

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/29>**Міркевич О.М.**<https://orcid.org/0009-0000-5215-6064>

Національний університет харчових технологій

СТРУКТУРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЖОМОСУШИЛЬНИМ КОМПЛЕКСОМ ІЗ ПІДСИСТЕМОЮ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ ІНЕРЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

У статті розглянуто актуальну задачу підвищення ефективності керування жомосушильними комплексами цукрового виробництва в умовах високої інерційності технологічного процесу, значних часових запізнень та обмежених можливостей прямого вимірювання показників якості продукції. Показано, що традиційні системи автоматичного регулювання та класичні SCADA-рішення, орієнтовані переважно на реактивне керування, не забезпечують достатньої стабільності вологості жому на виході сушильного барабана та раціонального використання енергоресурсів.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування структури системи керування жомосушильним комплексом із підсистемою підтримки прийняття рішень, яка забезпечує наскрізну інтеграцію технологічного об'єкта, засобів збору й архівації даних, аналітичних модулів та операторського рівня. Запропонована архітектура базується на багаторівневому підході та передбачає використання стандартних промислових протоколів обміну даними, інфраструктури збору телеметрії, баз даних часових рядів і аналітичних модулів прогнозування.

У роботі обґрунтовано доцільність відокремлення функцій реального часу, архівації та аналітичної обробки даних, що дозволяє підвищити гнучкість системи та спростити її впровадження на діючих виробничих об'єктах. Аналітичний рівень забезпечує формування прогнозової інформації щодо зміни ключових параметрів процесу сушіння, яка використовується у підсистемі підтримки прийняття рішень для генерації рекомендацій оператору. Інтеграція результатів аналізу з операторським інтерфейсом реалізується без прямого втручання у контури автоматичного регулювання, що підвищує промислову безпеку та прийнятність рішення для експлуатаційного персоналу.

Показано, що запропонована структура створює умови для переходу від реактивного до проактивного керування процесом сушіння, зменшує негативний вплив часових запізнень та сприяє стабілізації вологості жому на виході жомосушильного комплексу. Отримані результати можуть бути використані як основа для впровадження інтелектуальних систем керування на підприємствах цукрової промисловості та для подальших досліджень у напрямі підвищення енергоефективності інерційних технологічних процесів.

Ключові слова: жомосушильний комплекс, система керування, підсистема підтримки прийняття рішень, SCADA, промисловий інтернет речей, прогнозна аналітика.

Постановка проблеми. Сучасні цукрові заводи демонструють високий рівень автоматизації основних операцій, однак керування жомосушильними комплексами переважно залишається фрагментованим і орієнтованим на локальні рішення. Типові конфігурації зосереджені на ПЛК та SCADA, які забезпечують переважно візуалізацію параметрів і ручне коригування режимів, тоді як інтегрована цифрова екосистема з наскрізним потоком даних від первинних датчиків до рівня аналітики фактично відсутня. За таких умов інформація накопичується розрізнено, аналітичні

можливості систем обмежені, а процес ухвалення рішень суттєво залежить від індивідуального досвіду персоналу.

Ключовим викликом є несформованість інфраструктури, здатної перетворювати виробничу телеметрію на практичні керувальні дії. Більшість наявних SCADA-рішень не забезпечує повноцінного зберігання часових рядів та їхньої подальшої обробки у вигляді прогнозів і стандартизованих рекомендацій. Відсутній узгоджений зв'язок між рівнем телеметрії, рівнем даних і рівнем аналітики, що не дозволяє своєчасно враховувати



інерційність об'єкта та типові запізнення між керувальним впливом і результатом. Як наслідок, керування набуває реактивного характеру: відхилення фіксуються постфактум, корекції виконуються із запізненням, а стабільність якісних показників та енергоефективність процесу погіршуються.

Проблематичним також є впровадження сучасних цифрових технологій у вже експлуатовану інфраструктуру. Інтеграція IoT-шлюзів, баз даних часових рядів, сервісів візуалізації та алгоритмів аналітики часто потребує значних ручних налаштувань, що збільшує вартість і тривалість проєктів, ускладнює масштабування та супровід. За відсутності уніфікованих механізмів взаємодії між компонентами системи автоматизоване керування не переходить у проактивний режим, а потенціал даних залишається невикористаним.

Отже, науково-технічна проблема полягає у розробленні структурованої системи керування жомосушильним комплексом, у якій класичні контури автоматизації доповнені підсистемою підтримки прийняття рішень. Така система має забезпечити безперервний і відтворюваний потік даних, їх архівацію та аналітичну обробку з формуванням короткострокових прогнозів і уніфікованих рекомендацій для оператора, інтегрованих у наявний операторський інтерфейс. Реалізація зазначеної архітектури створює підґрунтя для переходу від реактивного до проактивного керування, підвищення стабільності вологості на виході, зменшення питомих енерговитрат і зниження залежності результатів від суб'єктивних рішень персоналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У харчовій промисловості спостерігається перехід від ізольованих локальних контурів регулювання до інтегрованих цифрових архітектур, у яких рівень автоматизації технологічного обладнання поєднано з інфраструктурою збору, архівації та аналітичної обробки даних. SCADA-системи, що історично виконували функції оперативного моніторингу та ведення історії параметрів, дедалі частіше розглядаються як платформи інтеграції між рівнями управління [1]. Запровадження стандарту OPC UA забезпечує уніфікований обмін даними між гетерогенними пристроями та прикладними сервісами, знімає бар'єри сумісності між обладнанням різних виробників і формує основу для наскрізного потоку телеметрії [2],[3], що, у свою чергу, відкриває можливості підключення аналітичних модулів, істориків часових рядів і підсистем підтримки прийняття рішень на рівні SCADA.

Концепції Industry 4.0 та кіберфізичних виробничих систем формують стратегічний вектор інтеграції технологічних процесів із цифровими сервісами [4],[5],[6]. Ключовим положенням цих підходів є організація єдиного інформаційного простору, у межах якого забезпечується циркуляція даних між польовим рівнем, системами архівації та аналітичними модулями в режимі, наближеному до реального часу. Реалізація такого обміну базується на технологіях промислового інтернету речей, що гарантують масштабованість архітектури та здатність опрацювати значні обсяги телеметрії [7],[8]. Супровідні стандарти промислових комунікацій орієнтовані на забезпечення інтероперабельності та кібербезпеки, що розглядається як необхідна умова інтеграції аналітичних компонентів у наявну виробничу інфраструктуру.

У наукових публікаціях значна увага приділяється інерційним технологічним процесам, яким властиві суттєві часові запізнення між керувальними діями та отриманими результатами. За таких умов традиційні реактивні стратегії регулювання не забезпечують належної стабільності якісних показників, що зумовлює необхідність застосування методів прогнозу аналітики та віртуальних вимірювань. Поширеним підходом є використання спостерігачів, які трансформують наявну телеметрію у оцінки змінних, що не можуть бути визначені безпосередньо [11],[12]. Застосування статистичних і алгоритмічних моделей дає змогу отримувати у режимі реального часу оцінки вологості та інших критичних параметрів, підвищуючи рівень спостережуваності процесу та створюючи умови для своєчасного реагування оператора. Це особливо актуально для сушильних процесів, де можливості прямого вимірювання вологості потоку в промислових умовах є обмеженими або економічно невиправданими.

У промислових дослідженнях швидкими темпами розвивається напрям застосування цифрових двійників. Цифровий двійник являє собою віртуальну репрезентацію виробничої установки, синхронізовану з реальними даними та здатну відтворювати її динамічні характеристики [13]. Інтеграція потоків інформації з датчиків з математичними моделями забезпечує можливість попередньої перевірки керувальних стратегій та аналізу співвідношень між продуктивністю, енергоефективністю й якістю ще до впровадження змін у реальних умовах [14]. Для інерційних процесів сушіння цифровий двійник виконує функцію безпечного середовища для тестування операторських рішень, що мінімізує ризики технологічних

збоїв та сприяє оптимізації режимів роботи перед промисловим впровадженням.

У наукових роботах, що стосуються сушіння бурякового жому, основну увагу зосереджено на високій енергоємності процесу, його значній інерційності та залежності кінцевих характеристик продукту від динаміки тепломасообмінних процесів. Дослідження з моделювання барабаних сушарок підтвердили необхідність урахування матеріального навантаження, тривалості перебування продукту в барабані та температури димових газів як визначальних факторів процесу [15],[16]. Фундаментальні праці з тепломасообміну систематизують базові уявлення щодо сушіння сипких матеріалів і водночас підкреслюють складність керування такими об'єктами [17],[18],[19],[20]. Ключовим обмеженням для практичних систем залишається значне запізнення між змінами вхідних параметрів і відгуком на виході, що робить реактивні схеми регулювання малоефективними.

Узагальнення проведеного огляду свідчить про наявність сформованих підходів і технологій, що можуть бути використані для створення наскрізних архітектур керування, здатних інтегрувати рівень автоматизації, системи збору та архівації даних, аналітичні модулі та засоби віртуальної апробації. Разом з тим, у сфері сушіння бурякового жому дослідження здебільшого мають фрагментарний характер: частина з них присвячена математичному моделюванню та симуляції процесу, інші зосереджені на систематизації його фізико-технічних основ. У науковій літературі практично відсутні описи цілісної архітектури керування, у якій би було поєднано зазначені підходи та реалізовано підсистему підтримки прийняття рішень, адаптовану до умов цукрового виробництва. Такий стан проблеми визначає актуальність подальших досліджень і створює підґрунтя для розробки структурованої системи керування жомосушильним комплексом із СППР.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробленні та обґрунтуванні структури системи керування жомосушильним комплексом із підсистемою підтримки прийняття рішень, що забезпечує наскрізну інтеграцію технологічного об'єкта, засобів збору й архівації даних, аналітичних модулів та операторського рівня, а також створює умови для переходу від реактивного до проактивного керування процесом сушіння з урахуванням його інерційності та технологічних обмежень.

Об'єктом дослідження є процес сушіння бурякового жому у складі жомосушильного комплексу

цукрового виробництва, який характеризується високою інерційністю, значними часовими запізненнями та залежністю якості кінцевого продукту від сукупності взаємопов'язаних технологічних параметрів. Предметом дослідження є структура системи керування цим процесом із підсистемою підтримки прийняття рішень, орієнтована на інтеграцію засобів автоматизації, збору та аналізу даних.

У ході дослідження використано системний підхід, що передбачає розгляд жомосушильного комплексу як багаторівневої кіберфізичної системи, у якій поєднані технологічний об'єкт, засоби вимірювання та керування, інформаційна інфраструктура й аналітичні модулі. Для формування структури системи застосовано методи структурного аналізу та декомпозиції, які дозволили виділити окремі рівні та визначити їх функціональні ролі й інформаційні зв'язки.

Матеріальною основою дослідження є дані технологічної телеметрії, що формуються у процесі роботи жомосушильного комплексу. До них належать показники температури сушильного агента, вологості жому на вході, швидкості подачі матеріалу, параметри повітряного потоку та інші змінні, доступні для вимірювання у промислових умовах. Збір первинних даних здійснюється програмованим логічним контролером, який забезпечує опитування датчиків і передавання інформації через стандартні промислові протоколи обміну.

Для організації збору, передачі та передобробки даних використано підхід, заснований на застосуванні IoT-шлюзу, що виконує функції агрегації та уніфікації телеметрії. Архівація даних реалізується за допомогою бази даних часових рядів, яка забезпечує зберігання великих обсягів інформації з високою часовою роздільною здатністю та можливістю подальшого аналізу. Візуалізація поточних і архівних параметрів здійснюється з використанням спеціалізованих інструментів моніторингу, що дозволяє аналізувати динаміку процесу в реальному часі та ретроспективно.

Методичною основою аналітичного рівня є використання методів аналізу часових рядів і машинного навчання для виявлення закономірностей у поведінці процесу сушіння. На основі архівованих даних формується модель прогнозування ключових показників, зокрема вологості жому на виході, яка враховує інерційні властивості об'єкта та взаємозв'язки між технологічними параметрами. Отримані прогнози значення використовуються у підсистемі підтримки при-

йняття рішень для формування рекомендацій оператору щодо можливих коригувальних дій.

Інтеграція аналітичних результатів з операторським рівнем реалізується через SCADA-систему із застосуванням стандартизованих інтерфейсів обміну даними. Це забезпечує відображення у єдиному операторському середовищі як поточних вимірювань, так і результатів прогнозної аналітики та рекомендацій, що створює умови для проактивного керування процесом без безпосереднього втручання в контури автоматичного регулювання.

Оцінювання запропонованої структури здійснювалося шляхом аналізу її функціональних можливостей, узгодженості інформаційних потоків і відповідності вимогам промислової експлуатації. Основна увага приділялася здатності системи забезпечувати наскрізну інтеграцію даних, підвищення спостережуваності процесу та під-

тримку прийняття рішень оператором в умовах інерційного технологічного об'єкта.

Виклад основного матеріалу. У ході дослідження розроблено та обґрунтовано структурну схему системи керування жомосушильним комплексом із підсистемою підтримки прийняття рішень (наведена на рис. 1), яка забезпечує наскрізний інформаційний обмін між технологічним об'єктом, засобами збору та архівації даних, аналітичними модулями й операторським рівнем. Запропонована архітектура реалізує багаторівневий підхід, орієнтований на поєднання класичних засобів автоматизації з інструментами аналізу та прогнозування поведінки системи.

Нижній рівень системи представлений технологічним процесом сушіння жому, датчиками та виконавчими механізмами, що забезпечують вимірювання основних параметрів і реалізацію керувальних впливів. Збір первинної інформації

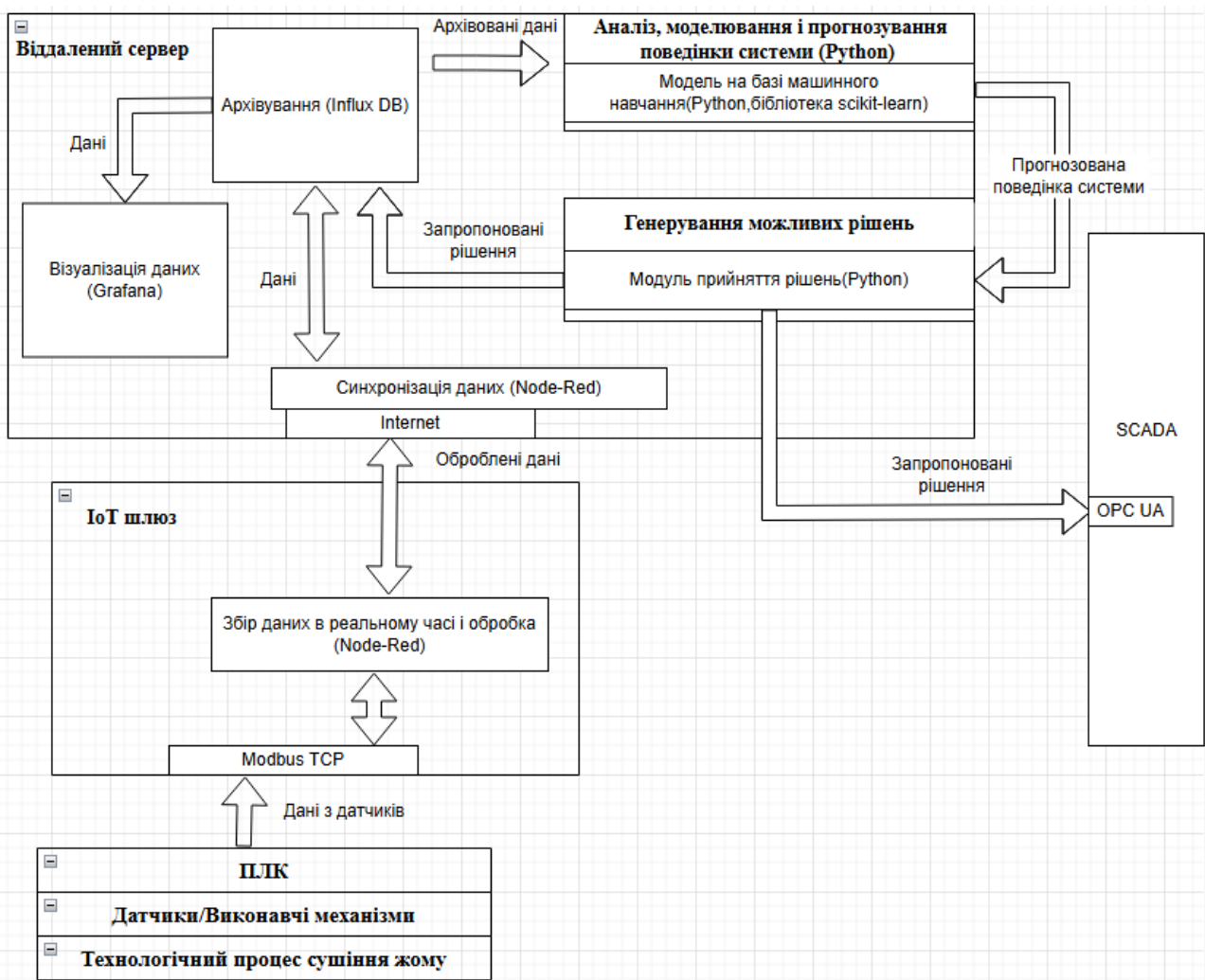


Рис. 1. Структурна схема системи керування жомосушильним комплексом із підсистемою підтримки прийняття рішень

здійснюється програмованим логічним контролером, який опитує датчики та передає дані через протокол Modbus TCP. На цьому рівні реалізуються базові функції автоматичного керування, захистів і блокувань, необхідні для безпечної та безперервної роботи сушильного комплексу.

Рівень збору та попередньої обробки даних реалізовано за допомогою IoT-шлюзу на базі Node-RED. Його функціями є приймання даних від PLC, їхня синхронізація, фільтрація та передача до віддаленого сервера. Такий підхід дозволяє відокремити завдання реального часу від задач архівації та аналітичної обробки, зменшуючи навантаження на контролер і підвищуючи гнучкість системи.

Архівація технологічної інформації здійснюється у базі даних часових рядів InfluxDB, яка забезпечує зберігання великих обсягів телеметрії з високою часовою роздільною здатністю. Накопичені дані використовуються як для ретроспективного аналізу, так і як вхідна інформація для аналітичних модулів. Візуалізація поточних і архівних параметрів реалізована за допомогою Grafana, що дає змогу формувати інтерактивні графіки, панелі моніторингу та спрощує аналіз динаміки процесу оператором і інженерно-технічним персоналом.

Аналітичний рівень системи представлений модулем аналізу, моделювання та прогнозування поведінки системи, реалізованим у середовищі Python з використанням бібліотек машинного навчання. На основі архівованих і поточних даних формується прогноз зміни ключових технологічних параметрів, зокрема вологості жому на виході сушильного барабана. Отримані прогнозні значення передаються до модуля генерації можливих рішень, який виконує оцінку поточного стану процесу та формує рекомендовані дії для оператора з урахуванням інерційності об'єкта та технологічних обмежень.

Модуль підтримки прийняття рішень інтегрований з операторським рівнем через інтерфейс OPC UA та SCADA-систему. Це дозволяє відображати в SCADA не лише фактичні значення параметрів, але й прогнозовану поведінку системи та запропоновані рішення. Оператор отримує інформацію у формі рекомендацій, що не втручаються безпосередньо в контури автоматичного регулювання, але сприяють своєчасному коригуванню режимів роботи сушильного комплексу.

Запропонована структура забезпечує наскрізний потік даних від рівня датчиків до рівня підтримки прийняття рішень і зворотне подання

результатів аналізу в операторський інтерфейс. Така організація дозволяє перейти від реактивного керування, заснованого виключно на поточних вимірюваннях, до проактивного режиму роботи з урахуванням прогнозованої інформації. У результаті створюються передумови для стабілізації вологості жому на виході, зменшення питомих енерговитрат і зниження залежності якості керування від суб'єктивного досвіду оператора.

Функціональні результати впровадження запропонованої архітектури полягають у розширенні можливостей операторського керування за рахунок використання прогнозованої інформації та аналітичних рекомендацій. На відміну від традиційних SCADA-систем, які відображають переважно поточний стан процесу, розроблена структура дозволяє оператору оцінювати очікувану поведінку жомосушильного комплексу з урахуванням інерційності об'єкта. Це створює умови для завчасного коригування режимів роботи, зменшує кількість запізнених рішень і підвищує стабільність показників якості, зокрема вологості жому на виході. При цьому підсистема підтримки прийняття рішень функціонує у режимі «оператор у контурі», не втручаючись безпосередньо в алгоритми автоматичного регулювання, що є важливим з точки зору промислової безпеки та прийнятності для виробничого персоналу.

Порівняння з підходами, представленими у науковій літературі, свідчить, що більшість робіт з автоматизації сушильних процесів зосереджені на окремих аспектах, зокрема математичному моделюванні, прогнозуванні або аналізі тепломасообміну. Запропоноване рішення, на відміну від таких підходів, орієнтоване на поєднання зазначених елементів у межах єдиної архітектури керування. У багатьох існуючих реалізаціях аналітичні модулі функціонують автономно від систем оперативного керування, тоді як у даній роботі прогнозна аналітика та підсистема підтримки прийняття рішень інтегровані з операторським рівнем через стандартизовані інтерфейси. Такий підхід забезпечує практичну спрямованість системи та підвищує її придатність до впровадження в умовах цукрового виробництва.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено та обґрунтовано структуру системи керування жомосушильним комплексом із підсистемою підтримки прийняття рішень, орієнтовану на інтеграцію класичних засобів автоматизації з сучасними інструментами збору, архівації та аналітичної обробки даних. Запропонована архітектура забезпечує наскрізний інформаційний

обмін між технологічним об'єктом, аналітичними модулями та операторським рівнем.

Показано, що використання багаторівневої структури з виділенням рівнів об'єкта, збору й архівації даних, аналітики та операторського інтерфейсу створює умови для підвищення спостережуваності інерційного процесу сушіння жому. Інтеграція аналітичного модуля та підсистеми підтримки прийняття рішень дозволяє враховувати прогнозну інформацію при формуванні операторських дій без прямого втручання у контури автоматичного регулювання.

Обґрунтовано, що запропонована система забезпечує перехід від реактивного до проактивного керування процесом сушіння, зменшуючи вплив часових запізнь між зміною керувальних впливів і результатами на виході сушильного барабана. Це створює передумови для стабілізації

вологості жому на виході та підвищення енергоефективності жомосушильного комплексу.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості впровадження запропонованої архітектури на діючих цукрових заводах із мінімальними змінами апаратної частини. Використання стандартних протоколів обміну даними та відкритих програмних рішень забезпечує масштабованість і адаптацію системи до інших енергоємних процесів цукрового виробництва.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень у напрямі розвитку інтелектуальних систем керування з підсистемами підтримки прийняття рішень, а також для розроблення прикладних рішень, спрямованих на підвищення стабільності технологічних режимів і зниження залежності якості керування від суб'єктивних рішень оператора.

Список літератури:

1. Boyer S. A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. 4th ed. ISA, 2010.
2. Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M. OPC Unified Architecture. Springer, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68899-0>
3. IEC 62541. OPC Unified Architecture. International Electrotechnical Commission, 2015–2020.
4. Monostori L. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65, № 2. P. 621–641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
5. Jazdi N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *Proc. IEEE IECON*. 2014. P. 831–836. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048573>
6. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
7. Xu L. D., Xu E. L., Li L. Industry 4.0: State of the art and future trends. *Int. J. Production Research*. 2018. Vol. 56, № 8. P. 2941–2962. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
8. Wollschlaeger M., Sauter T., Jasperneite J. The future of industrial communication. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2017. Vol. 11, № 1. P. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>
9. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Eng. Practice*. 2003. Vol. 11, № 7. P. 733–764. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)
10. Rawlings J. B., Mayne D. Q., Diehl M. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. 2nd ed. Nob Hill, 2017.
11. Kadlec P., Gabrys B., Strandt S. K. Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & Chemical Engineering*. 2009. Vol. 33, № 4. P. 795–814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.12.012>
12. Fortuna L., Graziani S., Rizzo A., Xibilia M. G. *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*. Springer, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-479-3>
13. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Trans. Ind. Informatics*. 2019. Vol. 15, № 4. P. 2405–2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
14. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 72. P. 173–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.192>
15. Douglas P. L., Kwade A., Lee P. L., Mallick S. K. Simulation of a rotary dryer for sugar crystalline. *Drying Technology*. 1993. Vol. 11, № 1. P. 129–155. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939308916806>
16. Duchesne C., Thibault J., Bazin C. Modelling and dynamic simulation of an industrial rotary dryer. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*. 1997. Vol. 5, № 3–4. P. 155–182. DOI: <https://doi.org/10.1002/apj.5500050301>
17. Keey R. B. *Drying of Loose and Particulate Materials*. CRC Press, 1992.
18. Baker C. G. J. *Industrial Drying of Foods*. Springer, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5730-7>
19. Strumiłło C., Pakowski Z., Mujumdar A. S. (eds.). *Drying: Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach, 1991.
20. Tsotsas E., von Grünhagen W. Fundamentals of momentum, heat and mass transfer in drying. *Modern Drying Technology*, Vol. 1. Wiley-VCH, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527614968.ch1>

Mirkevych O.M. STRUCTURE OF A CONTROL SYSTEM FOR A BEET PULP DRYING COMPLEX WITH A DECISION SUPPORT SUBSYSTEM UNDER CONDITIONS OF AN INERTIAL DRYING PROCESS

The paper addresses the relevant problem of improving the efficiency of control of sugar beet pulp drying complexes under conditions of high process inertia, significant time delays, and limited possibilities for direct measurement of product quality indicators. It is shown that traditional automatic control systems and classical SCADA-based solutions, which are mainly focused on reactive control, do not ensure sufficient stability of beet pulp moisture at the outlet of the drying drum and do not provide rational use of energy resources.

The aim of the study is to develop and substantiate the structure of a control system for a beet pulp drying complex with a decision support subsystem that provides end-to-end integration of the technological object, data acquisition and storage facilities, analytical modules, and the operator level. The proposed architecture is based on a multilevel approach and involves the use of standard industrial communication protocols, telemetry acquisition infrastructure, time-series databases, and predictive analytics modules.

The paper substantiates the expediency of separating real-time control functions from data storage and analytical processing, which increases system flexibility and simplifies its implementation at operating industrial facilities. The analytical level provides predictive information on the evolution of key drying process parameters, which is used within the decision support subsystem to generate recommendations for the operator. Integration of analytical results with the operator interface is implemented without direct intervention in automatic control loops, thereby increasing industrial safety and acceptance by operational personnel.

It is demonstrated that the proposed system structure enables a transition from reactive to proactive control of the drying process, reduces the negative impact of time delays, and contributes to stabilizing the moisture content of beet pulp at the outlet of the drying complex. The obtained results can be used as a basis for implementing intelligent control systems at sugar industry enterprises and for further research aimed at improving the energy efficiency of inertial technological processes.

Keywords: *beet pulp drying complex, control system, decision support system, SCADA, industrial internet of things, predictive analytics.*

Дата першого надходження статті до видання: 23.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026