

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-22>

УДК 664.012:004:005.6

БЕЛОВА ІРИНА

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5399-3654>

e-mail: i.belova@wunu.edu.ua

СТАДНИК ІГОР

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>

e-mail: igorstadnykk@gmail.com

КИРИЛІВ МАРІЯ

Тернопільський національний медичний

університет імені І. Я. Горбачевського

<https://orcid.org/0000-0001-5251-5637>

e-mail: kyryliv@tdmu.edu.ua

ФЕДОРІВ ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4499-0910>

e-mail: fedoriv55@ukr.net

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ: КОНЦЕПТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ДАНООРІЄНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА БЕЗПЕЧНІСТЮ

У статті досліджено комплексний вплив цифрової трансформації на структуру інженерно-технологічних процесів харчової промисловості та принципи операційного керування потоками. Актуальність роботи зумовлена активним переходом переробних підприємств на рейки четвертої та п'ятої промислових революцій (Food Industry 4.0/5.0), що вимагає перегляду класичних схем контролю параметрів середовищ. Проаналізовано сучасні інструменти промислового інтернету речей (IIoT), інтелектуальних сенсорних мереж, систем комп'ютерного зору та предиктивної аналітики, які впроваджуються на лініях для стабілізації кондицій готових продуктів. Показано, що автоматизація сучасного переробного заводу трансформує традиційні функції інженера-технолога, переміщуючи фокус із репродуктивного зняття показників приладів на аналіз динамічних часових рядів, роботу з цифровими лог-журналами та SCADA-інтерфейсами.

Методологічну основу дослідження становлять системний, технологічний та інтегративний інженерні підходи, а також методи структурно-логічного моделювання і концептуального синтезу параметрів харчових систем. Наукова новизна роботи полягає у розробленні та обґрунтуванні наскрізної концептуальної моделі «технологічна основа – цифровий інструмент – дані – рішення – безпека – якість – відповідальність». Дана модель вперше поєднує фізико-хімічні закономірності переробки сировини з верхніми рівнями автоматизованого управління підприємством (MES/ERP), алгоритмами верифікації критичних контрольних точок системи НАССР та процедурами цифрової простежуваності (Traceability) партій.

У межах запропонованої архітектури структуровано сім інтегрованих кластерів інженерно-технологічних функцій: технологічно-процесний, цифрово-аналітичний, якісно-безпечнісний, простежувально-регуляторний, інженерно-сенсорний, інноваційно-проектний та системно-відповідальний. Визначено організаційно-технологічні умови побудови надійних цифрових контурів управління, зокрема вимоги до валідації первинних сенсорних даних, захисту інформаційних мереж АСУ ТП та оцінювання ефективності ліній за інтегральним критерієм ОЕЕ. Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості їх використання для модернізації діючих цехів, автоматизації лабораторного контролю за допомогою LIMS-систем, а також для впровадження обчислювальної гідродинаміки (CFD) під час проектування нових високоефективних апаратів харчових виробництв.

Ключові слова: цифрова трансформація, харчова промисловість, Food Industry 4.0, автоматизація виробництва, управління якістю, простежуваність.

BELOVA IRYNA, STADNYK IHOR

Western Ukrainian National University

KYRYLIV MARIYA

I. Horbachevsky Ternopil National Medical University

FEDORIV VIKTOR

Khmelnytskyi National University

DIGITAL TRANSFORMATION IN THE FOOD INDUSTRY: CONCEPTUAL APPROACHES TO DATA-DRIVEN QUALITY AND SAFETY MANAGEMENT

This article examines the comprehensive impact of digital transformation on the structure of engineering and technological processes in the food industry and the principles of operational flow management. The relevance of this work stems from the active transition of processing enterprises toward the fourth and fifth industrial revolutions (Food Industry 4.0/5.0), which requires a reevaluation of traditional methods for controlling environmental parameters. The article analyzes modern tools of the Industrial Internet of Things (IIoT), intelligent sensor networks, computer vision systems, and predictive analytics, which are being implemented on production lines to stabilize the conditions of finished products. It is shown that the automation of a modern processing plant transforms the traditional functions of a process engineer, shifting the focus from the routine recording of instrument readings to the analysis of dynamic time series, working with digital log files, and SCADA interfaces.

The methodological basis of the study consists of systemic, technological, and integrative engineering approaches, as well as methods of structural-logical modeling and conceptual synthesis of food system parameters. The scientific novelty of the work lies in the development and justification of an end-to-end conceptual model: "technological foundation – digital tool – data – decision – safety – quality – responsibility." This

model is the first to integrate the physical and chemical principles of raw material processing with higher-level enterprise automation systems (MES/ERP), algorithms for verifying critical control points in the HACCP system, and procedures for digital traceability of batches.

Within the proposed architecture, seven integrated clusters of engineering and technological functions have been structured: technological-process, digital-analytical, quality-safety, traceability-regulatory, engineering-sensor, innovation-design, and system-responsibility. The organizational and technological conditions for building reliable digital control loops have been defined, including requirements for the validation of primary sensor data, the protection of process control system (PCS) information networks, and the evaluation of line efficiency using the OEE metric. The practical significance of the research results lies in the possibility of using them to modernize existing production facilities, automate laboratory control using LIMS systems, and implement computational fluid dynamics (CFD) during the design of new high-efficiency food processing equipment.

Keywords: digital transformation, food industry, Food Industry 4.0, production automation, quality management, traceability.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.05.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Белова Ірина, Стадник Ігор, Кирилів Марія, Федорів Віктор

Постановка проблеми

Цифрова трансформація та перехід до концепцій четвертої та п'ятої промислових революцій (Food Industry 4.0/5.0) є визначальними векторами модернізації сучасної харчової та переробної промисловості. Специфіка харчових виробництв полягає у високій динамічності технологічних процесів, біологічній варіативності властивостей сировини та строгих вимогах до забезпечення стабільної якості й абсолютної безпечності готової продукції. Традиційні підходи до інженерно-технологічного супроводу ліній, які базуються на періодичному лабораторному контролі та ручному коригуванні режимів роботи обладнання, сьогодні вже не здатні забезпечити необхідний рівень операційної ефективності та конкурентоспроможності підприємств.

Впровадження автоматизованих систем управління, промислового інтернету речей (IIoT), інтелектуальних сенсорних мереж та предиктивної аналітики дозволяє розраховувати та контролювати параметри середовищ у режимі реального часу. За таких умов будь-який технологічний процес (будь то заміс тіста, екструзія, пастеризація чи сушіння) трансформується у безперервне джерело потокових даних. Ключовим практичним завданням для інженерної спільноти стає створення наскрізних цифрових контурів управління, де дані з нижнього рівня (від датчиків та програмованих логічних контролерів, PLC) миттєво інтегруються у системи вищого рівня – MES (системи управління виробництвом) та ERP (системи планування ресурсів).

Зв'язок цієї проблеми з важливими науковими завданнями полягає у необхідності розроблення нових концептуальних моделей та математичних алгоритмів даноорієнтованого управління. Потрібно науково обґрунтувати, як саме масиви цифрової інформації про реологічні, теплофізичні чи фізико-хімічні показники напівфабрикатів мають трансформуватися у миттєві коригувальні рішення (наприклад, автоматичне змінення геометрії потоку, обертів робочих органів машин чи параметрів теплоносія). Особливого значення це набуває в контексті автоматизації процедур HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) та забезпечення цифрової простежуваності (Traceability) продукції вздовж усього ланцюга постачання, що є прямою вимогою міжнародних інженерно-технологічних стандартів ISO 22000 та IFS.

Таким чином, розроблення цілісної концептуальної архітектури, яка об'єднує фундаментальну технологічну основу харчових систем із новітніми інструментами автоматизації та аналітики великих даних, є актуальним науково-практичним завданням для розвитку технічних наук у переробній галузі.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблематика інтеграції цифрових інструментів та автоматизованих систем управління у процеси переробної промисловості перебуває в центрі уваги багатьох провідних науковців. Так, у роботі [1] наведено дані про загальні підходи до трансформації кваліфікаційного профілю інженерних кадрів та визначено ключові функції персоналу, що виникають в умовах реалізації концепції Industry 4.0 на підприємствах харчового сектору. Авторами праць [2, 3] детально систематизовано архітектуру сучасних технологій четвертої промислової революції в харчовій індустрії, зокрема розкрито потенціал використання штучного інтелекту, великих даних, цифрових двійників (Digital Twins) та кіберфізичних комплексів для оптимізації глибокої переробки сировини.

Окремий масив наукових досліджень присвячено проблемам наскрізного контролю безпечності продуктів та логістичного менеджменту. У роботі [4] розглядаються технічні аспекти побудови систем цифрової простежуваності (Traceability 4.0), де на основі технологій інтернет-речей (IIoT) та блокчейн забезпечується захист даних від фальсифікації вздовж усього виробничого ланцюга. Водночас у дослідженні [5] проведено комплексний техно-менеджерський аналіз переваг та бар'єрів при впровадженні інструментів автоматизованого моніторингу критичних контрольних точок (HACCP), де доведено, що перехід на предиктивні моделі оцінювання ризиків суттєво знижує ймовірність виходу параметрів ліній за технологічні межі.

Загальні теоретичні засади формування системного інженерного мислення, цифрової грамотності та алгоритмів взаємодії людини з автоматизованими комплексами в умовах сучасного машинобудування обґрунтовано в працях [6, 7, 8].

У вітчизняному науковому просторі суттєвий внесок у розроблення методології професійної підготовки та підвищення технічної компетентності фахівців переробних галузей зроблено авторами досліджень [9, 10, 11, 12]. Проблеми формування цифрових контурів управління складними технічними системами та використання інформаційно-комунікаційних інструментів у промисловому секторі висвітлено в працях [13, 14, 15]. На міжнародному рівні базові стандарти та рамки побудови індивідуальних і корпоративних цифрових профілів узагальнено у нормативних документах [16, 17].

Для забезпечення стабільної якості готового продукту критично важливо розуміти фізичну природу взаємодії робочих органів машин із перероблюваним середовищем. У роботі [20] експериментально досліджено закономірності впливу динамічних параметрів та реологічних властивостей технологічного середовища на механічне зношування і втрату деградацію металоконструкцій робочих органів харчових машин. Питання практичного забезпечення надійності, методології технічного обслуговування, ремонту (ТОiP) та ефективної експлуатації автоматизованих ліній детально висвітлено у навчально-методичному посібнику [21]. Крім того, у роботі [22] наведено вичерпні дані про сучасні високотехнологічні пакувальні комплекси, принципи їх інтеграції в автоматизовані контури великих заводів та вплив бар'єрних пакувальних матеріалів на стабільність показників безпечності готових виробів під час зберігання.

Проте, попри значну кількість публікацій, у наявному науковому дискурсі існує суттєвий розрив: більшість досліджень описують або загальні верхньорівневі IT-платформи (ERP/BI), або ж концентруються виключно на вузькоспеціалізованих фізико-хімічних параметрах конкретних одиниць обладнання. Недостатньо розробленим залишається системний інженерний рівень – а саме принципи побудови наскрізних концептуальних моделей, у яких параметри якості, верифікація критичних точок НАССР, рецептурні обмеження та кінематичні режими роботи автоматизованого обладнання об'єднані в єдину, даноорієнтовану кіберфізичну систему управління підприємством.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження техніко-технологічних чинників цифровізації харчових виробництв в умовах концепцій Food Industry 4.0/5.0, а також розроблення інтегрованої концептуальної моделі даноорієнтованого управління параметрами ліній для забезпечення стабільної якості, безпечності (НАССР) та наскрізної простежуваності продукції.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання:**

1. Проаналізувати архітектуру сучасних цифрових трендів у переробній промисловості, класифікувати ключові інструменти автоматизованого збору даних (ІоТ, інтелектуальні сенсори, системи машинного зору) та визначити характер трансформації традиційних інженерних задач у цифрову площину.
2. Побудувати наскрізну концептуальну модель взаємозв'язку між первинними технологічними процесами, засобами автоматизації, потоками потокових даних та алгоритмами ухвалення коригувальних рішень у межах єдиного кіберфізичного простору.
3. Розробити структуру функціональних кластерів сучасного інженерно-технологічного супроводу підприємств, яка інтегрує базові фізико-хімічні та реологічні параметри середовищ із новітніми цифровими та аналітичними функціями керування.
4. Обґрунтувати організаційно-технологічні умови та системні вимоги (валідація даних, кіберзахист АСУ ТП, інтеграція MES/ERP контурів), що є необхідними для мінімізації виробничих ризиків, усунення «вузьких місць» обладнання та підвищення загальної ефективності ліній за критерієм OEE.

Виклад основного матеріалу

Цифрова трансформація харчової промисловості в межах концепцій Food Industry 4.0/5.0 передбачає глибоку інтеграцію технологічних процесів із цифровими засобами моніторингу, автоматизованими системами керування (АСУ ТП), індустріальним інтернетом речей (ІоТ) та аналітичними платформами підтримки прийняття рішення.

Специфіка галузі (біологічна варіативність сировини, динамічність процесів) вимагає переходу від періодичного лабораторного контролю до даноорієнтованого управління. Концептуальний ланцюжок сучасного виробництва має вигляд: *«технологічний процес – цифровий моніторинг – виробничі дані – аналітика – управлінське рішення – якість і безпечність продукції»*.

Водночас цифровізація не замінює фундаментальних знань про фізико-хімічні, біохімічні та реологічні перетворення сировини, а доповнює їх інструментами оброблення потокових даних. Трансформацію класичних інженерних завдань у цифрову площину систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1

Трансформація інженерно-технологічних задач харчових виробництв в умовах цифровізації

Традиційна виробнича задача	Цифровий вимір задачі та інструменти	Нова операційна вимога до інженерного аналізу
Контроль параметрів процесу	Інтелектуальні сенсори, SCADA, MES-системи, цифрові лог-журнали	Здатність інтерпретувати потокові дані, будувати тренди й оперативно виявляти приховані відхилення
Забезпечення безпечності	Цифровий облік ККТ системи НАССР, автоматизований моніторинг бар'єрів	Вміння поєднувати аналіз небезпечних чинників із надійною цифровою доказовістю (захист логів контролерів)
Контроль якості продукції	Системи машинного зору, експрес-спектроскопія (NIR), предиктивний контроль	Оцінювання кондицій продукту на основі інтеграції експрес-лабораторних та безперервних цифрових даних

Продовження таблиці 1

Простежуваність партій	QR-кодування, блокчейн-платформи, ERP-системи	RFID-мітки, інтегровані	Наскрізне автоматичне відстеження руху сировини, напівпродуктів та готової продукції по складах і цехах
Оптимізація рецептур	Цифрові бази рецептурних даних, комп'ютерне моделювання матриць		Робота з багатокомпонентними рецептурними матрицями даних та динамічними технологічними обмеженнями
Експлуатація обладнання	Інтелектуальні машинні агрегати, прогнозне обслуговування (Predictive Maintenance)		Розуміння взаємозв'язку між деградацією елементів машин, кінематичним режимом та параметрами середовища
Документування	Лабораторні інформаційні системи (LIMS), електронні протоколи варок/замісів		Ведення верифікованої цифрової технологічної документації без можливості несанкціонованого коригування

Дані таблиці 1 свідчать, що автоматизація посилює значення аналітичних і регуляторних контурів. Інженерна діяльність тепер передбачає інтерпретацію будь-якого фізичного показника в контексті загальної системи даних та ризиків.

Масштаби та економічну значущість середовища, в якому реалізується Food Industry 4.0/5.0, обґрунтовано кількісними індикаторами ринку (табл. 2).

Таблиця 2

Кількісні орієнтири цифрової трансформації харчової промисловості та інженерно-технологічного супроводу

Показник	Значення	Джерело	Значення для інженерно-технологічного супроводу та модернізації ліній
Зайнятість у харчовій пром. ЄС	4,7 млн осіб	FoodDrinkEurope Data & Trends 2024 [18]	Масштаб галузі потребує тиражування уніфікованих, інтуїтивно зрозумілих цифрових інтерфейсів
Оборот харчової пром. ЄС	1,2 трлн євро	FoodDrinkEurope Data & Trends 2024 [18]	Цифровізація безпосередньо оптимізує процеси у секторі з надвисокою економічною вагою
Додана вартість галузі в ЄС	250 млрд євро	FoodDrinkEurope Data & Trends 2024 [18]	Ефективність інженерних рішень прямо пов'язана з підвищенням продуктивності й зниженням втрат
Очікувана зміна інженерних навичок до 2030 р.	39% ключових функцій	World Economic Forum, Future of Jobs 2025 [19]	Автоматизовані системи та алгоритми керування лініями мають будуватися як гнучкі комплекси
Частка підприємств із стратегіями рескілінгу	50% у 2025–2026 рр.	World Economic Forum, Future of Jobs 2025 [19]	Безперервна модернізація систем автоматизації та ПЛК стає нормою промислової експлуатації
Вимога аналітичного мислення до інженера	близько 70% компаній	World Economic Forum, Future of Jobs 2025 [19]	Ухвалення рішень персоналом має базуватися на статистичному контролі процесів (SPC)
Зростання значущості ШІ та аналітики даних	70% респондентів	World Economic Forum, Future of Jobs 2025 [19]	Сировинні контури харчових систем переходять на предиктивні математичні моделі управління

Таблиця 2 пояснює, чому наступний крок дослідження має бути строго професійно-галузевим та інженерним. Масштаб харчової промисловості та високий рівень очікуваної зміни структури процесів показують, що цифрові контури сучасного підприємства не можна зводити до простого користування офісними програмами. Вони мають бути безпосередньо інтегровані в управління якістю, безпечністю, простежуваністю, роботу з сенсорикою та промисловими виконавчими системами (MES). Саме ця логіка переводить аналіз від узагальнених макроекономічних показників до структурного графічного обґрунтування масштабу модернізації.



Рис. 1. Економічний масштаб середовища впровадження концепцій Food Industry 4.0/5.0 за показниками FoodDrinkEurope

Аналіз рисунка 1 має інтерпретуватися не як порівняння різнорідних величин в одній шкалі, а як візуальне інженерно-економічне обґрунтування галузевого масштабу: харчова промисловість поєднує мільйони робочих місць, трильйонний оборот і значну додану вартість. Отже, рівень автоматизації та цифрового супроводу безпосередньо впливає на загальну адаптивність і технологічну ефективність великих виробничих систем, а не є лише локальним технічним рішенням окремого цеху.

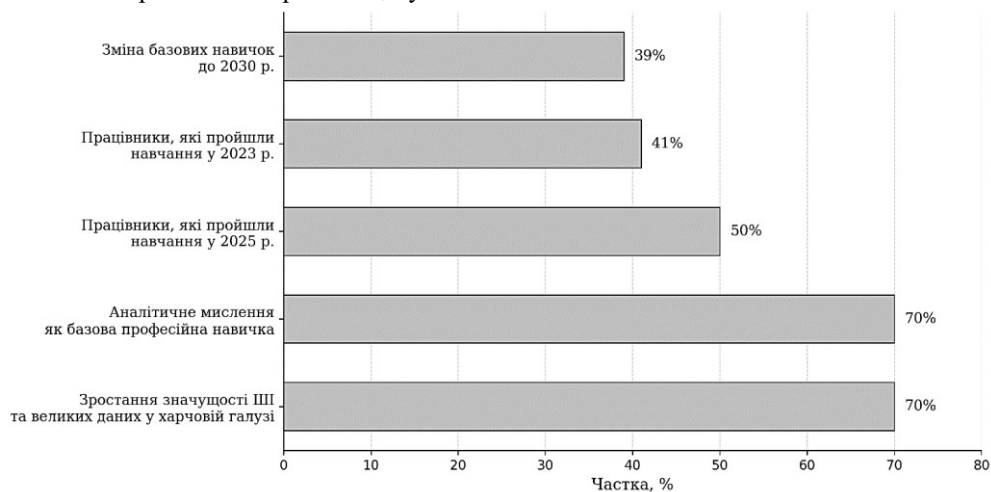


Рис. 2. Прогнозні індикатори інтенсивності трансформації виробничо-технологічних функцій за даними World Economic Forum

Рисунок 2 показує, що трансформація інженерних підходів має чітко вимірюваний характер: промислові підприємства та інвестори очікують суттєвої зміни базових операційних алгоритмів, а частка автоматизованих контурів, залучених до безперервного аналізу ризиків, стрімко зростає. Для даного дослідження це означає, що перехід до декомпозиції інженерно-технологічного контуру на інтегровані функціональні кластери є не абстрактним теоретичним кроком, а прямою відповіддю на реальну динаміку промислового ринку.

Авторська інженерно-технологічна модель функціонування сучасного цифровізованого харчового підприємства може бути представлена як цілісна система, що складається з семи взаємопов'язаних кластерів:

1) Технологічно-процесний кластер – охоплює базові фізико-хімічні, реологічні та біохімічні закономірності переробки сировини, а також класичне керування режимами роботи тепло- і масообмінних апаратів.

2) Цифрово-аналітичний кластер – пов'язаний з обробкою масивів потокових даних, роботою з цифровими журналами варок/замісів, побудовою часових трендів та інтерпретацією первинних сигналів із сенсорних мереж за допомогою SCADA-систем.

3) Якісно-безпечнісний кластер - забезпечує інтеграцію процедур HACCP, реалізацію ризик-орієнтованого мислення (risk-based thinking), безперервний автоматизований контроль мікробіологічних бар'єрів та формування цифрової доказової бази для аудитів.

4) Простежувально-регуляторний кластер – відповідає за дотримання вимог міжнародних технічних стандартів (ISO 22000, IFS), автоматичний облік партійності, маркування та електронний документообіг.

5) Інженерно-сенсорний кластер – охоплює фізичний рівень автоматизації: налаштування, калібрування та обслуговування інтелектуальних датчиків, роботу з програмованими логічними контролерами (PLC) та кіберфізичними вузлами ліній.

6) Інноваційно-проектний кластер – пов'язаний зі здатністю здійснювати модернізацію ліній, використовувати системи автоматизованого проектування (CAD) та пакети обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації геометрії робочих органів машин.

7) Системно-відповідальний кластер – забезпечує кібербезпеку промислових мереж АСУ ТП, моніторинг та мінімізацію вуглецевого сліду, оптимізацію енергоспоживання (рекуперацію) та загальну промислову безпеку.



Рис. 3. Інтегрована архітектура функціональних зв'язків у загальному інженерно-технологічному контурі цифровізованого підприємства

Структура, представлена на рисунку 3, підкреслює, що загальний інженерно-технологічний контур сучасного харчового підприємства має не лінійну, а глибоко інтегровану архітектуру. Неможливо ефективно реалізувати цифрово-аналітичні функції управління без базової фізико-хімічної та апаратної основи, так само як неможливо забезпечити надійну цифрову простежуваність продукції без чіткого системного розуміння партійності виробництва, вхідних сировинних ризиків, динаміки критичних контрольних точок (ККТ) та строгих нормативних вимог. Отже, автоматизація та цифровізація ліній мають бути професійно вмонтованими в загальну технологічну схему переробного заводу. Саме тому архітектуру цих інтегрованих кластерів доцільно конкретизувати через цільові операційно-технологічні завдання, які безпосередньо вирішуються інженерним персоналом (табл. 3).

Для практичного застосування запропонованої моделі необхідно перейти від загальних теоретичних кластерів до конкретних виробничих регламентів та алгоритмів дій. Слід наголосити, що реальна ефективність цифрового контуру управління не підвищується через декларативне внесення до текстової частини інструкцій загальної фрази «завод використовує ІТ-технології». Надійна система моніторингу формується лише тоді, коли інженер-технолог або автоматизована система підтримки прийняття рішень (DSS) регулярно аналізує конкретні параметри процесу за допомогою цифрових інструментів, оперативно отримує масиви поточкових даних, інтерпретує їх у режимі реального часу, ухвалює обґрунтоване коригувальне рішення та миттєво відстежує його наслідки для безпечності й якості готового харчового продукту.

Цілісна архітектура цих взаємозв'язків (рис. 3) демонструє глибоку інтеграцію контурів. Для практичної реалізації моделі розроблено цільові операційно-технологічні завдання для кожного кластера (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристика інженерно-технологічних кластерів та цільові операційні завдання

Кластер інженерного контуру	Системний зміст та інструментарій управління	Приклад цільового інженерно-технологічного завдання
Технологічно-процесний	Розуміння фізико-хімії сировини, кінетики процесів, режимів обробки	Розрахунок та обґрунтування оптимального режиму процесу з урахуванням варіативності сировини
Цифрово-аналітичний	Робота з великими даними (Big Data), трендами, методами SPC	Статистичний аналіз цифрових часових рядів температури, тиску або pH, виявлення прихованих відхилень
Якісно-безпечнісний	Автоматизація процедур HACCP, контроль бар'єрів, ризик-орієнтоване мислення	Формування захищеного електронного протоколу моніторингу та верифікації критичної контрольної точки (ККТ)
Простежувально-регуляторний	Контроль партійності, маркування, сертифікація за ISO 22000	Наскрізне цифрове трасування ланцюжка руху партії «вхідна сировина – напівфабрикат – готовий продукт»

Продовження таблиці 3

Інженерно-сенсорний	Обслуговування сенсорних мереж IoT, налаштування контролерів (PLC)	Технічне обґрунтування та вибір точок лінії для доцільного впровадження автоматичних датчиків
Інноваційно-проектний	Розроблення та модернізація ліній, 3D-проектування, моделювання потоків (CFD)	Інженерне проектування вискоєфективного цифрового контуру конкретного технологічного апарату
Етико-відповідальний	Кібербезпека АСУ ТП, екологічна сталість, захист даних споживача	Комплексне оцінювання інженерних ризиків у разі збоїв зв'язку або отримання недостовірних даних датчиків

Цифрова грамотність інженера в харчовій індустрії — це не просто володіння ПЗ, а системна здатність застосовувати цифрові інструменти для прийняття технологічно правильних та безпечних рішень. З огляду на це, найбільш продуктивною моделлю модернізації є наскрізна інтеграція, коли кожен професійний технологічний модуль лінії має власний цифровий контур управління.

Висновки

У результаті проведеного дослідження здійснено теоретичне узагальнення та розв'язано важливу прикладну інженерно-технологічну задачу, що полягає в науковому обґрунтуванні та розробленні концептуальних основ цифровізації харчових виробництв в умовах розгортання концепцій Food Industry 4.0 та Food Industry 5.0. Отримані результати дозволяють сформулювати такі розширені висновки:

1. Досліджено характер та глибину трансформації традиційних інженерно-технологічних задач під впливом сучасних цифрових трендів переробної промисловості. Доведено, що перехід до автоматизованого керування лініями не нівелює значення фундаментальних закономірностей тепло- та масообміну, біохімічних чи реологічних властивостей сировинних систем, а навпаки – вимагає їх точного цифрового опису. Встановлено, що впровадження інтелектуальних сенсорних мереж, засобів індустріального інтернету речей (IIoT) та систем машинного зору трансформуює класичний пасивний контроль параметрів у динамічний кіберфізичний супровід, де кожен фізико-хімічний показник стає частиною єдиного потоку даних, захищеного від несанкціонованого коригування.

2. Побудовано та теоретично обґрунтовано наскрізну концептуальну модель взаємозв'язку між первинними технологічними процесами та цифровими аналітичними інструментами у вигляді строгої послідовності: *«технологічний процес – цифровий моніторинг (SCADA/ПЛК) – потокові виробничі дані – предиктивна аналітика – автоматизоване чи диспетчерське коригувальне рішення – стабільна якість і безпечність продукції»*. У межах цієї моделі інформація інтерпретується як повноцінний виробничий ресурс, що має вимірювану економічну та технічну вартість. Системна інтеграція цієї послідовності в архітектуру підприємства дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, оперативно виявляти приховані відхилення режимів апаратів та максимізувати загальну ефективність роботи обладнання за міжнародним критерієм OEE (Overall Equipment Effectiveness).

3. Розроблено та деталізовано структуру функціональних кластерів сучасного інженерно-технологічного супроводу підприємств, яка охоплює сім взаємопов'язаних напрямів: технологічно-процесний, цифрово-аналітичний, якісно-безпечнісний, простежувально-регуляторний, інженерно-сенсорний, інноваційно-проектний та системно-відповідальний. На основі цієї структури побудовано прикладну матрицю наскрізного вмонтовування цифрових елементів у базові виробничі й лабораторні модулі заводу. Запропонований підхід, на відміну від існуючих децентралізованих IT-рішень, жорстко прив'язує використання спеціалізованого софту (програмних комплексів MES, ERP, LIMS та систем 3D/CFD моделювання) до конкретних операційних задач, таких як автоматична фіксація параметрів у критичних контрольних точках (ККТ) системи HACCP, електронне трасування партійності (Traceability) та оперативний статистичний контроль процесів (SPC).

4. Систематизовано комплекс організаційно-технологічних умов та жорстких системних вимог (валідація та калібрування сенсорів, забезпечення кіберзахисту промислових мереж АСУ ТП, синхронізація MES/ERP контурів інформаційного обміну), що є необхідними для усунення «вузьких місць» обладнання та зниження виробничих ризиків. З урахуванням гетерогенності розвитку промислового сектору, обґрунтовано три рівні цифрової зрілості технологічного контуру: операційний (базовий збір даних), аналітичний (інтерпретація трендів та детектування дефектів) і стратегічно-професійний (повна інтеграція даних для предиктивного керування). Це забезпечує інженерному персоналу можливість гнучко адаптувати алгоритми підтримки прийняття рішень до реального технічного та автоматизованого стану конкретного цеху чи лінії.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають у практичній реалізації розробленої інтегрованої моделі на прикладі конкретних хлібопекарських або цукрових виробництв. Зокрема, планується розроблення предиктивних математичних моделей та проведення чисельного симулювання гідродинамічних, тепло- і масообмінних процесів у пакетах обчислювальної гідродинаміки (CFD) для оптимізації геометричних параметрів робочих органів інноваційного обладнання. Наступним кроком стане алгоритмізація та програмування промислових логічних контролерів (ПЛК) для реалізації контурів автоматичного предиктивного керування на основі аналізу часових трендів великих даних.

Література

1. Akyazi T., Goti A., Oyarbide A., Alberdi E., Bayon F. A Guide for the Food Industry to Meet the Future Skills Requirements Emerging with Industry 4.0. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 4. Art. 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9040492>
2. Hassoun A., Ait-Kaddour A., Abu-Mahfouz A. M. [et al.]. The fourth industrial revolution in the food industry – Part I: Industry 4.0 technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. Vol. 63, No. 23. P. 6547–6563. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>
3. Hassoun A., Jagtap S., Trollman H. [et al.]. Food Processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution. *Food Control*. 2023. Vol. 145. Art. 109507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>
4. Hassoun A., Alhaj Abdullah N., Ait-Kaddour A. [et al.]. Food traceability 4.0 as part of the fourth industrial revolution: key enabling technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64, No. 3. P. 873–889. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2110033>
5. Semercioz-Oduncuoglu A. S., Luning P. A. Industry 4.0 technologies in quality and safety control systems in food manufacturing: A systematic techno-managerial analysis on benefits and barriers. *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 159. Art. 105144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105144>
6. Chaka C. Skills, competencies and literacies attributed to 4IR/Industry 4.0: Scoping review. *IFLA Journal*. 2020. Vol. 46, No. 4. P. 369–399. DOI: <https://doi.org/10.1177/0340035219896376>
7. Rêgo B. S., Lourenço D., Moreira F., Pereira C. S. Digital transformation, skills and education: A systematic literature review. *Industry and Higher Education*. 2024. Vol. 38, No. 4. P. 336–350. DOI: <https://doi.org/10.1177/09504222231208969>
8. Kipper L. M., Iepsen S., Dal Forno A. J. [et al.]. Scientific mapping to identify competencies required by Industry 4.0. *Technology in Society*. 2021. Vol. 64. Art. 101454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101454>
9. Дубова Н., Люльченко В. Формування технічної компетентності у майбутнього фахівця харчової галузі як складової професійної компетентності. *Збірник наукових праць Уманського державного педагогічного університету*. 2023. № 1. DOI: <https://doi.org/10.31499/2307-4906.1.2023.276931>
10. Плуток О., Газука Т., Газука А. Сучасні методологічні підходи до професійної підготовки майбутніх фахівців харчових технологій. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*. 2023. № 19. DOI: <https://doi.org/10.58407/232219>
11. Ткачук С. І., Куценко І. С. Особливості формування професійної компетентності майбутніх фахівців у галузі харчових технологій у процесі практичної підготовки. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*. 2023. URL: <https://visnyk.chnpu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/446>
12. Філімонова І. А. Структура професійної компетентності у підготовці майбутніх фахівців у галузі харчових технологій. *Збірник наукових праць «Педагогічні науки»*. 2017. URL: <https://ps.journal.kspu.edu/index.php/ps/article/view/415>
13. Шищенко І., Харченко І. Теоретичні аспекти цифрової трансформації професійної підготовки майбутніх фахівців. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Педагогіка. Соціальна робота*. 2021. № 49. С. 241–244. DOI: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2021.49.241-244>
14. Дембіцька С., Кобилянський О. Формування професійної компетентності майбутніх фахівців з професійної освіти засобами цифрових технологій. *Педагогіка безпеки*. 2023. Т. 8, № 1. DOI: <https://doi.org/10.31649/2524-1079-2023-8-1-001-007>
15. Ткачук С. І., Мельник О. С., Паска Т. В. Особливості формування цифрової компетентності в майбутніх фахівців професійної освіти в умовах сучасних глобальних викликів. *Професійно-прикладні дидактики*. 2025. № 2. DOI: <https://doi.org/10.37406/2521-6449/2025-2-8>
16. Vuorikari R., Kluzer S., Punie Y. DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2760/115376>
17. European Commission. ESCO – European Skills, Competences, Qualifications and Occupations. 2025. URL: <https://esco.ec.europa.eu/en>
18. FoodDrinkEurope. Data & Trends of the European food and drink industry 2024. 2025. URL: <https://www.fooddrinkurope.eu/resource/data-trends-of-the-european-food-and-drink-industry-2024/>
19. World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Skills outlook. 2025. URL: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/in-full/3-skills-outlook/>
20. Стадник І., Деркач А., Кравченко Х., Федорів В. Вплив технологічного середовища на механічне зношування робочих органів машини. *SWorldJournal*. 2024. № 1(23-01). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-23-00-016>
21. Федорів В. М., Олександренко В. П., Мартинюк А. В. Експлуатація та обслуговування обладнання : навч. посібник. Хмельницький : ХНУ, 2024. 335 с.
22. Федорів В., Стечишин М., Мартинюк А. [та ін.]. Modern packaging technologies in the food. *SWorldJournal*. 2025. № 1(34-01). С. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-34-01-047>

References

1. Akyazi T., Goti A., Oyarbide A., Alberdi E., Bayon F. A Guide for the Food Industry to Meet the Future Skills Requirements Emerging with Industry 4.0. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 4. Art. 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9040492>
2. Hassoun A., Ait-Kaddour A., Abu-Mahfouz A. M. [et al.]. The fourth industrial revolution in the food industry – Part I: Industry 4.0 technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. Vol. 63, No. 23. P. 6547–6563. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>
3. Hassoun A., Jagtap S., Trollman H. [et al.]. Food Processing 4.0: Current and future developments spurred by the fourth industrial revolution. *Food Control*. 2023. Vol. 145. Art. 109507. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109507>
4. Hassoun A., Alhaj Abdullah N., Ait-Kaddour A. [et al.]. Food traceability 4.0 as part of the fourth industrial revolution: key enabling technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64, No. 3. P. 873–889. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2110033>
5. Semercioz-Oduncuoglu A. S., Luning P. A. Industry 4.0 technologies in quality and safety control systems in food manufacturing: A systematic techno-managerial analysis on benefits and barriers. *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 159. Art. 105144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105144>
6. Chaka C. Skills, competencies and literacies attributed to 4IR/Industry 4.0: Scoping review. *IFLA Journal*. 2020. Vol. 46, No. 4. P. 369–399. DOI: <https://doi.org/10.1177/0340035219896376>
7. Rêgo B. S., Lourenço D., Moreira F., Pereira C. S. Digital transformation, skills and education: A systematic literature review. *Industry and Higher Education*. 2024. Vol. 38, No. 4. P. 336–350. DOI: <https://doi.org/10.1177/09504222231208969>
8. Kipper L. M., Iepsen S., Dal Forno A. J. [et al.]. Scientific mapping to identify competencies required by Industry 4.0. *Technology in Society*. 2021. Vol. 64. Art. 101454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101454>
9. Dubova N., Liulchenko V. Formuvannia tekhnichnoi kompetentnosti u maibutnoho fakhivtsia kharchovoi haluzi yak skladovoi profesiinoi kompetentnosti. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho derzhavnogo pedahohichnoho universytetu*. 2023. № 1. DOI: <https://doi.org/10.31499/2307-4906.1.2023.276931>
10. Plutok O., Hazuka T., Hazuka A. Suchasni metodolohichni pidkhody do profesiinoi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv kharchovykh tekhnolohii. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka*. 2023. № 19. DOI: <https://doi.org/10.58407/232219>
11. Tkachuk S. I., Kutsenko I. S. Osoblyvosti formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv u haluzi kharchovykh tekhnolohii u protsesi praktychnoi pidhotovky. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka*. 2023. URL: <https://visnyk.chnpu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/446>
12. Filimonova I. A. Struktura profesiinoi kompetentnosti u pidhotovtsi maibutnikh fakhivtsiv u haluzi kharchovykh tekhnolohii. *Zbirnyk naukovykh prats «Pedahohichni nauky»*. 2017. URL: <https://ps.journal.kspu.edu/index.php/ps/article/view/415>
13. Shyshenko I., Kharchenko I. Teoretychni aspekty tsyfrovoy transformatsii profesiinoi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya: Pedahohika. Sotsialna robota*. 2021. № 49. S. 241–244. DOI: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2021.49.241-244>
14. Dembitska S., Kobylanskiy O. Formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv z profesiinoi osvity zasobamy tsyfrovyykh tekhnolohii. *Pedahohika bezpeky*. 2023. T. 8, № 1. DOI: <https://doi.org/10.31649/2524-1079-2023-8-1-001-007>
15. Tkachuk S. I., Melnyk O. S., Paska T. V. Osoblyvosti formuvannia tsyfrovoy kompetentnosti v maibutnikh fakhivtsiv profesiinoi osvity v umovakh suchasnykh hlobalnykh vyklykiv. *Profesiino-prykladni dydaktyky*. 2025. № 2. DOI: <https://doi.org/10.37406/2521-6449/2025-2-8>
16. Vuorikari R., Kluzer S., Punie Y. DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2760/115376>
17. European Commission. ESCO – European Skills, Competences, Qualifications and Occupations. 2025. URL: <https://esco.ec.europa.eu/en>
18. FoodDrinkEurope. Data & Trends of the European food and drink industry 2024. 2025. URL: <https://www.fooddrinkurope.eu/resource/data-trends-of-the-european-food-and-drink-industry-2024/>
19. World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Skills outlook. 2025. URL: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/in-full/3-skills-outlook/>
20. Stadnyk I., Derkach A., Kravcheniuk Kh., Fedoriv V. Vplyv tekhnolohichnoho seredovyshcha na mekhanichne znoshuvannia robochykh orhanov mashyny. *SWorldJournal*. 2024. № 1(23-01). S. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2024-23-00-016>
21. Fedoriv V. M., Oleksandrenko V. P., Martyniuk A. V. Ekspluatatsiia ta obsluhovuvannia obladnannia : navch. posibnyk. *Khmelnitskyi : KhNU*, 2024. 335 s.
22. Fedoriv V., Stechyshyn M., Martyniuk A. [ta in.]. Modern packaging technologies in the food. *SWorldJournal*. 2025. № 1(34-01). S. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-34-01-047>