

Геращенко О.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков П.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Фармацевтична промисловість відіграє важливу роль у забезпеченні населення якісними та безпечними лікарськими препаратами. Стаття присвячена удосконаленню процесів керування в системах вентиляції чистих приміщень на заводах фармацевтичної продукції, які є невід'ємною частиною процесу виробництва та забезпечення контрольованих умов довкілля, необхідних для запобігання забрудненню та забезпечення безпеки продукції. Такі системи забезпечують не лише комфорт працівників в приміщеннях різного призначення, вони є надважливим фактором виготовлення якісної фармацевтичної продукції, виступаючи у ролі допоміжних системи основного технологічного процесу виробництва ліків. В статті розглянуто проблеми, з якими стикається фармацевтична галузь при впровадженні інновацій та покращенні процесів виробництва. Зокрема вимоги щодо відповідності регуляторним нормам не передбачають втручання в технологічні ланцюжки виготовлення лікарських препаратів. З іншого боку, конкуренція серед виробників спонукає підприємства знаходити резерви для підвищення ефективності споживання енергоресурсів і зменшення собівартості продукції. У статті проведено аналіз останніх актуальних досліджень щодо застосування сучасних технологій для автоматизації систем вентиляції. Визначено, що застосування цифрових технологій, таких як цифрові двійники, відкриває нові можливості для підвищення ефективності керування технологічним обладнанням. Основна увага в статті приділяється застосуванню нелінійного програмування для визначення параметрів динамічної моделі теплових процесів у вентиляційних системах. Як об'єкт керування розглянуто припливно-витяжну систему вентиляції з рециркуляцією. Визначено структуру функцій передач, які описують зв'язки між вхідними і вихідними технологічними параметрами. Проведено пасивну ідентифікацію для визначення параметрів моделей. Розроблено блок схему алгоритму пасивної ідентифікації. Визначено, що за результатами ідентифікації точність моделі складає 97.94%. Проведено налаштування каскадних систем, що дозволило підвищити точність регулювання параметрів середовища. У роботі розглянуто можливість подальшого масштабування запропонованого підходу для інших моделей технічного устаткування.

Ключові слова: припливно-витяжна система вентиляції, чисті приміщення, фармацевтична промисловість, цифровий двійник, методи ідентифікації, SCADA.

Постановка проблеми. У сучасному світі, де технологічний прогрес та інновації визначають розвиток різних галузей промисловості, системи вентиляції чистих приміщень стають важливою ланкою в забезпеченні ефективності виробничих процесів. Особливо це стосується фармацевтичної промисловості, де дотримання найвищих стандартів чистоти та контролю усіх аспектів виробництва має вирішальне значення для якості та безпеки лікарських засобів. Застосування сучасних цифрових технологій дозволяє оптимізувати функціонування систем вентиляції, що не тільки покращує ефективність та надійність виробничих процесів, але й дозволяє знаходити резерви

для зменшення собівартості виробництва. З цією метою виникає необхідність застосування цифрових технологій, для оптимізації функціонування систем вентиляції та знаходження резервів зменшення собівартості виробництва.

Незважаючи на існуючі технічні рішення у галузі вентиляції чистих приміщень, виникає ряд проблем, які обмежують їхню ефективність та адаптивність до змінних виробничих умов. Традиційні системи вентиляції відповідають високому рівню автоматизації та часто не модернізуються у зв'язку з відсутністю необхідності підвищувати точність управління. Однак, енергоефективність та швидкість реагування до змін у середовищі

виробництв можна значно покращити за допомогою цифрового двійника. Зважаючи на підвищення вартості електроенергії в Україні у зв'язку з пошкодженням енергосистеми внаслідок ракетних атак, питання енергоефективності набуває особливого значення. У таких умовах, впровадження гібридних джерел енергії та дизель-генераторів стає важливим кроком для забезпечення стабільної роботи виробництва. Використання цифрового двійника в управлінні вентиляційними системами дозволяє оптимізувати споживання енергії, збільшуючи їхню ефективність та адаптивність до змінних умов, що також важливим для підтримання конкурентоспроможності фармацевтичних компаній.

Сучасні системи автоматизації вже накопичують велику кількість даних, яку однак не так часто використовують для аналізу роботи обладнання. Наприклад, SCADA-системи великих підприємств записують показання найрізноманітніших датчиків всіх вентиляційних систем усіх приміщень підприємства. Застосування технології цифрового двійника може стати кроком уперед у вирішенні цієї проблеми. Інтеграція цифрового двійника в системи вентиляції дозволить не лише підвищити рівень автоматизації, але й забезпечити кращу якість регулювання та адаптивний контроль за параметрами середовища, забезпечуючи оптимальні умови для виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія цифрового двійника (ЦД) була представлена більше десяти років тому як інноваційний всеохоплюючий інструмент із очевидними перевагами, що включають моніторинг у реальному часі, моделювання, оптимізацію та точне прогнозування. Однак теоретична основа та практична реалізація цифрового двійника навіть сьогодні ще не повністю розкриті [1].

Незважаючи на те, що в дослідницьких і промислових роботах з'являється все більше успішних реалізацій, багато деталей впровадження технології недоступні для громадськості, що ускладнює повну оцінку їхніх компонентів і ефективності, порівняння, визначення успішних рішень, а також обмін досвідом. Розвиток методів машинного навчання, Інтернету речей (IoT) і великих даних (big data) призвели до значних покращень у функціях ЦД, таких як моніторинг у реальному часі та точне прогнозування [2]. Незважаючи на цей прогрес і зусилля окремих компаній, у цій галузі існують певні прогалини в дослідженнях і впровадженні, які досі перешкоджають широкому впровадженню концепції та технології DT.

ЦД був вперше представлений Майклом Гривсом трьома компонентами: цифровий (віртуальна частина) та реальний фізичний продукт плюс зв'язок між ними. Однак інші автори, такі як Тао та ін. [3] розширили цю концепцію до п'яти компонентів, включивши дані та сервіс як частину ЦД. Тао та ін. [4] також ввели поняття VV&A (verification, validation and accreditation, перевірку, валідацію та акредитацію) як компоненти ЦД і стверджує, що «ЦД характеризуються бездоганною інтеграцією між кібернетичним і фізичним просторами».

Оскільки наведені вище визначення є концептуально обґрунтованими, досягнення консенсусу щодо визначення ЦД вимагає визначення основних вимог до ЦД. З розвитком технологій, від яких залежить ЦД (таких як машинне навчання, великі дані та кібербезпека), ці вимоги з часом змінилися. Таким чином, загального опису архітектури ЦД також не існує, адже це сильно залежить від галузі, у якій використовується технологія [5].

Найпопулярнішим сектором для впровадження ЦД є управління життєвим циклом продукту (Product Lifecycle Management, PLM). Тао та ін. [3] обговорюють, що дані в PLM є ізольованими, фрагментованими та застійними. Робота також представляє теоретичну основу застосування ЦД до PLM, пропонуючи три етапи проектування: концептуальне проектування, детальне проектування та віртуальна перевірка. Ці етапи зображені на рис. 1.

У дослідженні також наведено приклад ЦД для велосипедів як тематичне дослідження, але не згадується методологія впровадження: наприклад, для проведення тестів на велосипеді з параметрами, що включають гальма, швидкість руху і вагу користувача, необхідне проведення фізичної симуляції, а також не вказане програмне забезпечення для проведення експерименту.

Куан Лю та ін. [5] пропонують використовувати рушій з відкритим кодом Unity3d для реалізації ЦД. Науковці створили еталонну модель для обробки та синхронізації складних систем автоматизованої потокової виробничої системи (Automated Flow-Shop Manufacturing System, AFMS) за допомогою ЦД, яка зокрема вирішує проблему оптимізації виробництва. Якщо ЦД – це весь життєвий цикл продукту, то використання аналітики та машинного навчання в ЦД означатиме визначення спільної проблеми оптимізації для життєвого циклу. Обробка безлічі параметрів і розв'язання задач багатоцільової оптимізації є актуальною проблемою для складних систем. Однак Куан Лю та ін. [5] успішно застосували

прототип DT для обробки даних у Ченду та Китаї й використали евристичні вимірювання, такі як виробничі пакети, уніфікована вартість системи та уніфікована продуктивність системи, щоб оцінити продуктивність ЦД (що призводить до доменно-залежного ЦД). На рис. 2 показано ЦД-кероване проектування AFMS.

Приклади компаній, які інвестують у технологію ЦД або надають програмне забезпечення ЦД

для клієнтів, або використовують функціональність ЦД для себе:

1. Інвестування в ЦД:

– Philips досліджує концепцію цифрового двійника для освітлення, оцифровуючи його [6]. Вони стверджують, що ЦД забезпечує функціонування екстрених служб, моніторинг у реальному часі та прогнозування технічного обслуговування.

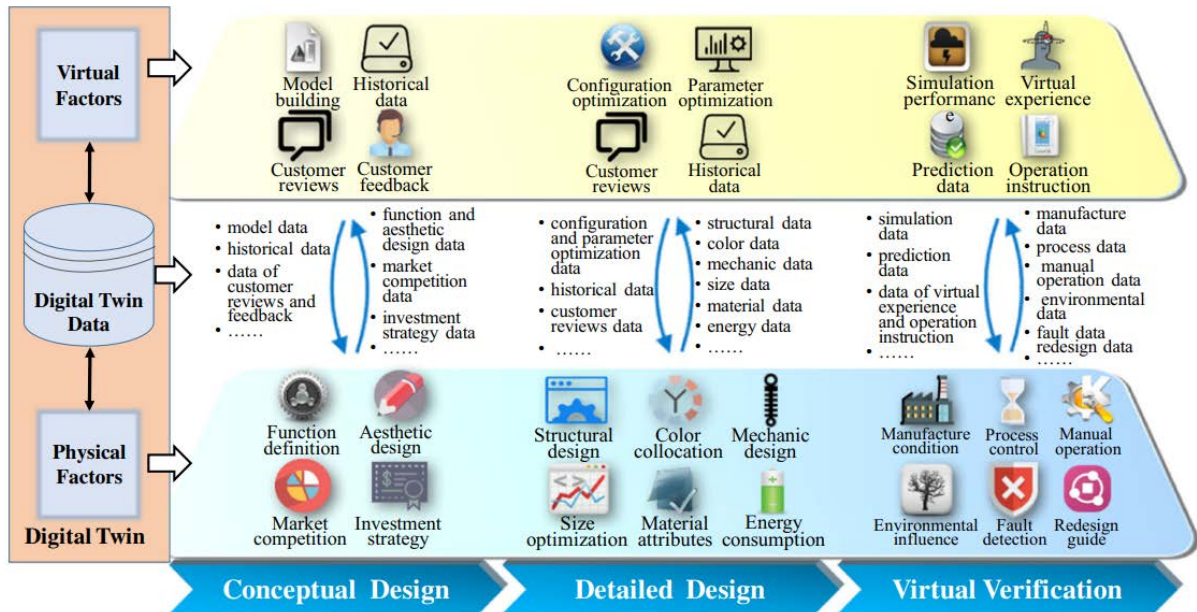


Рис. 1. Теоретична основа застосування ЦД для PLM

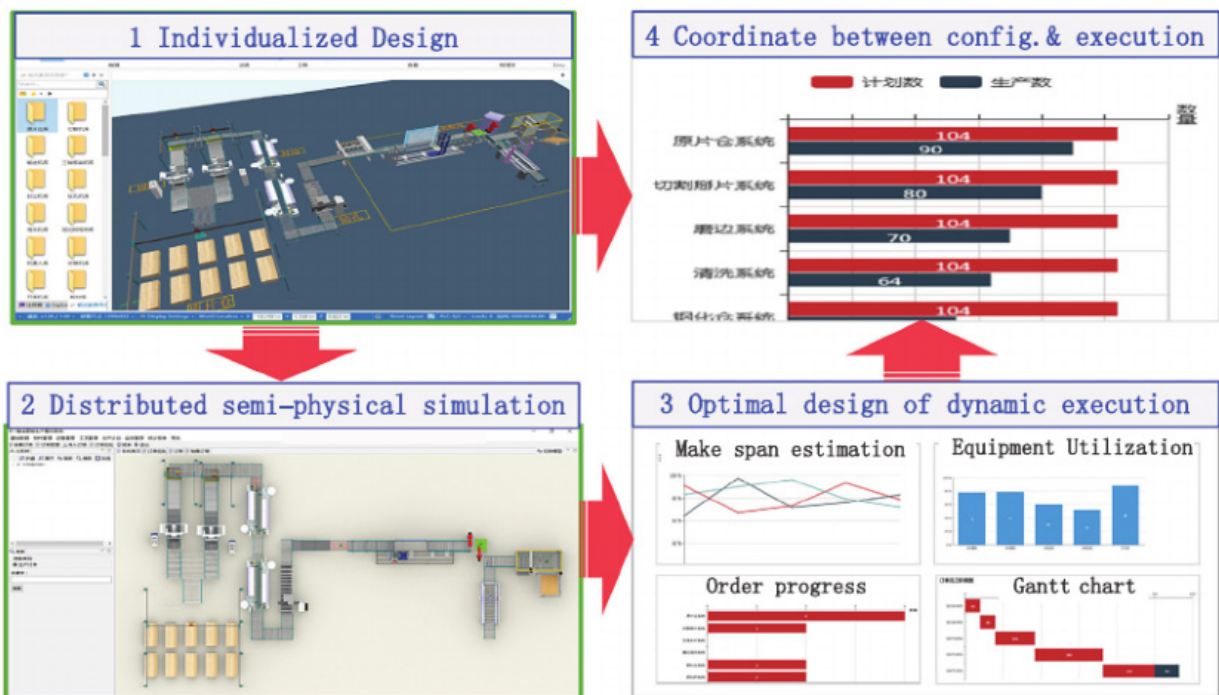


Рис. 2. ЦД-кероване проектування AFMS

2. Надання ЦД як послуги:

– Philips також надає технологію ЦД для використання систем охорони здоров'я, щоб отримати ранні ознаки попередження щодо технічних проблем у магнітно-резонансній томографії (Magnetic resonance imaging, MRI), комп'ютерній томографії (КТ) медичних апаратів [7]. Це може заощадити час простою обладнання.

– IBM трансформує порт Роттердам, використовуючи ЦД для моніторингу та підвищення загальної ефективності [8].

– Siemens має модель для впровадження цифрового двійника електромережі у Фінляндії [9].

3. Використання ДТ для власного використання:

– DHL впровадив свій перший цифровий двійник ланцюжка поставок для складу Tetra Pak в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні в Сінгапурі [10]. Хоча це й моніторинг у реальному часі, використання машинного навчання або не присутнє, або не є загальнодоступним, можливо, через його конкурентну перевагу.

Залежно від технологій IoT, великих даних та машинного навчання, може існувати величезний розрив між ідеальним впровадженням ЦД і практичним (наприклад, чи є необхідний прогрес у технології на даний момент доступний або підлягає подальшому дослідженню). Вартість і кількість доступних ресурсів також можуть сприяти збільшенню цього розриву в реалізації. Це обговорення залежить від детальнішого дослідження та наявності фактичного програмного забезпечення ЦД та його початкового дизайну. Деякі рішення, що наведені вище, використовують стороннє програмне забезпечення ЦД, але не описують детально кроки його побудови. У деяких статтях стверджується успішне використання ЦД для обробки даних, моніторинг у реальному часі, тестування моделювання та оптимізація [11]. Однак без доказів, заснованих на оцінці та показниках, важко зрозуміти, наскільки успішними є поточні впровадження ЦД.

Розглянемо також приклади моделювання, що тісно пов'язані з процесом управління температурою повітря системи вентиляції. Наприклад, моделювання процесів теплообміну у калорифері дослідниками у статті [12]. Автори використовують аналітичну модель із зосередженими параметрами. Розрахункова схема водяного калорифера представлена на рис. 3.

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_3p^3 + a_2p^2 + a_1p + 1} [(b_2p^2 + b_1p + b_0)\Delta\theta_{A0} + (b_5p^2 + b_4p + b_3)\Delta G_A + b_6\Delta\theta_{W0} + b_7\Delta G_W]$$

Модель охолоджувача матиме аналогічний вигляд через однакову фізику процесів, що протікають в цьому технічному устаткуванні.

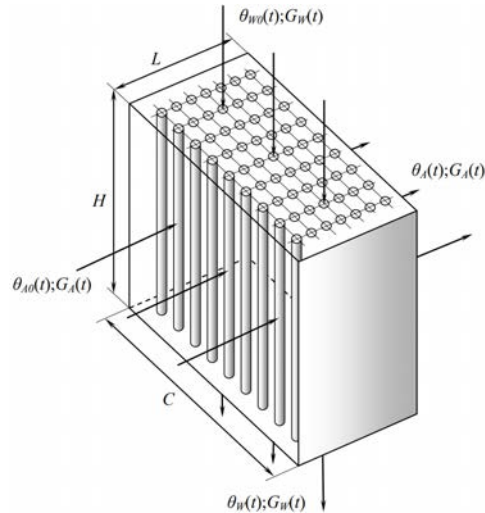


Рис. 3. Розрахункова схема калорифера

Модель приміщення розглядається в науковій роботі [13]. Дослідники подають модель приміщення у наступному вигляді:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2p^2 + a_1p + 1} [(b_1p + b_0)\Delta\theta_{A0} + (b_3p + b_2)\Delta G_A + (b_5p + b_4)\Delta N_E + b_6\Delta\theta_N],$$

На основі цих рівнянь, виведена структурну схему впливів динамічних процесів, вона зображена на рис. 4. Видно, що на вихідну температуру θ_A впливають такі параметри:

- θ_{A0} – температура повітря на виході;
- G_{A0} – витрата повітря;
- θ_{W0} – температура води на вході;
- G_{W0} – витрата води на вході.

Результуючими два параметри, а саме θ_A (вихідна температура повітря) та G_A (вихідна витрата повітря через калорифер).

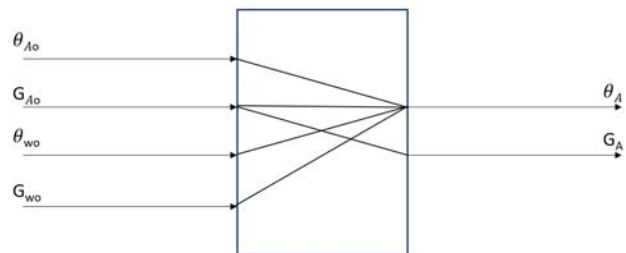


Рис. 4. Структура впливів динамічних елементів

Різницю моделі від реальності продемонстровано на рис. 5 та 6 (для нагрівача та охолоджувача відповідно):

Як видно з наведених графіків, результати майже однакові. Перевагою цієї моделі можна назвати те, що вона враховує відразу велику кількість технічних процесів, що може свідчити про

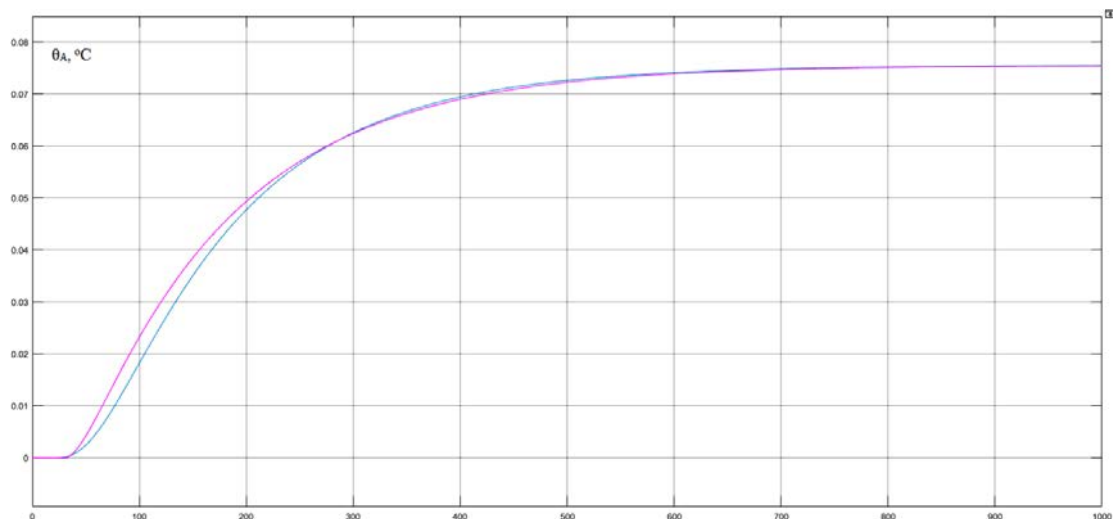


Рис. 5. Перехідні процеси калориферу

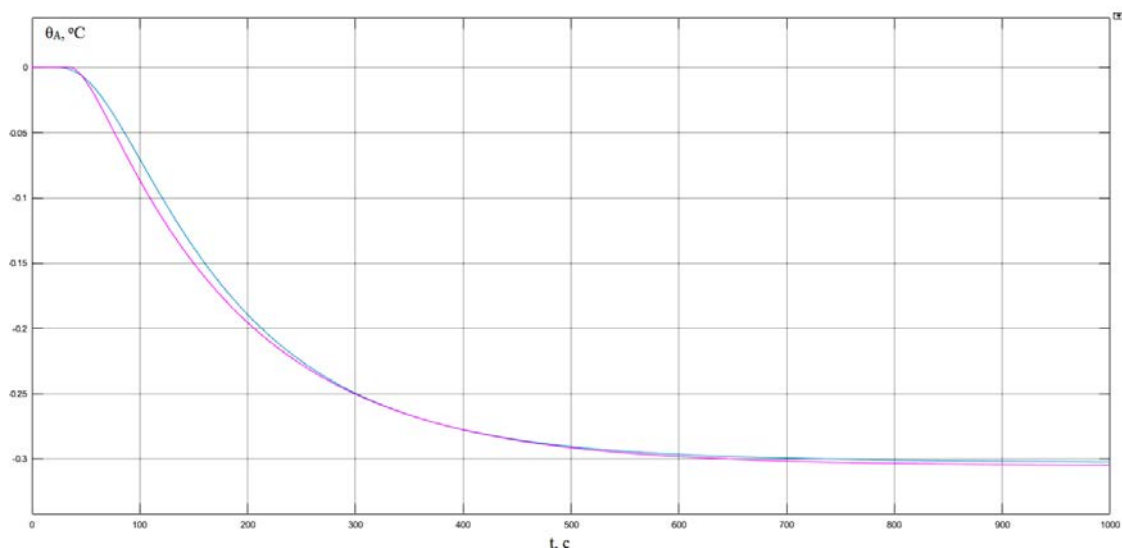


Рис. 6. Перехідні процеси охолоджувача

її точність. Недоліком аналітичного підходу є те, що отримання моделі потребує значних часових ресурсів, спеціалістів високої кваліфікації, глибокого розуміння фізики процесів, а також конструктивних особливостей технологічного обладнання.

Інший запропонований підхід отримання моделі [14] полягає в тому, що розрахунок здійснюється за допомогою нелінійного програмування на основі експериментальних даних. Результати роботи, з яких можна зробити висновок, що модель адекватна, наведені на рис. 7. T_{ha}^{model} - температура калориферу з моделі, $T_{ha}^{measured}$ – реальна температура калориферу.

Перевагою методу є те, що всі дані отримані з працюючої системи на виробництві. Модель в цьому випадку враховує усі деталі і особливості конкретного екземпляра обладнання.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка системи автоматизації вентиляції чистих приміщень з використанням інструментарію цифрового двійника на основі застосування методів машинного навчання для ідентифікації параметрів моделі об'єкту керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичне моделювання припливно-витяжної системи вентиляції.

Головними засобами для регулювання температури повітря, є теплообмінні апарати. Тому це є основні елементи, динамічні характеристики яких необхідно дослідити.

Для аналізу впливів керування та збурення на припливно-витяжну систему вентиляції (ПВСВ) розглянемо технологічну схему на рис. 8.

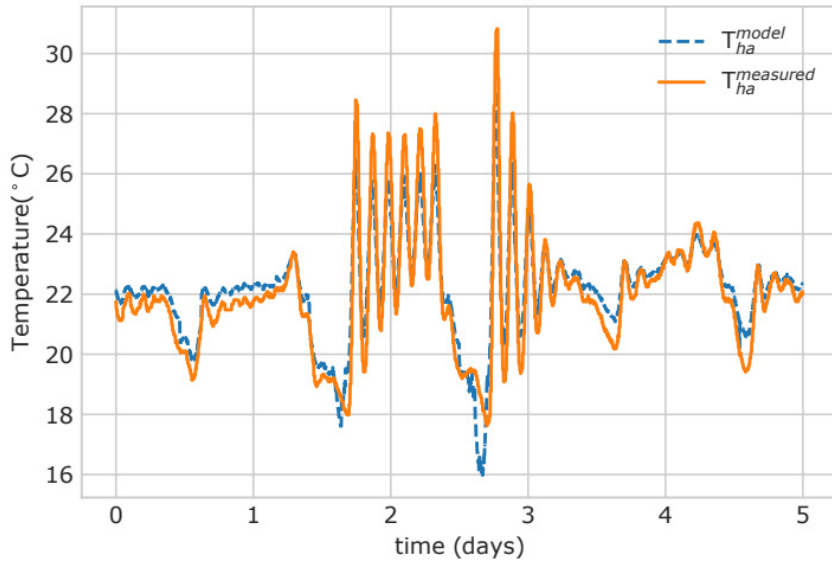


Рис. 7. Результати предиктивного контролю за нелінійною моделлю

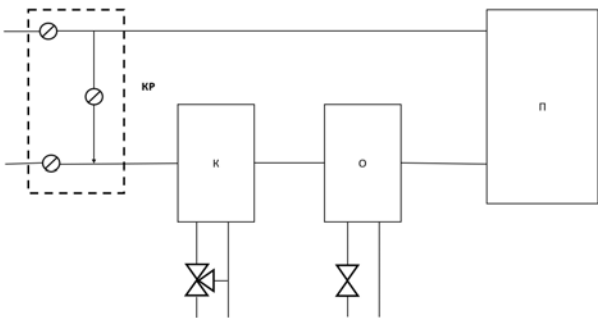


Рис. 8. Технологічна схема вентиляційної системи з рециркуляцією

На схемі зображені основні структурні елементи ПВСВ з рециркуляцією: К – калорифер; О – охолоджувач; П – приміщення; КР – камера рециркуляції; Трубопроводи.

Для регулювання температури у приміщенні існує два контури регулювання. Перший контур

це робота на нагрів повітря, він використовується взимку і реалізується за допомогою калорифера нагріву. Другий контур – це контур охолодження. Він реалізований охолоджувачем та використовується влітку.

Провівши декомпозицію цієї технологічної схеми на окремі елементи, можна отримати розширену параметричну схему вентиляційної системи [14], де представлено зв'язки між входами та виходами кожного апарату, рис. 9.

На схемі детально представлено все технічне устаткування, а також по ній можна відслідкувати вплив того чи іншого устаткування на кінцеві процеси. На схемі також наведено залежності кожного технічного устаткування та проміжних ланок, таких як повітропровід.

Проведемо аналіз технології. Керуючий вплив калориферу нагріву – температура води. Це пов'язано з тим, що між входом і виходом кало-

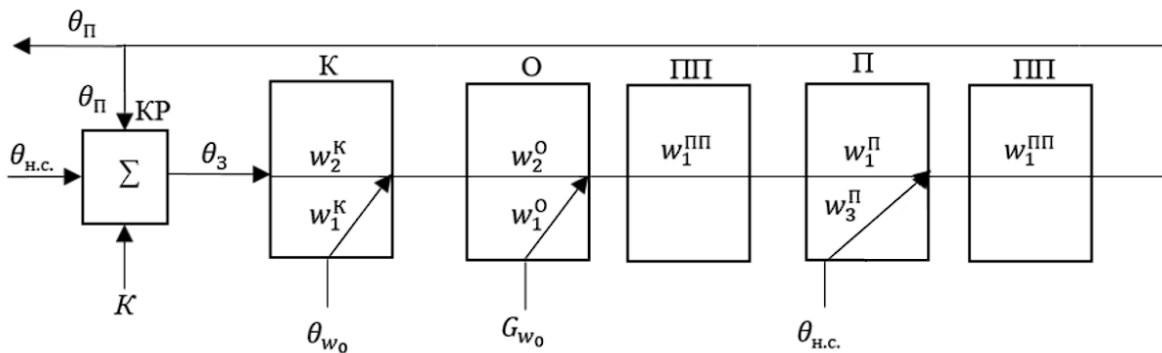


Рис. 9. Розгорнута параметрична схема ПВСВ із рециркуляцією

рифера стоїть 3-х ходовий клапан і витрата циркуляції теплоносія в калорифері завжди однакова. Зміна співвідношення відкриття та закриття клапану змінює температуру теплоносія, що йде в калорифер. Цей вплив позначається на схемі перехідною функцією W_1^k , але також зі схеми видно, що калорифер також містить іншу складову, а саме передаточну функцію W_2^k .

Таким чином, якщо прийняти до уваги ще й технічні особливості цієї системи, побачимо, що необхідно враховувати повітропровід та охолоджувач, адже навіть якщо охолоджувач не працює разом з калорифером нагріву, він забирає на себе невелику частину теплової енергії.

В охолоджувачі керуючий вплив – витрата. В ньому регулювання виконується звичайним 1-ходовим клапаном, тож при регулюванні змінюється саме витрата холодної води. Але аналогічним чином можна побачити, що на охолоджувач впливає не лише витрата води, а ще й технічне приміщення, трубопровід та навантаження.

Розгорнуту параметричну схему, що зображено на рис. 9 можна агрегувати й звести до структурної схеми, що зображена на рис. 10.

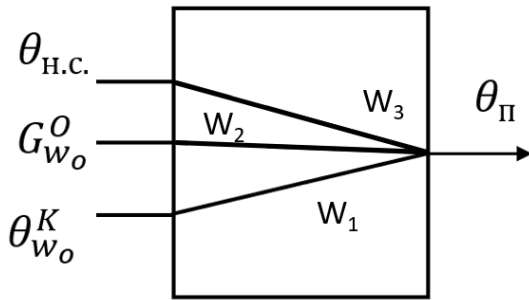


Рис. 10. Структурна схема температури в приміщенні

Ця схема показує, що температура приміщення залежить відразу від трьох вхідних величин, що мають свої перехідні функції, а саме:

- $\theta_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища;
- $G_{w_0}^o$ – витрата на охолоджувачі;
- $\theta_{w_0}^k$ – температура калорифера.

Таким чином можна скласти формули впливу на приміщення температури води, що входить у калорифер. Залежність між входами і виходами структурних схем на рис. 9 та 10 визначається за такими залежностями:

$$W_1 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{w_0}^k} = w_1^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_2 = \frac{\theta_{п.}}{G_{w_0}^o} = w_1^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_3 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{н.с.}} = w_1^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

$$W_3 = \frac{\theta_{п.}}{\theta_{н.с.}} = \frac{(1-K) w_2^k w_2^o w_1^{\text{II}} w_1^{\text{III}}}{1 - K w_2^k w_2^o w_1^{\text{II}}} + w_3^{\text{II}} w_1^{\text{III}}$$

Оскільки в роботі [13], автори приходять до спрощення перехідних функцій до аперіодичних ланок першого та другого порядків, а в статті [14] ці об'єкти представлені аперіодичними ланками першого порядку, прийнято гіпотезу щодо наступного вигляду передатних об'єктів моделі функцій:

$$W_1 = \frac{k_k}{T_k p + 1} \cdot e^{-p\tau_k} \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{k_o}{T_o p + 1} \cdot e^{-p\tau_o} \quad (2)$$

$$W_3 = \frac{k_{н.с.}}{T_{н.с.} p + 1} \cdot e^{-p\tau_{н.с.}} \quad (3)$$

Обґрунтування методу для ідентифікації параметрів моделі. Для подальшої роботи над математичною моделлю обрано експериментальний метод, бо для даної моделі дуже важливо оцінити модель точно, а використання технології цифрового двійника дає можливість цю модель уточнювати, отже й проблем адаптації моделі до зовнішніх умов в моделі немає. З огляду на те, що обладнання працює без відриву від виробництва, проведення активного експерименту з поданням збурюючих впливів на обладнання неможливе, тому був використаний метод пасивного експерименту, який полягав в отриманні великого масиву даних протягом трьох місяців.

Методи параметричної ідентифікації широко застосовуються при рішенні практичних завдань ідентифікації лінійних і нелінійних систем. Питанню оцінювання результатів присвячено багато робіт, починаючи з розробки К. Гауссом методу найменших квадратів в 1795 р., на даний момент існує безліч різних підходів, способів і методів параметричної ідентифікації.

Процедура параметричної ідентифікації або оцінювання параметрів – це процес визначення значень, що характеризують динаміку об'єкту, за допомогою певних способів обробки експериментальних даних у попередньому припущенні, що структура моделі досліджуваного об'єкта відома, тобто при наявності математичної моделі об'єкту. В якості параметрів моделі розглядаються коефіцієнти диференціальних рівнянь, передаточних функцій, частотних характеристик або нелінійних рівнянь тощо.

Одним з методів оцінювання параметрів, є метод найменших квадратів. Задача полягає в наступному: за наявними виборчими даними спостереже-

них за вхідними та вихідними сигналами з інтервалом дискретизації Δt потрібно оцінити значення параметрів, що забезпечують мінімальну величину параметрів функціональної похибки (неув'язки) між модельними та фактичними даними.

Як критерій близькості використовується мінімальна квадратична нев'язка J значень фактичних змінних y_j і модельних.

$$J(a_i) = \sum_{j=1}^N e_j^2 = \sum_{j=1}^N (y_j - y_{Mj})^2 =$$

$$= \sum_{j=1}^N (y_j - (a_0 + a_1 x_j + a_2 x_j^2 + \dots + a_m x_j^m))^2 \rightarrow \min,$$

де y_j – експериментальне значення вихідної змінної, отримане в j -ий момент часу; y_{Mj} – модельне (розрахункове) значення в той же момент часу.

Для знаходження коефіцієнтів регресії складаються рівняння наявності екстремуму за кожним параметром a_i :

$$\frac{\partial J}{\partial a_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, m.$$

Сукупність таких співвідношень утворює систему рівнянь щодо оцінок $m+1$ коефіцієнтів рівняння регресії, вирішення якої визначає шукані коефіцієнти.

Пошук коефіцієнтів моделі можна шукати чисельним методом, що ґрунтується на використанні градієнтних методів. Налаштування моделі може розглядатися як рух по гіперболі $J = J(\beta)$ у просторі параметрів β до точки екстремуму. Відповідно до цього, завдання визначення параметрів моделі інтерпретується як задача оптимізації цільової функції $J(\beta)$. Для вирішення такого завдання можуть використовуватися градієнтні методи, що ґрунтуються на ітераційній процедурі наближення до екстремуму цільової функції, що характеризується співвідношенням:

$$\beta(k+1) = \beta(k) + \gamma(k) \text{grad} J[\beta(k)],$$

де $\beta(k)$ – поточне наближення до істинного вектора параметрів β^* ; $\gamma(k)$ – службовий параметр, що характеризує довжину k -го кроку ітераційного процесу; k – номер ітерації. Градієнтні методи є основою для ідентифікації складних об'єктів та для оптимізації нелінійних критеріїв якості ідентифікації.

На основі цих відомостей, для ідентифікації було вибрано метод найменших квадратів, оскільки він є більш універсальним та простим у імплементації.

Пасивна ідентифікація аналітичної моделі вентиляційної системи.

Пасивна ідентифікація математичної моделі виконувалася за алгоритмом, блок-схема якого зображена на рис. 11.

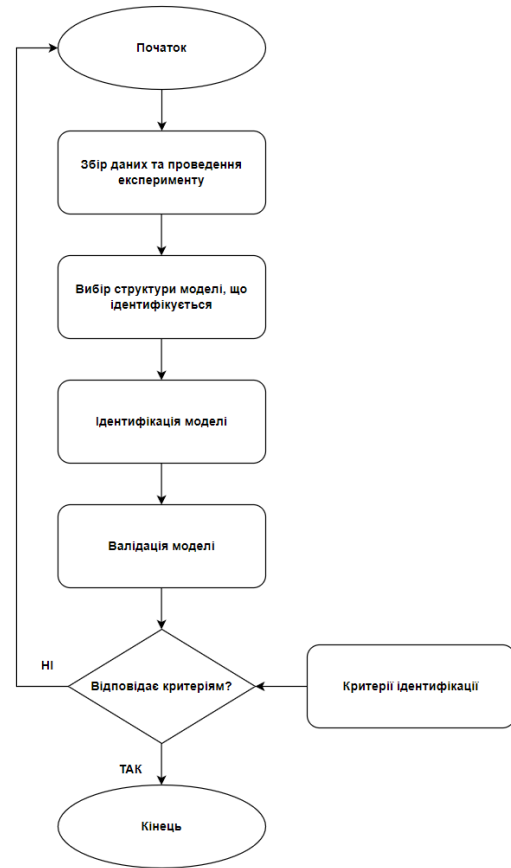


Рис. 11. Блок-схема процесу ідентифікації параметрів системи

Ідентифікація системи базується на реальних даних. Тому, весь процес починається з проведення експерименту та процесу збору даних з системи. Результат збору даних зображено на рис. 12–14 у вигляді трендів.

Процес ідентифікації та налагодження моделі – це ітеративний процес, який передбачає уточнення параметрів моделі для підвищення її точності. Наступним кроком є валідація моделі, що полягає у порівнянні показників математичної моделі та реальної роботи системи.

Якщо модель не відповідає критерію (або критеріям), процес починається спочатку. Можливо, необхідно зібрати більше вхідної інформації, чи змінити структуру моделі, чи налагодити сам алгоритм ідентифікації, після чого спробувати знову. Цей процес продовжується до тих пір, поки поставлені критерії не досягнуті і модель не вважається придатною до використання.

Розробка експериментальної математичної моделі системи вентиляції.

Для ідентифікації параметрів моделі було використано програмне забезпечення Matlab Identification Toolbox. Пасивну ідентифікацію

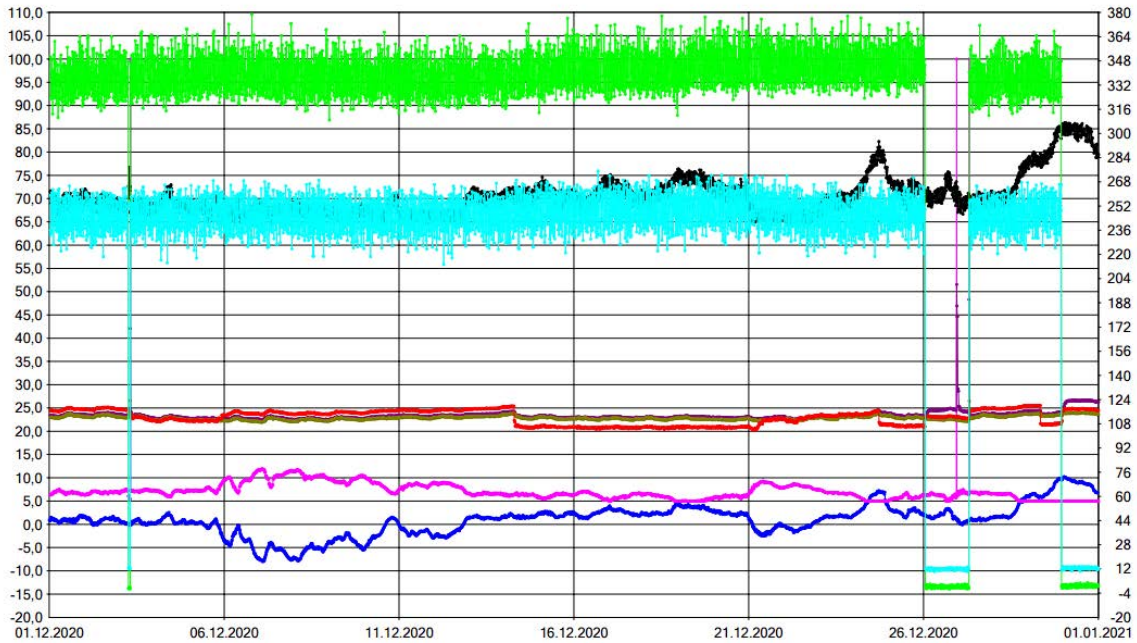


Рис. 12. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.12.2022 по 01.01.2023

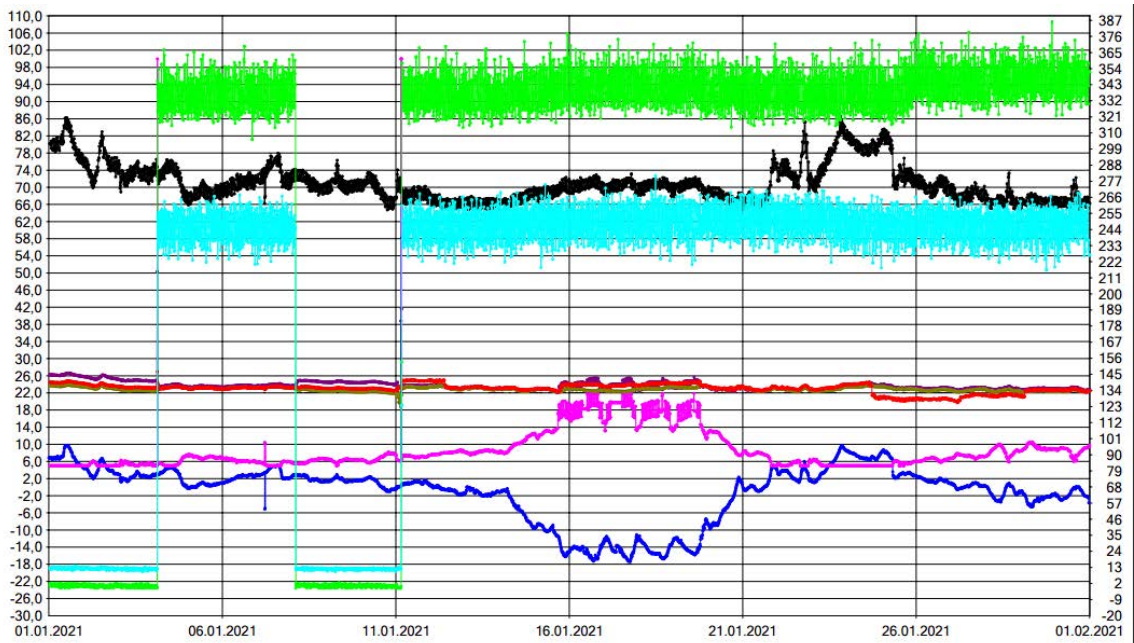


Рис. 13. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.01.2023 по 01.02.2023

проведено за алгоритмом, наведеним на рис. 11. З зібраних параметрів створено файл heaterdata. Код програми показано на рис. 15.

Графік процесу представлено на рис. 16.

Таким чином, задано дані для ідентифікації. Аналогічним чином задаємо дані для валідації адекватності моделі. Відповідні графіки наведені на рис. 17.

Далі необхідно оцінити затримку системи, що робиться програмно та використати вбудовану у Matlab функцію для отримання передаточної функції. Таким чином, отримуємо параметри моделі. Після ідентифікації модель набуває вигляду:

$$W_{\kappa} = \frac{0.39}{87p + 1} e^{-15p}$$

Наступним після ідентифікації кроком за блок-схемою процесу (рис. 11) є перевірка параметрів моделі на адекватність. Для цього порівнюємо

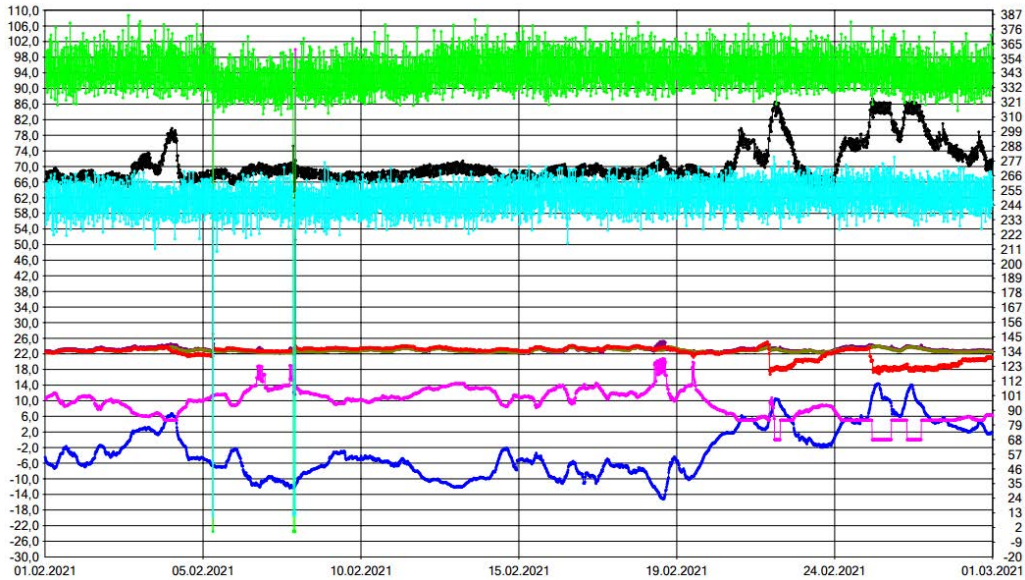


Рис. 14. Тренди основних характеристик побудови моделі за період з 01.02.2023 по 01.03.2023

```

/MATLAB Drive/heaterModel.m
1   load heater_data
2
3   Ts = 0.5; % Час дискретизації
4
5   % Збір даних з використанням команди |iddata| для їх відображення командою
6   % plot
7   heater_data = iddata(output1.data,input1.data,Ts);
8   heater_data.InputName = 'Збурення';
9   heater_data.InputUnit = 'C';
10  heater_data.OutputName = 'Реакція';
11  heater_data.OutputUnit = 'C';
12  heater_data.TimeUnit = 'minutes';
13  plot(heater_data)
14  set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
15  grid on
16
    
```

Рис. 15. Процес перенесення параметрів системи у середовище Matlab

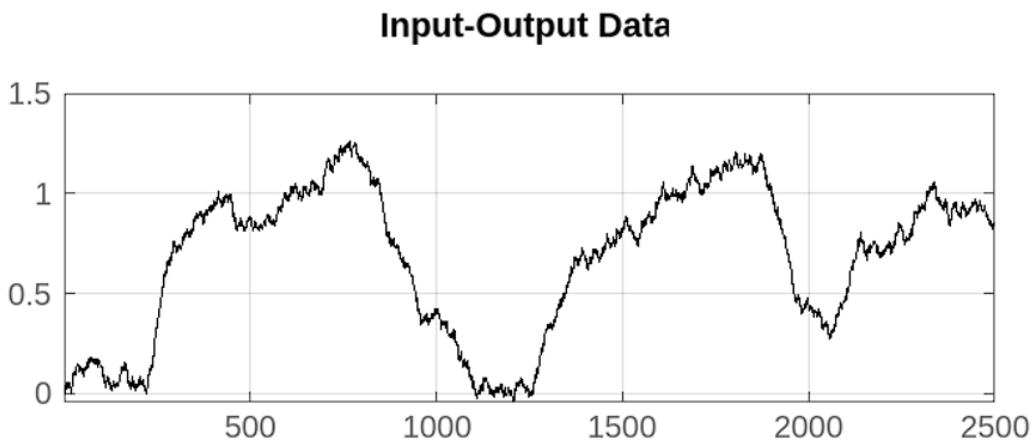


Рис. 16. Графік процесу нагріву повітря калорифером

Input-Output Data

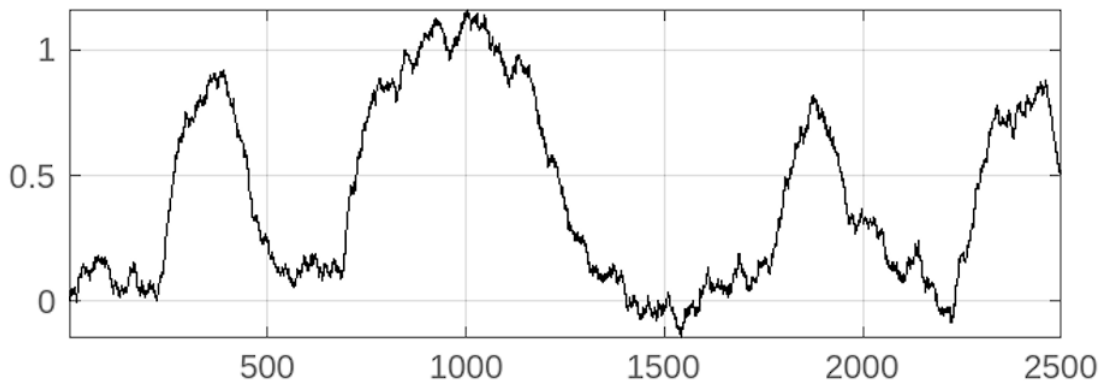


Рис. 17. Графік процесу нагріву повітря калорифером для валідації

```

34 % Перевірка моделі
35 opt = compareOptions;
36 opt.InitialCondition = 'z';
37 compare(heater_data,sysTF, opt);
38 set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
39 grid on
40 % Перевірка даних для валідації
41 opt = compareOptions;
42 opt.InitialCondition = 'z';
43 compare(validation_data,sysTF,opt)
44 set(findall(gca, 'Type', 'Line'),'LineWidth',4);
45 grid on
    
```

Рис. 18. Перевірка моделі

реальні дані з реакцією моделі на таке саме збурення. Код програми наведено на рис. 18.

На рис. 19 представлені результати порівняння моделі та реальної роботи системи.

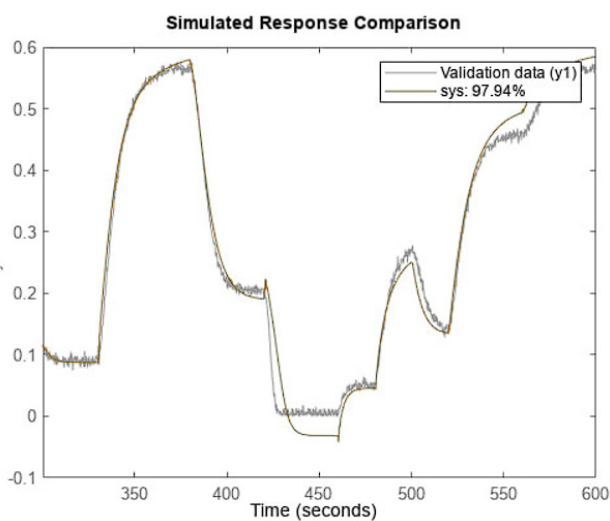


Рис. 19. Результати валідації моделі системи

Як видно з результатів, точність моделі складає 97.94%. Наступним кроком є оцінка відповідності

моделі до критеріїв. Покращення цієї математичної моделі – це окремий процес роботи з такими параметрами, як структура моделі, налагодження самого алгоритму ідентифікації або навіть збір більшої кількості даних.

Аналогічним чином можна програму для ідентифікації параметрів охолоджувача, знайдемо перехідні функції охолоджувача та приміщення.

Розробка системи керування вентиляційної системи.

Для управління була обрана каскадна система автоматичного регулювання (КСАР). Каскадна схема регулювання режиму роботи системи на нагрів виглядає наступним чином:

Виходячи зі структури системи вентиляції, що розглядається, можна дійти до висновку, що коригуючий регулятор налаштовується на температуру в приміщенні, а стабілізуючий – на температуру після технічного устаткування, тобто калорифера чи охолоджувача відповідно.

Варто зазначити, що формула еквівалентного об'єкту у випадку, коли система працює на нагрів, виглядає так:



Рис. 20. Структура каскадної системи регулювання WRFPV2V

$$W_{екв} = W_{вип.об.} + W_3 \cdot W_{рег.кор.} = W_1 + W_3 \cdot W_{рег.кор.}$$

Можна врахувати те, що при низьких частотах значення $W_{вип.об.}$ набагато більше за значення коригуючого регулятора, тому:

$$W_{вип.об.} \gg W_3 \cdot W_{рег.кор.} \rightarrow W_{екв} = W_{вип.об.}$$

Аналогічно й для охолоджувача.

Розрахунок стабілізуючих регуляторів.

У якості закону регулювання прийнято пропорційно-інтегральний закон, так як застосування диференційної складової не доцільне. Завданням такої системи – це досягти заданої у якості уставки температури на виході з установки. Тоді у якості зворотного зв'язку приймемо датчик температури на виході з приміщення.

Для обрахунку параметрів налаштувань регулятора проведені обрахунки методами РАФХ. Очікується отримання перехідного процесу з мінімальним показником перерегулюванням, бо у даному випадку необхідно отримати найменшу з можливих тривалостей перехідного процесу. Тому, нехай $m = \ln \frac{1-\psi}{-2\Pi} = 0,45$. Результати розрахунків прямих показників якості регулювання по каналу завдання-вихід та по каналу збурення-вихід наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Прямі показники якості по обом каналам

Показник якості	Канал	
	завдання-вихід	збурення-вихід
Статична похибка	0	0
Динамічна похибка	0,7	0,17
Час регулювання, с	790	110
Степінь затухання	0,91	0,92
Перерегулювання, %	25,7	14,7

Аналогічно розраховано коригуючий регулятор. Показники якості наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Прямі показники якості по обом каналам для нагрівача

Показник якості для калорифера	Канал	
	завдання-вихід	збурення-вихід
Статична похибка	0	0
Динамічна похибка	0.58	$1.72 \cdot 10^{-3}$
Час регулювання, с	2380	3460
Степінь затухання	0.93	0.88
Перерегулювання, %	20	62

Як оптимальні налаштувань ПІ-регулятора для досліджуваної системи прийняли параметри, що наведені в дослідженні вище. При переході на режим нагріву, налаштування такі: $K_p = 9,27$, $T_i = 34,71$. Для визначення параметрів налаштування охолоджувача розрахунки та підхід аналогічні.

Висновки. Наявність SCADA систем на фармацевтичних виробництвах дозволяє на основі архівних даних методами машинного навчання отримувати моделі об'єктів керування. В даній роботі на основі цих даних була створена математична модель процесу, за допомогою якої розраховані налаштування систем керування, що підвищило якість функціонування загалом. Використовуючи даний підхід, уточнення моделі також може відбуватися періодично, автоматизовано та без участі спеціалістів високої кваліфікації.

Зважаючи на схожість побудови цієї системи автоматизації з іншими, що використовуються на підприємствах, підхід, що наведений в цій статті, можна масштабувати. Розроблена математична модель може використовуватися для схожих вентиляційних систем, а параметри, надані моделлю, можна використати для всіх систем автоматизації, таким чином помноживши ефективність декількох вентиляційних установок одночасно.

Список літератури:

1. VanDerHorn E., Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*. 2021. Pp 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
2. Kusiak A. Smart Manufacturing Must Embrace Big Data. *Nature*. 2017. Pp 23-25. <https://doi.org/10.1038/544023a>
3. Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi etc. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Pp 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
4. Fei Tao, He Zhang, Ang Liu. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Pp. 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
5. Qiang Liu, Hao Zhang, Jiewu Leng etc. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*. 2018. Pp 12
6. Digital twins: what do they mean for lighting? URL: <https://www.lighting.philips.co.uk/oem-emea/stay-connected/digital-twins> (дата звернення 10.07.2024).
7. The rise of the digital twin: how healthcare can benefit. URL: <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html> (дата звернення 10.07.2024).
8. How the Port of Rotterdam is using IBM digital twin technology to transform itself from the biggest to the smartest. URL: <https://www.ibm.com/blog/iot-digital-twin-rotterdam/> (дата звернення 10.07.2024).
9. For a digital twin of the grid. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:09c20834-4ed4-49d8-923d-ebcc541cab37/inno2017-digitaltwin-e.pdf> (дата звернення 10.07.2024).
10. DHL Supply Chain partners Tetra Pak to implement its first digital twin warehouse in Asia Pacific. URL: <https://group.dhl.com/en/media-relations/press-releases/2019/dhl-supply-chain-partners-tetra-pak-implement-first-digital-twin-warehouse-asia-pacific.html> (дата звернення 10.07.2024).
11. Qingfei Min, Yangguang Lu, Zhiyong Liu etc. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *International Journal of Information Management*. 2019. Pp. 502-519. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.020>
12. Голінко І. М., Галицька І. Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів. *Інформаційні системи, механіка та керування*. 2016. С. 83-92. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ismk_2016_15_13
13. Адах, В. Г., Голінко І. М. Адаптивна система керування припливно-витяжною системою вентиляції з рециркуляцією. 2019. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30438>
14. Ghawash Faiq, Hovd Morten, Schofield Brad etc. Model Predictive Control of Air Handling Unit for a Single Zone Setup. *Researchgate*. 2022. <https://doi.org/10.1109/AdCONIP55568.2022.9894128>

Herashchenko O.O., Novikov P.V. AUTOMATION OF CLEAN ROOM VENTILATION SYSTEM USING MACHINE LEARNING METHODS

The pharmaceutical industry plays an important role in providing the population with high-quality and safe medicines. The article is devoted to the improvement of control processes in the ventilation systems of clean rooms at pharmaceutical factories, which are an integral part of the production process and ensuring controlled environmental conditions necessary to prevent contamination and ensure product safety. Such systems provide not only the comfort of workers in premises of various purposes, they are an important factor in the production of high-quality pharmaceutical products, acting as auxiliary systems of the main technological process of drug production. The article discusses the problems faced by the pharmaceutical industry when introducing innovations and improving production processes. In particular, the requirements for compliance with regulatory norms do not involve interference in the technological chains of the manufacture of medicinal products. On the other hand, competition among manufacturers encourages enterprises to find reserves to increase the efficiency of energy consumption and reduce the cost of production. The article analyzes the latest relevant research on the application of modern technologies for the automation of ventilation systems. It was determined that the use of digital technologies, such as digital doubles, opens up new opportunities for increasing the efficiency of technological equipment management. The main focus of the article is on the application of nonlinear programming to determine the parameters of the dynamic model of thermal processes in ventilation systems. The supply and exhaust ventilation system with recirculation is considered as a control object. The structure of transfer functions is defined, which describe the relationships between input and output technological parameters. Passive identification was carried out to determine the parameters of the models. A block diagram of the passive identification algorithm has been developed. It was determined that according to the results of identification, the accuracy of the model is 97.94%. Adjustment of cascade systems was carried out, which made it possible to increase the accuracy of the adjustment of environment parameters. The paper considers the possibility of further scaling of the proposed approach for other models of technical equipment.

Key words: supply-exhaust ventilation system, clean rooms, pharmaceutical industry, digital double, identification methods, SCADA.