

ЯКІСТЬ І БЕЗПЕКА ПРОМИСЛОВИХ ТОВАРІВ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ

УДК 640.432:613.2/.3:004.8:004.94

DOI <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2026-1-8>

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ В СИСТЕМУ ХАРЧОВОЇ БЕЗПЕЧНОСТІ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОЇ ІНДУСТРІЇ

М. Б. КОЛЕСНИКОВА, кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0000-0002-6223-7105;

Т. В. ЧЕРЕМСЬКА, кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0000-0001-6518-3889;

С. Л. ЮРЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0000-0003-1286-081X;

А. О. КОЛЕСНИК, кандидат технічних наук, доцент
ORCID ID: 0000-0002-9890-6040;
(Державний біотехнологічний університет)

Анотація. Обґрунтовано необхідність трансформації традиційної моделі НАССР у закладах ресторанної індустрії в умовах зростаючої динамічності виробничих процесів, варіативності асортименту та суттєвого впливу людського чинника. Показано, що практика впровадження НАССР у ЗРІ, яка базується на фіксації відповідності критичним межам і веденні журналів, не забезпечує можливості кількісного оцінювання кумулятивного впливу короточасних і повторюваних відхилень параметрів технологічного процесу, що обмежує аналітичну чутливість системи та її превентивний потенціал.

Метою дослідження є розроблення методологічних засад інтеграції інструментів штучного інтелекту та цифрового моніторингу в систему НАССР закладів ресторанної індустрії шляхом переходу від бінарної моделі контролю до градуїрованої моделі оцінювання ризику. Методологічну основу становлять принципи НАССР, положення ризик-орієнтованого підходу відповідно до ISO 31000, а також концепція *risk-based thinking*.

Запропоновано концепцію AI-НАССР як адаптивної моделі управління безпечністю, що базується на інтеграції багатоконтурної цифрової архітектури, яка включає виробничий, матеріальний, санітарний, кадровий та нормативний контури. Розроблено інтегральний цифровий індекс ризику (DHRI) для нормування, вагового агрегування та представлення показників у єдиній шкалі для кількісного оцінювання стану системи безпечності в реальному часі.

Доведено, що застосування безперервного цифрового моніторингу та аналітичної обробки даних забезпечує виявлення прихованих тенденцій і кумулятивних ризиків, які не фіксуються в межах традиційної бінарної логіки «відповідність/невідповідність». Інтеграція інструментів штучного інтелекту дозволяє реалізувати функції виявлення аномалій, прогнозування динаміки ризику та оптимізації управлінських рішень. Запропонований підхід формує методологічне підґрунтя для розвитку адаптивних систем управління безпечністю харчових продуктів у закладах ресторанної індустрії, підвищує доказовість управлінських рішень і сприяє переходу від реактивної до превентивної моделі управління ризиками.

Ключові слова: НАССР, штучний інтелект, цифровий моніторинг, заклади ресторанної індустрії, управління ризиками.

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Система аналізу небезпечних чинників і контролю у критичних точках (НАССР), закріплена в Codex Alimentarius та імплементована в законодавство України, є базовим інструментом забезпечення безпечності харчових продуктів [1, 2]. Для закладів ресторанної індустрії її функціонування ускладнюється високою динамікою виробничих

процесів, варіативністю асортименту та значною часткою ручної праці.

На практиці впровадження НАССР у ЗРІ часто набуває формалізованого характеру: контроль зводиться до ведення журналів температури, санітарії та простежуваності сировини. Такий підхід забезпечує відповідність нормативним вимогам, проте не дозволяє кількісно оцінювати сукупний

вплив короточасних і повторюваних відхилень параметрів. Розвиток цифрових технологій створює можливість безперервного моніторингу виробничих показників і накопичення великих масивів даних. Водночас існуючі цифрові рішення в ресторанному бізнесі залишаються фрагментарними та орієнтованими переважно на автоматизацію операційної діяльності, а не на інтегроване управління ризиком [3].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю формування системного підходу до інтеграції цифрового моніторингу та інструментів штучного інтелекту в систему НАССР закладів ресторанної індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифровізація ресторанного бізнесу в Україні та світі розвивається переважно в площині автоматизації операційних процесів. POS- та ERP-системи забезпечують контроль продажів, управління складом, формування калькуляційних карт і фінансову аналітику. Проте ці рішення спрямовані насамперед на оптимізацію економічної діяльності та не формують повноцінного механізму управління небезпечними чинниками [4].

Окремий сегмент становлять цифрові платформи для ведення санітарних журналів і температурного моніторингу. Вони дозволяють автоматизувати фіксацію параметрів, зменшити паперовий документообіг та спростити підготовку до перевірок. Проте їх функціонування здебільшого обмежується логікою документування відповідності. Дані накопичуються, але не інтегруються в багатофакторну модель оцінювання ризику.

Комплексні системи менеджменту безпеки, що застосовуються в харчовій промисловості, мають ширший функціонал, однак їх впровадження у ЗРІ часто ускладнюється масштабом, вартістю та необхідністю адаптації до змінного асортименту продукції (сезонне, святкове, пісне меню тощо).

Отже, сучасний рівень цифровізації ЗРІ характеризується фрагментарністю та відсутністю інтеграційної архітектури, що поєднувала б виробничі, санітарні, кадрові та нормативні дані в єдину аналітичну систему.

Попри активне впровадження цифрових інструментів у діяльність закладів ресторанної індустрії, відсутня узгоджена методологія їх інтеграції в систему НАССР як цілісну модель управління ризиком. Найвні рішення зосереджені переважно на автоматизації окремих процедур (температурний моніторинг, електронні журнали, складський облік), проте не формують механізму багатофакторного аналізу стану системи безпечної в реальному часі.

Таким чином, виникає наукова проблема: яким чином трансформувати процедурну модель

НАССР у кількісно-орієнтовану адаптивну систему, здатну інтегрувати різномірні дані цифрового моніторингу та забезпечити градуйоване управління ризиком у ЗРІ? З методологічної точки зору окреслена проблема корелює з положеннями ризик-орієнтованого підходу, закріпленого в міжнародних стандартах управління якістю та ризиками та концепції *risk-based thinking* у системах менеджменту [5].

У цих підходах ризик розглядається не як статичний факт перевищення порогового значення, а як ймовірність небажаних наслідків у контексті змінних умов функціонування системи. У діяльності ЗРІ така змінність є постійною: виробниче навантаження, асортимент, сезонність, поведінкові фактори персоналу створюють середовище з високою варіативністю параметрів. Тому інтеграція цифрового моніторингу в НАССР має розглядатися не як інструмент автоматизації, а як етап розвитку ризик-орієнтованої моделі управління безпекою.

У традиційній моделі НАССР ризик розглядається як наслідок перевищення критичної межі. Проте у діяльності ЗРІ ризик має динамічний характер і формується під впливом сукупності факторів: мікроклімату, тривалості зберігання, частоти відкриття холодильного обладнання, дисципліни персоналу та інтенсивності виробничого навантаження [6].

Навіть за відсутності формального перевищення критичних меж можливе накопичення кумулятивного ефекту, який підвищує ймовірність небезпечної ситуації. Це свідчить про необхідність переходу до моделі безперервного та кількісного оцінювання стану системи.

Саме на цьому методологічному підґрунті формується концепція AI-НАССР – адаптивної моделі, у якій цифровий моніторинг і аналітична обробка даних забезпечують градуйоване управління ризиком.

Формування цілей статті. Метою статті є представлення результатів розроблення методологічних засад інтеграції інструментів штучного інтелекту та цифрового моніторингу в систему НАССР закладів ресторанної індустрії з переходом від бінарної моделі оцінювання критичних контрольних точок до кількісно-орієнтованої адаптивної моделі управління ризиком на основі інтегрального цифрового індексу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методологічною основою дослідження стали принципи системи НАССР, положення ризик-орієнтованого підходу, закріплені в міжнародних стандартах управління ризиками (зокрема ISO 31000), а також концепція *risk-based thinking* у системах менеджменту безпеки харчових продуктів. У процесі дослідження використано комплекс взаємодоповнювальних методів: аналіз

і синтез – для узагальнення сучасних підходів до цифровізації системи НАССР у закладах ресторанної індустрії; структурно-функціональний аналіз – для формування багатокоштурної архітектури AI-НАССР (виробничий, матеріальний, санітарний, кадровий, нормативний контури); метод математичного моделювання – для побудови інтегрального цифрового індексу ризику (DHRI) як кількісного показника стану системи безпеки, методи нормування та вагового агрегування показників – для формування часткових індикаторів ризику та їх інтеграції в узагальнений показник. Інформаційною базою дослідження слугували дані цифрового моніторингу виробничого середовища (температурні логери, контроль мікроклімату, електронні санітарні журнали), цифровий облік матеріальних потоків, результати тестування персоналу, а також нормативні вимоги до функціонування системи НАССР у закладах ресторанної індустрії.

Контурна архітектура може розглядатися як еволюційний етап розвитку систем менеджменту безпеки в умовах цифровізації [7]. Класична система НАССР є процедурно орієнтованою: вона визначає критичні точки, встановлює межі та регламентує коригувальні дії. Проте, у діяльності закладів ресторанної індустрії ризик формується не ізольовано в межах окремої ККТ, а внаслідок взаємодії кількох факторів, що діють одночасно та змінюються в реальному часі. З огляду на це

система менеджменту безпеки може бути розглянута як багатокоштурна структура (рис. 1), у якій кожен контур генерує масив даних, що впливають на загальний стан ризику. Інтеграція цих даних у межах єдиного аналітичного середовища створює передумови для формування адаптивної системи AI-НАССР.

Контур виробничого середовища. Виробниче середовище є фізичною основою формування небезпек у ЗРІ. Температура, відносна вологість повітря, інтенсивність повітрообміну, режим роботи холодильного обладнання безпосередньо впливають на стабільність сировини, напівфабрикатів, готової продукції, особливо холодних страв та закусок, холодних супів та соусів, десертної продукції, кондитерських виробів з кремом.

Впровадження логерів температури та вологості забезпечує безперервний моніторинг із формуванням часових рядів параметрів. На відміну від дискретного контролю (періодичне зняття показань із засобів вимірювальної техніки), безперервні дані дозволяють аналізувати не лише максимальні значення, а й тривалість і частоту відхилень. Додатковим елементом цього контуру є автоматизоване керування бактерицидними лампами з формуванням електронних журналів роботи, що підвищує доказовість виконання інструкцій та процедур системи, дозволяє співвідносити режими опромінення з параметрами мікроклімату.

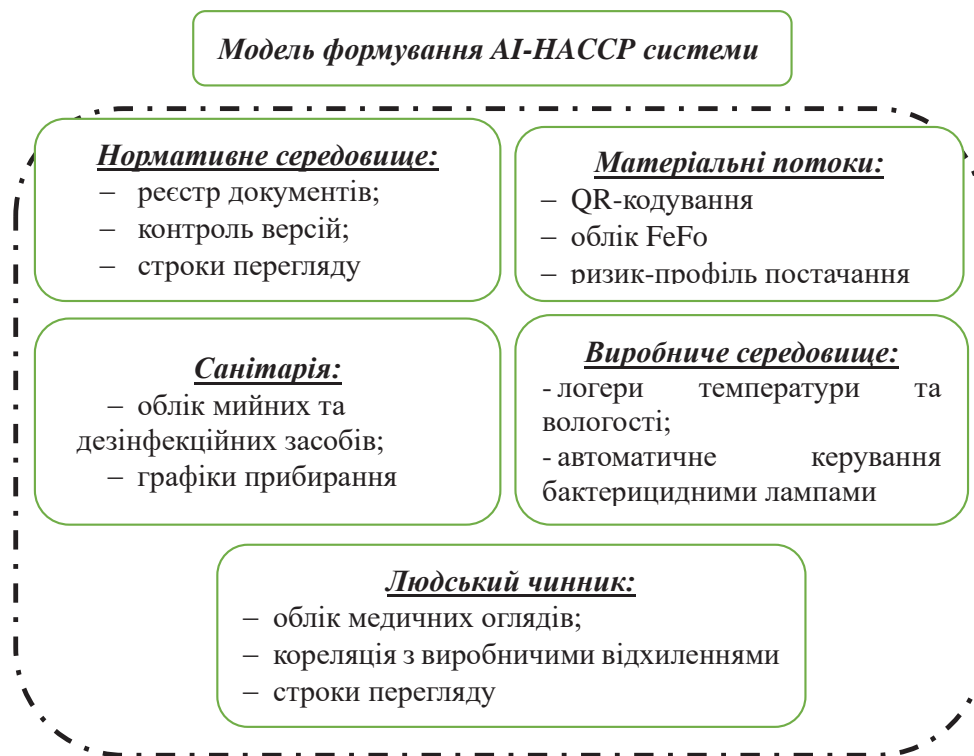


Рис. 1. Модель формування AI-НАССР системи менеджменту харчової безпеки (п'ять контурів цифрової екосистеми AI-НАССР)

Контура матеріальних потоків. Матеріальні потоки у ЗРІ характеризуються високою варіативністю постачань, строків придатності та умов зберігання. Цифровізація цього контуру передбачає використання штрих-кодування або QR-кодування партій сировини з автоматичним обліком дати надходження, строку придатності та режимів зберігання. Інтеграція з принципами FEFO дозволяє зменшити ризик використання сировини з наближеним строком придатності. Водночас аналіз частоти прострочень, затримок у використанні або порушень температурно-вологісного режиму дає змогу формувати ризик-профіль постачання [8].

Контура санітарії. Санітарні процедури формують базу програм-передумов (PRP). Цифровий облік приймання та видачі мийних і дезінфекційних засобів, контроль строків їх придатності, кількісних витрат згідно з інструкціями та автоматизовані графіки прибирання створюють прозору систему моніторингу виконання PRP. Аналітична обробка даних дозволяє виявляти аномалії у споживанні засобів або порушення періодичності процедур, що може свідчити про потенційне зростання біологічного та/або хімічного ризику.

Контура людського чинника. Людський фактор є однією з найбільш варіативних складових ризику. Цифровий реєстр медичних оглядів, автоматичний контроль строків їх дії, електронні модулі навчання та тестування персоналу дозволяють кількісно оцінювати рівень компетентності та дисципліни. Кореляція результатів тестування з даними виробничих відхилень створює основу для формування індикатора людського ризику.

Контура нормативного середовища. Система НАССР функціонує в умовах постійної актуалізації законодавчої, нормативної бази та внутрішньої документації закладу [9, 10]. Цифровий реєстр внутрішніх документів із контролем версій та строків перегляду забезпечує актуальність процедур, використання діючої нормативної документації, зменшує регуляторні ризики.

Взаємодія зазначених контурів формує єдину цифрову екосистему управління ризиком, у межах якої дані виробничого середовища, матеріальних потоків, санітарних процедур та людського фактора не існують ізольовано, а підлягають агрегуванню й аналітичній інтерпретації. Саме інтеграція різномірних джерел інформації створює передумови для переходу від фрагментарного контролю до системного управління станом безпечності, що реалізується через розрахунок інтегрального індексу ризику [11].

У традиційній моделі НАССР ризик розглядається як функція ідентифікованої небезпеки та ймовірності її реалізації. Оцінювання здійснюється на етапі розроблення НАССР-плану, після чого система функціонує відповідно до встановлених критичних меж і процедур моніторингу

[12]. Такий підхід є достатнім у відносно стабільних виробничих умовах, однак у ЗРІ ризик має виражений динамічний характер. Динамічний ризик – це змінна величина, що формується в реальному часі під впливом сукупності параметрів середовища, часу, інтенсивності виробничого навантаження, поведінкових факторів персоналу та стану обладнання. Його рівень може змінюватися навіть без формального перевищення критичних меж. Наприклад, температура зберігання холодного супу може не перевищувати +6 °C, але часті короткочасні коливання, поєднані з тривалим зберіганням та високою вологістю в цеху, формують кумулятивний ефект, який не відображається у бінарній логіці «норма/відхилення».

З позицій системного підходу ризик у ЗРІ доцільно розглядати як функцію взаємодії декількох змінних, що змінюються у часі та не є незалежними. У таких умовах використання лише порогового контролю окремих параметрів не дозволяє адекватно відобразити стан системи. Необхідною стає побудова інтегральної моделі, що враховує як амплітуду відхилення, так і його тривалість, частоту та контекст виробничого процесу [13, 14].

Для підвищення аналітичної чутливості системи НАССР необхідно перейти від статичної до адаптивної моделі, у якій ризик оцінюється безперервно, враховується взаємодія кількох контурів, здійснюється агрегування показників у кількісний індекс, забезпечується прогнозування наближення до критичного стану. Саме ця потреба зумовлює введення інтегрального цифрового індикатора ризику. Тому, у межах AI-НАССР ризик не може розглядатися як функція одного параметра, а є результатом багатофакторної взаємодії [15].

Саме тому доцільно використовувати інтегральну модель, що агрегує ключові компоненти ризику в єдину нормовану шкалу. До основи моделі покладено такі принципи:

- нормування показників для забезпечення їх відтворюваності;
- зважування складових відповідно до їх значущості;
- обмеження індексу в інтервалі [0;1] для зручності інтерпретації;
- можливість адаптації коефіцієнтів вагомості до специфіки процесу.

З огляду на багатофакторність ризику доцільним є використання інтегральної лінійної моделі з нормуванням показників до інтервалу [0;1], що забезпечує їх зіставність та можливість агрегування. Лінійна форма є початковою апроксимацією взаємодії чинників і дозволяє зберегти інтерпретованість результатів у практичних умовах ЗРІ [16]. Інтегральний цифровий індекс ризику DHRI визначається за формулою 1:

$$DHRI = \sum_{i=1}^n w_i D_i, \quad (1)$$

де D_i – нормований показник окремого чинника ризику;

w_i – коефіцієнт вагомості ($\sum w = 1$);

n – кількість урахованих факторів.

Для ЗРІ доцільно використовувати п'ятифакторну модель:

$$DHRI = w_T D_T + w_H D_H + w_t D_t + w_F D_F + w_L D_L \quad (2)$$

де D_T – температурний чинник;

D_H – чинник вологості/мікроклімату;

D_t – часовий чинник (тривалість перебування у зоні ризику);

D_F – частотний чинник відхилень;

D_L – людський чинник.

$$D_T = \min\left(1, \left| \frac{T - T_{crit}}{\Delta T_{max}} \right| \right) \quad (3)$$

де T – зафіксоване значення;

T_{crit} – критична межа;

ΔT_{max} – максимально допустиме відхилення для нормування.

$$D_t = \min\left(1, \frac{t}{t_{max}}\right) \quad (4)$$

де t – сумарна тривалість перебування поза межами;

t_{max} – порогове значення часу.

$$D_F = \min\left(1, \frac{F}{F_{max}}\right) \quad (5)$$

де F – кількість відхилень за період;

F_{max} – критична частота.

$$D_L = \alpha P + \beta(1 - S) + \gamma M \quad (6)$$

де P – частка процедурних порушень;

S – нормований бал тестування персоналу;

M – частка прострочених медичних допусків;

α, β, γ – коефіцієнти значущості.

Особливістю моделі є можливість адаптації вагових коефіцієнтів залежно від типу продукції. Наприклад, для холодних супів вагомості температурного чинника зростає, для кремкових десертів підвищується значущість мікроклімату, для продукції з коротким терміном реалізації збільшується вага часової складової. Інтерпретація індексу:

$0 \leq DHRI < 0,3$ – контрольований стан

$0,3 \leq DHRI < 0,7$ – підвищений ризик

$DHRI \geq 0,7$ – високий ризик

Такий підхід дозволяє перейти від бінарного сприйняття ризику до градуйованої системи управління. Штучний інтелект у цій архітектурі виконує три функції: виявлення аномалій у часових рядах, прогнозування значення DHRI на основі трендів, оптимізація коефіцієнтів вагомості. Тобто система переходить від реактивної логіки до адаптивної.

Для демонстрації практичної реалізації запропонованої моделі розглянемо процес виготовлення холодного супу типу окрошка, яка в теплий період року широко представлена в меню ЗРІ України. Незалежно від рецептурних варіацій, ця страва характеризується відсутністю повторного термічного оброблення після змішування компонентів та реалізується у готовому до споживання вигляді, що обумовлює підвищений ризик виникнення небезпечних чинників.

Технологічний процес передбачає попереднє термічне оброблення окремих інгредієнтів (картопля, яйця, м'ясний компонент), охолодження, подрібнення, змішування з рідкою основою, зберігання за температури $+2 \dots +6^\circ\text{C}$, реалізацію протягом обмеженого терміну. Критичною контрольною точкою (ККТ) у цьому випадку є температура та час зберігання готового продукту. За відсутності статистики інцидентів для первинної апробації моделі прийнято рівні коефіцієнти вагомості чинників. За результатами цифрового моніторингу (за одну виробничу зміну) встановлено:

– критична межа температури зберігання: $T_{crit} = +6^\circ\text{C}$;

– пікове значення температури: $T_{peak} = +8^\circ\text{C}$;

– сумарна тривалість перебування температури вище критичної межі: 40 хв;

– кількість епізодів перевищення температури: 3;

– зафіксовано 1 випадок затримки внесення даних у журнал (нормована частка процедурних порушень $P=0,1$);

– середній бал тестування персоналу: $S = 0,82$ (шкала $0 \dots 1$);

– критичних відхилень вологості не встановлено.

Порогові значення для нормування показників визначені експертним методом НАССР-групи на підставі аналізу небезпек та практики функціонування закладу: $\Delta T_{max} = 4^\circ\text{C}$, $t_{max} = 120$ хвилин, $F_{max} = 5$ відхилень за зміну. За відсутності статистики інцидентів для первинної апробації моделі прийнято рівні коефіцієнти вагомості чинників $w_i = 0,2$.

Температурний чинник:

$$D_T = \frac{T_{peak} - T_{crit}}{T_{max}} = \frac{8 - 6}{4} = 0,5 \quad \text{Часовий чинник:}$$

$$D_t = \frac{40}{120} = 0,33$$

Частотний чинник:

$$D_F = \frac{3}{5} = 0,6$$

Людський чинник:

$$D_L = \alpha P + \beta(1 - S), \alpha = 0,4, \beta = 0,6$$

$$D_L = 0,4 \cdot 0,1 + 0,6 \cdot (1 - 0,82) = 0,148$$

Людський чинник визначено як зважену суму процедурних порушень і рівня компетентності персоналу.

Чинник вологості (критичних відхилень вологості не зафіксовано):

$$D_H = 0$$

Інтегральний цифровий індекс ризику:

$$DHRI = 0,2D_T + 0,2D_H + 0,2D_I + 0,2D_F + 0,2D_L \quad (7)$$

$$DHRI = 0,2 \cdot 0,5 + 0 + 0,2 \cdot 0,33 + 0,2 \cdot 0,6 + 0,2 \cdot 0,148 \quad DHRI = 0,316$$

Отримане значення (0,316) відповідає зоні підвищеного контролю. Незважаючи на відсутність тривалого перевищення критичної межі температури, інтегральний показник відображає кумулятивний вплив короткочасних піків, їх повторюваності та внеску людського чинника. Це демонструє перевагу градуйованої моделі над бінарною логікою «відповідність/невідповідність», оскільки система дозволяє виявити тенденцію до зростання ризику до переходу процесу в критичний стан. Холодні супи характеризуються коротким строком реалізації та високою чутливістю до температурних коливань. Слід підкреслити, що в межах традиційної системи HACCP зазначені параметри не призвели б до формального визнання ситуації як критичної. Проте інтегральний показник виявив тенденцію до накопичення ризику, що у довгостроковій перспективі могло б призвести до мікробіологічної нестабільності продукції. Отже, запропонований підхід дозволяє виявляти приховані ризикові стани до моменту їх переходу у критичну фазу. На підставі отриманих даних було змінено організацію зберігання, зменшено обсяг одночасно відкритої продукції та переглянуто графік виробництва.

Роль ШІ полягає у виявленні тенденцій зростання частоти пікових температур, встановленні зв'язку між піками температури та годинами пікового навантаження, прогнозуванні ймовірності переходу DHRI у зону високого ризику протягом наступних змін. Таким чином, управління ризиком стає не реакцією на відхилення, а прогнозно-орієнтованим процесом.

Запропонована модель AI-HACCP не потребує повної зміни нормативної структури HACCP, а передбачає інтеграцію цифрових джерел даних у межах єдиної аналітичної моделі. Застосування інтегрального індексу ризику дозволяє стандартизувати оцінювання стану ККТ і процедур PRP, мінімізувати вплив суб'єктивної інтерпретації, забезпечити доказовість управлінських рішень, знизити ймовірність кумулятивних відхилень, оптимізувати використання ресурсів та зменшити втрати продукції.

Наукова новизна роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні можливості трансформації системи HACCP у ЗРІ шляхом формування багатоконтурної цифрової архітектури, уточненні поняття динамічного ризику для умов ресторанного виробництва та розробленні інтегрального цифрового індексу ризику як інструменту градуйованого управління станом системи безпечності.

Висновки із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень у поданому напрямі. Обґрунтовано доцільність трансформації процедурної моделі HACCP у закладах ресторанної індустрії в напрямі інтеграції цифрового моніторингу та кількісних методів оцінювання ризику. Запропоновано контурну архітектуру AI-HACCP, що поєднує виробничий, санітарний, матеріальний, кадровий та нормативний компоненти в єдину аналітичну систему. Уточнено поняття динамічного ризику для умов ЗРІ як результату взаємодії багатьох змінних факторів, що змінюються у часі. Розроблено інтегральний цифровий індекс ризику (DHRI), який забезпечує нормування різнорідних показників до інтервалу [0;1] та дозволяє реалізувати градуйовану систему управління. На прикладі виробництва літньої холодної страви продемонстровано можливість виявлення кумулятивних відхилень параметрів, які не фіксуються в межах бінарної логіки традиційного контролю. Запропонований підхід створює передумови для підвищення доказовості управлінських рішень та розвитку превентивної моделі менеджменту безпечності в закладах ресторанної індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. General Principles of Food Hygiene (CXC 1-1969) (Revised 2020). Annex: Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) System and Guidelines for its Application / Codex Alimentarius Commission. Rome : FAO/WHO, 2020.
2. Regulation (EC) No 852/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs.
3. Ellahi R. M., Wood L. C., Bekhit A. E.-D. A. Blockchain-based frameworks for food traceability: A systematic review. *Foods*. 2023. Vol. 12(16). Art. 3026. DOI: 10.3390/foods12163026.
4. Zhang Q., Lu Z., Liu Z., Li J., Chang M., Zuo M. Application of machine learning in food safety risk assessment. *Foods*. 2025. Vol. 14(23). Art. 4005. DOI: 10.3390/foods14234005.
5. ISO 22000:2018 Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
6. Козлова К., Колеснікова М. Розробка елементів системи HACCP для впровадження в ресторані італійської кухні. *Стан і перспективи харчової науки та промисловості : матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф.* 2019. С. 37–38.
7. Chen Y., Wang Y., Zhang Y., Wang X., Zhang C., Cheng N. Intelligent biosensors promise smarter solutions in Food Safety 4.0. *Foods*. 2024. Vol. 13(2). Art. 235. DOI: 10.3390/foods13020235.

8. Protopappas L., Bechtsis D., Tsotsolas N. IoT services for monitoring food supply chains. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(13). Art. 7602. DOI: 10.3390/app15137602.
9. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України від 23.12.1997 № 771/97-ВР.
10. Про затвердження Вимог щодо розробки, впровадження та застосування постійно діючих процедур, заснованих на принципах Системи управління безпечністю харчових продуктів (НАССР): Наказ Мінагрополітики України від 01.10.2012 № 590.
11. Bouzembrak Y., Klüche M., Gavai A., Marvin H. J. P. Internet of Things in food safety: Literature review and a bibliometric analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 94. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.11.005
12. Колеснікова М. Б., Гринченко О. О., Юрченко С. Л., Андрєєва С. С., Черемська Т. В. Системне забезпечення харчової безпечності продукції закладів ресторанного господарства. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 4. С. 64–73.
13. 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. 163. 105144. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105144.
14. Dadhaneeya H., Nema P. K., Arora V. K. Internet of Things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2023. Vol. 139. 104109. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.07.006.
15. Marvin H. J. P., Bouzembrak Y., van der Fels-Klerx H. J., Kempenaar C., Tekinerdogan B. Digitalisation and Artificial Intelligence for sustainable food systems. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 120. P. 344–348. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.01.020.
16. Membré J. M., Boué G. Quantitative microbiological risk assessment in food industry: theory and practical application. *Food Control*. 2018. Vol. 91. P. 321–329. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.04.015.

REFERENCES

1. Codex Alimentarius Commission. (2020). *General principles of food hygiene (CXC 1-1969) (Revised 2020). Annex: Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) system and guidelines for its application*. FAO/WHO.
2. European Parliament and Council of the European Union. (2004, April 29). *Regulation (EC) No 852/2004 on the hygiene of foodstuffs*.
3. Ellahi, R. M., Wood, L. C., & Bekhit, A. E.-D. A. (2023). Blockchain-based frameworks for food traceability: A systematic review. *Foods*, 12(16), Article 3026. DOI: 10.3390/foods12163026.
4. Zhang, Q., Lu, Z., Liu, Z., Li, J., Chang, M., & Zuo, M. (2025). Application of machine learning in food safety risk assessment. *Foods*, 14(23), Article 4005. DOI: 10.3390/foods14234005.
5. International Organization for Standardization. (2018). *Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain* (ISO Standard No. 22000:2018).
6. Kozlova, K., & Kolesnikova, M. (2019). Rozrobka elementiv systemy NASSR dlia vprovadzhenia v restorani italiiskoi kuhni [Development of elements of the HACCP system for implementation in an Italian restaurant]. In *Stan i perspektyvy kharchovoi nauky ta promyslovosti: materialy V Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* (pp. 37–38). [in Ukrainian].
7. Chen, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, X., Zhang, C., & Cheng, N. (2024). Intelligent biosensors promise smarter solutions in Food Safety 4.0. *Foods*, 13(2), Article 235. DOI: 10.3390/foods13020235.
8. Protopappas, L., Bechtsis, D., & Tsotsolas, N. (2025). IoT services for monitoring food supply chains. *Applied Sciences*, 15(13), Article 7602. DOI: 10.3390/app15137602.
9. Law of Ukraine. (1997, December 23). *Pro osnovni pryntsypy ta vymohy do bezpechnosti ta yakosti kharchovykh produktiv* [On the basic principles and requirements for the safety and quality of food products] (No. 771/97-VR). [in Ukrainian].
10. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2012, October 1). *Pro zatverdzhennia Vymoh shchodo rozrobky, vprovadzhenia ta zaostovuvannia postoiyno diuochykh protsedur, zasnovanykh na pryntsypakh Systemy upravlinnia bezpechnistiu kharchovykh produktiv (NASSR)* [On approval of requirements for the development, implementation and application of permanent procedures based on the principles of the Food Safety Management System (HACCP)] (Order No. 590). [in Ukrainian].
11. Bouzembrak, Y., Klüche, M., Gavai, A., & Marvin, H. J. P. (2019). Internet of Things in food safety: Literature review and a bibliometric analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 94, 54–64. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.11.005
12. Kolesnikova, M. B., Hrynchenko, O. O., Yurchenko, S. L., Andreieva, S. S., & Cheremaska, T. V. (2022). Systemne zabezpechennia kharchovoi bezpechnosti produktiv zakladiv restorannoho hospodarstva [Systemic ensuring of food safety of products of restaurant business establishments]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky*, (4), 64–73. [in Ukrainian].
13. Semercioz-Oduncuoglu, A. S., & Luning, P. A. (2025). 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*, 163, 105144. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105144.

14. Dadhaneeya, H., Nema, P. K., & Arora, V. K. (2023). Internet of Things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 104109. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.07.006.
15. Marvin, H. J. P., Bouzembrak, Y., van der Fels-Klerx, H. J., Kempenaar, C., & Tekinerdogan, B. (2022). Digitalisation and Artificial Intelligence for sustainable food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 344–348. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.01.020.
16. Membré, J. M., & Boué, G. (2018). Quantitative microbiological risk assessment in food industry: Theory and practical application. *Food Control*, 91, 321–329. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.04.015.

M. Kolesnikova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; *T. Cheremskaya*, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; *S. Iurchenko*, PhD in Technical Sciences, Associate Professor; *A. Kolesnyk*, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (State Biotechnological University). **Methodology for integrating artificial intelligence and digital monitoring tools into the food safety management system of restaurant industry establishments**

Abstract. The necessity of transforming the traditional HACCP model in restaurant industry establishments under conditions of increasing production process dynamism, product range variability, and the significant influence of the human factor is substantiated. It is shown that the current practice of HACCP implementation, based on documenting compliance with critical limits and maintaining records, does not ensure quantitative assessment of the cumulative impact of short-term and recurring deviations in technological parameters, which limits the analytical sensitivity of the system and its preventive potential.

The aim of the study is to develop methodological principles for integrating artificial intelligence tools and digital monitoring into the HACCP system through the transition from a binary control model to a graded risk assessment model. The methodological framework is based on HACCP principles, ISO 31000 risk-based management approaches, and the concept of risk-based thinking in food safety management systems.

The concept of AI-HACCP is proposed as an adaptive food safety management model based on a multi-contour digital architecture integrating production, material, sanitation, human factor, and regulatory domains. An integrated Digital Hazard Risk Index (DHRI) is developed to normalize, weight, and aggregate heterogeneous indicators into a unified scale, enabling real-time quantitative assessment of system performance and supporting evidence-based management.

It is demonstrated that continuous digital monitoring and analytical data processing allow the identification of hidden trends and cumulative risks not captured by the traditional binary “compliance/non-compliance” logic. The integration of artificial intelligence enables anomaly detection, risk forecasting, and optimization of decision-making. The proposed approach supports the transition from reactive to preventive food safety management in restaurant industry establishments.

Key words: HACCP, artificial intelligence, digital monitoring, restaurant industry establishments, risk management.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026