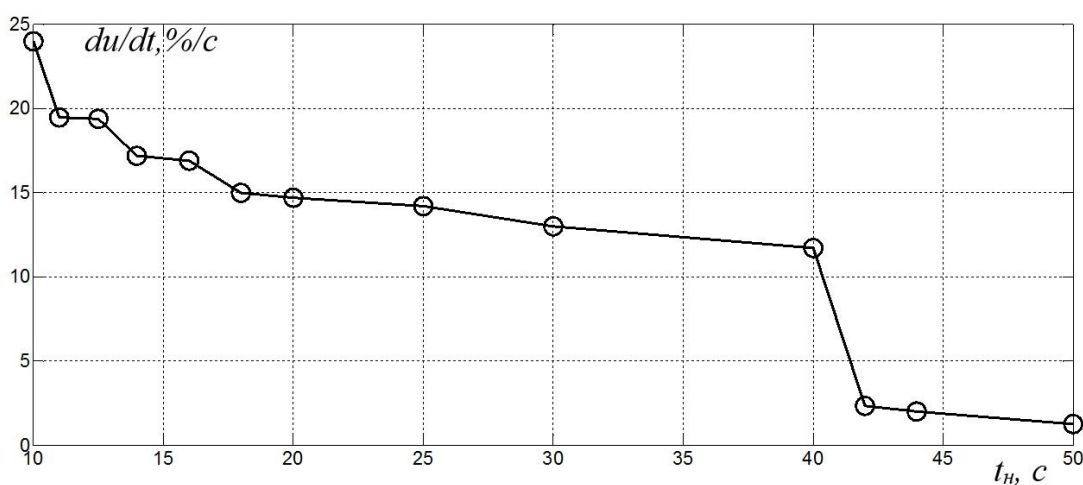
За отриманими результатами дослідження можна зробити ще один важливий висновок – для відпрацювання системою керування зміни уставки тиску ГПС у печі та компенсації дії збурення з максимальною швидкістю без перевищення допустимої швидкості зміни в часі керівного впливу за синтезу системи керування з використанням застосунку "PID Tuner" потрібно задавати різний час наростання. Тобто для цих двох подій маємо різні оптимальні налаштування ПІ-регулятора. Фактично потрібно використовувати два ПІ-регулятора з різними налаштуваннями, один із яких застосовується під час відпрацювання системою керування зміни уставки, а інший – під час компенсації збурення.

Для визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора отримані залежності цих параметрів від часу наростання перехідного процесу (рисунок 3), які властиві режиму компенсації системою керування збурення, оскільки він є основним у роботі системи.

З рисунка 3 можна зробити висновок, що параметри ПІ-регулятора мають зворотну й експоненціальну залежність від рівня



а



б

**Рис. 2. Залежність значень диференціалів керівного впливу в разі відпрацювання впливу збурення (а) та зміни уставки (б) від рівня швидкодії системи керування, що виражена через час наростання перехідного процесу**

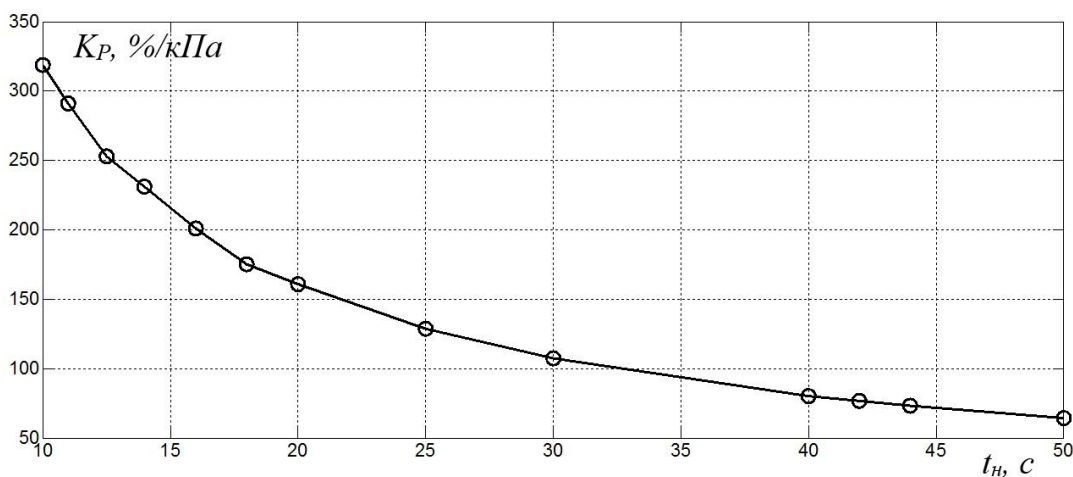
швидкодії системи керування. Також можна зробити висновок, що оптимальними параметрами ПІ-регулятора за критерієм максимальної швидкодії без перевищення допустимої швидкості зміни в часі керівного сигналу, які відповідають часу наростання 20 с, для режиму компенсації системою збурення є: коефіцієнт підсилення пропорційної складової частини – 160,6; коефіцієнт інтегральної складової частини – 19,6.

Результати моделювання роботи САК з оптимальним ПІ-регулятором на рисунку 4 підтверджують правильність розрахунку оптимальних параметрів регулятора. З рисунка 4 (б) ми бачимо, що максимальне фактичне значення диференціала керівного сигналу за часом як раз дорівнює своєму максимально допустимому значенню – 5%/с. Водночас максимально можлива з урахуванням обмеження швидкодія

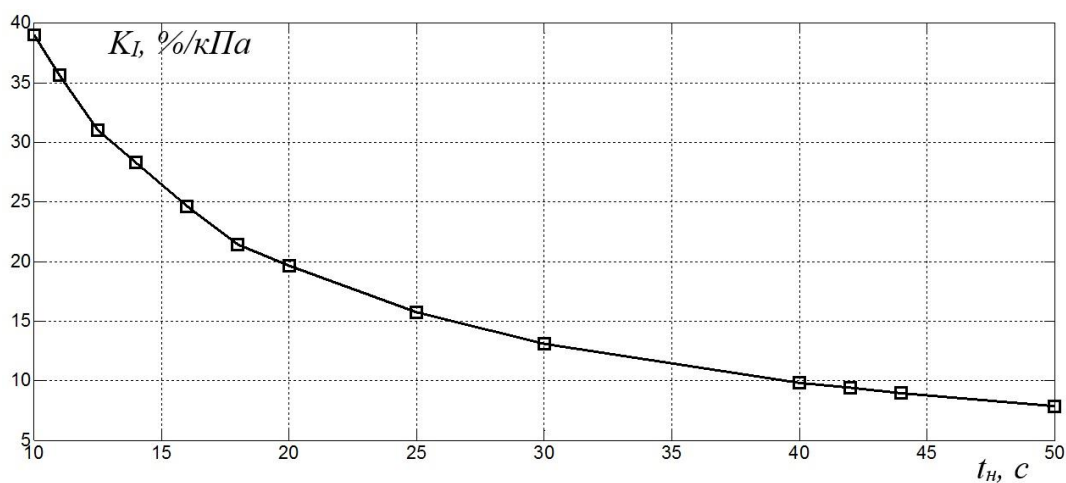
САК дозволила утримати керовану величину в бажаному діапазоні змін значень  $\pm 5\%$  від уставки (рисунок 4).

Подальші дослідження системи автоматичного керування (рисунок 5) дозволили виявити, що визначені вище оптимальні параметри ПІ-регулятора є дієвими для рівня збурення +20% від номінального тиску ГПС перед регулюючим клапаном, але не забезпечують потрібного результату в разі інших рівнів збурення. Наприклад, на рисунку 5 (б) ми бачимо, що фактичний диференціал за часом керівного впливу перевищив своє допустиме значення.

Тому під час подальших досліджень САК за допомогою її імітаційної моделі отримані залежності ступеня швидкодії системи й оптимальних параметрів ПІ-регулятора від величини збурення (рисунки 6–8).



а



б

**Рис. 3. Залежність значень коефіцієнтів підсилення пропорційної (а) й інтегральної (б) складових частин ПІ-регулятора від рівня швидкодії системи керування, що виражена через час наростання перехідного процесу**

З рисунка б можна зробити висновок, що рівень швидкодії системи, за якої фактичний диференціал за часом керівного впливу дорівнює своєму максимальному допустимому значенню, прямо пропорційно залежить від величини збурення. Водночас оптимальні коефіцієнти підсилення як пропорційної складової частини, так і інтегральної складової частини регулятора залежать від величини збурення зворотно й експоненціально.

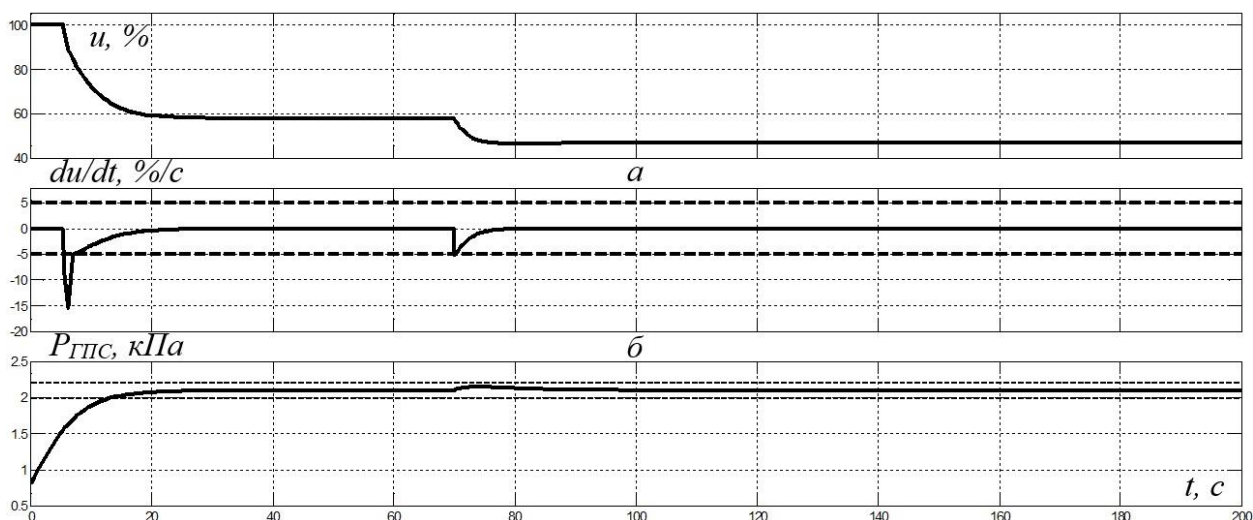
Отже, отримані залежності оптимальних параметрів регулятора від величини збурення дозволяють визначати оптимальні налаштування ПІ-регулятора для кожного рівня збурення, пристосовування під нього, дозволяють системі керування компенсувати збурення з максимальною швидкістю без перевищення максимальної допустимої швидкості зміни в часі керівного впливу.

Але для цього за допомогою інструментів пакету MATLAB проведена апроксимація залежностей оптимальних параметрів ПІ-регулятора від величини збурення, результати якої наведені на рисунку 9.

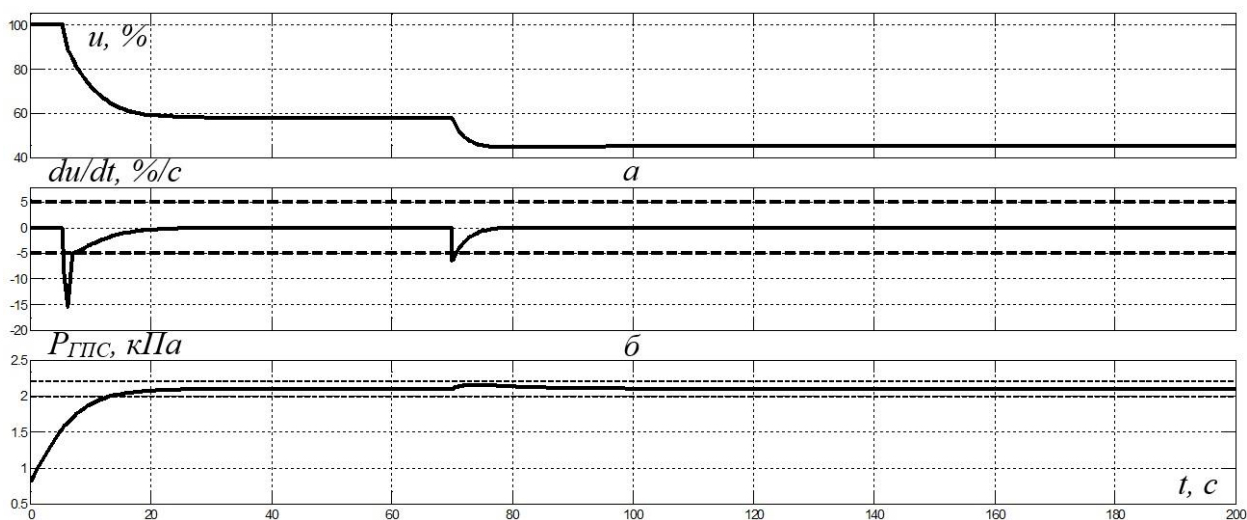
Аналіз рисунка 9 показує, що з високою точністю (відносна похибка не перевищує 1%) залежності оптимальних параметрів ПІ-регулятора від величини збурення апроксимуються ступеневими поліномами четвертого порядку.

З урахуванням отриманих нових залежностей розроблена імітаційна модель системи автоматичного керування тиском ГПС у тунельній печі з адаптивним і оптимальним ПІ-регулятором, параметри якого розраховуються у функції збурення.

На рисунку 10 адаптивний регулятор реалізований як підсистема з відповідною назвою.



**Рис. 4.** Результат роботи синтезованої системи автоматичного керування з максимальним рівнем робастності за часу наростання 20 с (тиск перед вентилям трубопроводу подачі газоповітряної суміші до 70 с – номінальний, після – на 20% більше): а – зміна в часі керівного впливу; б – його диференціала за часом; в – керованої величини



**Рис. 5.** Результат роботи синтезованої системи автоматичного керування з максимальним рівнем робастності за часу наростання 20 с (тиск перед вентилям трубопроводу подачі газоповітряної суміші до 70 с – номінальний, після – на 25% більше): а – зміна в часі керівного впливу; б – його диференціала за часом; в – керованої величини

Схема самого адаптивного ПІ-регулятора показана на рисунку 11. За допомогою блока  $F_{sp}$  зроблений перехід до відносного відхилення збурення (тиску ГПС перед регулюючим клапаном) від свого номінального значення, оскільки описані вище залежності отримані саме для цієї розмірності збурення.

Функції, що апроксимують залежності оптимальних параметрів регулятора від відносного відхилення збурення, реалізовані у блоках  $K_p$

та  $K_i$  на рисунку 11. Також до регулятора доданий інтегратор з обмеженням діапазону зміни керівного впливу та блок Saturation, що виконує аналогічну функцію, але вже для самого керівного впливу.

Щоб перевірити ефективність запропонованого нового адаптивного й оптимального ПІ-регулятора тиску ГПС у тунельній печі, проведено низку обчислювальних експериментів, результати яких наведені на рисунках 12–14.

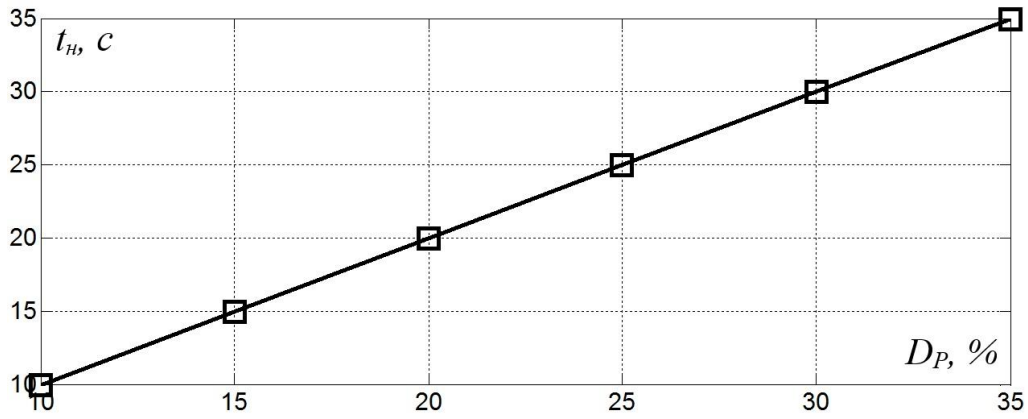


Рис. 6. Залежність ступеня швидкодії системи керування від відносної величини збурення за умови відсутності перевищення допустимої швидкості руху засувки в газопроводі

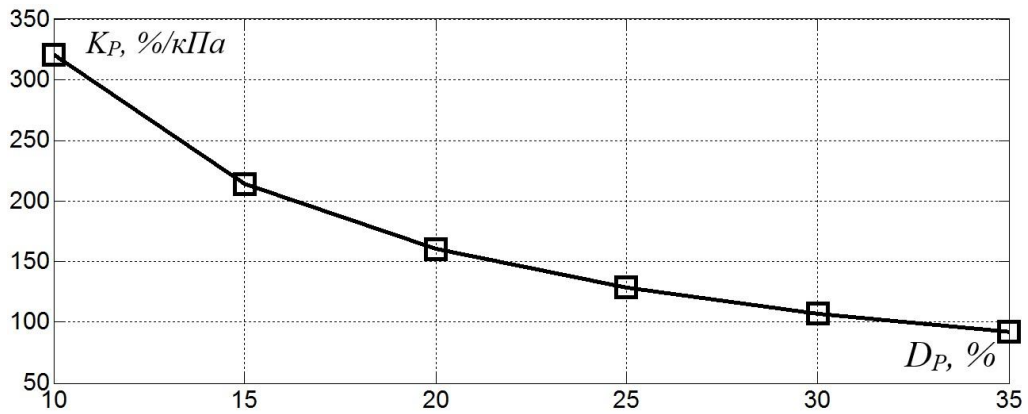


Рис. 7. Залежність коефіцієнта підсилення пропорційної складової частини ПІ-регулятора від відносної величини збурення за умови відсутності перевищення допустимої швидкості руху засувки в газопроводі

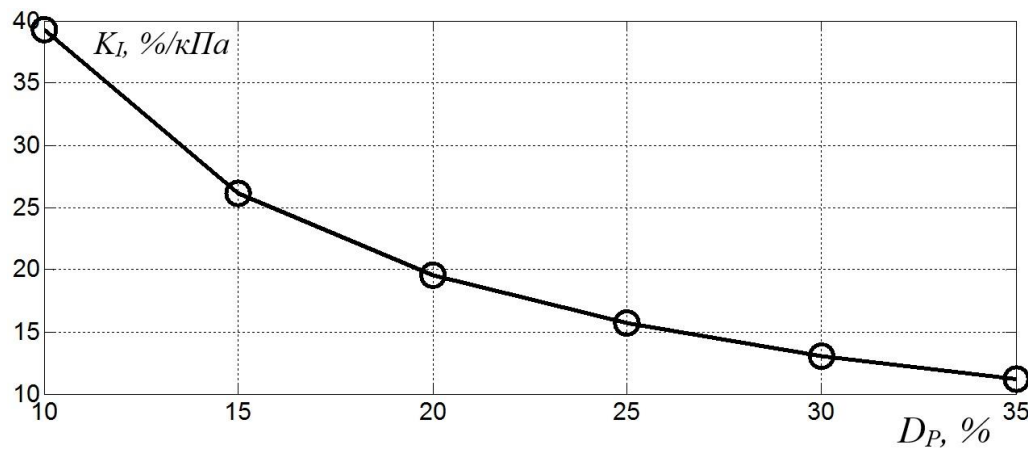


Рис. 8. Залежність коефіцієнта підсилення інтегральної складової частини ПІ-регулятора від відносної величини збурення за умови відсутності перевищення допустимої швидкості руху засувки в газопроводі



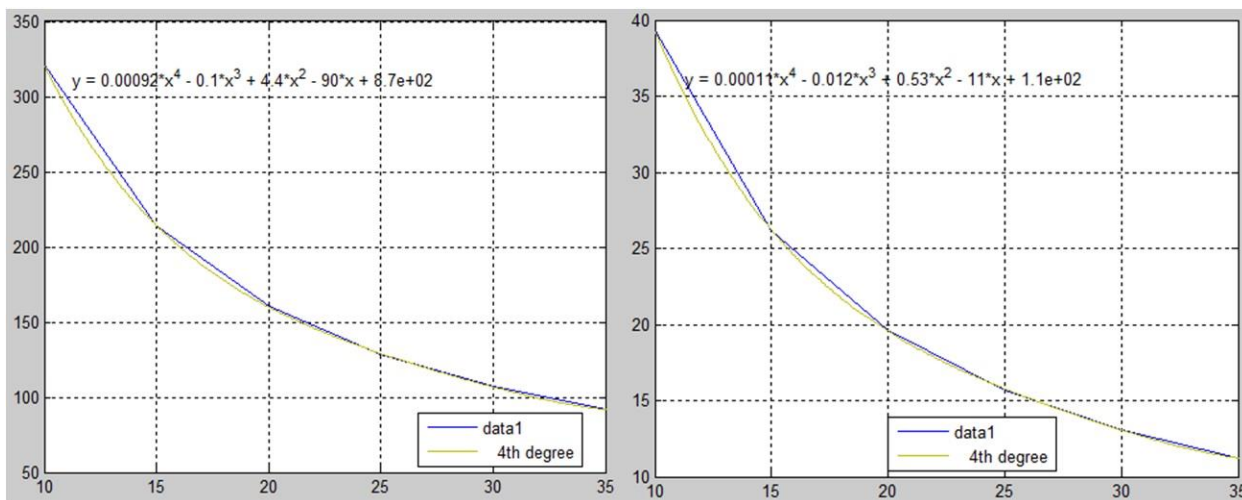


Рис. 9. Результат апроксимації залежності коефіцієнта підсилення пропорційної (а) й інтегральної (б) складових частин ПІ-регулятора від величини збурення

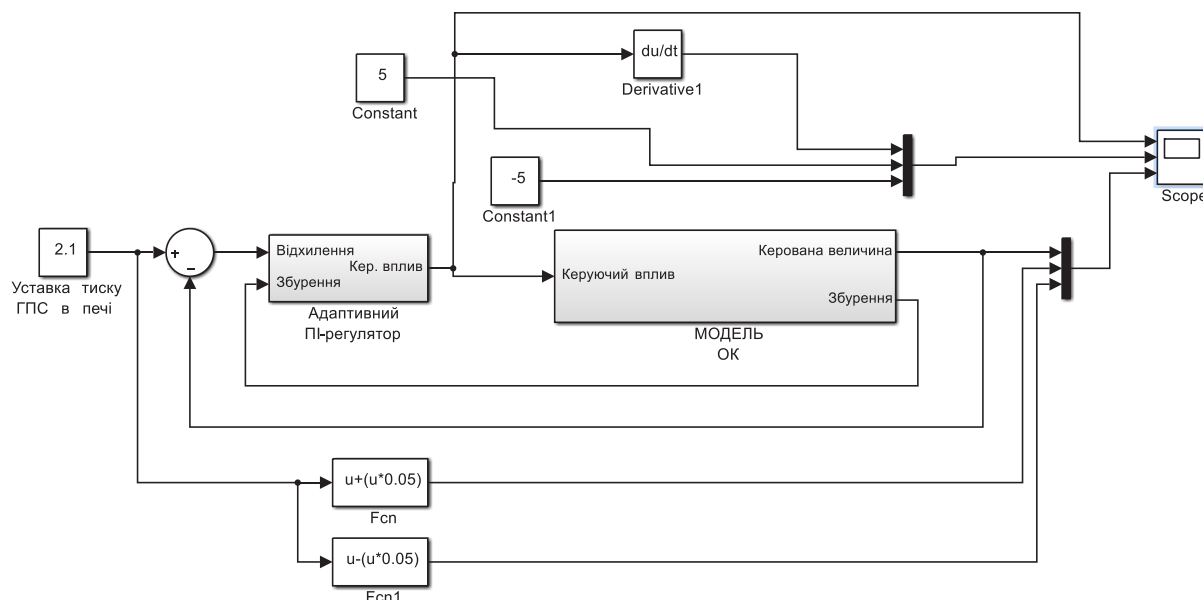


Рис. 10. Структурна схема імітаційної моделі адаптивної системи керування

З аналізу результатів моделювання на рисунках 12–14 можна зробити висновок, що адаптивний оптимальний регулятор працює коректно – незалежно від величини відносного відхилення тиску ГПС перед регулюючим клапаном від свого номінального значення кожний раз фактичне максимальне значення диференціала за часом керівного впливу дорівнює своєму максимальному допустимому значенню – 5%/с.

Також із рисунка 13 можна помітити, що навіть за умови досить значного впливу збурення (відносне відхилення тиску ГПС від номінальної величини становить 33%) система автоматичного керування завдяки забезпеченню її максимальної швидкодії з урахуванням обмеження щодо швидкості зміни в часі керівного

впливу все ж таки утримує керовану величину в рекомендованому діапазоні  $\pm 5\%$  від уставки.

**Висновки.** Результат синтезу системи автоматичного керування тиском ГПС у тунельній печі в застосунку “PID Tuner” є неефективним через неврахування в роботі застосунку обмеження за швидкістю зміни в часі керівного впливу на об’єкт автоматизації. Отже, проведене дослідження системи автоматичного керування з метою пошуку оптимальних параметрів регулятора за критерієм максимальної швидкодії системи керування, але за умови забезпечення відсутності перевищення максимального припустимого рівня диференціала за часом керівного впливу. У процесі дослідження отримані такі наукові результати:

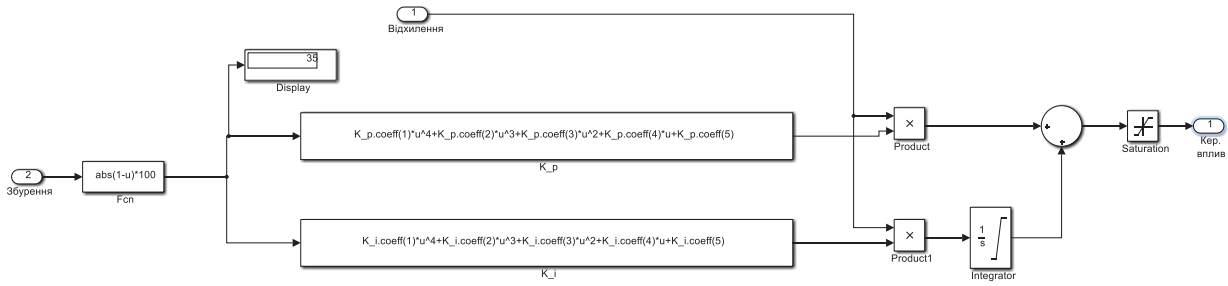


Рис. 11. Схема адаптивного ПІ-регулятора тиску газоповітряної суміші в тунельній печі

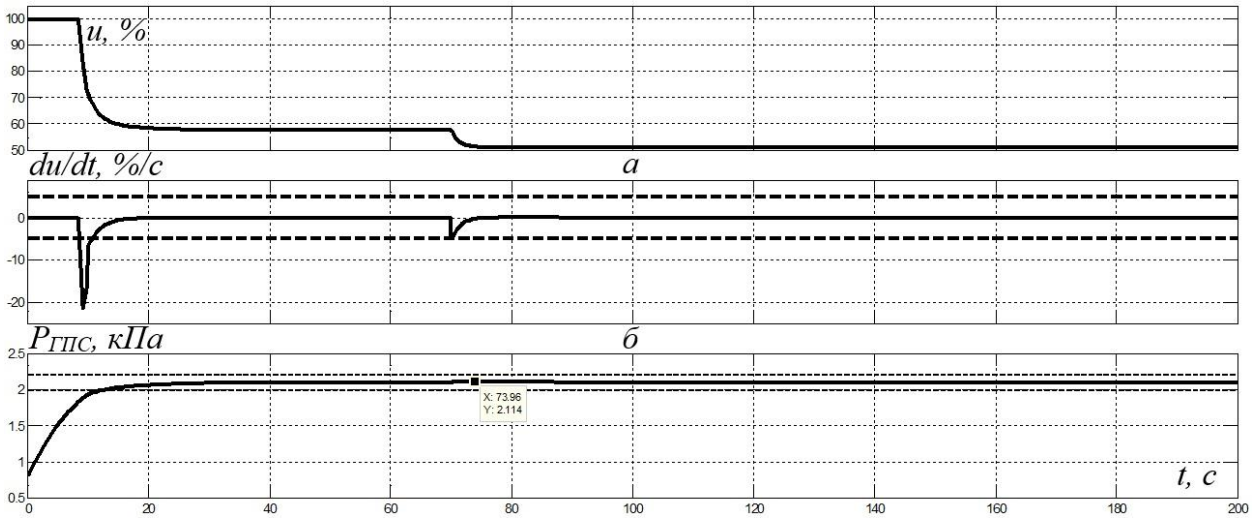


Рис. 12. Результат роботи адаптивної системи автоматичного керування з максимальним рівнем робастності (тиск перед вентилем трубопроводу подачі газоповітряної суміші до 70 с – номінальний, після – на 13% більше): а – зміна в часі керівного впливу; б – його диференціала; в – керованої величини

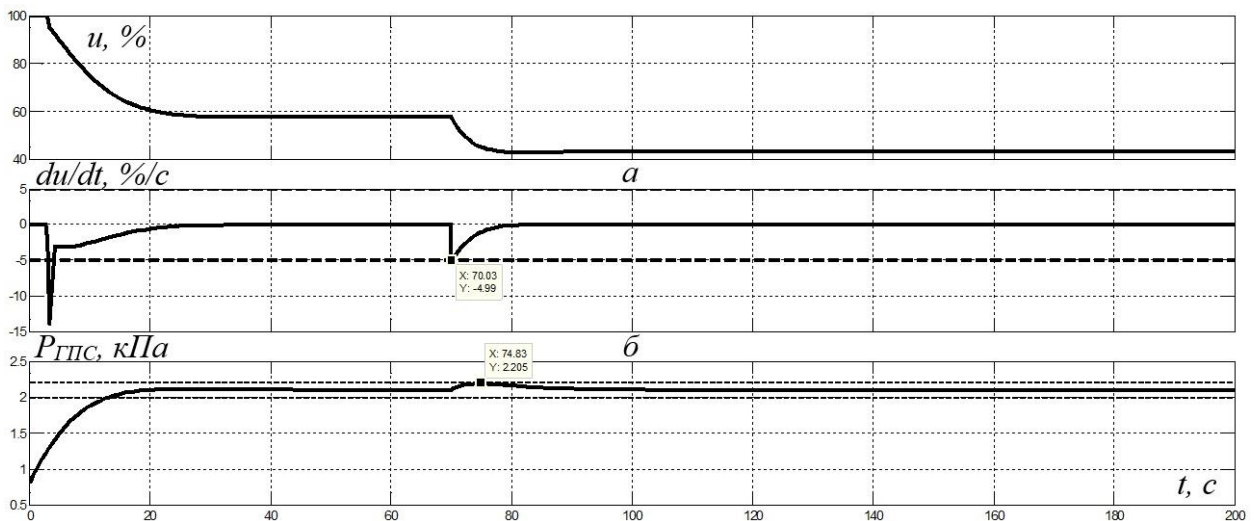
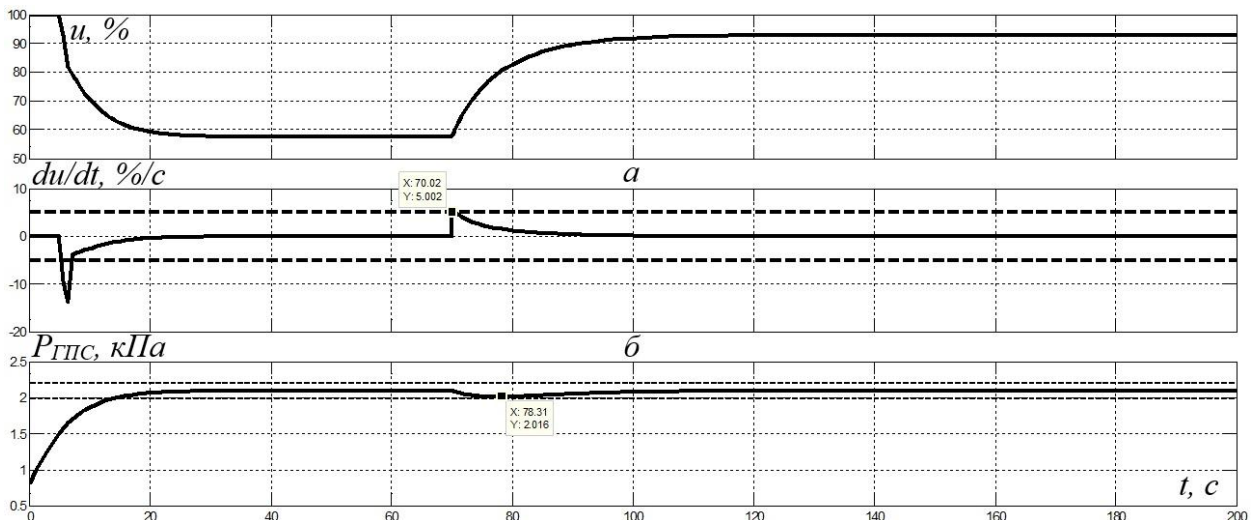


Рис. 13. Результат роботи адаптивної системи автоматичного керування з максимальним рівнем робастності (тиск перед вентилем трубопроводу подачі газоповітряної суміші до 70 с – номінальний, після – на 33% більше): а – зміна в часі керівного впливу; б – його диференціала за часом; в – керованої величини



**Рис. 14.** Результат роботи адаптивної системи автоматичного керування з максимальним рівнем робастності (тиск перед вентилем трубопроводу подачі газоповітряної суміші до 70 с – номінальний, після – на 22% менше): а – зміна в часі керівного впливу; б – його диференціала за часом; в – керованої величини

– для кожного режиму роботи системи автоматичного керування (відпрацювання уставки або компенсація збурення) є свої оптимальні налаштування ПІ-регулятора, що забезпечують максимальну швидкодію системи без перевищення максимального допустимого диференціала за часом керівного впливу;

– для кожної величини збурення є свої оптимальні параметри ПІ-регулятора, за яких максимальне значення фактичного диференціала керівного впливу дорівнює своєму

максимальному допустимому рівню. Установлено, що оптимальні коефіцієнти підсилення як пропорційної складової частини, так і інтегральної складової частини регулятора залежать від величини збурення зворотно й експоненційно;

– встановлено, що з високою точністю (відносна похибка не перевищує 1%) залежності оптимальних параметрів ПІ-регулятора від величини збурення апроксимуються ступеневими поліномами четвертого порядку.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Котуранова Т., Котенко А. Стан та перспективи розвитку ринку керамічних матеріалів. *Економічний простір*. 2020. № 161. С. 43–48.
2. Українська асоціація кераміки CER *Giornale Country Report Ukraine*. 20 квітня 2023 р. URL: <http://ceramic.com.ua/cer-country-report-ukraine/>.
3. В Україні прискорилося падіння одного з головних економічних показників. *Економічна правда*. 18 квітня 2023 р. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2020/04/23/659752/>.
4. Голінко І. Процес випалювання кераміки як об'єкт автоматизації. АТЕП. 2008.
5. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра / В. Шаруда та ін. Національний гірничий університет. 2015.

#### REFERENCES:

1. Koturanova, T. & Kotenko, A.V. (2020). Stan ta perspektyvy rozvytku rynku keramichnykh materialiv [State and prospects of development of the market of ceramic materials]. *Ekonomichnyi prostir*, № 161, P. 43–48.
2. Ukrainska asotsiatsiia keramiky (2023, 20 kvitnia). CER *Giornale Country Report Ukraine*. URL: <http://ceramic.com.ua/cer-country-report-ukraine/>.
3. (2023, 18 kvitnia). V Ukraini pryskorylosia padinnia odnogo z holovnykh ekonomichnykh pokaznykiv [In Ukraine, the decline of one of the main economic indicators accelerated]. *Ekonomichna pravda*. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2020/04/23/659752/>.
4. Holinko, I. (2008). Protse vy paliuvannia keramiky yak obiekt avtomatyzatsii [The process of firing ceramics as an object of automation]. АТЕП.
5. Sharuda, V.H., Tkachov, V.V. & Bublikov, A.V. (2015). Doslidnytska chastyna v kvalifikatsiinii roboti mahistra [The research part of the master's thesis]. Natsionalnyi hirnychiy universytet.