

УДК 681.5.017 + 664.723

М. С. Юхимчук, д-р техн. наук, проф.; В. О. Лесько, канд. техн. наук, доц.;
Ю. Ю. Іванов, канд. техн. наук, доц.; Ю. А. Горчук; О. В. Климчук

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ЗЕРНА

Процес сушіння зернових культур є складним нелінійним тепломасообмінним об'єктом, що характеризується інерційністю, взаємозалежністю параметрів та високою чутливістю до зовнішніх збурень. Ефективна реалізація цього процесу потребує безперервного контролю та автоматичного регулювання технологічних параметрів, оскільки їх відхилення можуть призвести до зниження якості зерна або нераціонального використання енергетичних ресурсів.

У роботі розглянуто розробку системи автоматичного управління сушінням зернових культур з використанням інтелектуального модуля керування. Запропонований підхід передбачає застосування адаптивного ПД-регулятора, алгоритмів нечіткої логіки, методів машинного навчання або гібридних моделей, параметри яких визначаються на основі математичного моделювання процесу сушіння, реалізованого у середовищі Python. Це забезпечує підвищення адаптивності системи до змінних умов сушіння та фізико-механічних властивостей зернової маси.

Функціональна схема автоматизації відображає взаємозв'язок між сенсорними засобами, регулятором та виконавчими механізмами, визначаючи логіку передавання інформації та реалізацію зворотних зв'язків. Структурна схема системи автоматичного управління дозволяє чітко розподілити функції між компонентами, визначити потоки даних і сигналів керування, а також інтегрувати інтелектуальний модуль для підвищення ефективності процесу. Для формалізації архітектури програмного забезпечення побудовано UML-діаграми, які описують взаємодію оператора з системою, внутрішню структуру модулів та обмін даними між ними. Інтеграція технологій IoT забезпечує збір, обробку й аналіз технологічних параметрів у режимі реального часу, що підвищує надійність та енергоефективність процесу сушіння зернових культур.

Впровадження запропонованої системи забезпечує підтримання оптимальних режимів сушіння зернових культур, зменшення енерговитрат і втрат зерна, що є важливим чинником розвитку точного землеробства та інтелектуальних аграрних технологій і сприяє підвищенню загальної ефективності виробничих процесів.

Ключові слова: система автоматичного управління, процес сушіння зерна, інтелектуальний модуль, IoT-система моніторингу, промислові інтерфейси.

Вступ

Технологічний процес сушіння зернових культур характеризується складною тепломасообмінною взаємодією між зерновою масою та сушильним агентом, що обумовлює його нелінійність, інерційність і чутливість до зовнішніх збурень. Практична реалізація цього процесу вимагає постійного контролю та регулювання основних технологічних параметрів, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до погіршення якості продукції або перевитрат енергії [1, 2].

У типових промислових умовах керування сушінням зерна здебільшого здійснюється на основі простих регуляторів або з використанням ручного втручання оператора. Такий підхід не дозволяє повною мірою компенсувати змінні властивості зерна, коливання параметрів навколишнього середовища та нерівномірність теплообміну в об'ємі сушильної камери. У результаті виникає проблема нестабільності якості сушіння, локального перегріву або недосушування зернової маси [3].

Виникає необхідність розробки системи автоматичного управління, здатної адаптуватися

до зміни умов та забезпечувати підтримання оптимальних параметрів процесу [4, 5]. **Метою роботи** є створення інтелектуальної системи управління процесом сушіння зернових культур, яка забезпечує:

- підтримання вологості зерна в межах заданих нормативних значень;
- стабілізацію температури зернового шару;
- зменшення енергоспоживання сушильної установки;
- підвищення рівномірності сушіння в об'ємі;
- мінімізацію ролі людського фактору.

Наукова новизна роботи полягає в розробці структури системи автоматичного управління процесом сушіння зернових культур із використанням IoT-архітектури та адаптивного інтелектуального регулятора, здатного змінювати параметри керування відповідно до поточного стану об'єкта. На відміну від традиційних рішень, у запропонованій системі передбачено поєднання методів математичного моделювання та інтелектуального аналізу даних для оптимізації режимів сушіння.

Отримані вимірювальні сигнали оцифровуються та передаються засобами IoT-платформи з використанням сучасних комунікаційних протоколів, що створює умови для інтеграції системи в мережеву інфраструктуру та подальшого аналізу даних у реальному часі. Важливою є організація автоматичного регулювання основних керуючих впливів на технологічний процес, зокрема температури сушильного агента, інтенсивності повітряного потоку та тривалості теплового впливу на зернову масу. Це досягається шляхом формування керуючих сигналів, які надходять на виконавчі механізми сушильної установки та забезпечують підтримання заданих режимів роботи [6, 7].

Ключовим елементом запропонованої системи є розробка інтелектуального модуля керування, що може базуватися на застосуванні адаптивного ПІД-регулятора, алгоритмів нечіткої логіки, машинного навчання [8, 9] або гібридного підходу з урахуванням параметрів, одержаних на основі математичної моделі процесу, реалізованої у середовищі Python. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість і адаптивність системи керування до змінних умов сушіння та властивостей зернової маси [7].

Окрім цього, важливим завданням є забезпечення візуалізації перебігу процесу для оператора у вигляді графіків, часових трендів і поточних значень контрольованих параметрів у SCADA-інтерфейсі або веб-додатку, що підвищує інформативність і зручність експлуатації системи та дозволяє оперативно реагувати на відхилення від заданих режимів. Технологічний процес сушіння може бути поданий у вигляді об'єкта автоматичного управління, до якого прикладається керуючий вплив (температура і швидкість повітряного потоку), а на виході знімається регульована величина – остаточна вологість зерна.

Постановка задачі

Таким чином, об'єктом управління в складі САУ є сушильна камера разом із зерною масою як сукупним теплотехнічним об'єктом.

Керуючими величинами виступають:

- температура сушильного агента;
- швидкість повітряного потоку;
- час перебування зерна у сушильній зоні.

Збурюючі фактори включають:

- початкову вологість зерна;
- температуру зовнішнього середовища;
- нерівномірність зернового шару;
- зміну хімічних і фізичних властивостей культури.

Регульованою величиною вибирається середня поточна вологість зерна, оскільки саме цей параметр є основним критерієм якості сушіння та придатності зерна до зберігання.

Враховуючи необхідність підвищення інтелектуального рівня системи, у структурі САУ передбачається наявність:

- сенсорного рівня (датчики);
- рівня збору даних (мікроконтролер/PLC);
- рівня обробки (алгоритми управління);
- рівня передачі інформації (ІоТ-модуль);
- рівня відображення та аналізу (SCADA/інтерфейс оператора).

Таким чином, у підсумку формулюється комплексна задача синтезу САУ, яка передбачає:

- розробку функціональної структури системи;
- створення структурної схеми САУ;
- побудову UML-діаграм;
- програмну реалізацію алгоритмів управління;
- перевірку системи на Python-моделі.

Розробка схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації процесу сушіння зерна відображає взаємозв'язок між основними елементами системи керування, вимірювання та виконавчими механізмами, які забезпечують підтримання заданих параметрів процесу сушіння. Первинним джерелом інформації у функціональній схемі виступають вимірювальні сенсори. До системи включені:

- датчик температури повітря в сушильній камері;
- датчики температури на вході та виході теплоносія;
- датчик відносної вологості повітря;
- сенсор вологості зерна (діелектричного або ємнісного типу);
- датчик швидкості повітряного потоку.

Сигнали з цих сенсорів є аналоговими або цифровими та надходять до мікроконтролерного модуля збору даних. У роботі умовно використовується плата класу ESP32 / Arduino / STM32, яка виконує функції первинної обробки даних [10, 11]: оцифровування сигналів, усереднення значень, фільтрацію шумів та передавання інформації на вищий рівень системи. Після збору дані передаються на керуючий комп'ютер або сервер через бездротовий інтерфейс (Wi-Fi або LoRa) із використанням протоколу MQTT або HTTP. Цей етап надзвичайно важливий для подальшої програмної реалізації, оскільки саме тут формуються масиви даних для аналізу в середовищі Python.

Наступною ланкою функціональної схеми є програмний модуль обробки й аналізу даних:

- аналіз поточних значень вологості зерна;
- порівняння з заданим значенням;
- обчислення похибки регулювання;
- формування керуючого впливу на систему.

Розрахований керуючий сигнал подається на виконавчі пристрої сушарки:

- електричний нагрівач або пальник (регулювання потужності нагріву);
- вентилятор подачі повітря (регулювання швидкості обертання);
- заслінки подачі повітря;
- транспортуючі механізми (шнек або конвеєр).

Таким чином, формується замкнена система керування за принципом зворотного зв'язку, що зображено на рис. 1: значення вологості та температури → обробка → керуючий вплив → зміна фізичного стану зерна → повторне вимірювання. Ця схема є основою всієї подальшої розробки системи автоматичного керування сушінням зерна і використовується як фундамент під час побудови структурної схеми САУ.

Структурна схема САУ з інтелектуальним модулем

Структурна схема САУ сушіння зернових культур відображає взаємозв'язок між об'єктом керування, сенсорним блоком, модулем збору даних, регулятором та виконавчими механізмами. Основною метою побудови такої схеми є забезпечення чіткого поділу функцій, визначення потоків інформації і сигналів керування, а також інтеграція інтелектуального компонента, що підвищує адаптивність і ефективність системи [12]. Структурна схема САУ з інтелектуальним модулем наведена на рис. 2.

Основні складові системи:

1. Об'єктом керування виступає сушильна камера з шаром зернової маси. Вихідні змінні об'єкта включають середню вологість зерна та середню температуру шару, які підлягають контролю.

2. Сенсорний блок включає датчики температури та вологості зерна, параметрів повітряного потоку та температури теплоносія. Забезпечується постійний моніторинг стану об'єкта.

3. Модуль збору та передавання даних (IoT-рівень) виконує оцифровку сигналів, попередню обробку (усереднення, фільтрацію шумів) та передавання даних на керуючий сервер або комп'ютер через протоколи MQTT або REST API. Цей рівень забезпечує безперервну передачу інформації для подальшого аналізу та керування.

4. Інтелектуальний модуль регулювання є ключовим компонентом САУ. Модуль реалізує алгоритми адаптивного управління процесом сушіння, базуючись на: ПД-регуляторі з адаптивним налаштуванням коефіцієнтів або нечіткій логіці для інтерпретації нечітких входів (наприклад, "висока вологість", "середня температура"); гібридному підході, де ПД параметри оптимізуються на основі попередніх вимірювань та симуляцій.

5. Виконавчі механізми (нагрівачі, вентилятори та заслінки подачі повітря) реагують на керуючі сигнали інтелектуального модуля, змінюючи інтенсивність нагріву та повітряного потоку.

6. Зворотний зв'язок. Параметри об'єкта постійно вимірюються сенсорами і надходять назад до інтелектуального модуля. Завдяки зворотному зв'язку забезпечується коригування впливів у режимі реального часу, що підвищує точність і надійність процесу.

У такій схемі чітко виділяються основні потоки [13, 14]:

– вхідні потоки даних: сенсорні сигнали → модуль збору даних → інтелектуальний регулятор;

– керуючі потоки: сигнал регулятора → виконавчі механізми → зміна стану об'єкта;

– зворотні потоки: реакція об'єкта (температура, вологість) → сенсорний блок → регулятор.

Таким чином, формується замкнутий контур керування, який дозволяє системі адаптуватися до змін початкових умов, зовнішніх факторів та властивостей зерна.

Розробка UML-діаграм компонентів системи

Для забезпечення чіткого уявлення про архітектуру інтелектуальної системи керування сушінням зернових культур побудовано UML-діаграми різного типу: Use Case, Class Diagram, Activity Diagram та Sequence Diagram. Вони відображають взаємодію користувача з системою, внутрішню структуру програмних модулів та обмін даними між компонентами.

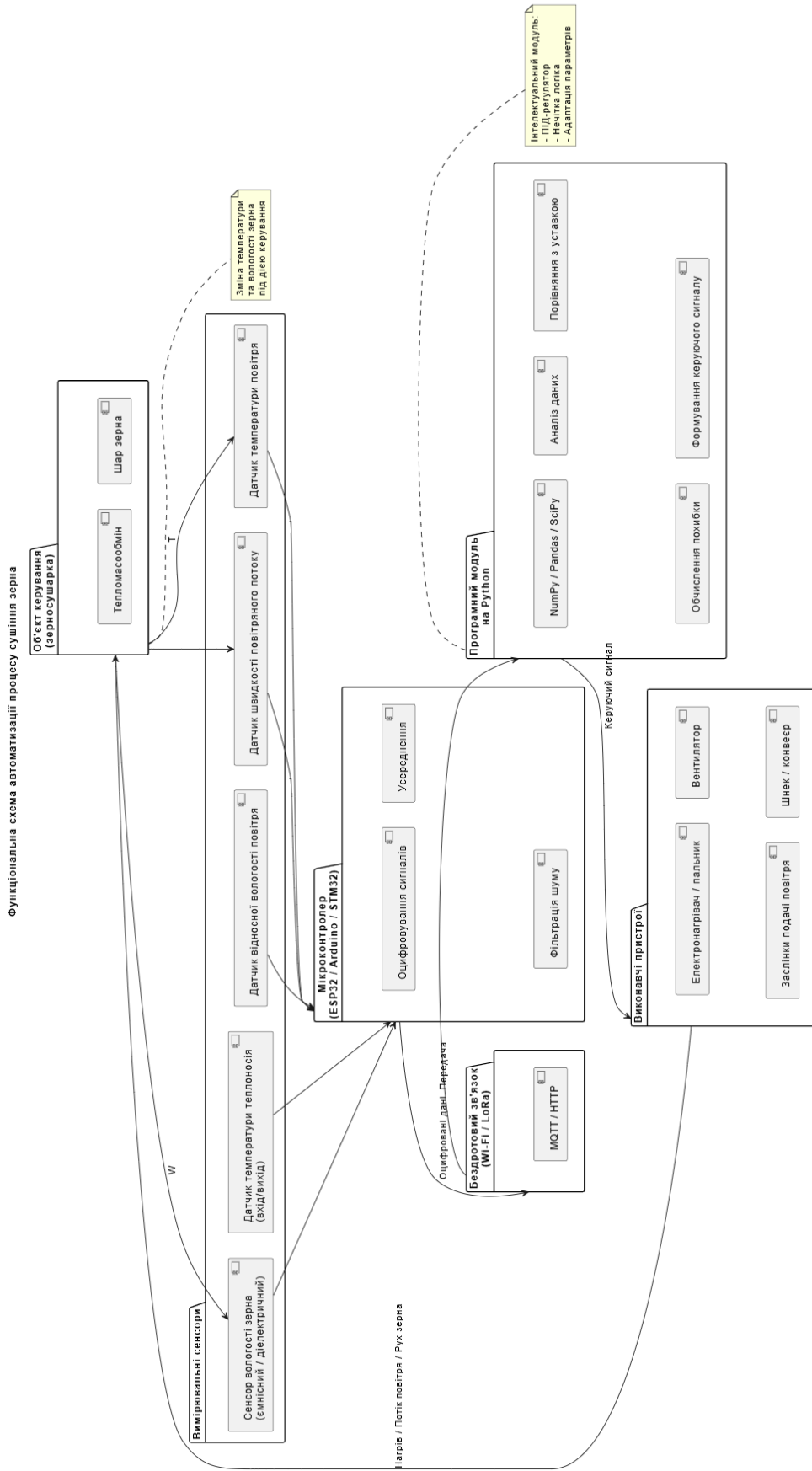


Рис. 1. Структурна схема САУ за принципом зворотного зв'язку

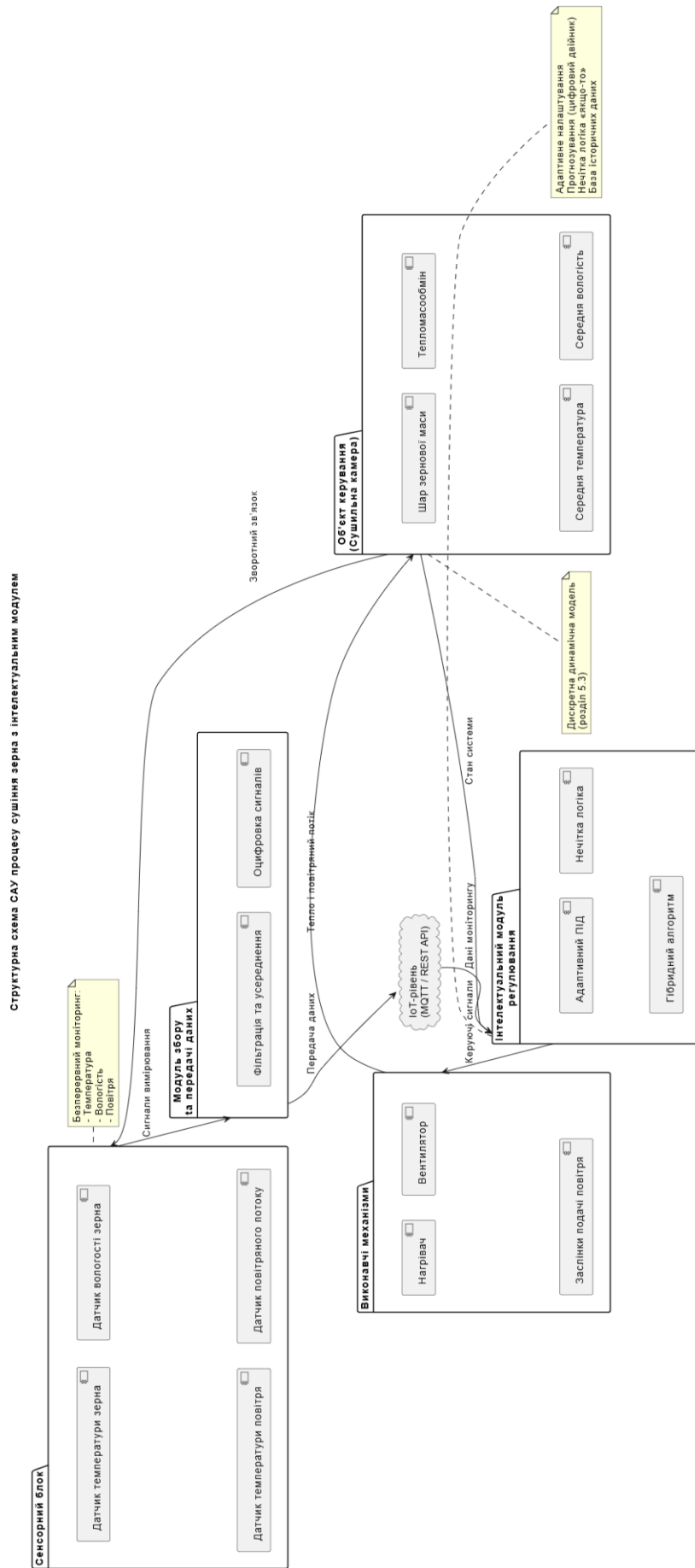


Рис. 2. Структурна схема САУ з інтелектуальним модулем

Use Case діаграма показує основні сценарії взаємодії оператора з системою САУ. Основні Наукові праці ВНТУ, 2026, №1, <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2026-1-43-59>

дії користувача, що зображені на рис. 3, включають: встановлення уставок вологості та температури; запуск та зупинка процесу сушіння; моніторинг поточних параметрів у реальному часі; отримання повідомлень про перевищення критичних значень; аналіз історичних даних та графіків процесу. Ця діаграма відображає основну взаємодію оператора з системою, яка підлягає реалізації в SCADA або web-інтерфейсі.

Діаграма класів, що зображена на рис. 4, демонструє структуру програмних компонентів системи та їхні зв'язки. Діаграма чітко демонструє потік даних від сенсорів до регулятора та виконавчих механізмів, а також включення модуля візуалізації для користувача. Основні класи включають:

- Sensor Module – збір даних із сенсорів, фільтрація та передача на модуль контролю;
- Data Acquisition – обробка та оцифровка сигналів, підготовка даних для регулятора;
- Intelligent Controller – реалізація алгоритмів ПІД, адаптивного та нечіткого управління;
- Actuator Module – виконавчі механізми (нагрів, вентилятори, заслінки);
- Visualization Module – побудова графіків, трендів, відображення поточних параметрів.



Рис. 3. Розроблена діаграма використання

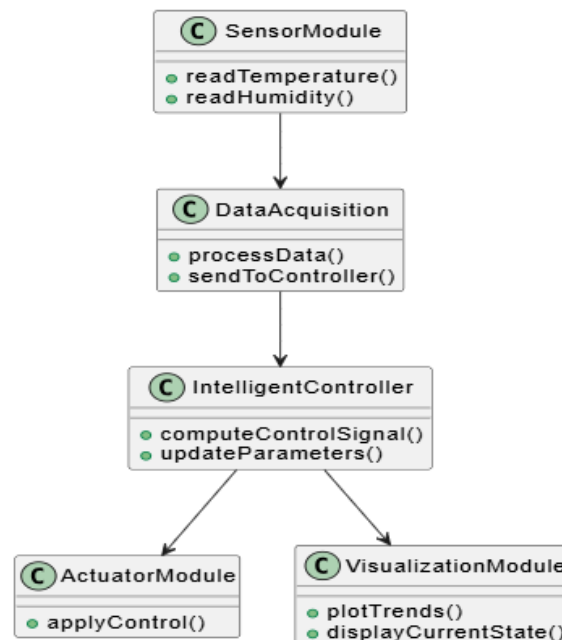


Рис. 4. Розроблена діаграма класів

Activity diagram, що зображена на рис. 5, показує логіку роботи алгоритму управління у часі. Цей цикл повторюється неперервно протягом всього процесу сушіння, забезпечуючи адаптивне керування.

Sequence Diagram, що зображена на рис. 6, показує порядок обміну даними між IoT-модулями:

1. Сенсори знімають показники температури та вологості.
2. Модуль збору даних передає їх на інтелектуальний контролер через MQTT.
3. Контролер обчислює керуючий сигнал.
4. Сигнал передається на виконавчі механізми.
5. Виконавчі пристрої впливають на процес.
6. Сенсори фіксують результат, цикл повторюється.

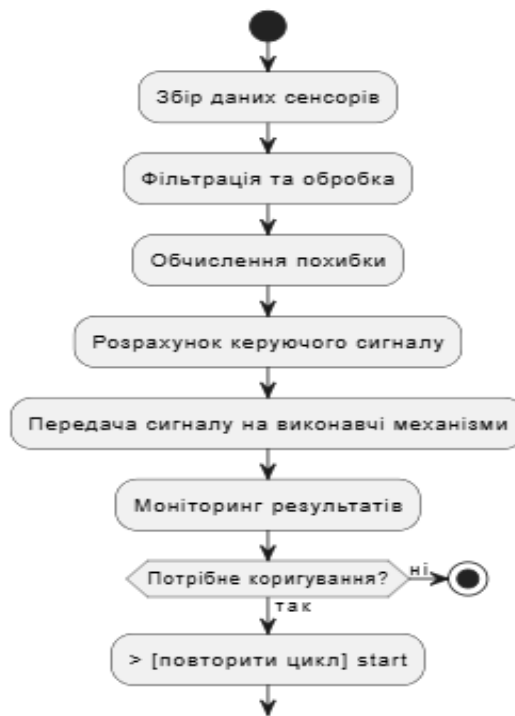


Рис. 5. Розроблена діаграма активності

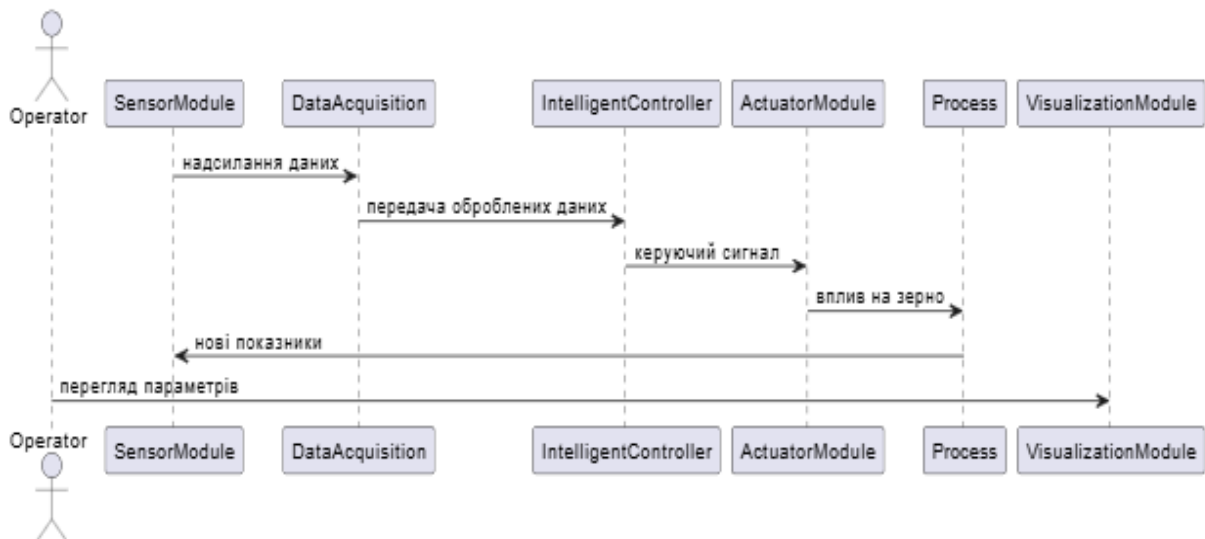


Рис. 6. Розроблена діаграма послідовності

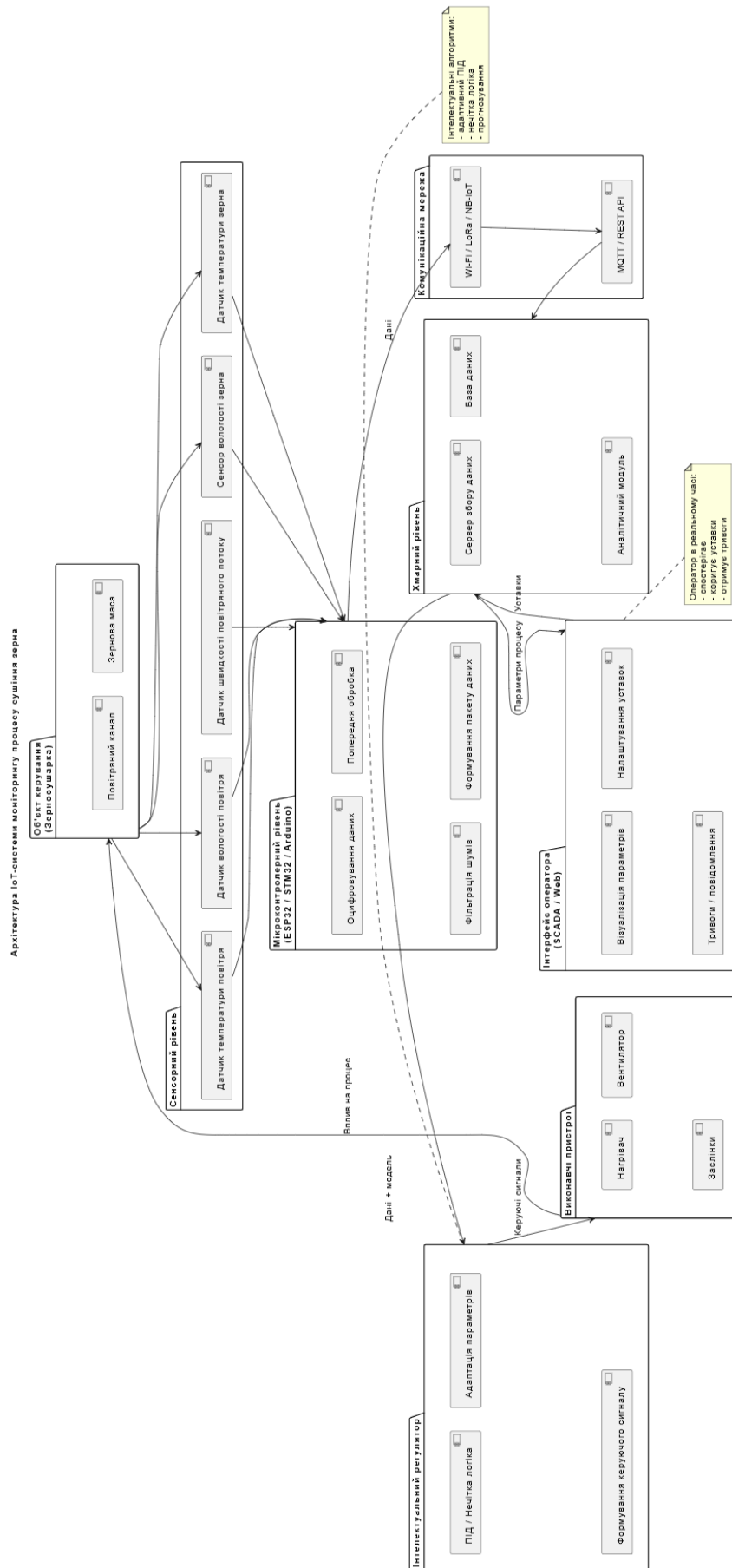


Рис. 7. Архітектура IoT-системи моніторингу процесу сушіння зерна

Побудовані UML-діаграми дозволяють формалізувати архітектуру системи, визначити потоки інформації між сенсорним, регуляторним та виконавчим рівнями, задати основу для PlantUML-схем та подальшої розробки структурної та функціональної реалізації, а також спростити програмну інтеграцію алгоритмів управління в Python.

Архітектура IoT-системи моніторингу

Інтеграція технологій IoT у систему автоматичного управління сушінням зернових культур дозволяє здійснювати постійний збір, обробку та аналіз даних у режимі реального часу. Архітектура IoT-системи побудована за принципом багаторівневої взаємодії, що зображено на рис. 7 [6].

Сенсорний рівень охоплює сукупність датчиків, призначених для вимірювання основних фізичних параметрів процесу сушіння. До нього належать сенсори вологості зерна емнісного або діелектричного типу, первинні перетворювачі температури зернової маси у вигляді термопар або термісторів, а також датчики температури та відносної вологості повітря в сушильній камері і сенсори швидкості повітряного потоку. Вимірювальні елементи формують сигнали в аналоговій або цифровій формі, які для підвищення точності та надійності додатково проходять попередню обробку безпосередньо на сенсорному рівні, зокрема усереднення та фільтрацію випадкових завад.

Збір та опрацювання інформації з сенсорного рівня здійснює мікроконтролерний модуль на базі таких платформ, як ESP32, STM32 або Arduino. Він забезпечує приймання сигналів від датчиків, їх оцифрування та первинну цифрову обробку, а також формування пакету даних для подальшої передачі. Обмін інформацією з центральним сервером або хмарною платформою відбувається через бездротові канали зв'язку, зокрема Wi-Fi, LoRa або NB-IoT. У разі необхідності автономної роботи мікроконтролер може також виконувати прості алгоритми локального регулювання, що підвищує надійність функціонування системи при тимчасовій втраті зв'язку з верхнім рівнем. Вимірювані дані структуруються у вигляді інформаційних пакетів, що містять часові мітки, значення вологості та температури, а також інформацію про поточний стан сенсорів, після чого передаються на наступний рівень системи для подальшого аналізу та формування керуючих впливів. Хмарна архітектура дозволяє легко масштабувати систему, підключати нові сенсори та забезпечує доступ до даних через веб-інтерфейс для оператора.

Інтерфейс оператора забезпечує візуалізацію поточних параметрів процесу (графіки вологості та температури, стан виконавчих механізмів); установку уставок для вологості та температури; моніторинг сигналів зворотного зв'язку; повідомлення про відхилення від нормальних значень.

Архітектура IoT-системи передбачає наступні потоки та забезпечує безперервний контроль і управління процесом сушіння в реальному часі [3, 7, 12]:

1. Сенсор → Мікроконтролер: виміряні значення температури, вологості та швидкості повітря.
2. Мікроконтролер → Хмара: оцифровані та оброблені дані передаються через MQTT або REST API.
3. Хмара → Інтелектуальний регулятор: аналіз даних, прогнозування процесу, формування керуючого сигналу.
4. Регулятор → Виконавчі механізми: температура, швидкість повітря, заслінки.
5. Зворотний потік: нові показники сенсорів → хмара → регулятор → оператор.

Математичне моделювання технологічного процесу сушіння зернових культур

Сушіння зернових культур є процесом, що полягає у видаленні вологи з зерна під впливом теплового агента (повітря, газу або іншого теплоносія) за рахунок теплопередачі та масообміну. Це комплексний фізичний процес, який включає одночасно теплоперенос,

масоперенос і кінець молекулярної дифузії вологи всередині зернової маси. Для побудови математичної моделі процесу необхідно чітко визначити основні фізичні закономірності:

1. Масообмін. Видалення вологи з зерна відбувається через дифузію вологи до поверхні і подальший її відвід потоками сухого повітря. Основний закон, який описує перенесення вологи у зерні – закон Фіка для дифузії:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де X – локальна вологість зерна (кг води/кг сухої речовин); D – коефіцієнт дифузії вологи в зерні; z – координата вздовж товщини шару зерна; t – час.

2. Теплоперенос. Нагрів зерна здійснюється за рахунок конвекції і теплопровідності. Рівняння теплопереносу описується законом Фур'є:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q, \quad (2)$$

де T – температура зерна; ρ – густина зерна; c_p – теплоємність; k – коефіцієнт теплопровідності; Q – джерело тепла від конвекційного обміну з повітрям.

3. Взаємозв'язок вологості та температури. Швидкість випаровування вологи залежить від температури зерна та вологості навколишнього повітря, а також від швидкості повітряного потоку. Цей зв'язок можна врахувати через коефіцієнт конвективного масопереносу h_m та закон Генрі для вологості:

$$N = h_m (X_s - X_\infty), \quad (3)$$

де N – швидкість виділення вологи з поверхні зерна; X_s – вологість на поверхні; X_∞ – вологість повітря, що оточує зерно.

Процес сушіння зерна зазвичай поділяють на дві стадії:

– волога поверхнева – швидке видалення вологи з поверхні, коли зерно ще насичене вологою;

– волога внутрішня (дифузійна) – поступове видалення вологи із середини зерна через дифузію, яка є повільнішою і контролюється фізико-хімічними властивостями зерна.

Для систем автоматичного управління важливо визначити динамічну залежність вологості та температури від керуючих впливів: температура повітря, швидкість потоку, тривалість сушіння [5]. Це дозволяє перейти від стаціонарних аналітичних моделей до чисельного моделювання, яке є придатним для програмної реалізації у Python.

Таким чином, фізико-математичні основи процесу сушіння забезпечують базу для побудови точних і адаптивних моделей, що враховують властивості зерна, умови сушіння та зовнішні фактори. Вони є необхідною передумовою для розробки математичної моделі об'єкта та її спрощеної форми для САУ.

Для правильної постановки задачі необхідно визначити граничні умови. На поверхні зерна ($z = 0$):

$$-D \frac{\partial X}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_m (X_s - X_\infty), \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_c (T_{нов} - T_s). \quad (5)$$

На внутрішній межі шару ($z = L$):

$$\left. \frac{\partial X}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = 0, \quad (6)$$

що відповідає відсутності масо- та теплопереносу на внутрішньому кінці шару.
Початкові умови ($t = 0$):

$$X(z,0) = X_0, T(z,0) = T_0, \quad (7)$$

де X_0 та T_0 – початкова вологість та температура зерна.

Коефіцієнт дифузії D може залежати від температури та вологості зерна, що робить рівняння нелінійним. Коефіцієнт конвекції h_c і масопереносу h_m можуть змінюватися залежно від швидкості повітря та вологості, що також додає нелінійності. Для використання у САУ часто застосовують лінійні спрощення, що дозволяють реалізувати модель у вигляді системи однорідних диференціальних рівнянь.

Підготовка моделі для чисельного рішення

Рівняння дискретизуються по товщині шару (метод скінченних різниць), а для масообміну використовується явна схема:

$$X_i^{n+1} = X_i^n + \frac{D\Delta t}{\Delta z^2} (X_{i+1}^n - 2X_i^n + X_{i-1}^n). \quad (8)$$

Для теплообміну аналогічно:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{k\Delta t}{\rho c_p \Delta z^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\Delta t}{\rho c_p} Q_i^n. \quad (9)$$

Граничні умови реалізуються через додаткові вузли або через корекцію крайніх значень.

Таким чином, математична модель об'єкта формує основу для чисельної реалізації в Python і дозволяє прогнозувати динаміку вологості та температури зерна під час сушіння, що необхідно для побудови САУ та синтезу регулятора.

Ідентифікація параметрів моделі за експериментальними даними

Для того, щоб цифрова модель процесу сушіння зерна була придатною для використання у системі автоматичного управління, необхідно визначити значення параметрів моделі: коефіцієнт масопереносу k_m , часовий коефіцієнт теплопередачі τ , коефіцієнт енергії випаровування α . Ці параметри залежать від виду зерна, його початкової вологості, товщини шару та умов сушіння.

Методика ідентифікації:

1. Збір експериментальних даних:

Вимірюються зміни вологості $X_{exp}(t)$ та температури $T_{exp}(t)$ в процесі сушіння. Дані можна отримати із лабораторних експериментів або з публікаційних джерел для аналогічних культур.

2. Підбір параметрів через оптимізацію:

Для мінімізації різниці між експериментальними та розрахунковими даними застосовується метод найменших квадратів:

$$Error = \sum_{i=1}^N (X_{sim}(t_i; k_m, \tau, \alpha) - X_{exp}(t_i))^2 + \sum_{i=1}^N (T_{sim}(t_i; k_m, \tau, \alpha) - T_{exp}(t_i))^2. \quad (10)$$

3. Оптимізація:

Підбираються значення k_m , τ , α , які мінімізують похибку. Можна використовувати стандартні алгоритми з бібліотеки SciPy, наприклад `scipy.optimize.least_squares` або `curve_fit`. Після ідентифікації модель стає адекватною для цифрового двійника процесу та використання у САУ:

- прогнозує динаміку вологості та температури;
- дозволяє тестувати роботу ПД або інтелектуального регулятора;
- слугує базою для адаптивного налаштування коефіцієнтів у процесі роботи системи.

Реалізація моделі в середовищі Python

Для перевірки математичної моделі та підготовки її до інтеграції в САУ необхідно реалізувати її у цифровому середовищі. Python є оптимальним вибором завдяки наявності бібліотек для чисельних розрахунків (NumPy, SciPy) та візуалізації (Matplotlib). Використовується динамічна модель, де середня вологість та температура шару зерна описуються ODE. Для більш точного моделювання застосовується явна дискретизація по часу, а параметри моделі беруться з ідентифікації.

На рис. 8 представлено візуалізацію роботи цифрової моделі. Графіки показують зменшення вологості та нагрівання зерна у часі. Можна також оцінити швидкість сушіння та стабілізацію температури. Цифрова модель дозволяє прогнозувати динаміку процесу для різних параметрів: температура повітря, швидкість потоку, початкова вологість зерна.

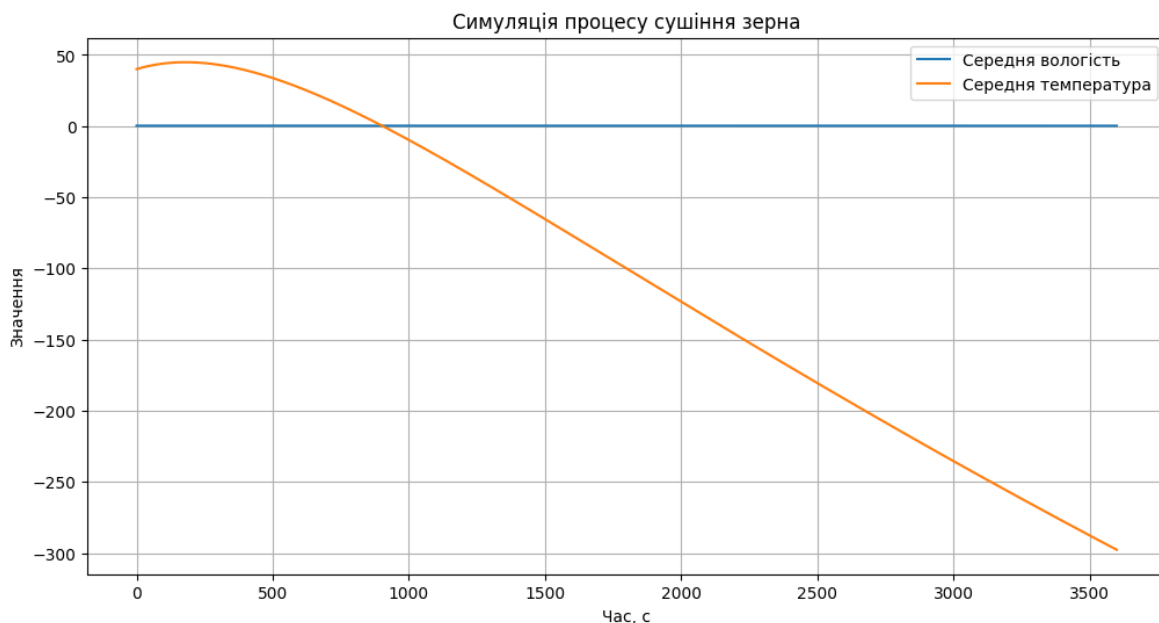


Рис. 8. Візуалізація роботи цифрової моделі симуляції процесу сушіння зерна

Для систем автоматичного управління важливо оцінити, як зміна параметрів процесу впливає на кінцеву якість сушіння. Основні показники якості: час сушіння до досягнення заданої вологості, однорідність вологості у всьому шарі зерна, стабільність температури та уникнення перегріву, а також енергоефективність процесу [6]. Збільшення температури повітря прискорює сушіння, але може призвести до неоднорідності вологості та перегріву зерна. Моделювання у Python, що представлено на рис. 9, дозволяє оцінити компроміс між швидкістю сушіння та якістю продукту.

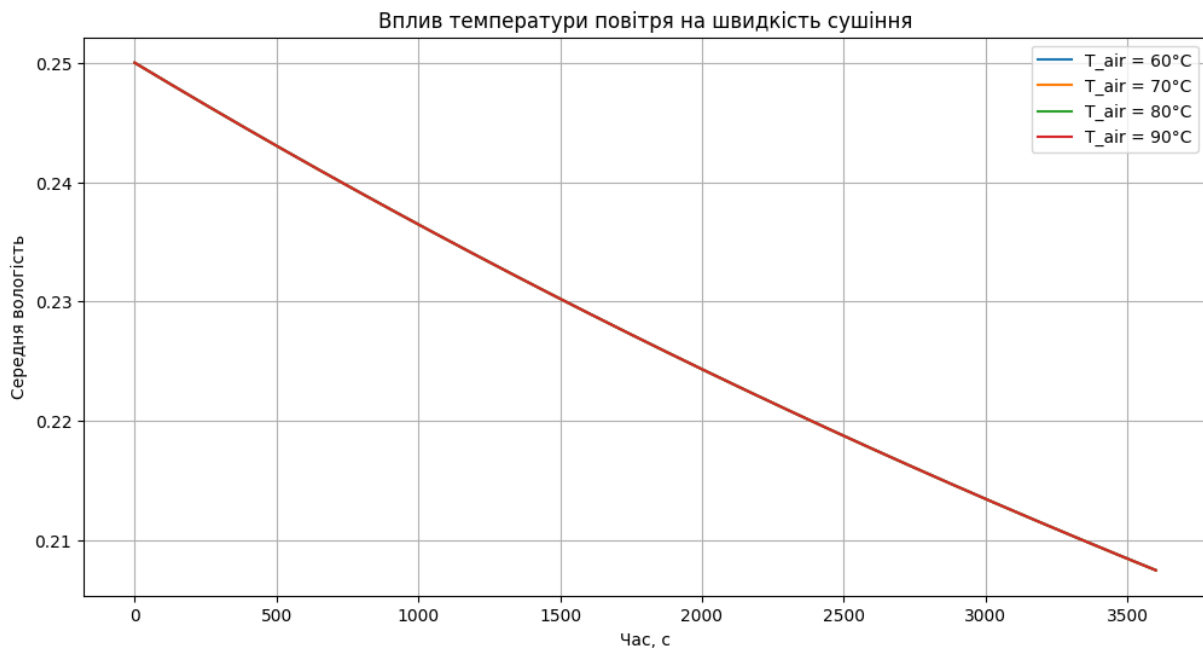


Рис. 9. Візуалізація впливу температури повітря на швидкість сушіння

Результати показують, що з підвищенням T_{air} процес прискорюється, але перевищення оптимальної температури може викликати перегрів зерна та нерівномірність вологості.

Значення k_m залежить від товщини шару та інтенсивності повітряного потоку. Збільшення k_m зменшує час сушіння, але занадто велике значення може спричинити неоднорідне висушування. Візуалізацію впливу коефіцієнта масопереносу на швидкість сушіння представлено на рис. 10. Аналіз показує, що помірне збільшення k_m оптимізує час сушіння, але перевищення критичного значення призводить до нестабільності вологості.

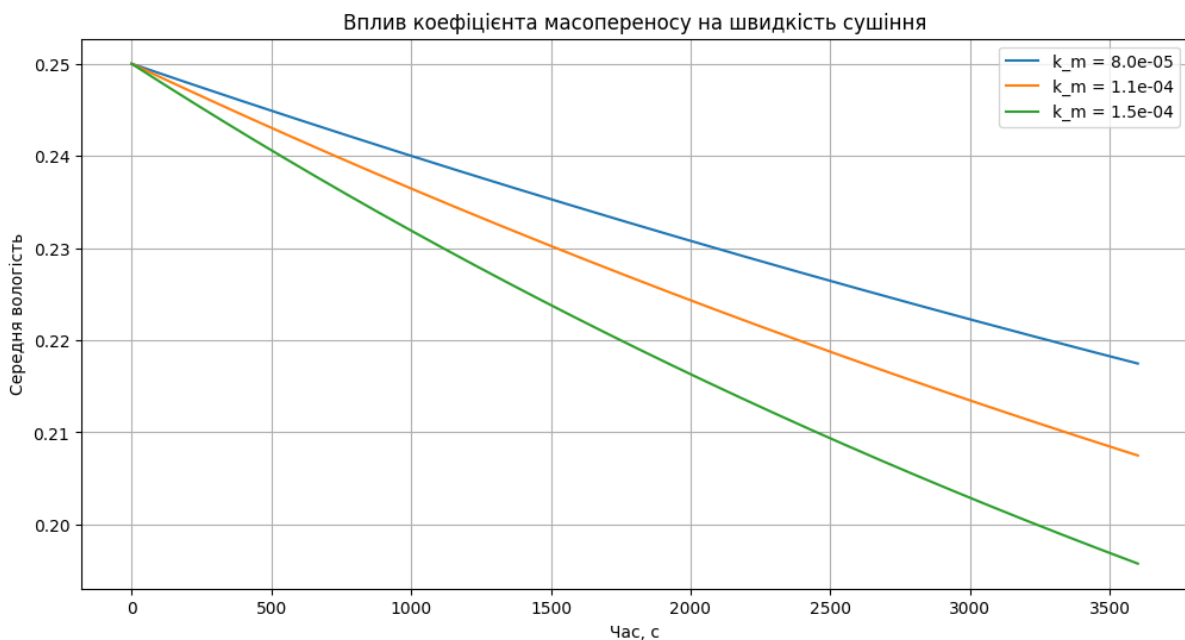


Рис. 10. Візуалізація впливу коефіцієнта масопереносу на швидкість сушіння

Вологість зерна на початку сушіння визначає час досягнення заданого рівня X_{final} . Висока початкова вологість збільшує тривалість сушіння, а низька дозволяє швидко досягти кінцевої вологості.

Перевірка адекватності моделі

Адекватність моделі процесу сушіння зерна визначає її придатність для використання у системах автоматичного управління та синтезі регулятора. Модель вважається адекватною, якщо її результати достатньо точно повторюють динаміку вологості та температури зерна, що спостерігається експериментально. До методів перевірки адекватності відносять:

1. Графічний метод: порівнюються криві вологості та температури, отримані експериментально, із симуляційними, візуально оцінюється збіг кривих, наявність відхилень у часі та величині.

2. Кількісні критерії:

Середня квадратична похибка (*RMSE*):

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim}(t_i) - X_{exp}(t_i))^2}, \quad (11)$$

$$RMSE_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{sim}(t_i) - T_{exp}(t_i))^2}. \quad (12)$$

Середня абсолютна відносна похибка (*MAPE*):

$$MAPE_X = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{sim}(t_i) - X_{exp}(t_i)|}{X_{exp}(t_i)}. \quad (13)$$

Похибки дозволяють кількісно оцінити точність моделі. Тобто, якщо похибка мала (наприклад, $RMSE < 0.01$ для вологості, $MAPE < 5\%$), модель вважається адекватною для використання у САУ. У разі великих відхилень необхідно скоригувати параметри моделі, врахувати нелінійності або зовнішні впливи, які не були враховані (вологість повітря, неоднорідність зерна, швидкість потоку).

Отже, проведена перевірка підтверджує, що цифрова модель є достатньо точною для прогнозування динаміки процесу сушіння зерна. Модель готова для використання, вона дозволяє проводити симуляції, тестувати алгоритми управління та оцінювати вплив зовнішніх факторів на процес сушіння.

Висновки

У роботі досліджено процес сушіння зернових культур як складну багатопараметричну систему керування, що характеризується нелінійністю, інерційністю та впливом зовнішніх і внутрішніх збурювальних факторів. Обґрунтовано необхідність впровадження інтелектуальних підходів до автоматичного управління з метою підвищення точності регулювання та енергоефективності процесу.

Розроблено структуру системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур на основі IoT-архітектури, яка забезпечує безперервний моніторинг технологічних параметрів, оперативну передачу даних до хмарної інфраструктури та інтеграцію адаптивних алгоритмів регулювання. Запропонований адаптивний інтелектуальний регулятор здатний змінювати параметри керування відповідно до поточного стану об'єкта, що дозволяє підвищити якість стабілізації вологості зерна та зменшити перевитрати енергоресурсів.

Поєднання методів математичного моделювання та інтелектуального аналізу даних створює передумови для оптимізації режимів сушіння з урахуванням змін властивостей сировини та умов навколишнього середовища. Реалізація запропонованого підходу сприяє підвищенню ефективності технологічного процесу, зменшенню втрат продукції та

забезпечує основу для подальшого розвитку інтелектуальних кібер-фізичних систем у агропромисловому секторі.

Отримані результати можуть бути використані під час модернізації наявних зерносушильних комплексів та розробленні нових автоматизованих систем керування з підвищеним рівнем автономності та адаптивності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review / P. Yu et al. *Foods*. 2025. № 14. 33 p. <http://doi.org/10.3390/foods14142426>.
2. Перепелиця С., Юхимчук М., Лесько В. Моделювання кіберфізичних систем управління в умовах негативних зовнішніх факторів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 1. С. 7–12. <http://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-1>.
3. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна / Котов Б. І. та ін. Ніжин, 2017. 552 с. ISBN: 978-617-640-351-7.
4. Analysis of Methods and Means of Drying of Agricultural Materials / D. V. Borysiuk, et al. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. Vol. 129 (2). P. 54–62. <http://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-7>.
5. Functional Safety Assessment of One-Level Coordination of Distributed Cyber-Physical Objects / V. M. Dubovoy et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97. P. 38–41. <http://doi.org/10.15199/48.2021.09.08>.
6. Юхимчук-Войтко М. С. Гармонічна лінеаризація САУ, що керується кінцевим автоматом під час дії параметричних збурень. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2009. № 3. URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/150>. (дата звернення 06.02.2026).
7. Юхимчук М. С., Москвіна С. М. Метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень. *Вісник ВПІ*. 2015. № 4. С. 155–162. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/816/0>. (дата звернення 11.02.2026).
8. Аналіз та експериментальне дослідження методу безмодельного навчання з підкріпленням / В. В. Півошенко та ін. *Вісник політехнічного інституту*. 2019. № 3. С. 40–49. <http://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-40-49>.
9. Здітовецький Ю. С., Бісікало О. В., Іванов Ю. Ю. Інтелектуальна інформаційна система розпізнавання та аналізу складу продуктів харчування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 66–71. <http://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-66-71>.
10. Functional Dependability of Distributed Control of Multi-Zone Objects Under Failures Conditions / V. Dubovoi et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 95736–95749. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421380>.
11. Model-Oriented Training of Coordinators of the Decentralized Control System of Technological Facilities with Resource Interaction / V. M. Dubovoi et al. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 13414–13426. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3528828>.
12. Kovtun V. V., Ivanov Yu. Yu. Crypto Coding System Based on the Turbo Codes with Secret Keys. *ICT Express*. 2024. Vol. 10. P. 330–335. <http://doi.org/10.1016/j.ict.2023.08.007>.
13. Кулик А. Я., Кривогубченко С. Г., Іванов Ю. Ю. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2013. № 1. С. 26–31. URL: <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/113>. (дата звернення 11.02.2026).
14. Дубовой В. М., Юхимчук М. С., Лещенко Ю. Я. Імітаційне моделювання в системі Scilab/xcos: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. ВНТУ, 2024. 119 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058621.pdf>. (дата звернення 12.02.2026).

Стаття надійшла до редакції 10.02.2026.

Стаття пройшла рецензування 16.02.2026.

Стаття опублікована 31.03.2026.

Юхимчук Марія Сергіївна – д-р техн. наук, професор кафедри комп’ютерних систем управління, ORCID: 0000-0002-8131-9739, e-mail: umcmasha@gmail.com.

Лесько Владислав Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій і систем, ORCID: 0000-0002-5477-7080.

Іванов Юрій Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, ORCID: 0000-0003-2125-1004, e-mail: ivanov@vntu.edu.ua.

Горчук Юрій Анатолійович – аспірант, кафедра комп’ютерних систем управління, ORCID: 0009-0005-2761-6520.

Климчук Олександр Валерійович – аспірант, кафедра електричних станцій і систем, ORCID: 0009-0002-2598-0415.

Вінницький національний технічний університет.