

## 151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.518:62-50

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344904

### МЕТОДИ КОРЕГУВАННЯ ПОТОЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сімкін О.І.  | канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-9939-7866">https://orcid.org/0000-0002-9939-7866</a> , e-mail: <a href="mailto:a.i.simkin@mipolitech.education">a.i.simkin@mipolitech.education</a> ;       |
| Сокол С.П.   | викладач, ВСП «Маріупольський фаховий коледж ДВНЗ «ПДТУ», м. Дніпро, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0006-0457-4476">https://orcid.org/0009-0006-0457-4476</a> , e-mail: <a href="mailto:teacher152@mfk.ukr.education">teacher152@mfk.ukr.education</a> ;                                      |
| Ісаєв А.Б.   | ст. викладач, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-5966-4886">https://orcid.org/0000-0002-5966-4886</a> , e-mail: <a href="mailto:andrii.isaiev@mipolitech.education">andrii.isaiev@mipolitech.education</a> ;               |
| Койфман О.О. | канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2075-7417">https://orcid.org/0000-0003-2075-7417</a> , e-mail: <a href="mailto:aleksey.koyfman@mipolitech.education">aleksey.koyfman@mipolitech.education</a> |

Розглядається питання організації збору та обробки технологічної інформації в АСУ ТП в рамках функціонування інформаційної підсистеми АСУ ТП. Висвітлено основні проблеми, що виникають при розробці програмного забезпечення. Поставлені основні задачі дослідження, описані методи вирішення проблеми, проведено експерименти з вимірювання технологічних параметрів (температура, швидкість повітря) при різних значеннях керуючих впливів. Обрано та розроблено алгоритми фільтрації та корекції аналогових сигналів. Проведено ідентифікацію параметрів об'єкта за отриманими експериментальними даними, розроблено та протестовано декілька систем автоматичного керування, проаналізовано результати моделювання роботи САР та порівняно з реальними вимірами.

**Ключові слова:** АСКТП, об'єкт керування, ідентифікація, мікроконтролер, підсистема введення технологічної інформації.

#### Постановка проблеми

Один із найважливіших пріоритетів розвитку виробництва полягає в переході до його цифровізації.

У статті [1] представлені основні напрями цифровізації, які революціонізують виробництво:

1. Віртуальний інжиніринг як сучасний підхід до проєктування, налагодження та експлуатації процесів. Створення високотехнологічних виробів та виробництв є комплексною задачею, що включає наукові, проєктно-конструкторські, технологічні та виробничі аспекти. Віртуальний інжиніринг процесів включає як проєктування виробничого та додаткового обладнання, очисного устаткування, так і засобів та систем автоматизації технологічних процесів і екологічного моніторингу на всіх етапах виробництва.

2. Використання цифрових двійників у виробництві, що визначається тими характеристиками, які слід оптимізувати щодо самого виробу або технології його виробництва, з використанням симуляційних моделей у формі цифрових даних.

Технічне та програмне забезпечення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), без яких неможливі обидва напрями, включає декілька підсистем, але базовою є інформаційна

підсистема. Технологічні прориви у сфері моніторингу процесів, управління та промислової автоматизації суттєво сприяли підвищенню продуктивності промисловості і виробництва. Ключовим вимогам відповідає точний і ефективний механізм збору даних, що здійснюється за допомогою різноманітних датчиків, зокрема для збору, аналізу та сортування об'єктів і елементів.

Такі функції як опитування технологічної інформації, її обробка та передача на верхній рівень, реалізація управляючих дій зазвичай реалізовані в програмованих логічних контролерах (PLC), інші функції (отримання інформації, занесення в базу даних поточної інформації, обслуговування робочих місць оператора-технолога та оперативного персоналу АСУ ТП і т.д.) реалізовані на комп'ютерах верхнього рівня.

Структура і алгоритми функціонування цієї підсистеми істотно залежать від кількості вхідних сигналів, їх типів, подальшого використання в інших підсистемах. На сьогоднішній час є декілька невирішених питань, пов'язаних з роботою інформаційних систем:

1. Під час проєктування інформаційної підсистеми необхідно вибрати та реалізувати способи опитування датчиків, інтервали опитування для кожного сигналу чи групи сигналів, алгоритми обробки інформації, в

тому числі фільтрації. Зазвичай вимоги щодо реалізації способів опитування та алгоритмів обробки інформації замовниками АСУ ТП не сформульовані, а конкретні рекомендації виходять з досвіду експлуатації систем та не завжди обґрунтовані.

2. В процесі роботи АСУ ТП трапляються ситуації виходу з ладу датчиків основних технологічних параметрів чи іншого обладнання для передачі сигналу до контролера чи комп'ютера. В цьому випадку керування агрегатом переводять на ручний режим.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботі [2] автори описують методи обробки великих масивів даних, такі як спектральний аналіз, кореляційний аналіз і метод фільтрації сигналів. Ці методи застосовуються з використанням адаптивного алгоритму дискретизації, який вибирає лише екстремуми аналогового сигналу і фіксує час їхнього виникнення та амплітудні значення.

У статті [3] розглядаються моделі для обробки аналогових сигналів, які базуються на тригонометричних сплайнах. Обговорюється проблема перетворення аналогових сигналів в цифрову форму та їх наступної обробки. Виділяється клас сигналів з відомими диференціальними властивостями. Розглядається моделювання інформаційних сигналів за допомогою тригонометричних сплайнів, а також аналізуються переваги та недоліки цих сплайнів.

У роботі [4] розглядається створення функціонального і універсального логічного аналізатора, який може одночасно захоплювати і аналізувати 24 цифрових і 8 аналогових сигналів. Для забезпечення мобільності та універсальності пристрою, а також реалізації як локального, так і дистанційного доступу, передбачено декілька інтерфейсів.

У статті [5] досліджено вплив параметрів фільтра низьких частот на основну похибку перетворення при обробці аналогових сигналів аналого-цифровим перетворювачем. Встановлено, що процедура нормалізації сигналів передбачає повне або часткове усунення впливу перешкод під час одночасної обробки інформаційної частини сигналу.

Нова схема цифрової компенсації, що представлена в [6], призначена для вимірювання, оцінки та корекції лінійних, слабко змінюваних в часі аналогових помилок в аналого-цифрових перетворювачах з чергуванням частот. Схема цифрової компенсації розроблена з використанням передбачуваного алгоритму стабілізації біспряженого градієнта, що забезпечує ефективне обчислювальне рішення. Проведені чисельні експерименти підтвердили ефективність і досяжність запропонованого методу.

Останнім часом зафіксоване зростання інтересу до концепції цифрового двійника (ЦД) в промисловості та наукових колах, проте використовуються різні визначення цього терміну.

Так, робота [7] спрямована на консолідацію досліджень, оцінок та розвитку цієї теми з метою забезпечення наукової обґрунтованості майбутніх досліджень. За допомогою систематичного огляду літератури та тематичного аналізу біля ста публікацій про ЦД за останні роки автори надають характеристику цього концепту, виявляють прогалини у знаннях, що потребують подальших досліджень. У роботі визначені ключові напрямки майбутніх досліджень, включаючи переваги, етапи створення та розвитку ЦД, приклади застосування, технічні реалізації та інше.

Стаття [8] аналізує понад 50 попередніх публікацій, патентів та результатів досліджень, проведених провідними світовими компаніями, з метою узагальнення поточного стану досліджень та застосувань цифрових двійників. Автори зазначають, що найбільша популярність ЦД спостерігається у PHM (Prognostics and Health Management – прогнозування, діагностика та управління станом), де моделювання є основою цифрових двійників, а основною проблемою є кіберфізичний синтез. Автори вважають, що підвищення життєздатності цифрових двійників необхідно вирішити шляхом розробки єдиного методу моделювання ЦД.

В роботі [9] описано систему оптимального управління процесом безперервного розливання сталі на основі моделі цифрового двійника. Система призначена для скоординованої оптимізації та динамічного керування вторинним охолодженням та остаточним електромагнітним перемішуванням та складається з трьох взаємопов'язаних частин. По-перше, створюється тривимірна модель теплопередачі в реальному часі як цифровий двійник процесу теплопередачі при безперервному розливанні; для високої точності він калібрується в автономному режимі з використанням вимірювань температури поверхні та товщини оболонки. По-друге, відповідно до металургійних правил охолодження та перемішування оптимізуються узгоджено на основі встановленої моделі цифрового двійника та алгоритму оптимізації рою частинок хаосу. По-третє, охолодження та перемішування додатково динамічно контролюються для забезпечення стабільності якості. Після введення системи зменшилися помилки діючої математичної моделі та помилки управління, що вплинуло на якість зливків.

При використанні штучного інтелекту для розв'язання складних проблем в промисловості підходи варіюються залежно від доступності досліджень і літератури, що накопичені в процесі вирішення аналогічних завдань. У статті [10] спочатку обговорюється пошук і вибір корисних досліджень і літератури. Якщо існують добре відомі дослідження у галузі штучного інтелекту (ШІ), наступним кроком стає вибір відповідної платформи ШІ. У протилежному випадку виникає основна перешкода – як інтегрувати знання в галузі виробництва та технології штучного інтелекту. В статті також наводиться рішення для цієї проблеми, яке дозволяє інженерам підприємств використовувати штучний

інтелект на повний обсяг, адаптуючи його для своїх потреб, а не покладаючись на фахівців з обробки даних.

В огляді [11] представлено своєчасне дослідження кількох нових архітектур нейронних мереж та методів навчання після короткого огляду основ нейронних мереж та деяких важливих пов'язаних з ними проблем. Оглядова література і обговорення, що супроводжує її, мають загальну цінність, що виходить далеко за рамки металургії сталі, і можна багато чого отримати від оцінки методів, що використовуються в інших галузях матеріалознавства і за її межами, щоб застосувати їх до чорної металургії.

Разом з цим, на думку авторів, є можливість розробити алгоритми управління об'єктом в замкнутому режимі протягом часу, достатнього для оперативної заміни вказаних вище технічних засобів.

Для вирішення вище вказаних задач був реалізований імітатор об'єкта управління, розроблений його цифровий двійник і оцінені на його базі алгоритми обробки та можливості видавати розрахований сигнал у випадку збою фізичного датчика.

### Мета статті

Розробка алгоритмів обробки аналогових сигналів, що поступають в АСУ ТП, які включають в себе фільтрацію, корекцію та масштабування. Ідентифікація структури та параметрів об'єкта керування. Розробка системи автоматичного керування об'єктом на базі мікроконтролера. Розробка і випробування цифрового двійника об'єкта керування з використанням математичного моделювання.

### Матеріали та методи

В якості узагальненого об'єкта дослідження використані фізична та математична модель комплексного технологічного агрегату, що включає в себе систему з двома ємностями (перша – власне агрегат, друга розглядається функціонально як димовий тракт), датчиками, для вимірювання технологічних параметрів та системою керування на основі мікроконтролера. Також розглядається цифровий двійник цього об'єкта. При розробці макету технологічного об'єкта автори керувалися наступними принципами:

- наявність декількох взаємозв'язаних технологічних параметрів (не менше 6-8), щоб можна було набрати достатню базу даних для побудови моделі;
- відносна простота реалізації макету без необхідності пошуку дефіцитних матеріалів або вироблення складних деталей;
- відносна дешевизна електронних компонентів та датчиків.

Результуюча структурна схема макету технологічного об'єкта представлена на рис. 1.

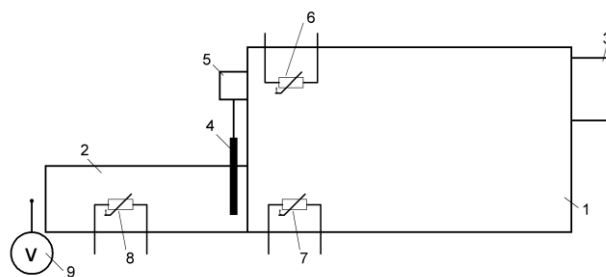


Рис. 1 – Схема макету технологічного об'єкта

Макет являє собою дві з'єднані ємності 1 та 2. Більша ємність представляє собою власне основний агрегат, де відбувається технологічний процес, а менша – димовий тракт, через який відводиться гаряче повітря. У крайній верхній частині агрегату (ємність 1) закріплений нагрівач повітря з вентилятором 3, який вдуває гаряче повітря всередину. Потужність як нагрівача, так і вентилятора контролюються та регулюються за допомогою мікроконтролера.

Між агрегатом 1 та димовим трактом 2 розташований шибєрний затвор 4, який дозволяє змінювати витрати повітря, що виходять з агрегату у димовий тракт. Положення шибєрного затвору регулюється за допомогою сервоприводу 5.

У макеті вимірюються наступні технологічні параметри:

- температура в двох точках робочого простору агрегату за допомогою термометрів опору типу Pt100 та температура в димовому тракті за допомогою аналогового термометру (8);
- швидкість повітря на виході з димового тракту за допомогою датчику 9;
- струм та напруга нагрівача повітря (на схемі не показані);
- струм та напруга вентилятора (на схемі не показані).

Всі сигнали від усіх датчиків заводяться у мікроконтролер серії RA2A1 компанії Renesas. Вибір саме такого контролера обумовлений його розвиненою аналоговою периферією. Він має п'ятиканальний 24-бітний сігма-дельта АЦП, а також 20-канальний 16-бітний АЦП послідовного наближення з п'ятьма диференційними каналами. Крім того, мікроконтролер має сучасне потужне 32-бітне ядро Cortex M23 і безліч цифрових інтерфейсів, що робить його ідеальним вибором для поставленої задачі і дозволяє відмовитися від зовнішніх модулів вводу-виводу.

Дослідним шляхом було встановлено, що для всіх аналогових параметрів, включаючи температуру, струм і напругу, достатньо 16-бітної точності.

Керування технологічним процесом та контроль параметрів відбувається за допомогою персонального комп'ютера, що підключається до мікроконтролеру за допомогою інтерфейсу Segger RTT.

Оскільки потужність нагрівального елементу становить 100 Вт, для керування ним використовується твердотільне реле типу SSR-40 DD, яке має максимальний струм 40 А, що дає великий запас по допустимій потужності.

#### Виклад основного матеріалу

Було проведено декілька експериментів, щоб виявити взаємозв'язок параметрів між собою.

В першому експерименті спочатку шиберний затвор було закрито, а вентилятор і нагрівач працювали на повну потужність, через деякий час шибер було відкрито, а ще через деякий час нагрівач було вимкнено.

Результати експерименту представлені на рис. 2 – 6. Як можна побачити з цих рисунків, між багатьма параметрами є взаємозв'язок. Чітко прослідковується вплив положення шиберного затвору на температуру в агрегаті та димовому тракті (рис. 2, 3).

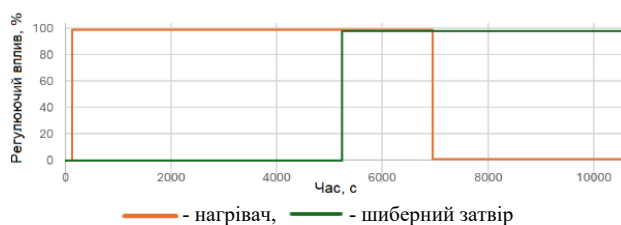


Рис. 2 – Положення шиберу та відносна потужність нагрівача

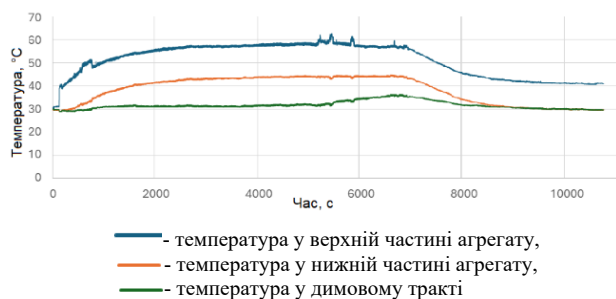


Рис. 3 – Температури в верхній та нижній частині агрегату та у димовому тракті

Поки шибер зачинено, температура в агрегаті росте швидко, причому у верхній частині вона значно більша, ніж у нижній. Це пов'язано з тим, що вентилятор-нагрівач також знаходиться у верхній частині, і створює потік повітря безпосередньо на термометр опору, а також з конвекційними процесами.

На рис. 4 можна помітити, що при вимкненні нагрівача потужність вентилятора незначно збільшується. Це пов'язано з підвищенням напруги блоку живлення при відключенні потужного споживача.

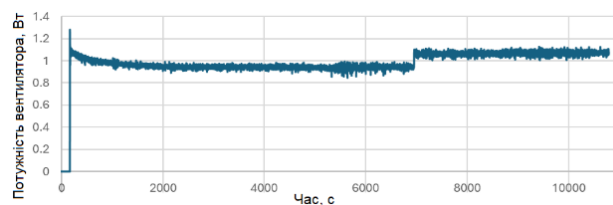


Рис. 4 – Потужність вентилятора

При відкриванні затвору температура в агрегаті незначно падає, а в димовому тракті починає зростати. Також зростає і швидкість повітря на виході. Можна помітити, що в цей момент також починає знижуватися потужність нагрівача (рис. 5).

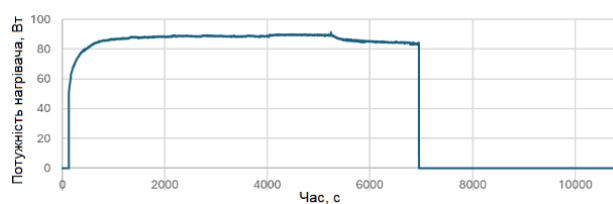


Рис. 5 – Потужність нагрівача

В димовому ж тракті температура майже не змінюється. Також видно, що швидкість повітря на виході з тракту (рис. 6) дуже мала і обумовлена негерметичністю затвору.

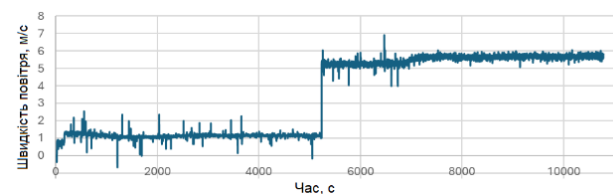


Рис. 6 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

У другому експерименті була отримана залежність швидкості повітря від потужності вентилятора і положення шиберного затвору (рис. 7-9).

Швидкість повітря на виході з димового тракту значно залежить від положення шиберного затвору і слабо залежить від потужності вентилятора.

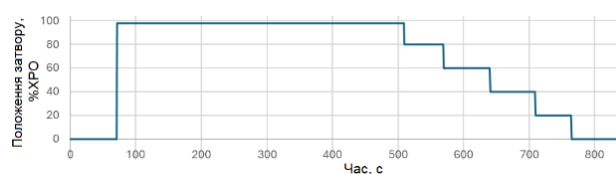


Рис. 7 – Положення шиберного затвору

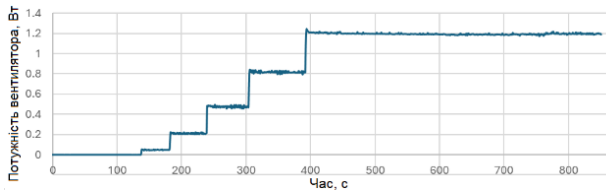


Рис. 8 – Потужність вентилятора

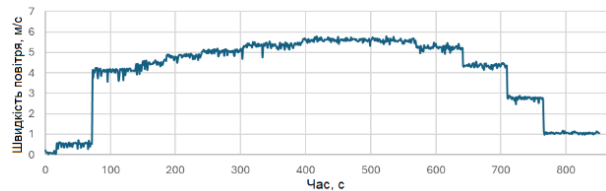


Рис. 9 – Швидкість повітря на виході з димового тракту

Щоб запобігти перегріву нагрівача, вентилятор крутиться на мінімальних обертах навіть при нульовому керуючому впливі, цим і обумовлена невелика швидкість повітря на початку графіків (рис. 5, 9)

#### Вимірювання температури та корекція

При використанні термометрів опору виявилася наступна проблема. Оскільки у вимірювальній схемі окрім власне термометру опору присутні ще звичайні резистори (навіть прецизійні), опір яких також залежить від температури навколишнього середовища, показання температури були нестабільними та неточними.

Для оцінки точності вимірювання та калібрування термометрів опору у схему були додані ще цифрові датчики температури типу DS18B20, які фізично розташовані всередині агрегату біля термометрів опору. То ж ми можемо вважати, що температури і зразкового (цифрового), і робочого (термометр опору) термометрів однакові.

Оскільки точність цифрових термометрів DS18B20, згідно з документацією, дорівнює  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  у всьому діапазоні вимірювання (від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ ), ми можемо вважати їх зразковими у порівнянні з термометрами опору.

Після першого тестування були отримані наступні результати (рис. 10). На графіку представлені показання термометру опору (синій графік) та цифрового термометру (фіолетовий графік) у нижній точці агрегату (див. рис. 1). Температури в інших точках мають якісно схожі графіки.

За графіком (рис. 10) видно, що показання термометру опору дуже зашумлені, а крім того, різниця між показаннями зразкового та робочого термометру сягає  $5^{\circ}\text{C}$ , що не є припустимим.

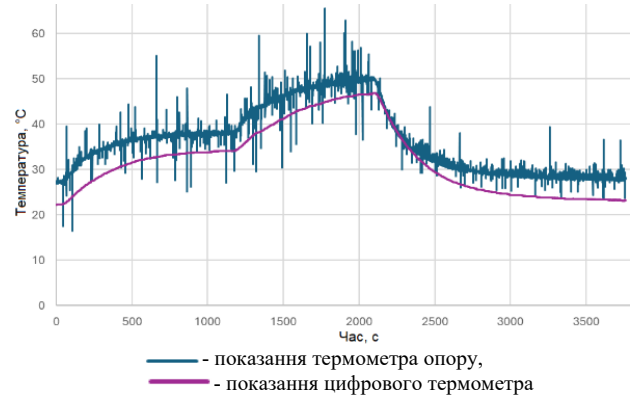


Рис. 10 – Результати вимірювань після першого випробування

Очевидно, що для усунення першої проблеми треба використовувати фільтрацію вхідних даних, а для усунення другої – провести калібрування датчика.

Було проведено декілька тестів з різними фільтрами – ковзне середнє, медіанний, аперіодичний, фільтр Калмана [12]. Найкращі результати були отримані за допомогою послідовного використання медіанного фільтра, який прибирав поодинокі викиди показань, та аперіодичного фільтра з коефіцієнтом фільтрації 0,1, який згладжував залишкові коливання. Фільтр Калмана, який вважається пристосованим як раз для фільтрації таких зашумлених показань, не дав значного покращення результатів, тож, враховуючи складність його реалізації, від нього було вирішено відмовитися. Результати застосування медіанного та аперіодичного фільтрів показані на рис. 11 та 12 відповідно.

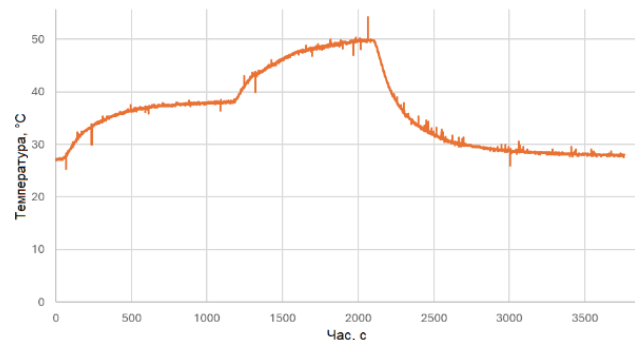


Рис. 11 – Результати застосування медіанного фільтра

Як можна бачити з рис. 11, вже після медіанного фільтра результати стають набагато кращими, ніж вихідні (рис. 10).

Аперіодичний фільтр майже повністю усуває коливання показань, роблячи їх придатними для подальшого зберігання та використання в системі індикації та регулювання.

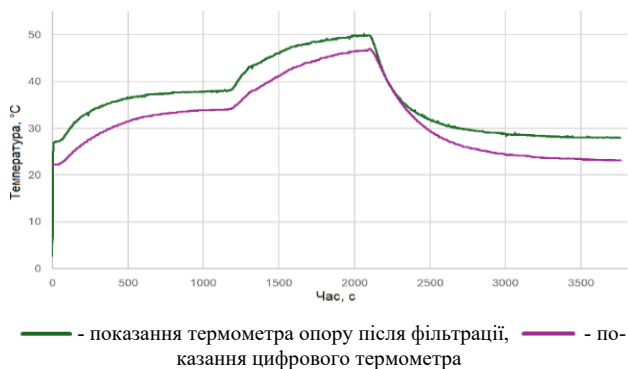


Рис. 12 – Результати застосування аперіодичного фільтра

Наступним кроком треба усунути різницю показань. Для цього треба ввести поправку на фільтровані показання термометру опору. Найпростіший варіант – це знайти різницю між показаннями зразкового та робочого термометрів у сталому стані, і віднімати її від кожного показання останнього. Графік різниці показань представлений на рис. 13.

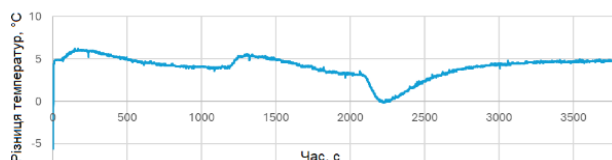


Рис. 13 – Різниця показань робочого та зразкового термометра

Початок графіка не є інформативним, оскільки показання спочатку сильно занижені аперіодичним фільтром (це також можна бачити і на рис. 12).

З рис. 13 можна побачити, що різниця між показаннями постійно змінюється, але у сталому стані вона близька до 5 градусів. При застосуванні такої поправки, ми отримаємо наступний результат (рис. 14).

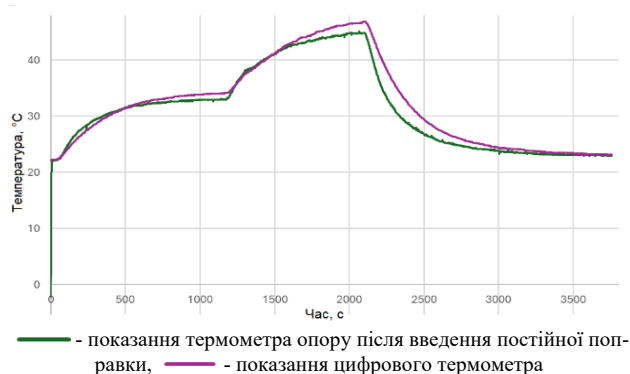


Рис. 14 – Результати вимірювання після введення постійної поправки

Тепер результати збігаються з досить непоганою точністю. Але в динамічних режимах показання все ж таки досить сильно розходяться. Це пов'язано з тим,

що фізично датчики мають різні геометричні розміри і різну конструкцію, то ж прогрів самих датчиків не є однаковим. Для подальших розрахунків ми будемо вважати, що показання цифрового термометру і в статичних, і в динамічних режимах є істинними.

Для того, щоб прибрати різницю показань в динамічному режимі треба ввести так звану динамічну поправку, що залежала б від швидкості зміни температури.

Цю швидкість ми будемо визначати, як різницю показань цифрового термометра за 30 секунд. Графік швидкості зміни температури представлений на рис. 15.

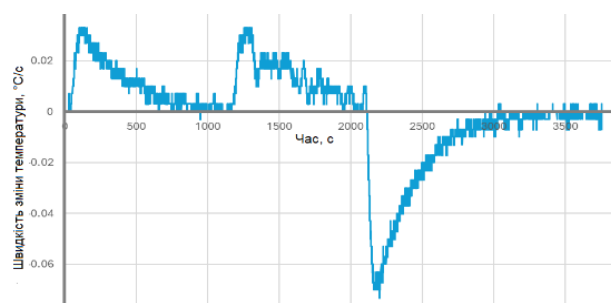


Рис. 15 – Швидкість зміни температури

Наступним кроком треба побудувати графік залежності різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури (рис. 16).

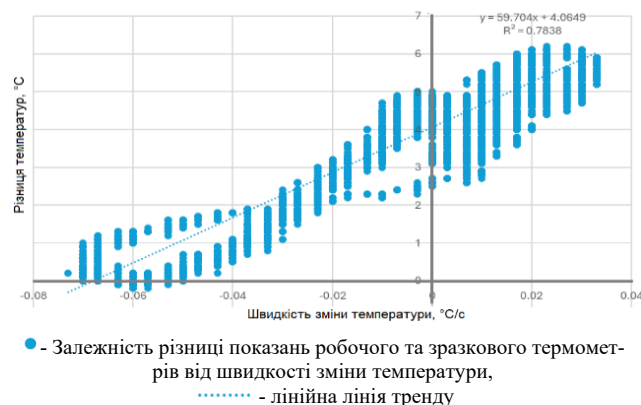


Рис. 16 – Залежність різниці показань робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури

З цього графіку видно, що залежність має характер, схожий на лінійний. Побудувавши лінію тренду, ми можемо отримати математичну залежність різниці показань температур робочого та зразкового термометрів від швидкості зміни температури, яку потім можна застосувати до фільтрованих показань термометру опору. Ця лінія тренду, а її рівняння та коефіцієнт кореляції також показані на рис. 16. З цього рівняння, до речі, можна побачити, що при швидкості 0 °C/хв

поправка складає  $4,06^{\circ}\text{C}$ , а не  $5^{\circ}\text{C}$ , як ми використовували на рис. 14.

Після введення динамічної поправки замість статичної, отримаємо наступний результат (рис. 17). Як можна бачити з цього рисунку, тепер показання сходяться з точністю не гірше  $2^{\circ}\text{C}$ . Після введення поправки значення робочого термометру стали більш шумними, що викликано тим, що швидкість також є досить зашумленою (рис. 15), а поправка залежить від швидкості у значній мірі (див. рівняння на рис. 16)



Рис. 17 – Результати вимірювання після введення динамічної поправки

Після тестування виявилося, що поправка також залежить від обертів вентилятора.

Тож, для того щоб врахувати ще й цей параметр, кінцеве рівняння для динамічної поправки було взято як лінійна апроксимація між рівняннями, отриманими методом, показаним на рис. 16, в залежності від обертів вентилятора.

Для інших двох термометрів були проведені аналогічні розрахунки та викладки. Результати вимірювання для температури у верхній частині агрегату наведені на рис. 18.



Рис. 18 – Результати вимірювання температури в верхній частині агрегату після введення динамічної поправки

Як бачимо з рис. 17 та 18, після математичної обробки показання зразкового та робочого датчиків

збігаються з точністю, що не перевищує  $1^{\circ}\text{C}$  в найгіршому випадку, а в більшості випадків – не більше  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Для інших двох термометрів були зроблені аналогічні обчислення і отримані подібні результати.

#### Вимірювання швидкості повітря та її корекція

Швидкість повітря (і пов'язані з нею витрати повітря) на відміну від температури є дуже динамічно змінюваним параметром. Тому при його вимірюванні та обробці треба, з одного боку, зменшити коливання показань, а з іншого боку – не допустити надмірного уповільнення його зміни через надто сильну фільтрацію.

Оскільки для датчика швидкості повітря немає ніякої можливості перевірити правдивість його показань, будемо вважати, що вони відповідають дійсності. Для цього датчика ми будемо обирати тип фільтра, а також перевіримо, як впливає частота опитування на результати вимірювання.

Для цього зробимо вимірювання з частотами 1000, 100, 10, 6, 4 та 1 вимірювань на секунду і застосуємо до вихідних результатів медіанний, аперіодичний фільтри та фільтр Калмана.

Оскільки швидкість змінюється дуже швидко, використання медіанного фільтра не дає помітного результату, як це було для температури, тому від нього було вирішено відмовитися.

Результати вимірювання та фільтрації для різних частот та коефіцієнтів фільтрації представлені на рис. 19-22. Тут жовтий графік – це вхідні дані, показання датчика, червоний графік – вихід аперіодичного фільтра, фіолетовий графік – вихід фільтра Калмана. Коефіцієнт фільтрації для обох фільтрів вказаний у назві графіків.

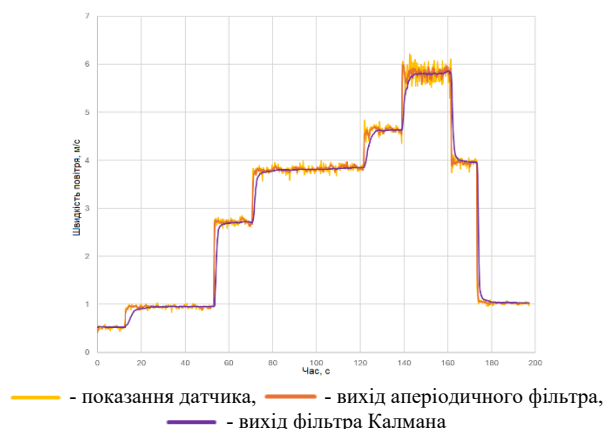


Рис. 19 – Результати при частоті опитування 1000 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

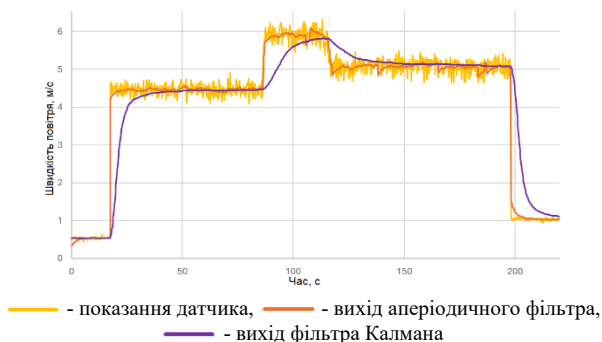


Рис. 20 – Результати при частоті опитування 100 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,005

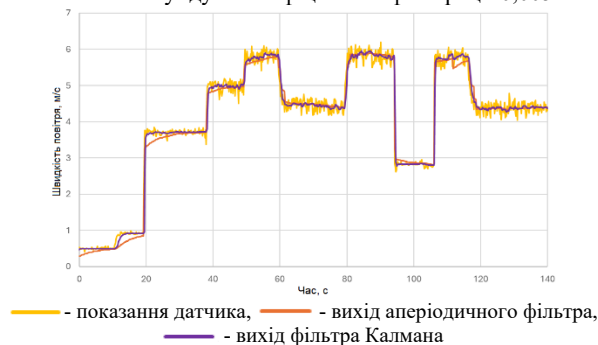


Рис. 21 – Результати при частоті опитування 10 вимірювань на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

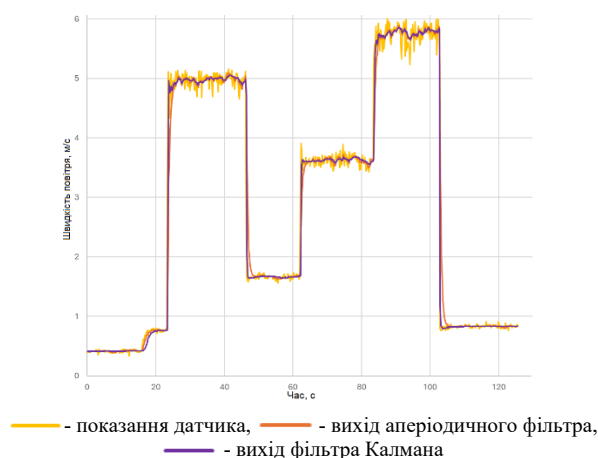


Рис. 22 – Результати при частоті опитування 1 вимірювання на секунду та коефіцієнтом фільтрації 0,5

З графіків виходить, що частота опитування слабо впливає на показання датчика. Якщо порівняти вхідні дані на рис. 19, де частота опитування 1000 раз на секунду і на рис. 22, де вона 1 раз на секунду, то помітної різниці між ними не видно. То ж для зменшення навантаження на мікроконтролер, що займається вимірюванням і обробкою даних, було вирішено проводити вимірювання 10 раз на секунду. Це значення було обрано тому, що ПІД-регулятор, який керує швидкістю повітря і який буде описаний далі,

працює з кроком 0,1 с, і має сенс мати на кожному кроці актуальне значення.

З іншого боку, результат дуже сильно залежить від коефіцієнта фільтрації. Якщо він недостатній, то отримані на виході фільтра значення будуть мати значні коливання (як на рис. 20, червоний графік), якщо ж він буде надто великим, то показання будуть сильно згладжені та не будуть відображати реальну картину зміни витрат повітря (як на рис. 20, фіолетовий графік). Тому треба обрати компромісне рішення, при якому коливання будуть усунені у достатній мірі, щоб регулятор міг впоратися з керуванням цим параметром, але водночас, щоб дані, що надходять на регулятор, були актуальні, а не затримані на 10-20 секунд, що є неприпустимим для такого швидкозмінного параметру.

Серед усіх графіків найбільше відповідає цим вимогам фільтр Калмана з коефіцієнтом 0,5 при частоті опитування 10 раз на секунду (фіолетовий графік на рис. 21). Він реагує на швидку зміну значення параметру швидше, ніж аперіодичний фільтр, і при усталеній швидкості краще відфільтровує викиди (див. графіки на рис. 21 в районі 110 с).

#### Ідентифікація параметрів об'єкту керування

Як вже було зазначено, в якості вихідних параметрів об'єкту керування, вважатимуться температура та швидкість повітря на виході з димового тракту.

Визначимо параметри об'єкту управління методом побудовання кривих розгону для різних величин. Температура головним чином визначається електричною потужністю, що подається на нагрівач, тому побудуємо залежність температури від часу при стрибкоподібній зміні потужності нагрівача від 0% до 100% і від 100% до 0% (рис. 23).

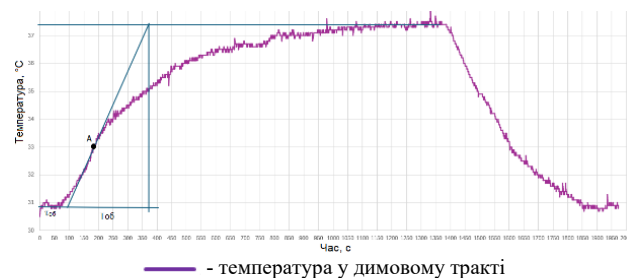


Рис. 23 – Крива розгону об'єкту керування за температурою у димовому тракті

Проведемо ідентифікацію параметрів об'єкту, представивши його статичним об'єктом керування першого порядку з запізненням. Передатна функція такого об'єкту

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{1+T_{об}p} e^{-p\tau_{об}}. \quad (1)$$

З рис. 23 можна визначити параметри об'єкту [13]:  $K_{об} = 0,07^\circ\text{C}/\%\text{ШІМ}$ ,  $T_{об} = 260$  с;  $\tau_{об} = 100$  с.

Що стосується швидкості повітря, то вона залежить одразу від двох параметрів: потужності вентилятора та ступеню відкриття шиберної заслінки, причому, першим параметром можна регулювати

швидкість більш точно, але в більш вузькому діапазоні ( $\pm 1$  м/с), в той час, як другий параметр дозволяє змінювати швидкість у всьому діапазоні, але з меншою точністю.

Аналогічним чином побудуємо криві розгону для цього параметру за двома каналами регулюючого впливу: ступеню відкриття заслінки та потужності вентилятора (рис. 24).

На рис. 24 перший стрибок швидкості обумовлений зміною положення шиберної заслінки від 0% до 100%, а другий – зміною потужності вентилятора від 0% до 100%.

Як бачимо, на зміну положення шиберної заслінки швидкість реагує практично миттєво, в той час, як при зміні потужності вентилятора встановлення нового значення займає деякий час, але дуже незначний.

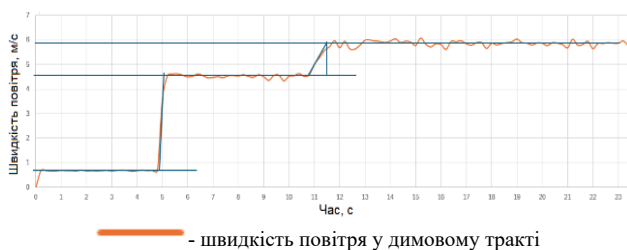


Рис. 24 – Крива розгону об'єкту керування за швидкістю повітря на виході з димового тракту

В даному випадку об'єкт за обома каналами керування можна вважати статичним із запізненням, і використовувати передатну функцію (1) тільки з наступними параметрами.

Параметри об'єкту керування при зміні положення шиберної заслінки:  $K_{об} = 0,039$  м/с/%ХРО,  $T_{об} = 0,15$  с,  $\tau_{об} = 0,01$  с.

Параметри об'єкту керування при зміні потужності вентилятора:  $K_{об} = 0,013$  м/с/%ШІМ;  $T_{об} = 0,8$  с;  $\tau_{об} = 0,2$  с.

*Керування об'єктом за допомогою ПІД-регулятора*

Знаючи параметри об'єкту управління за різними каналами керування, можна визначити параметри ПІД-регуляторів для кожного з цих каналів. Скористаємося формулами для визначення налаштувань регулятора інженерним методом для аперіодичного перехідного процесу:

$$K_p = \frac{0,95}{K_{об}T_{об}}; T_i = 2,4\tau_{об}; T_d = 0,4\tau_{об} \quad (2)$$

Для керування температурою будемо використовувати один ПІД-регулятор з наступними параметрами:  $K_p = 35\%$ ШІМ/°С;  $T_i = 40$  с;  $T_d = 1$  с.

Для керування швидкістю повітря будемо використовувати наступний алгоритм: керування потужністю вентилятора буде відбуватися за допомогою ПІД-регулятора. При досягненні ним крайніх положень (0% чи 100%) буде на кожному кроці відбуватися відкриття або закриття заслінки на заданий відсоток. Така

система керування можлива за рахунок того, що параметри об'єкту за каналом регулювання шиберною заслінкою мають набагато меншу інерційність, ніж за каналом регулювання потужністю вентилятора. Тому перший регулятор можна замінити ПІ-регулятором, а другий залишити ПІД, і підтримувати ним точне значення швидкості повітря. Параметри цього ПІД-регулятора наступні:  $K_p = 300\%$ ШІМ/м/с;  $T_i = 0,48$  с;  $T_d = 0,08$  с.

Відсоток відкриття шиберної заслінки при досягненні ПІД-регулятором крайніх положень буде підібрано експериментально, починаючи з 1%/крок.

Результати регулювання температури та швидкості з заданими параметрами представлені на рис. 25-28.

На рис. 25, 26 показаний процес регулювання температури. Спочатку було встановлено задане значення 32°С, а потім 25°С. Як можна бачити, процес регулювання є коливальним, причому коливання мають місце при утриманні більш високої температури. Значення в 25°С так і не було досягнуто бо регулятор чомусь намагався збільшити керуючий вплив (рис. 26).

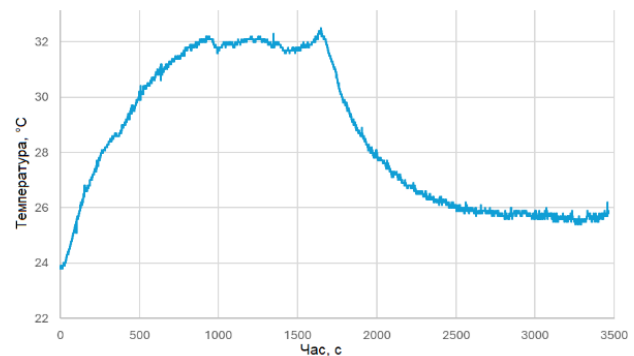


Рис. 25 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту

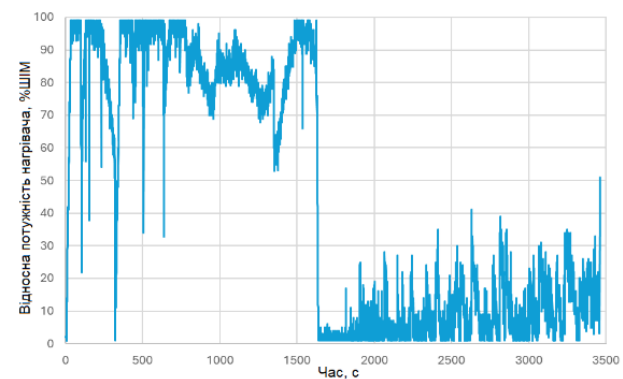


Рис. 26 – Потужність нагрівача при регулюванні температури

При регулюванні швидкості повітря процес також коливальний (рис. 27, 28), при цьому на малій заданій швидкості (1 м/с) коливання стають незатухаючими. Це говорить про те, що в налаштуваннях регулятора величина  $T_i$  є недостатньо великою і керуючий вплив

змінюється швидше, ніж регульована величина, причому це стосується обох параметрів. Для того, щоб підібрати  $T_i$  для обох регуляторів, будемо збільшувати їхні значення з певним кроком (0,5 с для регулятора швидкості повітря і 10 с для регулятора температури) і проводити експерименти з отримання перехідних процесів. В результаті досліджень було встановлено, що для регулятора температури найкращі результати отримуються при  $T_i = 80$  с, а для регулятора швидкості повітря при  $T_i = 3$  с.

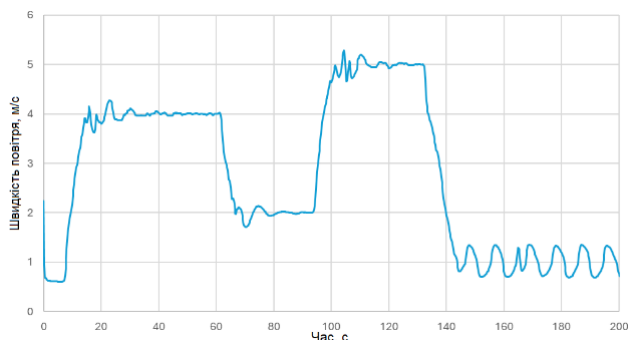


Рис. 27 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту



Рис. 28 – Положення шиберної заслінки та потужність вентилятора при регулюванні швидкості повітря

Результати представлені на рис. 29, 30.

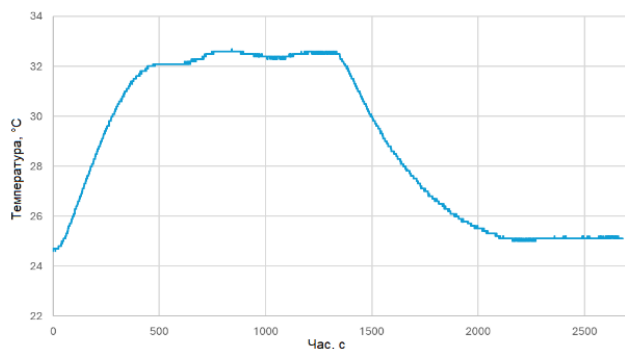


Рис. 29 – Результат регулювання температури на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

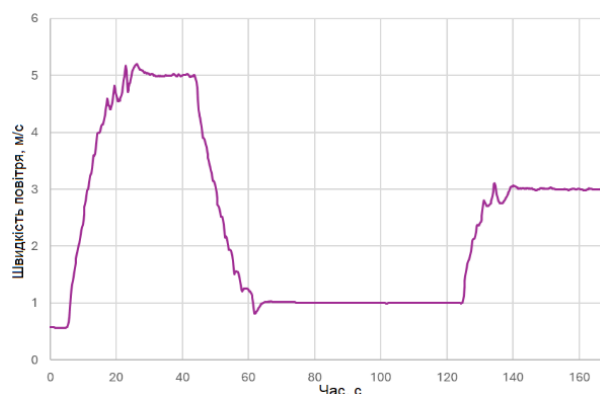


Рис. 30 – Процес регулювання швидкості повітря на виході з димового тракту при збільшенні часу інтегрування регулятора

Як видно з рис. 29, 30, якість регулювання температури та швидкості повітря значно покращилися. Процеси стали значно більше схожими на аперіодичні. При регулюванні швидкості температури коливання відбуваються лише в момент активної роботи обох регуляторів, коли змінюється положення шиберної заслінки, а регулятор потужності вентилятора намагається компенсувати зміни швидкості повітря.

*Створення математичної моделі об'єкту керування*

Для математичного опису об'єкту управління можна використовувати декілька підходів.

1. На основі фізичного опису процесів, що відбуваються всередині об'єкту. Такий підхід може дати високу точність, але потребує доброго розуміння аеродинаміки та теплообміну і, окрім того, визначення певної кількості емпіричних коефіцієнтів.

2. На базі спрощеної математичної моделі, представивши об'єкт як сукупність елементарних ланок. Такий підхід має меншу точність, але при правильному знаходженні параметрів ланок та механізму їх зв'язку може дати добрий результат.

3. На базі штучної нейронної мережі. В такому випадку треба зробити велику кількість вимірювань при різних значеннях регулюючих параметрів, щоб набрати достатню кількість даних для навчання мережі. Враховуючи велику інерційність об'єкту за температурою, це може зайняти велику кількість часу.

Автори обрали другий варіант, який є відносно простим, але дає достатню точність, то ж може слугувати добрим прикладом створення цифрового двійника об'єкта керування.

При побудові моделі для спрощення будемо вважати, що температура в об'єкті та в димовому боріві здебільшого залежить від поточної потужності нагрівача, а швидкість повітря на виході залежить в рівній мірі і від положення заслінки, і від потужності вентилятора.

Раніше були визначені параметри об'єктів при представленні їх в якості послідовного з'єднання аперіодичної ланки та ланки запізнення. Для швидкості повітря такий підхід є виправданим через невелику інерційність. А для температури треба додати ще одну аперіодичну ланку з коефіцієнтом передачі 1, але з додатковою постійною часу  $T_2$ , щоб врахувати сильну інерційність цього параметру. Величину  $T_2$  було знайдено емпіричним шляхом.

Таким чином, передатна функція об'єкту за каналом температури

$$W_T(p) = \frac{K_T}{T_{T1}p+1} \frac{1}{T_{T2}p+1} e^{-p\tau_T}, \quad (3)$$

а за каналом швидкості повітря

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{\Pi 3}}{T_{\Pi 3}p+1} e^{-p\tau_{\Pi 3}} + \frac{K_{\Pi 6}}{T_{\Pi 6}p+1} e^{-p\tau_{\Pi 6}}, \quad (4)$$

де  $K_m$ ,  $T_{m1}$ ,  $T_{m2}$  та  $\tau_m$  – відповідно, коефіцієнт передачі, постійні часу та час запізнення об'єкту за каналом потужності нагрівача – температура;

$K_{\Pi 3}$ ,  $T_{\Pi 3}$  та  $\tau_{\Pi 3}$  – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом положення заслінки – швидкість повітря;

$K_{\Pi 6}$ ,  $T_{\Pi 6}$  та  $\tau_{\Pi 6}$  – відповідно, коефіцієнт передачі, постійна часу та час запізнення об'єкту за каналом потужності вентилятора – швидкість повітря.

При підставленні значень параметрів, отриманих раніше, отримаємо наступні результати моделювання (рис. 31, 32).

Як можна бачити з рис. 31 та 32, результати моделювання та реальні дані сильно відрізняються. Шляхом додаткових експериментів було виявлено, що параметри об'єкту є сильно нелінійними. Тож було вирішено зробити модель зі змінними параметрами. Для цього було побудовано декілька кривих розгону при зміні потужності нагрівача та вентилятора і положення заслінки не з кроком 100%, а з кроком 20%.

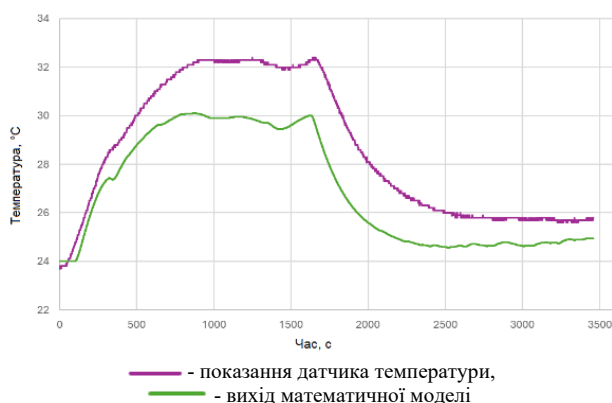


Рис. 31 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання

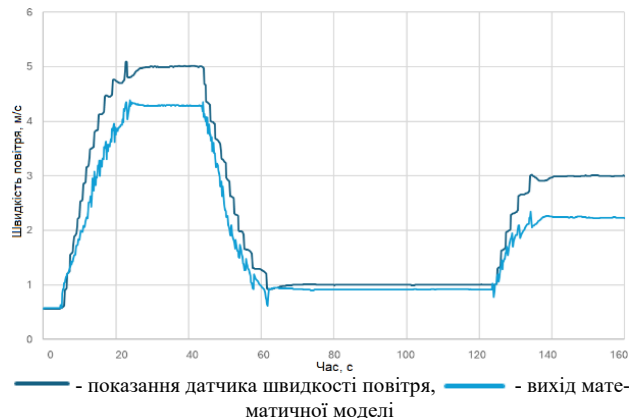


Рис. 32 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання

В результаті було знайдено параметри об'єктів для різних діапазонів керуючих впливів. При їх підставленні в моделі (3) та (4) було отримано наступні результати моделювання (рис. 33, 34).

Як видно з рис. 33 та 34, при використанні змінних параметрів об'єкту результати моделювання наближаються до реальних значень з досить високим ступенем точності. В цій спрощеній моделі використовувалися лише залежності між параметрами та найбільш впливовими керуючими впливами, але якщо додати в формули (3) та (4) всі керуючі впливи, можна отримати ще більш точне наближення результатів моделювання до реальних значень.

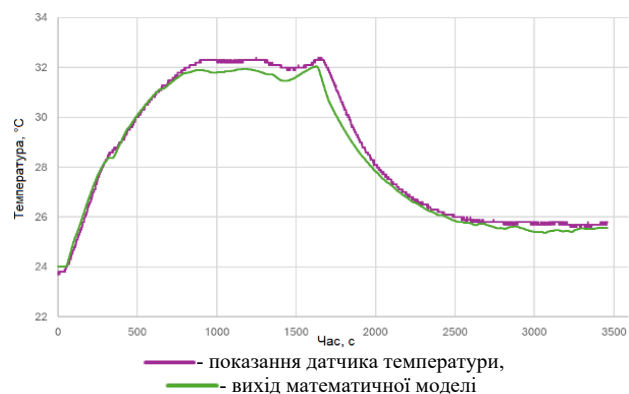


Рис. 33 – Порівняння реальної температури повітря в димовому тракті з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту



Рис. 34 – Порівняння реальної швидкості повітря на виході з димового тракту з результатами моделювання при змінних параметрах об'єкту

### Висновки

#### Наукова новизна:

1. Запропоновано вводити динамічну поправку для вимірювання температури, в залежності від швидкості її зміни.
2. Розроблено адаптивну математичну модель із змінними параметрами на основі діапазону керуючих впливів.
3. Застосовано комбінацію методів фільтрації, корекції та математичного моделювання для створення та тестування цифрового двійника технологічного агрегату з термо- та аеродинамічними процесами.

#### Теоретичні результати:

1. Показано доцільність використання фільтра Калмана для швидкозмінних параметрів і комбінації медіанного та аперіодичного фільтрів для повільнозмінних параметрів.
2. Показано доцільність використання динамічних поправок з урахуванням швидкості зміни параметру для повільнозмінних параметрів.
3. Розроблено математичну модель об'єкта керування у вигляді сукупності елементарних ланок.

#### Практичні результати:

1. Створено фізичний макет технологічного об'єкта.
2. Реалізовано систему збору та обробки аналогових сигналів.
3. Встановлено методи корекції похибок температури з урахуванням динаміки та величини керуючих впливів.
4. Впроваджено ПІД-регулятори для керування технологічним процесом.
5. Досягнута точність температурних вимірювань до 0,5-1°C.

### Перелік використаних джерел

- [1] Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника. *Процеси*

лиття. 2020. № 4 (142). С. 53-62. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.053>.

- [2] Гриценко В., Скурихін В., Цепков Г. Інформаційні технології цифрової обробки сигналів: нові підходи і перспективи впровадження. *Вісник Національної академії наук України*. 2005. № 12. С. 33-41.
- [3] Негоденко О. В. Моделі для обробки інформаційних сигналів на основі тригонометричних сплайнів. *Зв'язок*. 2018. № 4. С. 47-50.
- [4] Алдохін М. Д. Логічний аналізатор сигналів на ПЛІС. *Електронна та акустична інженерія*. 2020. Т. 3. № 4. С. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.4.199926>.
- [5] Рязанцев О. І., Кардашук В. С., Рязанцев А. О. Дослідження впливу параметра фільтра на якість аналого-цифрового перетворення сигналу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2020. № 7 (263). С. 29-34. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34>.
- [6] Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs / J. Song et al. *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2019. Vol. 28. Pp. 35-42. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218126619501342>.
- [7] Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones et al. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29, part A. Pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [8] Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, iss. 4. Pp. 2405-2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- [9] Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process / Yang J., Ji Z., Liu W., Xie Z. *Metals*. 2023. Vol. 13(4). Article 816. Pp. 123-143. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13040816>.
- [10] Kanokogi H. AI in the Process Industry. *Yokogawa Technical Report (Engl. Ed.)*. 2021. Vol. 64, no. 1. Pp. 53-60.
- [11] Smith J. L. Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy. *Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 36, iss. 17. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1839206>.
- [12] Шилов Д., Ямненко Ю. Система дистанційного моніторингу ваги для бджільництва. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2022. Т. 27, № 3. С. 267186-1 – 267186-7. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.267186>.
- [13] Койфман О., Мірошніченко В., Сімкін О. Аналітичне дослідження методів ідентифікації об'єкта керування. *MiningMetalTech 2023 – The Mining and Metals Sector: Integration of Business, Technology and Education: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023. С. 113-147. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>.

## METHODS OF CORRECTION OF CURRENT VALUES OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Simkin O.I.</b>  | PhD (Engineering), professor, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-9939-7866">https://orcid.org/0000-0002-9939-7866</a> , e-mail: <a href="mailto:a.i.simkin@mipolitech.education">a.i.simkin@mipolitech.education</a> ;     |
| <b>Sokol S.P.</b>   | lecturer, Separate structural unit «Mariupol Vocational College of the SHEI «PSTU», Dnipro, ORCID: <a href="https://orcid.org/0009-0006-0457-4476">https://orcid.org/0009-0006-0457-4476</a> , e-mail: <a href="mailto:teacher152@mfk.ukr.education">teacher152@mfk.ukr.education</a> ;             |
| <b>Isaiev A.B.</b>  | senior lecturer, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-5966-4886">https://orcid.org/0000-0002-5966-4886</a> , e-mail: <a href="mailto:andrii.isaiev@mipolitech.education">andrii.isaiev@mipolitech.education</a> ;            |
| <b>Koyfman O.O.</b> | канд. техн. наук, доцент, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, Zaporizhzhia, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2075-7417">https://orcid.org/0000-0003-2075-7417</a> , e-mail: <a href="mailto:aleksey.koyfman@mipolitech.education">aleksey.koyfman@mipolitech.education</a> |

The issue of organizing the collection and processing of technological information in an automated process control system (APCS) within the framework of its information subsystem operation is considered. The main tasks that arise during the development of software for the information subsystem are highlighted: determining the sensor polling time, selecting signal averaging methods, and selecting filtering algorithms. Based on the review of scientific articles, the current state of these issues has been assessed. The purpose of the study has been defined, the methods for solving the tasks have been described, and a physical prototype of a nominal technological object has been created. A system for collecting and processing analog signals has been implemented, and experiments have been conducted to measure technological parameters (temperature, air velocity) under various values of control actions. Algorithms for filtering and correcting analog signals have been selected. Methods for correcting temperature errors, accounting for the dynamics and magnitudes of control actions, have been established. A combination of filtering, correction, and mathematical modeling methods has been applied to create and test a digital twin of a technological unit with thermal and aerodynamic processes. The expediency of using a Kalman filter for rapidly changing parameters and a combination of a median filter and an aperiodic filter for slowly varying parameters has been demonstrated. The expediency of applying dynamic corrections that account for the rate of change of slowly varying parameters has also been demonstrated. An adaptive mathematical model with variable parameters, based on the range of control actions, has been developed in the form of a set of elementary links. The object parameters have been identified using the obtained experimental data; several variants of automatic control systems have been developed and tested; and the results of control system simulation have been analyzed.

**Keywords:** APCS, control object, identification, microcontroller, technological information input subsystem.

## References

- [1] V.S. Doroshenko, "Topologichna optymizatsiia konstruktivnykh vylyvkiv pry adyativnomu vyrobnytstvi z zastosuvanniam tsyfrovoho dviinyka" ["Topological optimization of castings designs in additive production using a digital twin"], *Protsesty lyttia – Casting Processes*, № 4(142), pp. 53-62, 2020. doi: [10.15407/plit2020.04.053](https://doi.org/10.15407/plit2020.04.053). (Ukr.)
- [2] V. Hrytsenko, V. Skurykhin, and H. Tsepkov, "Informatsiini tekhnolohii tsyfrovoy obrobky syhnaliv: novi pidkhody i perspektyvy vprovadzhennia" ["Information technologies of digital signal processing: new approaches and prospects for implementation"], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 12, pp. 33-41, 2005. (Ukr.)
- [3] O. V. Negodenko, "Modeli dlia obrobky informatsiinykh syhnaliv na osnovi tryhometrychnykh splainiv" ["Models for processing of information signals based on trigonometric splines"], *Zviazok – Connectivity*, № 4, pp. 47-50, 2018. (Ukr.)
- [4] M. Aldokhin, "Lohichnyi analizator syhnaliv na PLIS" ["FPGA Logic Analyzer"], *Elektronna ta akustychna inzheneriia – Electronic and Acoustic Engineering*, vol. 3, № 4, pp. 38-43, 2020. doi: [10.20535/2617-0965.2020.3.4.199926](https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.4.199926). (Ukr.)
- [5] O.I. Ryazantsev, V.S. Kardashuk, A.O. Ryazantsev, "Doslidzhennia vplyvu parametra filtra na yakist analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnalu" ["Study of the influence of the filter parameter on the quality of analog-to-digital signal conversion"], *Visnyk Shkhydnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnyk of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, № 7 (263), pp. 29-34, 2020. doi: [10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34](https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-29-34). (Ukr.)
- [6] J. Song et al, "Digital Estimation and Compensation of Analog Errors in Frequency-Interleaved ADCs," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 28, pp. 35-42, 2019. doi: [10.1142/S0218126619501342](https://doi.org/10.1142/S0218126619501342).
- [7] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP Journal of Manufacturing Science*

and Technology, vol. 29, part A, Pp. 36-52, 2020. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

- [8] F. Tao, H. Zhang, A. and A.Y.C. Liu, Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,” vol. 15, iss. 4, pp. 2405-2415, 2019. doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [9] J. Yang, Z. Ji, W. Liu, and Z. Xie, “Digital-Twin-Based Coordinated Optimal Control for Steel Continuous Casting Process,” *Metals*, vol. 13(4), article 816, pp. 123-143, 2023. doi: 10.3390/met13040816.
- [10] H. Kanokogi, “AI in the Process Industry,” *Yokogawa Technical Report (Engl. Ed.)*, vol. 64, no. 1, pp. 53-60, 2021.
- [11] J.L. Smith, “Advances in neural networks and potential for their application to steel metallurgy,” *Materials Science and Technology*, vol. 36, iss. 17, 2020. doi: 10.1080/02670836.2020.1839206.
- [12] D.Yu. Shylov, S. Yamnenko, “Systema dystantsiinoho monitorynhu vahy dlia bdzhilnytstva” [“System of Remote Weight Monitoring for Beekeeping”],

*Mikrosystemy, elektronika ta akustyka – Microsystems, Electronics and Acoustics*, vol. 27, № 3, pp. 267186–1 – 267186–7, 2022. doi: 10.20535/2523-4455.me.267186. (Ukr.)

- [13] O.O. Koifman, V.I. Miroshnychenko, O.I. Simkin, “Analychne doslidzhennia metodiv identyfikatsii obiekta keruvannia” [“Analytical study of methods of identification of control object”], in *MiningMetalTech 2023 – The Mining and Metals Sector: Integration of Business, Technology and Education: Scientific monograph*, Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023, pp. 113-147. doi: 10.30525/978-9934-26-382-8-7. (Ukr.)

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

**Цитуйте цю статтю як:** Методи корегування поточних значень технологічних параметрів в автоматизованих системах керування / Сімкін О. І., Сокол С. П., Ісаєв А. Б., Койфман О. О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51. С. 174-187. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344904>.