УДК 66.047:681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/28

Мельник В.С.
Національний університет харчових технологій
https://orcid.org/0009-0005-3477-9344

Смітюх Я.В.
Національний університет харчових технологій
https://orcid.org/0000-0002-5411-3284

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ МУЛЬТИСЕНСОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КАМЕРНИМИ КОНВЕКТИВНИМИ СУШАРКАМИ

У статті розглянуто проблему недостатнього інформаційного забезпечення традиційних систем автоматичного керування камерними конвективними сушарками, у яких керування переважно здійснюється за температурою повітря в сушильній камері, що не забезпечує безпосередньої оцінки стану сировини (ступеня висушування) і, відповідно, обмежує можливості ефективного керування процесом сушіння. Метою роботи є експериментальне дослідження та аналіз мультисенсорної вимірювальної системи камерної сушарки та обґрунтування раціонального складу її вимірювальних каналів для задач автоматичного керування процесом сушіння.

Побудована експериментальна камерна конвективна сушарка та проведено експериментальні дослідження сушіння із використанням мультисенсорних вимірювань: зовнішньої температури, температури та відносної вологості повітря в камері, маси завантаження, внутрішньої температури сировини, температури поверхні сировини, споживання електричної енергії, кольору сировини та складу газового середовища камери сушіння. Окремо проаналізовано доцільність застосування прямих вимірювань вологості сировини, температури нагрітого повітря на вході в камеру та систем комп'ютерного зору.

Виконано оцінку інформативності та практичної придатності вимірювальних каналів з урахуванням їх точності, стабільності, завадостійкості, а також вимог до монтажу, калібрування та обслуговування. На основі проведених досліджень базовим мінімумом для систем керування доцільно вважати вимірювання температури повітря в камері та вимірювання маси завантаженої сировини. Рекомендовано доповнювати системи керування каналами вимірювання зовнішньої температури, температури нагрітого повітря, температури поверхні та енергетичних показників сушіння. Інші розглянуті канали визнано малопридатними для практичного застосування. Вказано, що розширення складу вимірювань підвищує повноту інформації про процес, але потребує ускладнення алгоритмів керування. Сформульовані рекомендації можуть бути використані для проєктування мультисенсорних систем керування та розробки алгоритмів їх роботи з метою підвищення якості продукції та ефективності процесу сушіння.

Ключові слова: *сушіння, камерна конвективна сушарка, вимірювання, давач, мультисенсорна система, автоматичне керування, система керування.*

Постановка проблеми. Камерні конвективні сушарки широко застосовуються для зневоднення харчової, лікарської та сільськогосподарської сировини. Вони вирізняються простотою конструкції, універсальністю та можливістю гнучко змінювати режими роботи. Незважаючи на простоту, камерні конвективні сушарки є досить складними об'єктами для автоматизації через складність процесів тепло- і масообміну при конвективному сушінні, постійну зміну характеристик навіть однотипної сировини, складність безпосередніх вимірювань її характеристик, неоднотипність завантажень, складні комплексні критерії якості продукції та інші фактори.

Традиційні системи керування камерними сушарками зазвичай базуються на вимірюванні

© Мельник В.С., Смітюх Я.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

температури в одній точці камери, що пояснюється низькою вартістю технічної реалізації, простотою обслуговування та експлуатації, простотою налаштування алгоритмів керування. Такий підхід дає змогу підтримувати температуру в камері на заданому рівні, але не надає безпосередньої інформації про стан сировини (вологовміст, температура, швидкість висушування, показники якості тощо). При цьому система керування сушінням фактично працює за непрямим, опосередкованим показником, що обмежує можливості для реалізації більш складних алгоритмів автоматичного керування з метою підвищення якості продукції та ефективності процесу. Саме тому режими сушіння нерідко задаються із запасом за температурою та тривалістю сушіння, щоб гарантовано уникнути недосушування, що веде до перевитрати енергії, часу та, відповідно, до зниження загальної ефективності процесу. Зростання вимог до якості сушених продуктів, до стабільності і повторюваності технологічних режимів та до енергоефективності зумовлює потребу в подальшій автоматизації камерних сушарок і переході від найпростіших систем регулювання температури в камері до об'єктивного керування, заснованого на вимірюванні та врахуванні всіх необхідних технологічних параметрів.

Ідея мультисенсорного підходу полягає у комбінованому використанні сигналів від різних давачів (ваги завантаженої сировини, температури і вологості повітря, оптичних сенсорів, вимірювання електроспоживання тощо) для підвищення поінформованості про перебіг процесу сушіння та стан сировини. Комплексний аналіз розширеного набору вимірювань дозволить сформувати більш повне уявлення про хід процесу, зміну стану сировини та оцінку ефективності. Такий підхід може розглядатися як інформаційна основа для подальшого розвитку методів автоматичного та інтелектуального керування камерними конвективними сушарками, орієнтованих на отримання якісної продукції при високій загальній ефективності процесу.

Водночас впровадження мультисенсорних систем у практику викликає низку питань, пов'язаних із оцінкою інформативності вимірювальних каналів для задач автоматичного керування, алгоритмами використання даних, а також із вартістю та надійністю додаткових засобів вимірювання. Значне збільшення кількості сенсорів може призвести до надмірної складності системи, підвищення витрат на обслуговування та високих вимог до персоналу. Разом з тим, збільшення кількості сенсорів не гарантує підвищення ефективності автоматичного керування.

Отже, науково-практична проблема полягає у відсутності цілеспрямованих досліджень мультисенсорних вимірювальних систем для камерних конвективних сушарок, орієнтованих на обґрунтування і оптимізацію їх складу та структури для систем автоматичного керування, а також на оцінювання їх придатності до практичного промислового використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки камерні конвективні сушарки мають невисоку продуктивність і використовуються переважно на малих та середніх підприємствах, кількість робіт, присвячених їх автоматизації, є порівняно невеликою. Аналіз публікацій показує, що в дослідженнях камерних конвективних сушарок найпоширенішими є мультисенсорні вимірювальні системи, побудовані на комбінаціях вимірювань температури, вологості, швидкості повітря та ваги завантаження.

Базовими для більшості робіт залишаються вимірювання температури та відносної вологості повітря, які реалізуються як класичними давачами (термопари, термоопори різних типів, психрометри на основі них), так і цифровими температурними сенсорами (DS18B20) та цифровими комбінованими сенсорами температури і вологості (DHT11, DHT22, SHT11) [1–5, 7–9, 12, 13, 15, 20]. Швидкості повітряного потоку визначаються за допомогою анемометрів (теплові, обертові) або непрямих методів на основі перепаду тиску [1, 2, 5, 9, 12, 13, 17, 20].

У деяких роботах мультисенсорні вимірювання доповнюються вимірюванням сонячної радіації піранометрами, що є характерним для сонячних і комбінованих сушарок [2, 5, 12].

Практично в усіх сучасних дослідженнях проводиться вимірювання маси продукту за допомогою електронних ваг або тензодатчиків [1–5, 7–13, 15, 18]. Вагові вимірювання застосовуються для розрахунку вологовмісту продукту та аналізу кінетики процесу. У ряді робіт показано, що тензометричні системи можуть розглядатися як непрямі давачі вологості в реальному часі [3, 8, 11].

У роботі [6] використовується оцінювання механічних властивостей сировини під час сушіння за допомогою спеціалізованих сенсорів із тензодатчиками, що дозволяють реєструвати зміни стану матеріалу в процесі зневоднення.

Окремий напрям становлять дослідження, у яких для оцінки стану та якості продукту використовуються оптичні, колориметричні та спек-

тральні методи. До таких належать колориметри, NIR-спектроскопія, системи комп'ютерного зору, що дозволяють аналізувати колір, геометричні зміни сировини під час сушіння [6, 10, 14, 19].

Помітною тенденцією є розвиток програмних або віртуальних давачів стану продукту, які формуються на основі стандартних вимірювань температури, відносної вологості, витрати повітря, маси тощо. У таких підходах використовуються моделі тепломасообміну або алгоритми машинного навчання, зокрема нейронні мережі, для оцінювання вологовмісту без прямого його вимірювання [16–18].

Узагальнюючи розглянуті публікації [1-20], можна відзначити, що більшість мультисенсорних систем використовується насамперед як інструмент наукових досліджень процесу сушіння: моделювання, уточнення фізичних коефіцієнтів, енергетичного аналізу, оцінки якості продукції та створення віртуальних сенсорів вологовмісту. Аналіз цих публікацій показує, що, попри наявну повторюваність сенсорів, жодної пари публікацій із повністю ідентичними наборами вимірювальних каналів не виявлено, завдання обґрунтованого вибору складу мультисенсорної вимірювальної системи саме з позицій задач автоматичного керування камерними конвективними сушарками не розглядалося.

Постановка завдання. Метою роботи є експериментальні дослідження та аналіз роботи мультисенсорної вимірювальної системи камерної конвективної сушарки, а також вибір та обґрунтування складу її вимірювальних каналів для побудови ефективних систем автоматичного керування процесом сушіння.

Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментальних досліджень систем автоматичного керування процесами сушіння харчових продуктів побудована експериментальна камерна сушильна установка (рис.1).

Робоча камера установки має розміри 400×330×300 мм та вісім сітчастих полиць для розміщення сировини. Нагрівання здійснюється електричним нагрівачем потужністю 700 Вт з можливістю плавного регулювання потужності в діапазоні 0–100 %. Максимальна температура в камері обмежена термостатом на рівні 70 °С. Двигун основного вентилятора має потужність 30 Вт і керується в діапазоні швидкостей 30–100 % від номінальної, двигун витяжного вентилятора – 10 Вт із діапазоном регулювання 40–100 %. Сушарка встановлена на вагову платформу, змонтовану на трьох тензодатчиках з номінальним діапазоном 5 кг кожен. Максимальна маса завантаження становить 9 кг сировини. Сигнал із суматора тензодатчиків подається на модуль тензоперетворення Yaskawa 031-1CA20 із розрядністю перетворення 16(24) біти та основною похибкою не більше ±0,1 % від діапазону.

Температуру зовнішнього повітря на вході в нагрівач, температуру в камері сушіння та в середині продукту вимірюють платиновими термометрами опору Pt100 різних форм-факторів, підключеними до чотириканального модуля аналогового вводу Yaskawa 031-1BD80. Модуль має 16-бітний АЦП, забезпечує похибку вимірювання не більше ±0,2 %.

Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментальної установки

Вологість та температура повітря в камері вимірюються цифровим комбінованим давачем DHT22. Технічні характеристики DHT22: діапазон вимірювання відносної вологості 0–100 % з типовою точністю близько ±2 % у середній частині діапазону, діапазон робочої температури від –40 до +80 °C з типовою точністю близько ±0,5 °C.

Для вимірювання температури поверхні сировини застосовується інфрачервоний безконтактний термометр MLX90614: діапазон вимірюваної температури об'єкта від –70 °C до +380 °C, діапазон температури навколишнього середовища від –40 до +125 °C, типова точність ±0,5 °C.

Колір поверхні сировини вимірюється цифровим давачем TCS34725 типу RGB із 16-бітним виходом по кожному каналу та інтерфейсом I^2C. Виходом є числові значення по каналах R, G, B, що відображають зміну кольору поверхні сировини в процесі сушіння.

Для оцінки змін газового середовища в камері під час сушіння використовувався "електронний ніс" на базі восьми напівпровідникових резистивних сенсорів концентрації газів типу MQ компанії Winsen. Повітря із сушильної камери через гофрований шланг втягується вентилятором у вимірювальний блок із встановленими сенсорами і комбінованим давачем DHT22 для врахування зміни температури і вологості повітря з камери сушіння. Для живлення сенсорів відповідними напругами, первинного перетворення і підсилення сигналів був розроблений блок вторинного перетворювача сигналів із восьмиканальним 16-бітним АЦП AD7606, сигнали із якого передаються в систему збору і обробки інформації.

Потужність споживання та витрата електричної енергії установки вимірюються за допомогою однофазного електролічильника Siemens 7KT1652 з інтерфейсом RS-485 та протоколом Modbus RTU.

Керування установкою та збір даних здійснюються одноплатним комп'ютером Raspberry Pi 5, до якого через Profinet станцію вводу/виводу Yaskawa підключені модулі вводу/виводу дискретних та аналогових сигналів. На Raspberry Pi 5 працює середовище Codesys, у якому реалізовані алгоритми опитування, фільтрації, первинної обробки інформації від сенсорів та алгоритми керування установкою. Для збереження експериментальних даних використовується встановлена на Raspberry Pi 5 SQL-база даних MariaDB. Людино-машинний інтерфейс (рис.2) реалізований на сенсорній панелі Weintek cMT2078x, де візуалізуються поточні значення вимірювань, тренди та здійснюється настроювання установки.

Перед початком експерименту установка попередньо готується: вмикається заздалегідь для прогрівання сенсорів «електронного носа», тарується вагова платформа, перевіряються покази давачів. Вибрана для експерименту сировина нарізається на шматки однакової товщини та рівномірно завантажується на сітки (рис. 3).

Внутрішній давач температури встановлюється в середину одного шматка сировини, який одночасно розміщується під інфрачервоним давачем температури поверхні. Режим сушіння під час експериментів обирався відповідно до обраної сировини та типових технологічних рецептів, також виконувалися різнопланові експерименти із дослідження динаміки сушіння. На рис. 4-6 показані графіки зміни сигналів вимірювальних кана-

Рис. 2. Головний екран керування експериментальною установкою

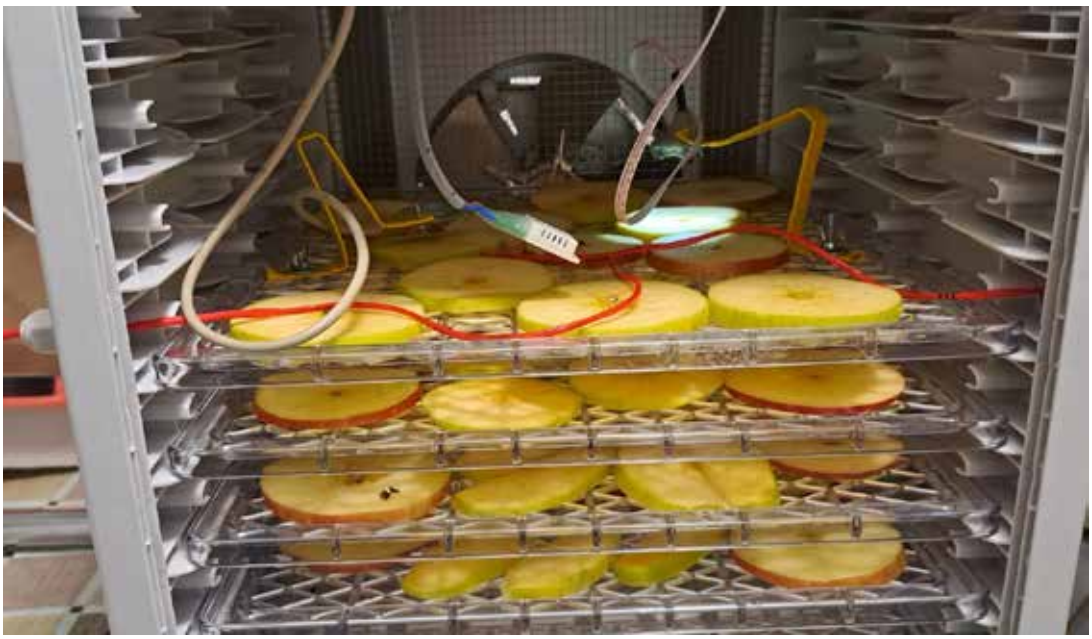

Рис. 3. Сушіння яблук в експериментальній установці

лів при включенні електричного нагрівача повітря сушарки на 50% від максимальної потужності, та сушінні до припинення падіння ваги завантаженої сировини, після чого нагрівач був вимкнений, але залишилися працювати вентилятори.

У процесі експериментальних досліджень мультисенсорної вимірювальної системи камерної конвективної сушарки були проаналізовані різнотипні вимірювальні канали. Для кожного з них оцінювалися інформативність щодо процесу сушіння, досвід практичного використання, а також аналізувалась доцільність використання в системах автоматичного керування.

Найбільш поширеним і найбільш очевидним вимірювальним каналом є температура повітря у робочому об'ємі сушильної камери як одного з ключових факторів, що визначають інтенсивність процесу сушіння (рис. 4). У більшості існуючих систем керування використовують саме цю технологічну змінну, тому включення її до складу мультисенсорної системи є закономірним. Перевагами цього вимірювального каналу є простота технічної реалізації та експлуатації, надійність і доступність промислових температурних перетворювачів. Разом з тим, вимірювання лише температури повітря в камері має суттєві обмеження для керування. Температура в камері не дає прямої інформації про вологовміст, швидкість випаровування чи ступінь готовності продукту. У реальних умовах у камері можуть існувати просторові градієнти температури, також на вимірювання може впливати радіаційний теплообмін із нагрівальними елементами або поверхнями камери. Вимірювання температури повітря в камері є базовим для реалізації ефективних алгоритмів керування камерними конвективними сушарками.

В експериментальній установці проводилося також безперервне вимірювання маси завантаженої сировини. Вага є інтегральною характеристикою, безпосередньо пов'язаною зі зміною вологовмісту, оскільки основна частина втрати маси зумовлена саме видаленням води. За наявності відомої початкової вологості, ваговий канал може розглядатись як непряме вимірювання вологовмісту сировини. Проте можливо і доцільно використовувати безпосереднє вимірювання ваги для керування процесом сушіння. Криві зміни ваги в процесі сушіння відображають основні стадії процесу: початковий розігрів і вихід на ділянку сушіння з практично сталою швидкістю, перехід до стадії падаючої швидкості, а також наближення до кінцевого стану, коли швидкість втрати ваги сильно зменшується (рис. 4).

Перевагою вагового каналу є те, що на відміну від температури повітря в камері він безпосередньо характеризує стан саме сировини. Крім того, ваговий сигнал фактично враховує і загальну завантаженість сушарки (ступінь заповнення полиць, касет, підвісів), що є важливим для розробки адаптивних алгоритмів керування сушінням для промислових умов. Технічна реалізація вимірювання ваги є досить простою, діючі сушарки можуть бути нескладно модернізовані, вартість на сьогоднішній час помірна. Ваговий

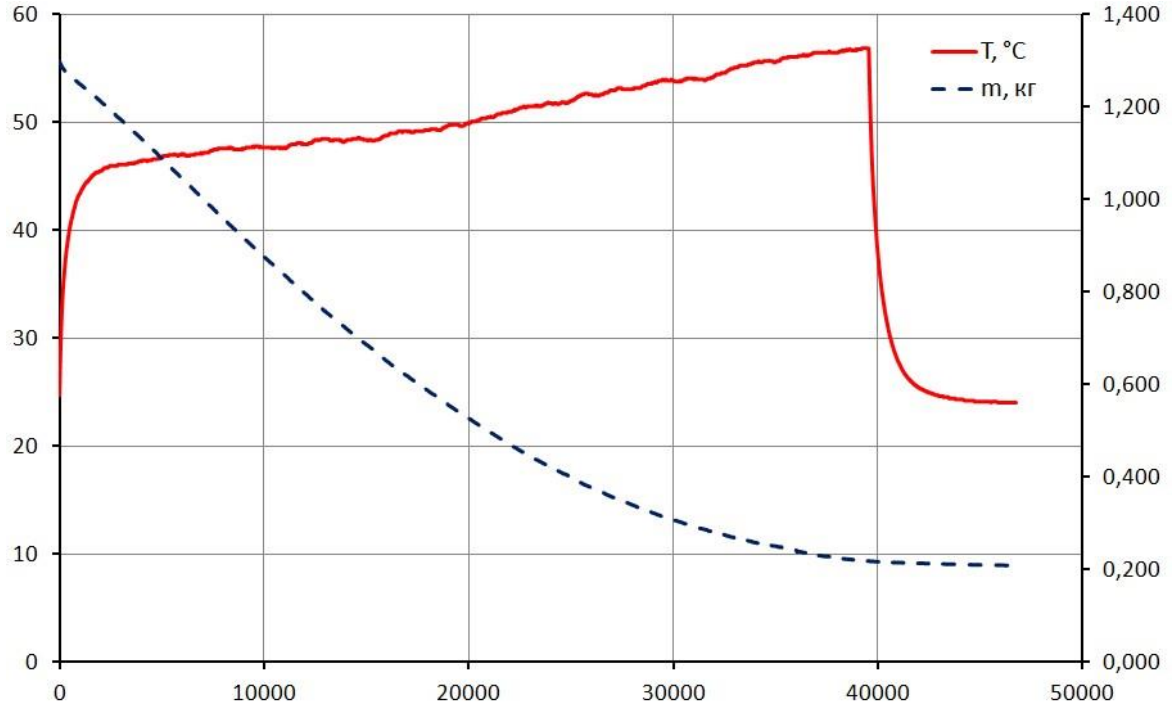

Рис. 4. Зміни температури повітря в камері сушарки (T, ºC) та ваги завантаженої сировини (m, кг) при 50% потужності нагрівача

канал є одним із найінформативніших з точки зору стану сировини в процесі сушіння, тому є практично необхідним для використання в системах керування камерними сушарками.

На рис. 5 показана зміна вологості повітря в камері під час сушіння: на початку процесу відносна вологість у камері швидко падає, а потім у міру видалення вологи з продукту та з камери поступово зменшується.

Вимірювання вологості повітря в сушильній камері є необхідним для режимів сушіння, де вологість повітря розглядається як додаткова керована координата, наприклад, при регулюванні вологовмісту повітря з метою запобігання надмірному пересушуванню чи зменшення ризику утворення поверхневої кірки. Для ряду видів сировини, схильних до розтріскування, підсихання поверхні або втрати товарного вигляду, контроль і регулювання вологісного режиму повітря є необхідним. Однак практична реалізація вимірювання вологості повітря в гарячому і вологому середовищі камери сушіння ускладнена. Ємнісні давачі вологості (у нашому випадку комбінований цифровий давач температури і вологості DHT22) обмежені за температурою експлуатації, а накопичення конденсату, пилу чи аерозольних частинок на чутливій поверхні погіршує точність і повторюваність показів. Під час тривалої роботи при підвищеній температурі (> 50 ºC) та низькій вологості (< 15 %) давач DHT22 показав нестабільність показів. Інші типи і моделі доступних давачів або значно дорожчі, або складніші в експлуатації. Тому канал вологості розглядаємо як вторинний: він є корисним для деяких випадків, але не є критично необхідним для більшості систем керування.

Вимірювання внутрішньої температури потребує введення давача безпосередньо в шматок сировини. Практична реалізація таких вимірювань стикається з низкою суттєвих недоліків. По-перше, сировина нарізається якомога тонкими шматками, тому важко підібрати підходящий давач і виконати його правильне розміщення. По-друге, для кожної партії продукту складно забезпечити повторюваність і однотипність організації вимірювань: однакове місце встановлення давача, однакову глибину та ін. По-третє, теплопровідність провідників і елементів давача призводить до паразитного теплопереносу від частин, які знаходяться поза сировиною в камері, до чутливого елемента давача, що може проявлятися завищенням виміряної внутрішньої температури сировини вже на початку процесу сушіння (рис. 6). Крім того, у процесі сушіння сировина деформується, зменшується в розмірах, утворюючи повітряні зазори, що впливає на вимірювання. Для промислових систем автоматичного керування така складність експлуатації та нестабільність вимірювального каналу є неприйнятною. З урахуванням наведених

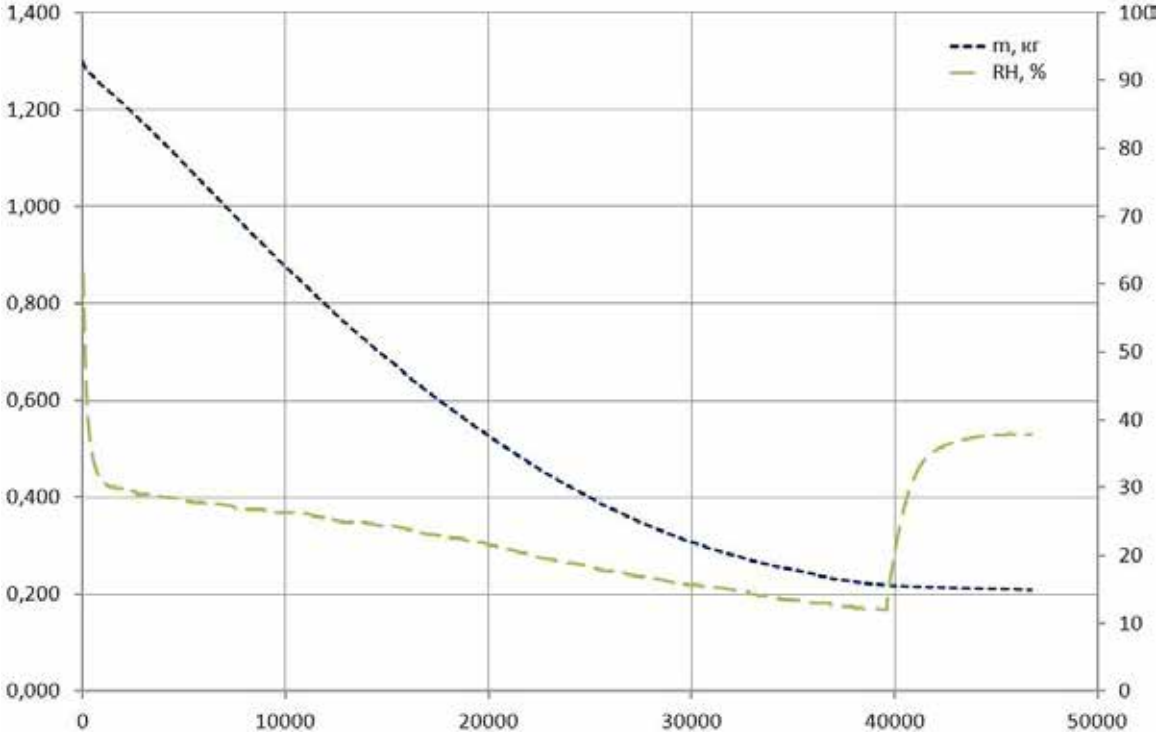

Рис. 5. Зміни відносної вологості повітря в камері сушарки (RH, %) та ваги завантаженої сировини (m, кг)

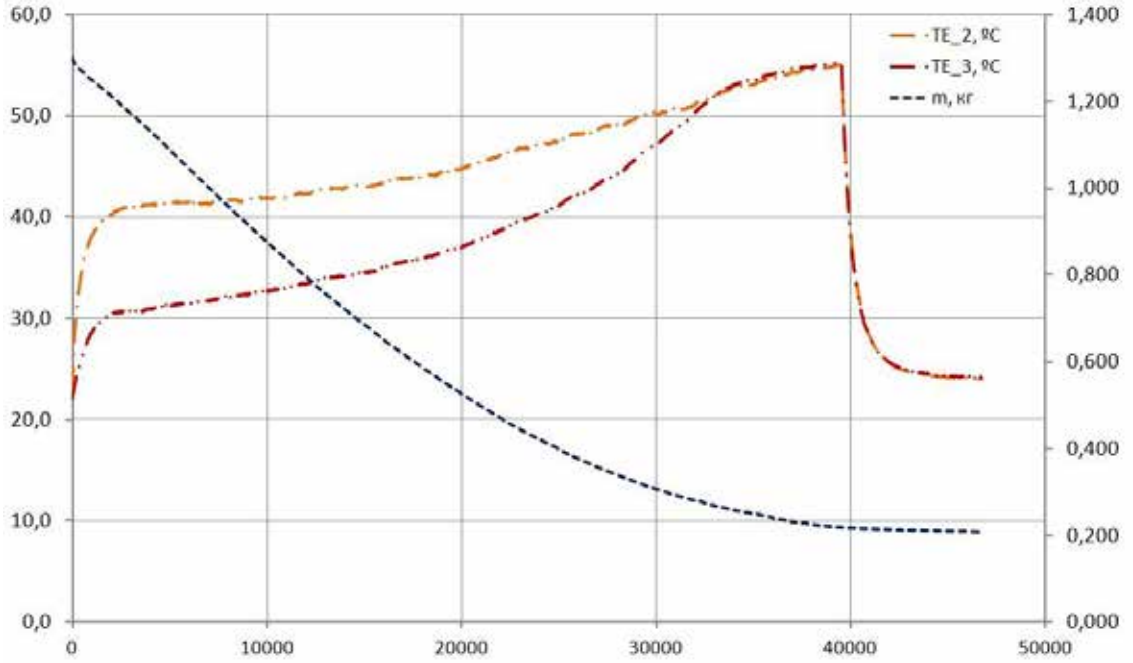

Рис. 6. Зміни температури в середині сировини (TE_2, ºC), на поверхні сировини (TE_3, ºC) та ваги завантаженої сировини (m, кг)

обмежень канал внутрішньої температури було віднесено до недоцільних.

Схожі проблеми виникають і при вимірюванні температури поверхні сировини контактними давачами, які потребують стабільного притиску до поверхні шматка, відсутності зсувів і деформацій, що практично неможливо. В експериментальній установці використовується безконтактний інфрачервоний давач температури (рис. 6), який значно ефективніший для таких вимірювань, проте і він чутливий до правильності і однотипності встановлення над вимірювальним зразком.

Промислові варіанти таких давачів також мають значну вартість. Вимірювання температури поверхні є досить інформативним каналом, особливо у зв'язці із іншими вимірюваннями. Загалом, канал вимірювання температури поверхні рекомендується для застосування в мультисенсорних системах керування.

Оптичний контроль кольору поверхні сировини здійснювався за допомогою цифрового давача кольору TCS34725. В результаті експериментальних досліджень отриманий практичний досвід використання сенсорів такого типу. Для багатьох продуктів зміна кольору з перебігом сушіння невелика, або нерівномірна по поверхні, можлива наявна текстура чи дефекти поверхні, тому вимірюваний сигнал може часто слабо корелювати зі ступенем висушування. Крім того, покази цього давача виявилися дуже чутливими до умов встановлення (висота, кут, місце контролю на поверхні сировини), до освітленості та до вібрацій. У зв'язку з цим канал кольору вважаємо невиправданим для використання у складі систем автоматичного керування.

Аналіз газового середовища в камері сушарки здійснювався за допомогою так званого «електронного носа» – набору чутливих елементів до газів і летких сполук. Під час сушіння харчових продуктів змінюється запах повітря в камері та його інтенсивність, тобто концентрація летючих речовин і газів змінюється на різних стадіях процесу і, таким чином, інформацію про зміни їх концентрацій з допомогою «електронного носа» можна використати як додатковий індикатор ступеня висушування чи, наприклад, появи небажаних явищ (псування, перегріву та ін.). Однак практичні дослідження із доступною номенклатурою чутливих елементів сенсорів Winsen MQ (а це найпростіші неорганічні та органічні сполуки: аміак, водень, озон, оксиди азоту, сірководень, вуглекислий газ, чадний газ, метан, пропан, бутан, природний газ, скраплений нафтовий газ, пари бензину, пари етанолу, бензен, толуол) показали, що зміни їх вимірюваних сигналів в процесі низькотемпературного сушіння виявилися недостатньо вираженими і не мають характерних змін відповідно до стадій процесу сушіння. Це пояснюється тим, що під час сушіння характерні запахи харчових продуктів та сільськогосподарської сировини в основному формуються специфічними, складними леткими органічними сполуками, для вимірювання яких прості і дешеві сенсори відсутні. Оскільки поширені, недорогі резистивні сенсори концентрації газів є неефективними для контролю процесу сушіння харчових продуктів, а спеціальні аналітичні прилади є дорогими, складними в експлуатації та обслуговуванні, тому вимірювальний канал концентрації газів вважаємо недоцільним для використання в системах керування промисловими камерними конвективними сушарками.

В експериментальній установці здійснювалося безперервне вимірювання енергетичних змінних – струму, потужності, а також споживання електричної енергії на нагрівання. Ці дані дають змогу розраховувати показники енергоефективності процесу, у тому числі в режимі онлайн. На основі таких вимірювань можуть будуватися алгоритми керування, орієнтовані на оптимізацію енергоспоживання, пошук енергетично доцільних режимів роботи. Вимірювання електричних змінних є недорогим і простим у реалізації, надійним в експлуатації та не потребує обслуговування. Отримувана інформація є важливою для енергетичного аналізу і оцінки ефективності, тому включення каналу вимірювання енергетичних величин (у нашому випадку – електричних) вважаємо доцільним у мультисенсорних системах автоматичного керування камерними конвективними сушарками.

Вимірювання зовнішньої температури повітря (або температури повітря на вході в нагрівач) та температури нагрітого повітря на вході в сушильну камеру (не вимірювалась в експериментальній установці), хоча і не несуть безпосередньої інформації про хід процесу сушіння, проте можуть використовуватися для покращення алгоритмів регулювання температури в камері сушарки та врахування змін температури навколишнього середовища. Низька вартість, надійність, простота експлуатації та корисність для керування виправдовує їх включення до складу мультисенсорних систем керування.

Необхідно також проаналізувати і оцінити можливість застосування давачів вологості безпосередньо завантажуваної сировини (наприклад, ємнісні, діелектричні, НВЧ), хоча вони і не використовувалися в експериментальній установці. Такі рішення є надто дорогими та складними в експлуатації для типових камерних конвективних сушарок. Ці давачі, як правило, не є універсальними: потребують індивідуальної калібровки під кожен вид сировини. Для тонкої сировини (скибочки фруктів, шари м'яса, лікарська сировина) їх часто важко або взагалі неможливо застосувати. Висока вартість, низька надійність, чутливість до забруднення, а також складність забезпечення однотипності і повторюваності вимірювань

роблять цей канал малопридатним для практичного використання в системах керування. Саме тому значна частина сучасних досліджень пропонує для оцінювання вологовмісту використовувати непрямі методи вимірювань (ваги, вологості і витрати повітря та ін.).

У сучасних дослідженнях також розглядається використання систем комп'ютерного зору для контролю процесу сушіння за візуальними ознаками – зміна кольору, розміру, геометрії, текстури. Попри потенційну інформативність таких підходів, їх практичне застосування в камерних конвективних сушарках пов'язане з низкою суттєвих недоліків: важкі умови експлуатації (підвищена температура, волога, наявність конденсату, запиленість), складність забезпечення необхідного поля зору в існуючих сушарках при модернізації. Додатковою проблемою є необхідність навчання та валідації алгоритмів обробки зображень на великих датасетах для різних видів сировини, які можуть істотно відрізнятися за формою, розміром шматків, щільністю та схемою укладання на лотках чи сітках. Це часто потребує повторного налаштування чи донавчання підсистеми машинного зору, що ускладнює її використання в умовах гнучкого дрібносерійного виробництва. Для малопотужних камерних сушарок на невеликих підприємствах подібні рішення є надмірно складними і дорогими, вимагають кваліфікованого персоналу для обслуговування та експлуатації. У підсумку, доцільність застосування комп'ютерного зору як сенсорного каналу в таких установках є сумнівною, оскільки поставлені задачі можна ефективно розв'язувати з допомогою значно простіших, надійніших і дешевших засобів вимірювань.

Висновки. Узагальнюючи результати експериментальних досліджень і порівняльного аналізу, можна зробити висновок, що для застосування в системах керування камерними конвективними сушарками рекомендованим мінімальним вибором вимірювальних каналів є температура повітря в камері сушарки та вага завантаженої сировини. Найбільш доцільним набором є використання вимірювання температури в камері сушарки, ваги завантаженої сировини, температури поверхні сировини, температури повітря на вході в нагрівач, температури нагрітого повітря на вході в камеру та вимірювання енергетичних показників сушіння. Для деяких окремих випадків необхідним є також вимірювання і керування відносною вологістю повітря в камері.

Саме ці канали забезпечують прийнятний компроміс між інформативністю сигналів та вартістю, складністю їх технічної реалізації, експлуатації і обслуговування. Інші розглянуті канали, такі як внутрішня температура продукту, безпосереднє вимірювання вологості сировини, «електронний ніс», давачі кольору чи комп'ютерний зір – не відповідають вимогам до метрологічних (чутливість, точність, повторюваність) чи до експлуатаційних (простота, надійність, стабільність) характеристик, які потрібні для вимірювальних перетворювачів промислового застосування.

Необхідно зазначити, що вибір складу вимірювальних каналів пов'язаний із вибором алгоритмів керування процесом сушіння: збільшення кількості вимірюваних координат підвищує інформаційне забезпечення системи керування, але одночасно вимагає застосування складніших алгоритмів (адаптивні системи, інтелектуальні системи на основі нечіткої логіки чи нейронних мереж, комплексування методів керування). Цей аспект є важливим для подальшої практичної реалізації мультисенсорних систем автоматичного керування для промислового застосування, де складність налаштування, обслуговування, недостатня надійність є недопустимими, незважаючи на всі їх потенційні переваги та наукову новизну.

Висновки та рекомендації ґрунтуються не лише на формальному аналізі інформативності вимірювальних каналів щодо процесу сушіння, а й на накопиченому практичному досвіді експлуатації різних давачів у реальних умовах роботи сушильної установки: враховано особливості монтажу, складність калібрування, стійкість до високих температур, високої вологості, забруднень, завадостійкість, стабільність сенсорів у тривалих циклах сушіння, потреба в обслуговуванні та ін. Результати цього дослідження можуть бути основою для проєктування структур систем керування та розробки ефективних алгоритмів для мультисенсорних систем керування камерними конвективними сушарками, спрямованих на практичне впровадження і використання з метою отримання високоякісної продукції при високій загальній ефективності.

Список літератури:

1. Noori A. W., Royen H., Medveďová A., Haydary J. Drying of Food Waste for Potential Use as Animal Feed. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 10. Art. 5849. DOI: https://doi.org/10.3390/su14105849

2. Chouikhi H., Amer B. M. A. Performance Evaluation of an Indirect-Mode Forced Convection Solar Dryer Equipped with a PV/T Air Collector for Drying Tomato Slices. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 6. Art. 5070. DOI: https://doi.org/10.3390/su15065070

3. Pruthvi Raj J., Rajender G., Tejaswi D. та ін. Development of cost effective IoT based solar cabinet dryer. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*. 2025. Vol. 9, № 8S. P. 848–853. DOI: https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i8Sm.5263

4. Adekanye T., Okunola A. Experimental Evaluation of an Automatic Cabinet Dryer. *2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG): Proceedings. IEEE.* 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/SEB-SDG57117.2023.10124523

5. Das M., Akpinar E. K. Investigation of Pear Drying Performance by Different Drying Methods and Regression of Convective Heat Transfer Coefficient with Support Vector Machine. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, № 2. Art. 215. DOI: https://doi.org/10.3390/app8020215

6. Patel U., Kumar N., Kaur S. Drying Characteristics of Thin Layer Hot Air Drying for Preparation of Ready-to-Reconstitute Protein Enriched Spongy Snack (Khaman). *Discover Chemistry*. 2025. Vol. 2. Art. 64. DOI: https://doi.org/10.1007/s44371-025-00145-8

7. Pramono E. K. та ін. Low Cost Telemonitoring Technology of Semispherical Solar Dryer for Drying Arabica Coffee Beans. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 340–350. DOI: https://doi.org/10.35633/inmateh-66-34

8. Herani N., Rahmat S., Prasetia V. Monitoring of Rice Dryer Machine Using Tray Dryer Method. *Infotekmesin*. 2023. Vol. 14, № 2. P. 311–317. DOI: https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v14i2.1915

9. Setiawan B., Pradani E. R. K., Radianto D., Nabawi A. Analysis of a Tray Dryer Machine Using a Microcontroller-Based Data Acquisition System using LabVIEW. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*. 2025. Vol. 9, № 2. P. 1045–1055. DOI: https://doi.org/10.70609/gtech.v9i2.6806

10. Chakravartula S. S. N., Bandiera A., Nardella M., Bedini G., Ibba P., Massantini R., Moscetti R. Smart Drying of Carrot Slices Through Computer Vision. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: https://doi.org/10.2139/ssrn.4234123

11. Pramono E. K. та ін. Performance Tests of Loadcell as Real-Time Moisture Content Sensor: Case Study Moringa oleifera Leaves Drying. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1024. Art. 012018. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1024/1/012018

12. Genobiagon C. P., Alagao F. B. Performance of low-cost dual circuit solar assisted cabinet dryer for green banana. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2019. Vol. 42, № 1. P. 42–45. DOI: https://doi.org/10.26480/jmerd.01.2019.42.45

13. Nidhin A. R., Issac J. M., Nair G. G., Mohan S. V., Fidus F. Experimental Study of a Heat Pump Assisted General Purpose Tray Dryer with Backup Heater. *GRD Journal for Engineering*. 2018. Vol. 2, № 6. P. 30–35.

14. Udomkun P., Nagle M., Argyropoulos D., Mahayothee B. та ін. Multi-Sensor Approach to Improve Optical Monitoring of Papaya Shrinkage During Drying. *Journal of Food Engineering*. 2016. Vol. 189. P. 82–89. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.05.014

15. Reyer S., Awiszus S., Müller J. High-Precision Laboratory Dryer for Characterization of the Drying Behavior of Agricultural and Food Products. *Machines*. 2022. Vol. 10, № 5. Art. 372. DOI: https://doi.org/10.3390/machines10050372

16. Correa-Hernando E., Arranz F. J., Diezma B. та ін. Development of Model Based Sensors for the Supervision of a Solar Dryer. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011. Vol. 78, № 2. P. 167–175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.07.004

17. Román F., Hensel O. Real-Time Product Moisture Content Monitoring in Batch Dryer Using Psychrometric and Airflow Measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014. Vol. 107. P. 97–103. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.05.017

18. Yang T., Zheng X., Xiao H., Shan C., Zhang J. Moisture Content Online Detection System Based on Multi-Sensor Fusion and Convolutional Neural Network. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 15. Art. 1289783. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1289783

19. Sheng X., Zan J., Jiang Y. та ін. Data Fusion Strategy for Rapid Prediction of Moisture Content During Drying of Black Tea Based on Micro-NIR Spectroscopy and Machine Vision. *Optik*. 2023. Vol. 276. Art. 170645. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170645

20. Mishra N., Jain S. K., Agrawal N., Jain N. K., Wadhawan N., Panwar N. L. Development of Drying System by Using Internet of Things for Food Quality Monitoring and Controlling. *Energy Nexus*. 2023. Vol. 11. Art. 100219. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100219

Melnyk V.S., Smitiukh Ya.V. RESEARCH AND ANALYSIS OF MULTISENSOR MEASUREMENT SYSTEMS FOR AUTOMATIC CONTROL TASKS OF BATCH CONVECTIVE DRYERS

The article addresses the problem of insufficient information support of traditional automatic control systems for batch convective dryers, in which control is predominantly based on the air temperature in the drying chamber. Such an approach does not provide a direct assessment of the material state (degree of drying) and, consequently, limits the possibilities for effective control of the drying process. The aim of the study is the experimental investigation and analysis of a multisensor measurement system for a batch dryer and the justification of a rational composition of its measurement channels for automatic control applications.

An experimental batch convective dryer was developed, and drying experiments were conducted using multisensor measurements, including ambient temperature, air temperature and relative humidity in the chamber, load mass, internal temperature of the material, surface temperature of the material, electrical energy consumption, material color, and the composition of the gaseous environment in the drying chamber. In addition, the feasibility of direct measurements of material moisture content, the temperature of heated air at the chamber inlet, and the use of computer vision systems was analyzed separately.

The informativeness and practical suitability of the measurement channels were evaluated with regard to their accuracy, stability, noise immunity, as well as installation, calibration, and maintenance requirements. Based on the conducted studies, measurements of air temperature in the chamber and the mass of the loaded material are considered the basic minimum for control systems. It is recommended to complement control systems with channels for measuring ambient temperature, heated air temperature, surface temperature of the material, and energy-related parameters of the drying process. Other considered channels were found to be of limited practical applicability. It is noted that expanding the set of measured variables increases the completeness of information about the process but requires more complex control algorithms. The formulated recommendations can be used for designing multisensor control systems and developing their control algorithms aimed at improving product quality and the efficiency of the drying process.

Keywords: *drying, batch convective dryer, measurement, sensor, multisensor system, automatic control, control system.*

Дата першого надходження статті до видання: 21.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026