

МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ ЗОНИ ДРУКУ 3-D ПРИНТЕРА¹Інститут технічної механікиНаціональної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: gl_konstruktor@ukr.net²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького 19, 49005,
Дніпро, Україна.

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого 3-d друку відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми. Але інколи в технологічному процесі друкування специфічними матеріалами необхідно додатково нагрівати чи охолоджувати деталь потоком повітря над нею. Для підвищення якості деталей цей процес треба контролювати, але для безпеки виробництва процес 3-d друку спеціальними матеріалами необхідно проводити без присутності людини – оператора. Таким чином, необхідно розробити автоматизовану систему контролю виробництва деталей на 3-d принтері. Ця система повинна включати кілька підсистем, зокрема систему контролю подачі матеріалу через екструдер, систему контролю температури охолодження (чи підігріву) зони друку і, нарешті, аналіз контролю швидкості друку деталі, що впливає на якість деталі. Параметри всіх систем залежать від характеристик матеріалу і форми деталі, що друкується.

В роботі побудована математична модель об'єкта керування: підсистеми нагрівання повітря обдуву зони друку 3-d принтера на основі експериментальних даних, отриманих в реальних умовах. Наведені процедури структурної й параметричної ідентифікації для підсистеми нагрівання повітря обдуву зони друку 3-d принтера. В результаті ідентифікації отримані залежності параметрів моделі від величини зміни керуючого впливу. Аналіз цих залежностей показав, що модель цієї підсистеми як об'єкта автоматичного керування є складною зі змінною структурою та нестационарними параметрами, які змінюються випадковим чином в широкому діапазоні значень. Було виявлено, що весь діапазон зміни керуючого впливу можна розбити на п'ять ділянок, в межах яких структура моделі об'єкта керування не змінюється, а параметри моделі перебувають у відносно невеликих діапазонах зміни значень. З урахуванням цього, сформовані рекомендації щодо процедури подальшого синтезу підсистеми автоматичного керування температурою повітря обдуву. При розробці цієї підсистеми керування процесом друку для забезпечення якості перехідного процесу перевірку значень керуючого впливу необхідно проводити для різних структур моделі зі змінними параметрами в певних діапазонах значень. І розроблену систему керування треба погодити і зв'язати з іншими системами керування процесом друку для створення повної закінченої системи автоматичного керування.

Ключові слова: обдув, об'єкт керування, ідентифікація, керуючий вплив, 3-d принтер.

Innovative technologies of layer-by-layer product manufacturing by fast 3-D printing open up new opportunities for producing parts of a given shape. But sometimes, during the printing process with the use of specific materials, it is necessary to additionally heat or cool the part with an air flow over it. To improve the part quality, this process must be controlled, but for production safety, 3-D printing with special materials must be unmanned. Thus, it is necessary to develop an automated system for controlling the 3-printing process. This system should include several subsystems, in particular, a system for controlling the material supply through the extruder, a system for controlling the cooling (or heating) temperature of the printing zone, and a system for controlling the printing speed, which affects the part quality. The parameters of all the systems depend on the material characteristics and the printed part shape.

This paper presents a mathematical model of a control object: a subsystem for 3-D printing zone air heating control, which is based on experimental data obtained in real conditions, and structural and parametric identification procedures for this subsystem. As a result of the identification, the model parameters were obtained as a function of the control action. The analysis of these relationships showed that the model of this subsystem as an automatic control object is complex with a variable structure and non-stationary parameters that change randomly over a wide range. It was found that the whole range of the control action can be divided into five sections, within which the structure of the control object model does not change and the model parameters change over relatively small ranges. Taking this into account, recommendations were formed regarding the procedure for further synthesis of the subsystem for automatic control of the air blowing temperature. In developing this printing control subsystem, to ensure the quality of the transient process, the control action values must be checked for different model structures with variable parameters over certain ranges. The control system developed must be interfaced with other printing control systems to get a complete finished automatic control system.

Keywords: blowing, control object, identification, control action, 3-D printer.

Вступ. Технологія 3-d друку – це добре спланований і підготовлений процес перетворення віртуальних моделей у фізичні об'єкти. 3-d індустрія

постійно змінюється і народжує нові продукти й технології: в будівництві, в машинобудуванні, ракетобудуванні і навіть в медицині [1 – 3]. Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого 3-d друку відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми. Але інколи для технологічного процесу друкування специфічними матеріалами необхідно додатково нагрівати чи охолоджувати деталь потоком повітря над нею. Для підвищення якості деталей цей процес треба контролювати [4 – 5].

Мета роботи – побудова математичної моделі об'єкта керування підсистеми нагрівання повітря обдуву зони друку 3-d принтера на основі експериментальних даних.

Постановка задачі. З метою отримання математичної моделі об'єкта керування, що описує аналітичний зв'язок в статиці та динаміці між керованою величиною (температура повітря в трубі системи обдуву зони друку) та керуючим сигналом (потужність, що споживає електричний нагрівач) було проведено натурні активні експерименти. Після тривалого перебування об'єкта в певному статичному стані (в нашому випадку нагрівач вимкнений) обігрівач вмикався за умови встановлення певного рівня потужності. Таким чином через зміну керуючого впливу викликався перехідний процес за умови переходу об'єкта керування з одного статичного стану в інший. За результатами експерименту були отримані вибірки за потужністю обігрівача (залишався незмінним протягом перехідного процесу) та за температурою повітря. Одержані данні надають інформацію про зміну у часі цих параметрів. Замірювання потужності й температури здійснювались з кроком у часі 0,5 с. Результати експериментів представлені у графічному вигляді на рис. 1 (позначення на 1, а) і б) – однакові)

З аналізу рис. 1 вже можна зробити попередні висновки щодо приблизно однакової динаміки температури при подачі східчастого керуючого впливу різного рівня, але для доведення цього припущення проведемо структурну й параметричну ідентифікацію об'єкта керування за експериментальними даними для кожного експерименту. У загальному вигляді математична модель, що описує динамічні процеси в системі обдуву за каналом керування “потужність обігрівача – температура повітря в трубі системи обдуву зони друку”, представлена на рис. 2.

Математична модель на рис. 2 за збільшенням керованої величини представлена блоком завдання передаточної функції на нагрівання повітря обдуву (W_{Oy1}), блоком транспортного запізнення за каналом нагрівання зони $T31$ та нелінійним елементом для врахування нелінійності статичної характеристики за каналом нагрівання зони $HE1$.

Математична модель на рис. 2 за зменшенням керованої величини представлена блоком завдання передаточної функції на охолодження повітря обдуву (W_{Oy2}) за рахунок зменшення потужності обігрівача, блоком транспортного запізнення за каналом охолодження зони $T32$ та нелінійним елементом для врахування нелінійності статичної характеристики за каналом охолодження зони $HE2$.

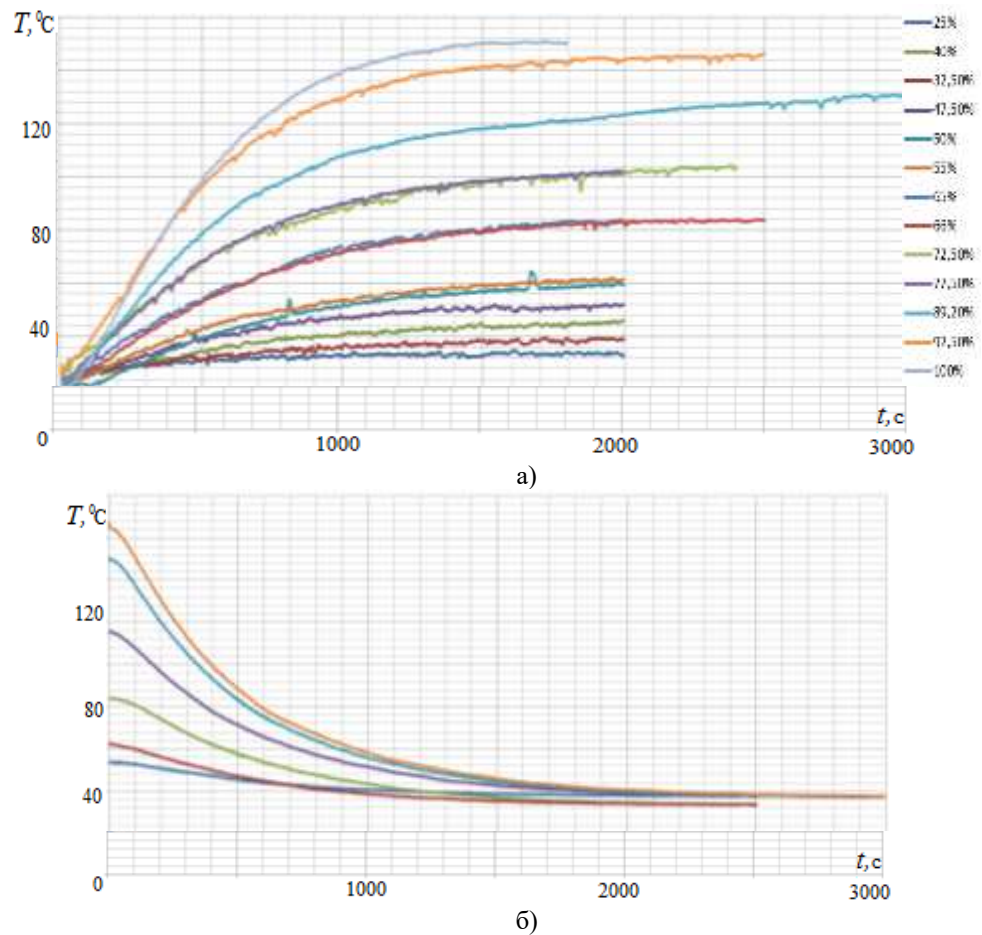


Рис. 1 – Зміна у часі температури повітря в трубі системи обдуву зони друку в реальних умовах при східчистій зміні потужності обігрівача (рівні потужності у відносних одиницях показані в правій частині рисунка) за умови нагрівання (а) та охолодження (б) повітря

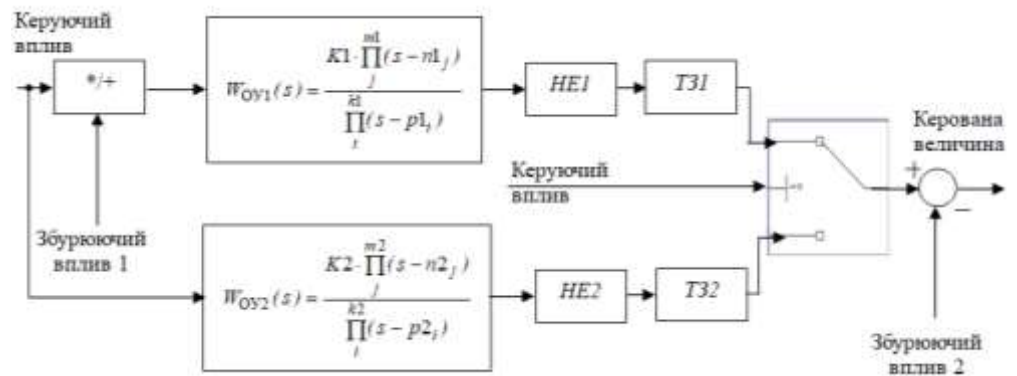


Рис. 2 – Структурна схема моделі об'єкта керування

Виконавчим елементом для досліджуваної системи автоматичного керування температурою повітря в трубі системи обдуву зони друку принтера є пристрій, що змінює струм через нагрівальний елемент обігрівача. Перемикання між складовими моделями відбувається за умовою перевірки, чи дорівнює керуючий вплив нулю. Якщо так, включається активна складова моделі,

яка імітує процес нагрівання, а якщо ні – складова, яка імітує процес охолодження. Механізм введення у модель збурюючих впливів реалізується через блок підсумовування або множення керуючого сигналу на перший збурюючий вплив (рис. 2), яким може бути порушення герметичності повітропроводу для транспортування повітря обдуву. Також механізм введення в модель збурюючих впливів реалізується через суматор на виході моделі об'єкта керування (рис. 2). При цьому відбувається підсумовування керованої величини з другим збурюючим впливом, яким є зміна температури повітря обдуву не через увімкнення обігрівача (порушення герметичності повітропроводу тощо).

Ще один тип збурення буде врахований через зміну коефіцієнта пропорційності за каналом керування $K1$, причиною чого може бути коливання потужності енергомережі тощо.

За умови структурної ідентифікації об'єкта керування необхідно провести:

- перевірку об'єкта керування на симетричність щодо реагування на керуючий вплив;
- перевірку об'єкта керування на лінійність його статичної характеристики;
- перевірку об'єкта керування на наявність транспортного запізнення у перехідному процесі на його виході;
- аналіз кількості та типу нулів та полюсів передаточної функції об'єкта керування.

Вихідними даними для структурної та параметричної ідентифікації є експериментальні вибірки за температурою та потужністю, що отримані за умови увімкнення на повну потужність (рис. 1), а потім його вимкнення.

Для перевірки об'єкта керування на симетричність щодо реагування на керуючий вплив на мові програмування програми Matlab створена програма, що змінює напрям зміни керованої величини для одної з кривих розгону, та визначає різницю експериментальних кривих для усіх точок заміру (програма 1).

Результат виконання програми 1 показаний на рис. 3 та рис. 4.

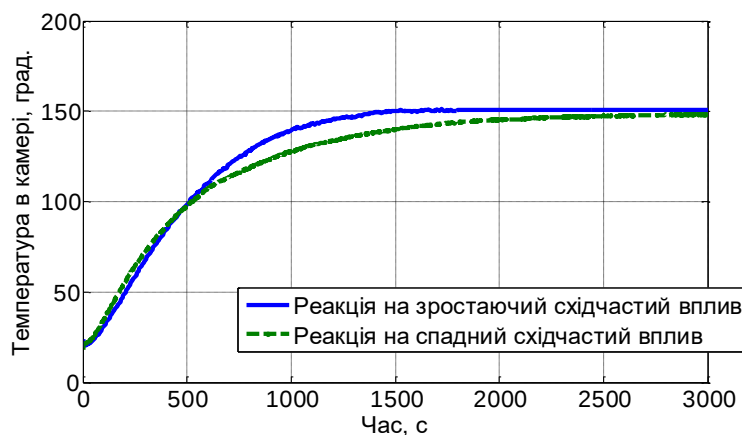


Рис. 3 – Суміщені експериментальні криві розгону

З рис. 3 видно, що хоча за тривалістю перехідні процеси за умови нагрівання й охолодження повітря обдуву приблизно однакові, форми кривих є різними, що свідчить про різну динаміку температури та, відповідно, відмінність моделей, які імітують процес нагрівання та охолодження повітря обдуву.

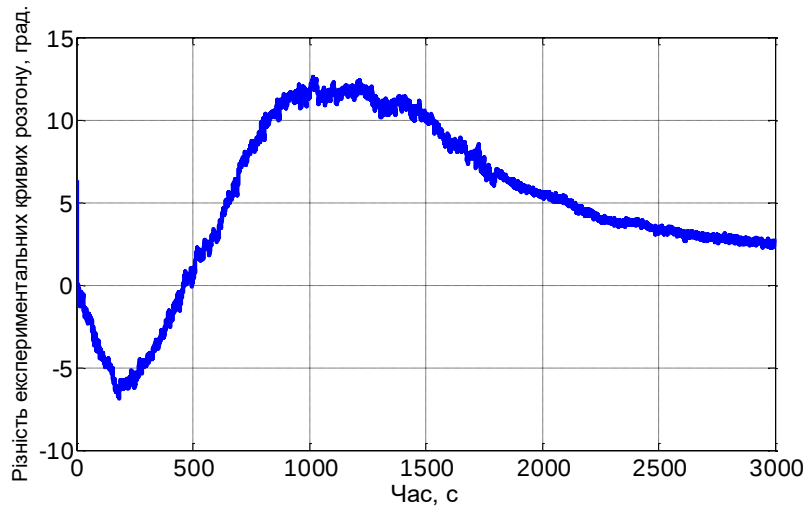


Рис. 4 – Графік різності експериментальних кривих розгону за умов зростаючого та спадного керуючого впливів

Суттєву відмінність динаміки температури при нагріванні й охолодженні повітря обдуву підтверджує рис. 4, на якому видно, що на середній часовій ділянці перехідного процесу, коли має місце суттєва відмінність динаміки температури, відхилення температур повітря обдуву при його нагріванні та охолодженні перевищує 10 градусів за Цельсієм в абсолютних одиницях.

Для оцінки збіжності експериментальної кривої розгону за умови зростаючого керуючого впливу та перетвореної експериментальної кривої розгону за умови спадного керуючого впливу за інтегральним критерієм використовуємо інтегральну оцінку за нормованим середньоквадратичним відхиленням. Тож, можна зробити висновок, що модель об'єкта керування є несиметричною щодо реагування на напрям зміни керуючого впливу, та потрібно створювати дві окремі її складові, одна з яких імітує процес нагрівання повітря обдуву, а інша – процес охолодження.

Щодо перевірки об'єкта керування на наявність транспортного запізнення у перехідному процесі на його виході, із рис. 1, а) видно, що між моментами подачі керуючого впливу та моментом початку явної зміни температури повітря в трубі системи обдуву зони друку (приблизно 500 с) є явно виражена затримка. Особливо це проявляється для експериментальних кривих розгону для рівня потужності 50 % та 100 %. Таким чином, можна зробити висновок, що в перехідному процесі на виході об'єкта керування за умови збільшення керуючого впливу є затримка у часі зміни керованої величини, а в моделі об'єкта керування присутня ланка транспортного запізнення (*TZI* на рис. 2).

Аналогічний висновок можна зробити й для випадку східчастого зменшення керуючого впливу. Час транспортного запізнення буде визначений пізніше за умови параметричної ідентифікації об'єкта керування. За умови аналізу присутності нелінійності статичної характеристики об'єкта керування за каналом збільшення керуючого впливу будуть використані експериментальні дані на рис. 1, а).

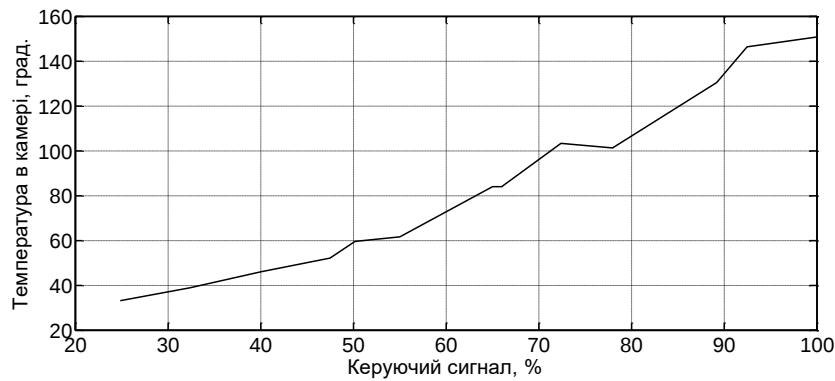


Рис. 5 – Експериментальна статична характеристика об'єкта керування для випадку збільшення керуючого впливу

Для аналізу присутності нелінійності статичної характеристики об'єкта керування на рис. 5 застосуємо спеціальний інструмент програми Matlab “Basic Fitting” (рис. 6).

З рис. 6 можна зробити висновок, що лінійна апроксимація призводить до суттєвих помилок – як за максимальним відхиленням графіку рівняння лінійної регресії від експериментальної статичної характеристики (до 13 °C в абсолютних одиницях), так і за евклідовою нормою вектора відхилень (25,3 C в абсолютних одиницях).

Перехід до апроксимації експериментальної статичної характеристики поліномом другого порядку значно покращує точність апроксимації (максимальне відхилення – до 8 °C, та евклідова норма вектора відхилень – до 15,1°C). Перехід до апроксимації експериментальної статичної характеристики поліномом третього порядку точність апроксимації суттєво не покращує.

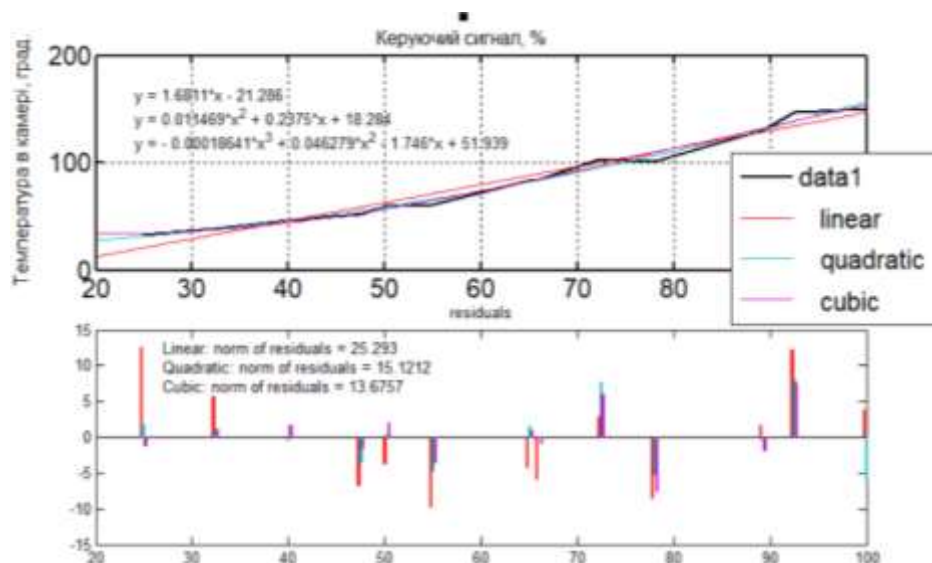


Рис. 6 – Результат апроксимації експериментальної статичної характеристики об'єкта керування поліномом першого, другого та третього порядків

Таким чином, статичну характеристику об'єкта керування за нагріванням можна вважати нелінійною, а у структурі моделі об'єкта керування буде присутній нелінійний елемент *HE* (рис. 2) зі статичною залежністю вихідної величини від вхідної, що описується ступеневим поліномом другого порядку (рис. 6).

За умови аналізу присутності нелінійності статичної характеристики об'єкта керування за каналом зменшення керуючого впливу будуть використані експериментальні дані (рис. 1, б)). З рис.1, б) видно, що під час охолодження повітря обдуву температура зменшується до рівня, який відповідає температурі зовнішнього середовища, і це значення приблизно однакове для всіх експериментів. Тобто, величина зміни температури при охолодженні буде така сама, як і за умови нагрівання, з урахуванням того, що температура зовнішнього середовища суттєво не змінюється протягом тривалого часу, що відповідає дійсності. Таким чином, в складовій моделі об'єкта керування, яка імітує охолодження повітря обдуву, може бути використане таке саме рівняння для опису статичної характеристики за каналом керування, яке було визначене для першої складової моделі, що імітує нагрівання повітря обдуву.

Аналіз кількості та типу нулів і полюсів передаточної функції об'єкта керування можемо зробити тільки приблизно на основі експериментальних даних на рис. 1. З графіків експериментальних кривих розгону цього рисунка видно, що фактично всі вони мають експоненціальну форму перехідних процесів з самовирівнюванням. Якщо й спостерігається незначний один перегин кривої на початковій ділянці (характерно для випадків рівня потужності вище 90 %), це може бути пов'язано з наявністю транспортного запізнення. Тобто, ця початкова ділянка перехідного процесу, яка займає лише десятю долю всього часу, може бути однаково точно описана як коливальною ланкою, так і послідовно з'єднаними аперіодичною ланкою та ланкою транспортного запізнення. Це буде перевірено далі у ході параметричної ідентифікації об'єкта керування шляхом перебору різних структур моделі.

Отже, за результатом проведеного аналізу експериментальних кривих на рис. 1 можна зробити висновок, що кількість полюсів у передаточній функції об'єкта керування як для нагрівання повітря обдуву, так і для його охолодження – один чи два, і що вони є дійсними. Також, відносно проста форма перехідних процесів за умови відсутності низькочастотних коливань керованої величини, а також прагнення керованої величини до певного рівня говорять про відсутність у передаточної функції об'єкта керування нулів.

Метою параметричної ідентифікації об'єкта керування є визначення параметрів його моделі у вигляді передаточної функції за каналом «потужність обігрівача – температура повітря обдуву». При цьому за результатами структурної ідентифікації за основу взята передаточна функція виду:

$$W_{\dot{\theta}}(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)},$$

де параметри, що необхідно визначити, це коефіцієнт підсилення K , перша та друга постійні часу T_1 та T_2 , а також час транспортного запізнення τ .

Проведемо параметричну ідентифікацію першої частини моделі об'єкта керування, що відповідає за опис реакції об'єкта на збільшення керуючого впливу (процес нагріву повітря обдуву). Цю процедуру проведемо для кожної отриманої експериментальної кривої розгону.

Виконаємо параметричну ідентифікацію для рівня потужності 24,9 %.

Введемо початкові значення параметрів передаточної функції об'єкта керування, що необхідно визначити: $K=1$; $T_1=500$; $T_2=1$; $\tau=100$;

Вихідними даними для ідентифікації є два вектори: керуючого сигналу P_{24_9} та керованої величини T_{24_9} , що сформовані на основі експериментальних кривих розгону на рис. 1.

Далі для коректного знаходження коефіцієнта K та транспортного запізнення τ проведемо нормування вектору T_{24_9} , видаливши статичний початковий зсув, та після цього прирівнявши від'ємну температуру до нуля.

Для параметричної ідентифікації об'єкта керування використаємо інструмент додатку Simulink програми Matlab «Control and Estimation Tool Manager».

Для цього у додатку Simulink створимо схему моделі об'єкта керування (рис. 7), що відповідає його прийнятій передаточній функції (параметри задамо через їх імена неявно).

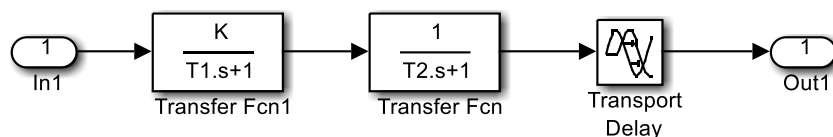


Рис. 7 – Схема моделі об'єкта керування для його параметричної ідентифікації

Введення вихідних даних для параметричної ідентифікації об'єкта керування у вигляді нормованих векторів P_{24_9} та $T_{24_9_n}$ відбувається у пункті «Transient Data» інструменту «Control and Estimation Tool Manager», в якому також вказується крок заміру величин у часі (рис. 8).

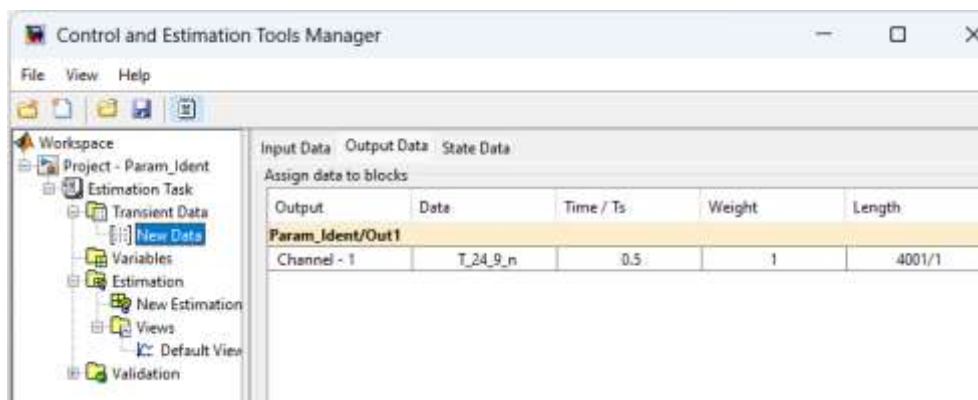
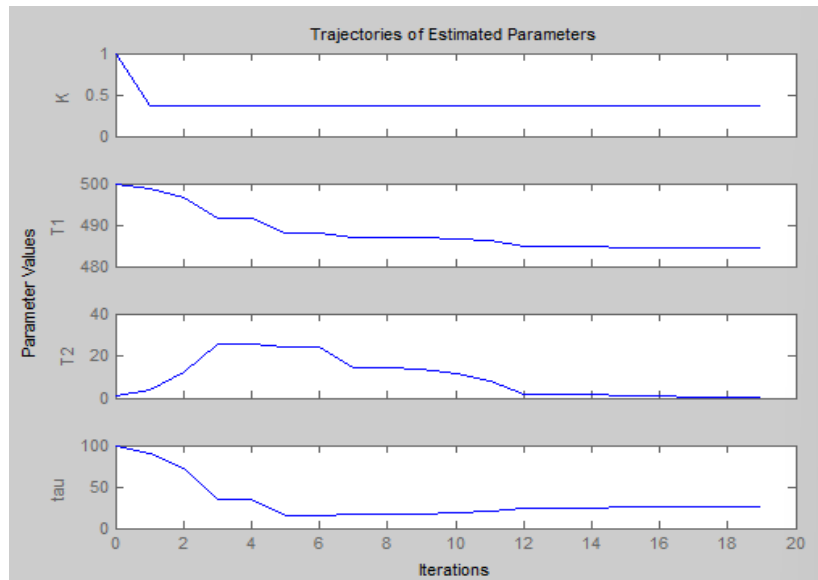


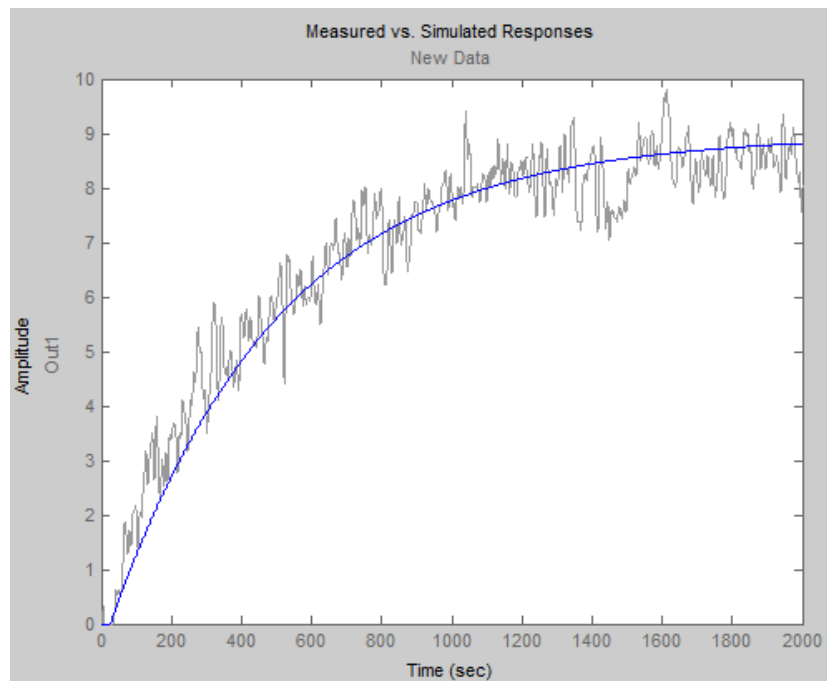
Рис. 8 – Введення вихідних даних в інструмент «Control and Estimation Tool Manager» для параметричної ідентифікації об'єкта керування

Далі у пункті «Variables» інструменту «Control and Estimation Tool Manager» вводяться імена параметрів передаточної функції об'єкта керування, що ідентифікуються, та які вже занесені з початковими значеннями у робочий простір програми Matlab. Далі в інструменті «Control and Estimation Tool Manager» створюємо новий проєкт параметричної ідентифікації та обираємо параметри, які потрібно визначити.

Результат параметричної ідентифікації об'єкта керування за допомогою інструменту «Control and Estimation Tool Manager» показаний на рис. 9 та рис. 10.



a)

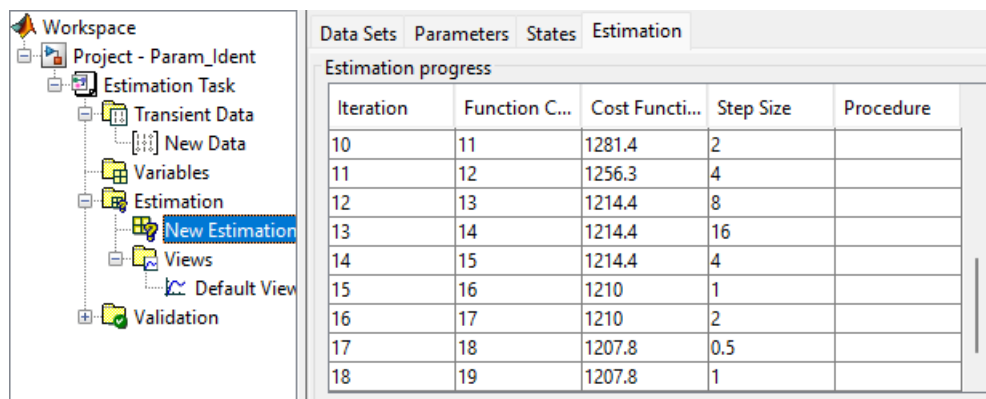


б)

Рис. 9 – Результат параметричної ідентифікації об'єкта керування: значення шуканих параметрів передаточної функції на різних кроках ідентифікації а); експериментальна крива розгону та графік моделі б)

З рис. 9 витікає, що за 18 ітерацій методом найменших квадратів досягнута не достатньо добра збіжність експериментальної кривої з графіком динамічної моделі об'єкта керування на основі вище наведеної передаточної функції, в основному через наявність високочастотного шуму. Це підтверджує рис. 10, на якому видно, що функція витрат "Cost Function" має досить

велике значення 1207,8, що є показником незначної збіжності експериментальної кривої з графіком динамічної моделі об'єкта керування.



a)

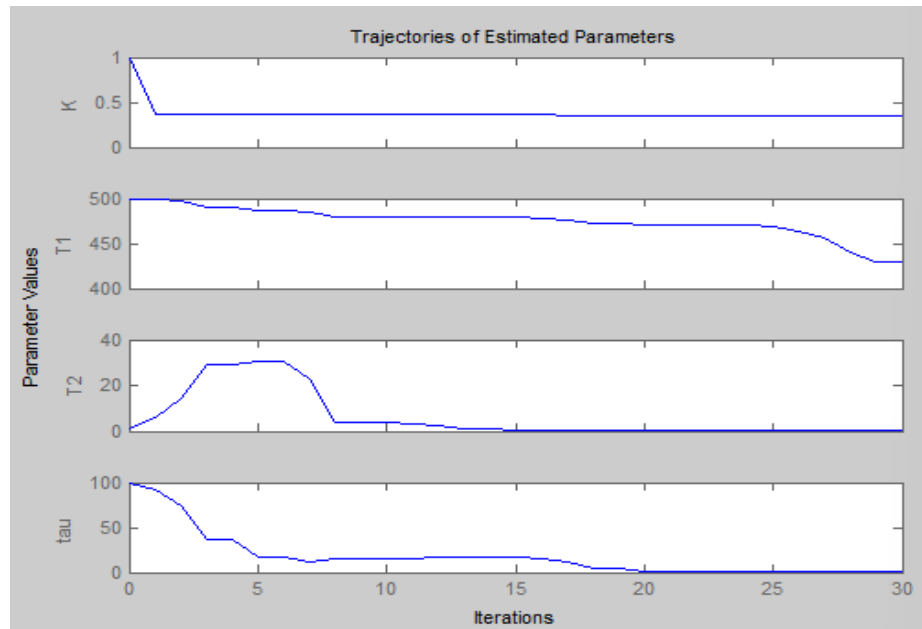
Параметр	Значення	Мінімальне	Максимальне	Типове значення
K	0,36018	-Inf	+Inf	K
T1	484,43	-Inf	+Inf	T1
T2	0,19968	-Inf	+Inf	T2
tau	25,758	-Inf	+Inf	tau

б)

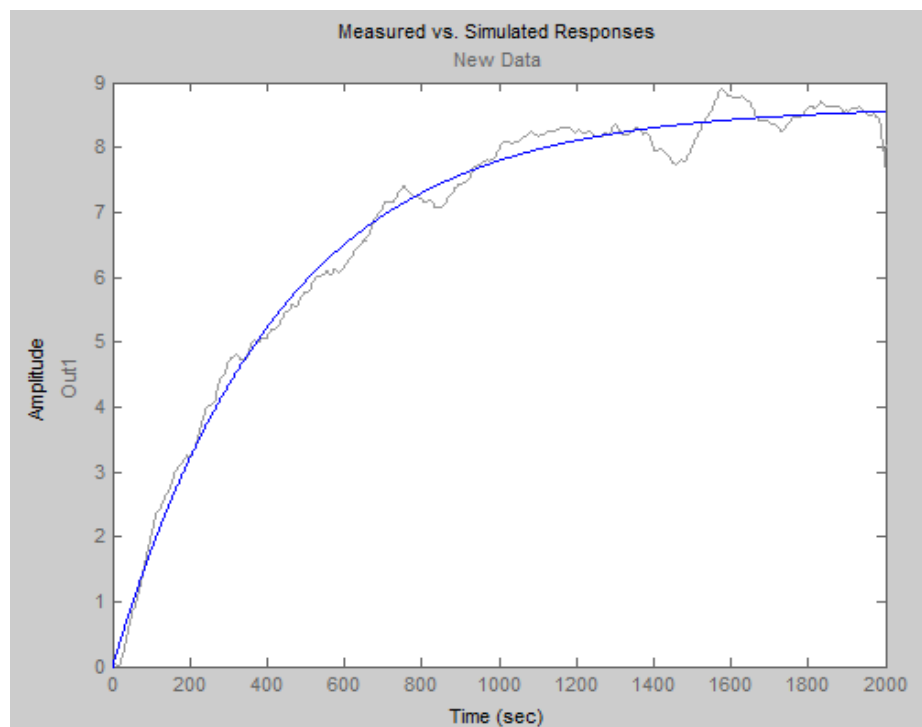
Рис. 10 – Результат параметричної ідентифікації об'єкта керування: вікно оцінювання процедури ідентифікації (а) та визначені параметри передаточної функції (б)

Тому з метою покращення точності ідентифікації проведемо попередню фільтрацію високочастотних шумів методом ковзного усереднення. Результат параметричної ідентифікації моделі об'єкта керування після попередньої фільтрації вибірки за температурою показаний на рис. 11 та рис. 12.

Отже, функція витрат "Cost Function" зменшилась в рази з 1207,8 до 192,6, що підтвердило ефективність введення попередньої фільтрації експериментальних даних. За результатами параметричної ідентифікації об'єкта керування можна зробити висновок, що динамічною моделлю принтера за каналом керування «потужність обігрівача – температура повітря в трубці системи обдуву зони друку» є передаточна функція першого порядку з коефіцієнтом підсилення $K = 0,35$ та постійною часу $T1 = 429,3$ с (другою постійною часу та часом транспортного запізнення можна знехтувати через їх мале значення).



a)



б)

Рис. 11 – Результат параметричної ідентифікації об'єкта керування за умови попередньої фільтрації експериментальних даних: значення шуканих параметрів передаточної функції на різних кроках ідентифікації (а) та експериментальна крива розгону та графік моделі (б)

Estimation progress				
Iteration	Function C...	Cost Functi...	Step Size	Procedure
21	22	250.15	8	
22	23	250.15	2	
23	24	247.53	0.5	
24	25	244.22	1	
25	26	237.71	2	
26	27	229.21	4	
27	28	214.68	8	
28	29	196.32	16	
29	30	192.66	10.67	

a)

Параметр	Значення	Мінімальне	Максимальне	Типове значення
K	0,34673	-Inf	+Inf	K
T1	429,31	-Inf	+Inf	T1
T2	0,055101	-Inf	+Inf	T2
tau	0,34871	-Inf	+Inf	tau

б)

Рис. 12 – Результат параметричної ідентифікації об'єкта керування за умови попередньої фільтрації експериментальних даних: вікно оцінювання процедури ідентифікації (а) та визначені параметри передаточної функції (б)

Аналогічним чином проведена параметрична ідентифікація моделі об'єкта керування для інших рівнів потужності обігрівача як для процесу нагріву повітря обдуву, так і його охолодження. Результати ідентифікації показано на рис. 13–16. З метою більш зручного аналізу результати ідентифікації представлені окремими графіками зміни параметрів моделі об'єкта керування (коефіцієнт пропорційності за каналом керування, постійна часу (перша та друга) та транспортне запізнення) в залежності від рівня потужності обігрівача.

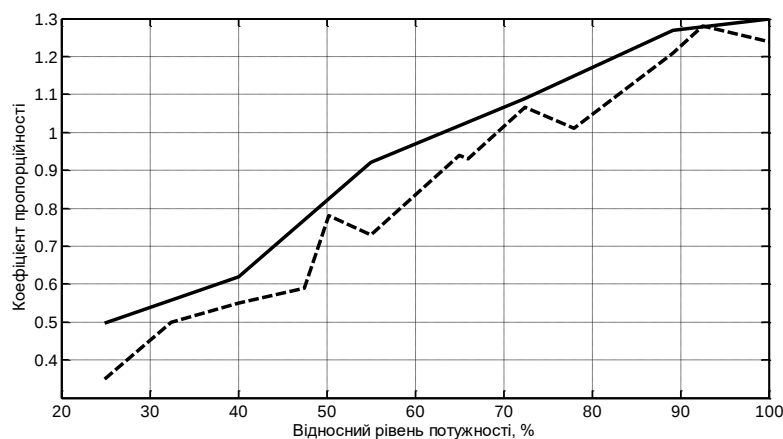


Рис. 13 – Залежність коефіцієнта пропорційності за каналом керування від відносного рівня потужності (суцільна лінія – процес охолодження, пунктирна – нагрівання повітря обдуву)

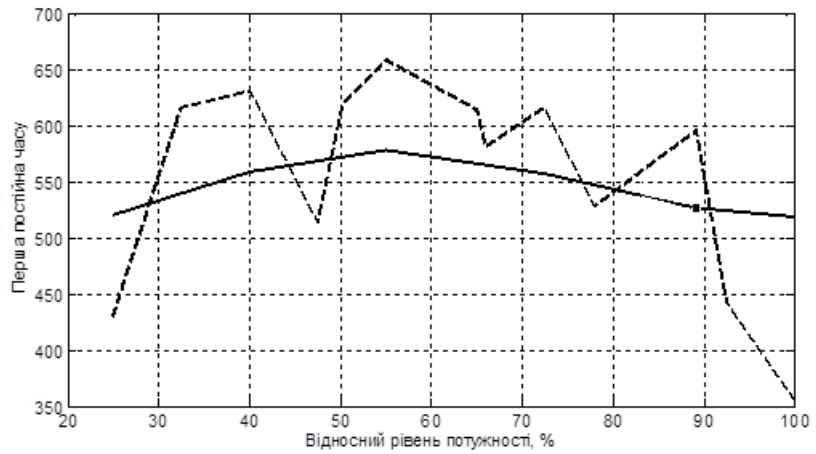


Рис. 14 – Залежність першої постійної часу від відносного рівня потужності (суцільна лінія – процес охолодження, пунктирна – нагрівання повітря обдуву)

Результати ідентифікації показали, що зміна параметрів моделі в залежності від величини зміни керуючого впливу для випадку охолодження повітря обдуву мають дещо інший характер у порівнянні з випадком нагрівання повітря. При збільшенні величини відхилення керуючого впливу більша постійна часу змінюється несуттєво у вузькому діапазоні значень від 520 с до 580 с (рис. 14), а менша постійна часу зменшується майже за лінійним законом зі 120 с до 20 с (рис. 15).

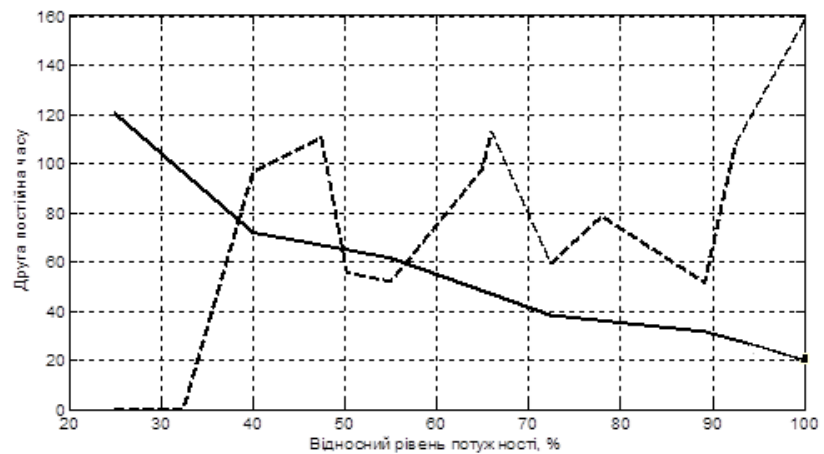


Рис. 15 – Залежність другої постійної часу від відносного рівня потужності (суцільна лінія – процес охолодження, пунктирна – нагрівання повітря обдуву)

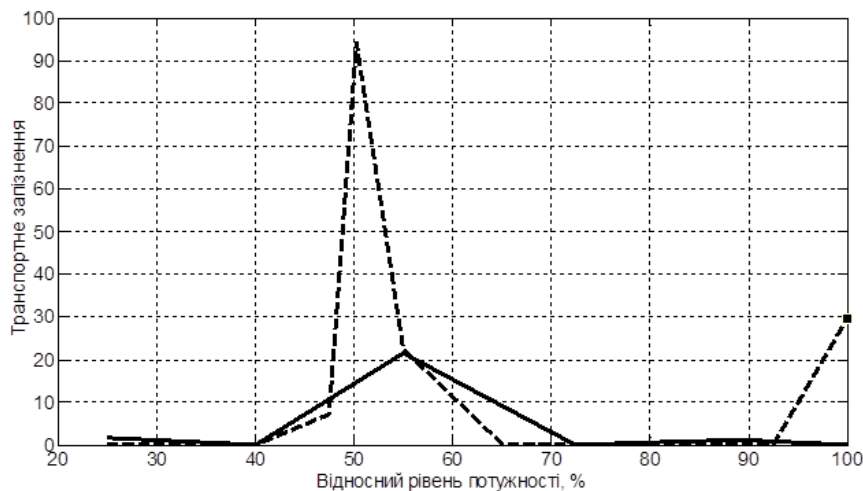


Рис. 16 – Залежність часу транспортного запізнення від відносного рівня потужності (суцільна лінія – процес охолодження, пунктирна – нагрівання повітря обдуву)

Щодо коефіцієнту підсилення та транспортного запізнення, то ці залежності для випадку охолодження повітря приблизно такі самі, як й для випадку його нагрівання. Коефіцієнт підсилення збільшується майже за лінійним законом при збільшенні величини зміни керуючого впливу (рис. 15), а транспортне запізнення залишається несуттєвим, окрім діапазону значень за віссю абсцис від 50 % до 60 % (рис. 16).

Як видно з результатів ідентифікації на рис. 17, маємо суттєво різні коефіцієнти підсилення за каналом керування для випадків нагрівання й охолодження повітря обдуву, що пов'язано з різними умовами експерименту, зокрема з різною температурою зовнішнього середовища.

За підсумком ідентифікації моделі об'єкта керування для обох випадків (як нагрівання повітря обдуву, так і його охолодження), на основі порівняльного аналізу залежностей на рис. 13 – 16 можна зробити такі висновки:

- весь діапазон зміни керуючого впливу можна розбити на декілька ділянок, в межах яких структура моделі об'єкта керування не змінюється, а параметри моделі перебувають у відносно невеликих діапазонах зміни значень;
- перша ділянка відповідає діапазону зміни значень керуючого впливу від 20 % до 30 %. На цій ділянці нагрівання повітря описує аперіодична ланка з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,37 - 0,5$; $T = 430 \text{ с} - 520 \text{ с}$, а охолодження – дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,37 - 0,5$; $T_1 = 520 \text{ с} - 550 \text{ с}$; $T_2 = 100 \text{ с} - 120 \text{ с}$;
- друга ділянка відповідає діапазону зміни значень керуючого впливу від 30 % до 45 %. На цій ділянці нагрівання повітря описують дві послідовні аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,5 - 0,6$; $T_1 = 520 \text{ с} - 630 \text{ с}$; $T_2 = 55 \text{ с} - 110 \text{ с}$, а охолодження – також дві послідовно

з'єднані аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,5 - 0,6$; $T1 = 540 \text{ с} - 560 \text{ с}$; $T2 = 70 \text{ с} - 100 \text{ с}$;

– третя ділянка відповідає діапазону зміни значень керуючого впливу від 45 % до 65 %. На цій ділянці нагрівання повітря описують дві послідовні аперіодичні ланки з транспортним запізненням з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,6 - 0,9$; $T1 = 520 \text{ с} - 660 \text{ с}$; $T2 = 55 \text{ с} - 110 \text{ с}$; $\tau = 10 \text{ с} - 95 \text{ с}$; а охолодження – також дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки з транспортним запізненням з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,6 - 0,9$; $T1 = 520 \text{ с} - 630 \text{ с}$; $T2 = 50 \text{ с} - 70 \text{ с}$; $\tau = 5 \text{ с} - 25 \text{ с}$;

– четверта ділянка відповідає діапазону зміни значень керуючого впливу від 65 % до 95 %. На цій ділянці нагрівання повітря описують дві послідовні аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,9 - 1,2$; $T1 = 440 \text{ с} - 610 \text{ с}$; $T2 = 50 \text{ с} - 110 \text{ с}$, а охолодження – також дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 0,9 - 1,2$; $T1 = 520 \text{ с} - 570 \text{ с}$; $T2 = 30 \text{ с} - 50 \text{ с}$;

– п'ята ділянка відповідає діапазону зміни значень керуючого впливу від 95 % до 100 %. На цій ділянці нагрівання повітря описують дві послідовні аперіодичні ланки з транспортним запізненням з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 1,2 - 1,3$; $T1 = 350 \text{ с} - 440 \text{ с}$; $T2 = 100 \text{ с} - 160 \text{ с}$; $\tau = 20 \text{ с} - 30 \text{ с}$; а охолодження – дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки з такими діапазонами зміни параметрів: $K = 1,2 - 1,3$; $T1 = 510 \text{ с} - 530 \text{ с}$; $T2 = 20 \text{ с} - 30 \text{ с}$;

– за умови подальшого синтезу системи автоматичного керування температурою повітря обдуву зони друку принтера перевірка розрахованого регулятора щодо забезпечення заданих критеріїв якості перехідного процесу повинна бути здійснена для кожної вище зазначеної ділянки діапазону зміни значень керуючого впливу, тобто для різних структур моделі зі змінними параметрами в певних діапазонах значень.

Математична модель об'єкта керування має бути реалізована з урахуванням результатів параметричної й структурної ідентифікації на основі схеми на рис. 2 в застосунку Simulink програми MATLAB. За структурою модель є не дуже складною – вона складається з двох частин, перша з яких імітує нагрівання повітря обдуву зони друку принтера, а друга – охолодження повітря. Але, складністю моделі є те, що ці дві частини працюють по чергові у часі в залежності від напрямку зміни керуючого впливу. Тобто, в поточний момент активною може бути тільки одна з двох частин моделі. Через це виникають неузгодженості між вхідними та вихідними сигналами різних частин моделі. Перед перемиканням ці сигнали мають синхронізуватись в часі, а це потребує додаткових рішень щодо фіксування в часі та передачі на іншу частину моделі температури, яка була перед перемиканням, нормування керуючого сигналу на вході частин моделі, узгодження роботи ланок транспортного запізнення тощо. Ці особливості реалізації моделі, що пов'язані з її структурою на рис. 2, роблять її занадто складною. Тому запропоновано дещо змінити підхід щодо реалізації структури моделі, що наведена на рис. 2. Замість представлення моделі різними частинами, що описують окремі фізичні процеси

нагрівання й охолодження повітря обдуву, пропонується використовувати одну частину моделі, але зі змінними параметрами. При цьому структура моделі враховує всі можливі комбінації динамічних ланок, які були визначені в ході процедури ідентифікації, а виключення тих чи інших ланок відбувається через завдання відповідних параметрів. Наприклад, аперіодичну ланку можна виключити, прирівнявши постійну часу до нуля та задавши коефіцієнт підсилення рівним одиниці. За умови реалізації такого підходу схема моделі об'єкта керування, яка створена в застосунку Simulink, буде такою, як на рис. 17.

Для того, щоб змінювати параметри моделі під час моделювання в залежності від напряму зміни керуючого впливу аперіодичні ланки представлені моделями у просторі стану. Таким чином, коефіцієнти підсилення та постійні часу цих ланок наразі є не внутрішніми параметрами блоків, а вхідними сигналами, які можна змінювати під час моделювання.

Для зміни часу транспортного запізнення в моделі об'єкта керування використаний блок "Variable time delay" (рис. 17). Параметри моделі визначаються s-функцією "Switcher".

В представленому варіанті s-функції процес нагріву повітря обдуву описується двома послідовними аперіодичними ланками з коефіцієнтом підсилення 0,7 та постійними часу 400 с та 50 с. А процес охолодження повітря обдуву описаний однією аперіодичною ланкою з постійною часу 500 с й аналогічним коефіцієнтом підсилення, а також ланкою транспортного запізнення з відповідним часом 40 с.

Результат роботи моделі об'єкта керування представлений на рис. 18. Динаміка температури при нагрівання повітря обдуву до 2000 с моделювання, та динаміка охолодження повітря після зменшення керуючого впливу зі 100 % до 50 % є різною, та відповідає заданим в s-функції параметрам моделі. В перехідному процесі при нагріванні повітря помітний невеликий перегин на його початку через наявність другої аперіодичної ланки, чого немає в перехідному процесі при охолодженні повітря обдуву. З іншої сторони, у перехідному процесі при охолодженні повітря помітне транспортне запізнення, якого немає в перехідному процесі при нагріванні повітря обдуву.

Таким чином, результати моделювання підтвердили наявність закладеного в модель об'єкта керування механізму зміни структури й параметрів моделі прямо під час моделювання в залежності від того, який процес наразі має місце – нагрівання чи охолодження повітря обдуву зони друку 3-d принтера.

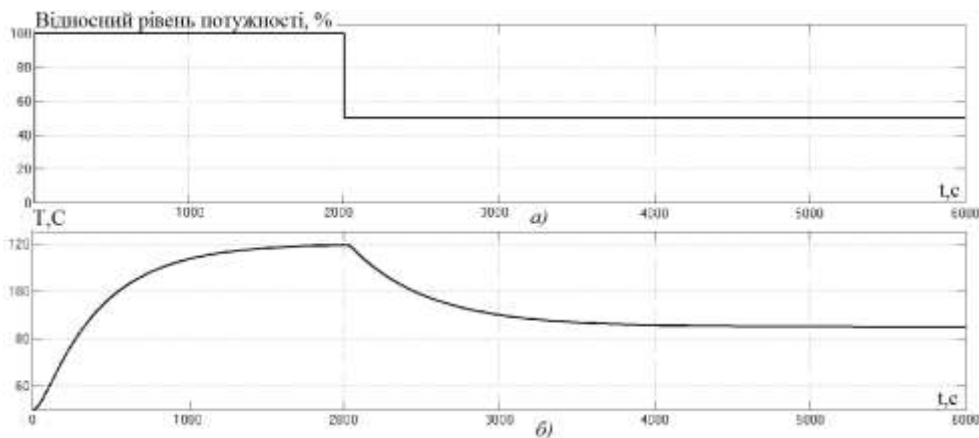


Рис. 18 – Зміна у часі потужності обігрівача (а) та температури повітря обдуву (б)

Висновки. Процес ідентифікації підсистеми нагрівання повітря обдуву зони друку 3-d принтера показав, що модель цієї підсистеми як об'єкта автоматичного керування є складною зі змінною структурою та нестационарними параметрами, які змінюються випадковим чином в широкому діапазоні значень. Окрім того, за каналом керування має місце нелінійна статична характеристика. З урахуванням цього, створена модель підсистеми нагрівання повітря обдуву як об'єкта автоматизації з можливістю змінювати її структуру та параметри під час процесу моделювання, що дозволяє коректно імітувати процеси нагрівання й охолодження повітря.

Аналіз результатів ідентифікації показав, що весь діапазон зміни керуючого впливу можна розбити на п'ять ділянок, в межах яких структура моделі об'єкта керування не змінюється, а параметри моделі перебувають у відносно невеликих діапазонах зміни значень. За умови подальшого синтезу системи автоматичного керування температурою повітря обдуву зони друку принтера перевірка розрахованого регулятора щодо забезпечення заданих критеріїв якості перехідного процесу повинна бути здійснена для кожної вище зазначеної ділянки діапазону зміни значень керуючого впливу, тобто для різних структур моделі зі змінними параметрами в певних діапазонах значень.

1. Abduganiyeva Yulduzoy Shakhabinovna. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES. European Journal of Humanities and Educational Advancements. 2022. V. 3 № 12. P. 130-131.
2. Davim J. P., Markopoulos A. P., Markopoulos A. Advanced Machining Processes: Innovative Modeling Techniques. Taylor & Francis Group, 2017. 327 c. <https://doi.org/10.1201/b21863>
3. Иващенко А. Г. Моделирование сложных систем: Информационный подход / Под общ. ред. В. В. Павлова. К.: Вища школа, 1987. 62 с.
4. Шевченко В. В., Капінос І. В., Грабовський Д. О. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдної технології». Прогресивні технології та прилади. 2011. №1. С. 223–231.
5. Бубликов А., Ткачов В. Використання імітаційного моделювання для дослідження системи автоматичного керування видобувним комбайном. Монографія. Дніпро: Національний гірничий університет. 2015. 182 с.

Отримано 12.11.25
в остаточному варіанті 03.12.2025