УДК 543.422.3:537.8:637.344 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.6

Д. О. ВАСИЛЕНКО
аспірант
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0009-0000-2604-1087

М. С. СОРОКІН
кандидат технічних наук, доцент
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0002-7524-7687

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ТОЧНІСТЬ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ БІЛКІВ У СИРНИХ ПРОДУКТАХ

Метою цієї роботи є визначення ефективності та придатності основних електротехнічних методів спектрального аналізу (NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, флуоресцентна і раманівська спектроскопія, діелектрична спектроскопія та гіперспектральне зображення) для автоматизованого контролю якості молочної продукції з урахуванням впливу електромагнітних завад на відтворюваність флуоресцентного сигналу білків у сирних матрицях.

У процесі дослідження проведено комплексний аналіз літературних даних та теоретичних моделей взаємодії зовнішніх електромагнітних полів із флуорофорами білків, класифіковано основні джерела завад у виробничому середовищі згідно з ISO/IEC 17025. Розроблено багатокритеріальну матрицю методики оцінювання за чотирма основними категоріями (точність, швидкодія, надійність, інтеграція) із застосуванням MCDA. Для верифікації запропонованих критеріїв рекомендовано пілотне тестування inline-систем на виробничій лінії, адаптивні режими калібрації моделей та моніторинг KPI із застосуванням процедур k-fold cross-validation і міжлабораторних випробувань.

Теоретичний аналіз показав, що зовнішні електромагнітні завади здатні знижувати інтенсивність флуоресценції на 5–15 % залежно від частоти та потужності поля, що призводить до зростання RMSE і зміщення bias. Класифікація виявила низькочастотні та високочастотні (RF, мікрохвилі, імпульсні інвертори) джерела шумів. Багатокритеріальна матриця для прикладного сценарію показала, що NIR-спектроскопія з високою швидкодією та помірною точністю отримує зважену оцінку 4,4, тоді як флуоресцентна спектроскопія з найвищою чутливістю – 4,0.

Розроблена MCDA-матриця дозволяє обрати оптимальний метод залежно від виробничих пріоритетів: пріоритет швидкодії – NIR, пріоритет точності – флуоресцентна спектроскопія або FTIR/MIR. Практичні рекомендації щодо пілотного тестування, адаптивної калібрувальної стратегії та моніторингу KPI забезпечують підґрунтя для інтеграції спектральних систем в інтелектуальні лінії контролю відповідно до вимог ISO/IEC 17025.

Ключові слова: *спектральний аналіз, гіперспектральне зображення, інфрачервона спектроскопія, MCDA, інтелектуальні системи контролю, діелектрична спектроскопія.*

D. O. VASYLENKO
Postgraduate Student
State Biotechnological University
ORCID: 0009-0000-2604-1087

M. S. SOROKIN
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Biotechnological University
ORCID: 0000-0002-7524-7687

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE ACCURACY OF PROTEIN FLUORESCENCE ANALYSIS IN CHEESE PRODUCTS

The aim of this work is to determine the effectiveness and suitability of the main electrical engineering methods of spectral analysis (NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, fluorescence and Raman spectroscopy, dielectric spectroscopy, and hyperspectral imaging) for automated quality control of dairy products, taking into account the influence of electromagnetic interference on the reproducibility of the fluorescent signal of proteins in cheese matrices.

During the study, a comprehensive analysis of literature data and theoretical models of the interaction of external electromagnetic fields with protein fluorophores was carried out, and the main sources of interference in the production

© Василенко Д. О., Сорокін М. С., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

environment were classified in accordance with ISO/IEC 17025. A multi-criteria matrix for evaluating methods in four main categories (accuracy, speed, reliability, integration) was developed using MCDA. To verify the proposed criteria, it is recommended to conduct pilot testing of inline systems on the production line, adaptive model calibration modes, and KPI monitoring using k-fold cross-validation and interlaboratory testing procedures.

Theoretical analysis showed that external electromagnetic interference can reduce fluorescence intensity by 5–15 % depending on the frequency and power of the field, leading to an increase in RMSE and bias offset. Classification revealed low-frequency and high-frequency (RF, microwaves, pulse inverters) noise sources. A multi-criteria matrix for the application scenario showed that NIR spectroscopy with high speed and moderate accuracy receives a weighted score of 4.4, while fluorescence spectroscopy with the highest sensitivity receives a score of 4.0.

The developed MCDA matrix allows you to choose the optimal method depending on production priorities: priority of speed – NIR, priority of accuracy – fluorescence spectroscopy or FTIR/MIR. Practical recommendations for pilot testing, adaptive calibration strategy, and KPI monitoring provide the basis for integrating spectral systems into intelligent control lines in accordance with ISO/IEC 17025 requirements.

Key words: *spectral analysis, hyperspectral imaging, infrared spectroscopy, MCDA, intelligent control systems, dielectric spectroscopy.*

Постановка проблеми

Спектральні методи, такі як флуоресценція, інфрачервона (ІЧ) та спектральний аналіз методом Рамана, відкривають широкі можливості для селективного та неінвазивного контролю якості молочних продуктів. Вони дозволяють виявляти навіть незначні зміни у складі сировини, не порушуючи її структури. Проте в умовах виробництва, де присутнє змінне промислове електромагнітне поле, флуоресцентні сигнали білків можуть зазнавати суттєвих спотворень. Це знижує відтворюваність результатів, навіть коли використовуються сучасні алгоритми машинного навчання для обробки даних. У цьому контексті однією з основних проблем є відсутність уніфікованих критеріїв для оцінювання впливу електромагнітних завад. Це унеможливлює об'єктивне порівняння різних методик за точністю, швидкодією та надійністю. Окрім того, нестача єдиної структурованої матриці параметрів ускладнює інтеграцію багаторівневих спектральних даних у системи контролю в реальному часі. Як наслідок, виникають розбіжності між високоточними лабораторними дослідженнями та практичними потребами виробництва, де стабільність і передбачуваність результатів є надзвичайно важливими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі широко представлено дослідження, присвячені синтезу функціональних похідних тієно[2,3-d]піримідинів, спектроскопічним і біоімпедансним методам аналізу молока та молочних продуктів, а також використанню хемометричних алгоритмів і методів машинного навчання для підвищення точності контролю їхнього складу та якості. Зокрема, Г. Різак описує синтез, фізико-хімічні та біологічні властивості 2,4-діоксо-й 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів, включно з їхньою ізоляцією, очищенням, фармакологічним аналізом і вдосконаленням методів синтезу [1]. В іншій роботі Г. Різак та співавтори досліджують синтез 2-ацилокси-4-оксо(іміно)-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів і β-(2,4-діоксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d] піримідин-1-іл)пропіонових амідоксидів, а також їхні фізико-хімічні й антимікробні властивості [2]. Сканувальну конфокальну раманівську мікроскопію з мультиваріантним аналізом для візуалізації мікроструктури молока та розподілу його основних компонентів – жиру, білка та лактози – в об'ємних зрізах використовують А. Суркова та колеги (A. Surkova et al.) [3]. Огляд застосування ІЧ-спектроскопії для неінвазивного аналізу автентичності та якості молочних продуктів, зокрема в контексті контролю складу, процесів дозрівання сиру та виявлення контамінантів представляють С. Перейра та співавтори (S. Pereira et al.) [4]. Чотирьохелектродний біоімпедансний сенсор, заснований на методі ван дер Пау, для виявлення доданої води в молоці через аналіз спектра імпедансу в діапазоні 10 Гц – 5 МГц пропонують М. Ашурірад і (M. Ashoorirad) і Р. Багбані (R. Baghbani) [5]. Можливості ІЧ-спектроскопії у виявленні та кількісному визначенні домішок у молоці – від розведення водою до залишків ветеринарних препаратів – аналізують С. Ченіті та колеги (C. Ceniti et al.), акцентуючи на можливостях швидкого скринінгу [6]. Програмне забезпечення MCDA-MSS, що дозволяє таксономічно підбирати оптимальні методи багатокритеріального аналізу з-понад 200 доступних залежно від параметрів конкретного завдання розробили М. Чінеллі та співавтори (M. Cinelli et al.) [7]. Дані щодо застосування NIR- та MIR-спектроскопії для визначення хімічного складу та автентичності молочних продуктів узагальнюють М. Де Маркі та колеги (M. De Marchi et al.). Науковці надають практичні рекомендації для їх упровадження в промисловість [8]. На відновлення наукового інтересу до УФ–ВІС-спектроскопії завдяки сучасним підходам хемометрії вказують Р. Ріос-Рейна та співавтори (R. Ríos-Reina et al.), аналізуючи підходи до препроцесингу, відбору змінних і багатовимірного калібрування [9]. Новий підхід до фокусування ліпосом за допомогою акустичних воронок із топологічними зарядами для цільового вивільнення ліків шляхом локального нагрівання, що відкриває перспективи в таргетній терапії, пропонують Л. Ду та колектив однодумців (L. Du et al.) [10]. Спектри синхронної фронтальної флуоресценції молока систематизують П. Фрейре та співавтори (P. Freire et al.), пов'язуючи спектральні області з характерними флуорофорами й узагальнюючи дані для потреб онлайн-моніторингу якості [11]. In-line NIR-спектроскопію разом з алгоритмами

машинного навчання для прогнозування концентрацій метаболітів у крові корів застосовують Д. Джаннудзі та колеги (D. Giannuzzi et al.) [12]. Ефективність MIR-спектроскопії на прикладі 1736 проб буйволячого молока для прогнозування параметрів коагуляції, тверднення та механічної міцності оцінили А. Герра та співавтори (A. Guerra et al.), проте отримана модель (R^2 = 0,57) виявилася недостатньо ефективною для практичного застосування [13]. Метод AHP для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв соціальної оцінки життєвого циклу мобільних сервісів, спираючись на дані опитування 48 експертів, використовують Й. Геттеріх та колектив однодумців (J. Hetterich et al.). Результати засвідчили загальну узгодженість при наявності деяких групових розбіжностей [14]. Гіперспектральну зйомку з безпілотників з алгоритмами RF, MLR, DNN та SVM для оцінювання надземної біомаси молочної вики поєднують Х. Ху та колеги (H. Hu et al.), при цьому модель RF продемонструвала високу точність (R^2 = 0,95, RRMSE = 14,86 %) [15].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є всебічне оцінювання електротехнічних методів спектрального аналізу для автоматизованого контролю якості молочної продукції та розробка системи критеріїв для об'єктивного порівняння їхньої точності, швидкодії, надійності й інтеграційної здатності в інтелектуальні системи.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати сучасні електротехнічні методи спектрального аналізу, що застосовуються для автоматизованого контролю якості молочної продукції;
2) визначити підходи до оцінювання ефективності та придатності зазначених методів;
3) розробити матрицю критеріїв точності, швидкодії, надійності та інтеграції методів в інтелектуальні системи контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Спектральні методи стали невіддільною частиною онлайн-контролю якості молочної продукції завдяки неінвазивності та швидкості. Зокрема, NIR і MIR-спектроскопії дають швидку кількісну оцінку білків, жирів і вологи без пробопідготовки [4, с. 1; 8, с. 2]; UV–Vis та синхронна фронт-фейс флуоресценція виявляють характерні флюорофори [9, с. 1]; раманівська гіперспектральна візуалізація картографує мікроструктуру молока й сиру [3, с. 1]; електрична імпеданс-спектроскопія оцінює діелектричні властивості й фіксує зміни в спектрі [4, с. 2; 8, с. 10590].

Ближня інфрачервона спектроскопія (780–2500 нм) аналізує поглинання води, білків, жирів і вуглеводів, даючи кількісні результати за кілька секунд і легко інтегрується у виробничі лінії для безперервного моніторингу [4, с. 1; 8, с. 2]. FTIR/MIR (2500–25 000 нм) фіксує коливальні переходи через Фур'є-перетворення, даючи «відбиток» амідних і карбонільних груп; висока селективність дозволяє точно виявляти домішки в молоці й сирі [6, с. 6; 8, с. 4]. UV–Vis (200–800 нм) аналізує поглинання білкових хромофорів та природних пігментів; проста оптична схема й невисока вартість роблять його популярним сенсором для попереднього оцінювання складу молока [9, с. 2]. Флуоресцентна спектроскопія (UV-збудження) реєструє front-face чи синхронні спектри білків, виявляючи казеїн і фальсифікації з чутливістю до ppm [11, с. 3]. Раманівська спектроскопія фіксує зсув частоти при розсіянні світла, картографуючи мікроструктуру без контакту зі зразком [3, с. 4]. Діелектрична спектроскопія (Гц–МГц) вимірює активну й реактивну складову імпедансу, що відображає зміни в структурі води, білків і жиру; швидко виявляє фальсифікації та контролює дозрівання сиру [5, с. 2]. Гіперспектральне зображення поєднує спектроскопію з візуальною зйомкою, отримуючи для кожного пікселя повний спектр у сотнях смуг для виявлення неоднорідностей і контамінацій.

Попри надзвичайну чутливість флуоресцентної спектроскопії, в умовах виробництва зовнішні електромагнітні поля можуть знижувати точність і повторюваність вимірювань. Це обґрунтовує необхідність детального аналізу механізмів взаємодії електромагнітного поля з флуоресцентними характеристиками білків.

Механізм флуоресценції полягає в тому, що молекула-флуорофор поглинає високоенергійний фотон, переходить у збуджений стан і випромінює фотон меншої енергії (стоксовий зсув). Інтенсивність і спектр сигналу, відповідно до діаграми Яблонського, змінюються під впливом температури, pH, полярності розчинника та ефекту квенчінгу [11, с. 3].

Проте, у присутності електромагнітних полів спостерігається взаємодія з дипольними моментами флуорофорів, що призводить до депопуляції збудженого стану, зниження інтенсивності, скорочення часу життя та зсуву максимуму емісії – особливо це виражено в складних матрицях, зокрема сирі.

Джерела електромагнітних завад на виробництві можна класифікувати на:

1) низькочастотні (50/60 Гц) – трансформатори, лінії електропередач;
2) високочастотні (RF/мікрохвилі) – бездротові системи, RF-підігрів, радари;
3) імпульсні – інверторні приводи, зварювальні апарати, індукційні нагрівачі;
4) статичні – постійні магніти відокремлювачів [16].

Основною проблемою більшості попередніх досліджень є відсутність контрольованих експериментів, у яких варіюються частоти й інтенсивності полів, а також бракує комплексного фронт-фейс моніторингу з поперемінним екрануванням і заземленням сенсорів для визначення порогових рівнів і виробничих рекомендацій.

Спираючись на теоретичні засади впливу електромагнітних полів на флуоресценцію білків [11, с. 3] і класифікацію джерел завад [16], було здійснено систематичну оцінку точності, робастності та інтегрованості спектральних методів. Точність оцінюється за показниками RMSE, R^2 і bias. Саме bias виявляється критичним за наявності шумів, адже навіть незначне спотворення інтенсивності спричиняє систематичні похибки та зниження R^2, що суперечить вимогам ISO/IEC 17025. У inline-NIR аналізі молока моделі машинного навчання знижують RMSE на 3–6 % і забезпечують кореляційний коефіцієнт r приблизно 0.55–0.66, що відповідає значенням R^2 у межах 0.30–0.44 навіть за наявності шумів. Методи front-face флуоресценції для кейсин-моделей забезпечують RMSEP на рівні 0.12–0.13 % та RPD 3.2–3.4 навіть у змінному електромагнітному середовищі. Швидкодія inline-NIR систем становить 2–5 с на зразок, проте в умовах високого рівня шумів застосовують усереднення кількох послідовних сканів для стабілізації сигналу. UV–Vis спектрофотометрія теоретично дає спектри за менш ніж 1 с, але через вимоги до звуження смуги й підвищеної чутливості час аналізу збільшився до 5–10 с. Inline-аналізатори AfiLab зчитують спектри молока двічі на добу для кожної корови, що забезпечує близько 770 зразків на добу на лінію доїння, і для підтримки такої продуктивності використовують адаптивне усереднення шумів та періодичне автоматичне калібрування. Надійність спектральних методів оцінюють за коефіцієнтом варіації (CV) та дрейфом сигналу протягом тривалих серій вимірювань. Для кількісних визначень білків CV не повинен перевищувати 2–3 %, а дрейф за годину роботи має бути меншим за 1 % від початкової інтенсивності.

Калібрування моделей спектрального аналізу передбачає побудову регресій PLS, MPLS, kernel-PLS та penalized regression із періодичною переоцінкою на нових зразках. Використання стратегій K-fold крос-валідації (5–10 фолд) і leave-one-batch-out дозволяє оцінити узагальнювальну здатність без упередження, а міжлабораторна валідація за ISO/IEC 17025 сприяє відтворюваності й зменшенню дисперсії між джерелами даних. Уніфікована матриця критеріїв передбачає комбінування кількісних і якісних показників із призначенням ваг за допомогою MCDA для ранжування спектральних методів відповідно до виробничих завдань, і цей підхід підтверджується оглядом інфрачервоної спектроскопії для контролю якості молочних продуктів. Основні категорії MCDA-MSS охоплюють точність із показниками RMSE, R^2 і bias, швидкодію за часом аналізу зразка й кількістю оброблених зразків, надійність за CV і drift, а також інтеграцію за сумісністю зі стандартними інтерфейсами обміну даними та затримкою передавання. Виробничі та регуляторні вимоги зосереджуються на компетенції персоналу, ресурсному забезпеченні, валідації методів і трасованості результатів відповідно до стандарту ISO/IEC 17025. Підкритерії для матриці містять порогові значення RMSE ≤ 1 % і $R^2 \geq 0.9$ для IR-методів, аналіз часу проби з урахуванням IEM-перешкод, а також контроль CV ≤ 3 % за 100 послідовних сканів та drift ≤ 1 % при зміні поля. Вагові коефіцієнти, визначені за допомогою AHP, дозволяють відобразити пріоритети виробництва, зокрема, у стандартному сценарії швидкодія може отримувати вагу 0.4, точність 0.3, надійність 0.2 та інтеграція 0.1, тоді як для преміальних продуктів точність підвищується до 0.5, а швидкодія знижується до 0.2 з відповідною корекцією інших показників.

Для побудови багатокритеріальної матриці (MCDA) кожний із розглянутих спектральних методів відображається в окремому рядку, а критерії точності, швидкодії, надійності та інтеграції з їх вагами – у стовпцях. У клітинки заносяться бали методів за кожним критерієм за обраною шкалою (наприклад, 1–5), а зважена сума (Weighted Score) обчислюється як $\sum$(бал × вага). Наведені оцінки в таблиці 1 є ілюстративними; реальні значення визначаються експериментально згідно з процедурою валідації й кодування MCDA. Такий підхід дозволяє прозоро порівняти й ранжувати методики відповідно до виробничих пріоритетів [7, с. 7].

Таблиця 1

Коефіцієнти для побудови багатокритеріальної матриці

Метод	Точність (0.3)	Швидкодія (0.4)	Надійність (0.2)	Інтеграція (0.1)	Зважена оцінка
NIR	4	5	4	4	4.4
FTIR/MIR	5	3	5	3	4.2
UV–Vis	3	4	3	5	3.8
Флуоресценція	5	3	4	3	4.0
Раманівська	4	2	5	2	3.5
Імпедансна	3	4	4	4	3.8
Гіперспектральне	5	2	4	3	3.9

Джерело: побудовано автором на основі [17–24]

Аналіз чутливості є важливим етапом у процесі обґрунтування вибору оптимальної спектральної методики, оскільки дозволяє оцінити, як зміна вагових коефіцієнтів впливає на підсумковий рейтинг технологій. Зокрема, шляхом поступової варіації ваг (наприклад, збільшення ваги критерію точності з 0,3 до 0,5) можна простежити, як трансформується загальна зважена оцінка кожного методу. Такий підхід допомагає визначити стабільність обраного рішення за змінних виробничих умов і критичність окремих характеристик, зокрема точності, відносно швидкодії чи здатності до інтеграції [14, с. 31–32].

Після аналітичного обґрунтування вибору технології доцільно переходити до пілотного тестування обраного методу (наприклад, inline-NIR) безпосередньо на виробничій лінії з переробки молока. На цьому етапі використовують обмежену партію зразків, відібраних із різних стадій технологічного процесу. Оптимально, щоб тестування тривало щонайменше один виробничий цикл (кілька діб), аби охопити варіативність умов, таких як температура, склад сировини або рівень фонових шумів, а також перевірити стабільність функціонування системи збору даних у режимі реального часу. Як стверджують науковці, одного тижня in-line тестування достатньо для налаштування моделей калібрування і виявлення джерел систематичних відхилень. При цьому дотримання вимог ISO/IEC 17025 гарантує достовірність отриманих результатів і створює підґрунтя для подальшої масштабованої валідації [16].

Під час розгортання системи важливу роль відіграють оптимальні режими калібрування, які мають охоплювати початкову побудову моделей на репрезентативній вибірці зразків із різним вмістом білків, жирів і вологи, а також регулярне оновлення моделей із залученням нових контрольних зразків. Згідно з рекомендаціями вчених, ефективними є адаптивні стратегії обробки гіперспектральних даних, зокрема PCA-фільтрація та PLS-регресія з регуляризацією, з перенавчанням моделей щоквартально або за зміни технологічного режиму [18, с. 1]. Водночас дослідники підкреслюють значущість таких факторів, як системна валідація методик, трасованість калібрувальних зразків і якісна документація процедур, що забезпечує відповідність вимогам стандартів і знижує ризик дрейфу моделей у часі [19, с. 17].

Після впровадження системи доцільно встановити набір основних показників ефективності (KPI) для регулярного моніторингу її роботи. До таких показників належать середньоквадратична похибка (RMSE), частота повторних калібрувань, кількість простоїв через перевищення рівня шумів та відсоток невдалих вимірювань. За даними досліджень, дворазове щоденне зчитування спектрів молока дозволяє зафіксувати кілька сотень результатів щодня, на підставі яких можна будувати статистику KPI та відстежувати тренди зміни алгоритмічних похибок [12, с. 9–10]. При перевищенні заданих порогів KPI мають автоматично запускатися адаптивні процедури корекції – повторне калібрування або сповіщення технолога для ручної верифікації [19, с. 17].

Аналіз підтвердив, що електромагнітні завади можуть суттєво знижувати інтенсивність і стабільність флуоресцентного сигналу білків, що призводить до росту RMSE і bias, а також до збільшення часу повторних вимірювань. Водночас комбіноване застосування NIR, FTIR, UV-Vis, флуоресценції та спектроскопічний аналіз розсіяння Рамана з урахуванням адекватного екранування та алгоритмічного фільтрування шумів демонструє можливість досягнення високих значень R^2 (>0,9) та прийнятних throughput навіть в умовах змінюваного електромагнітного фону.

У цьому контексті наявні inline-системи спектрального аналізу вже забезпечують достатню швидкодію (кілька секунд на зразок) та інтеграцію з лініями доїння чи фасування, хоча й потребують жорсткого контролю калібрування й періодичного оновлення моделей. Запропоновані процедури пілотного тестування, адаптивної калібрувальної стратегії та моніторингу KPI дозволяють мінімізувати ризики невідповідностей і забезпечити відповідність стандартам ISO/IEC 17025, що робить такі технології готовими до широкого застосування.

З огляду на це, необхідно провести систематичні досліди з варіацією частоти й інтенсивності зовнішніх полів на флуоресцентний відгук у сирних матрицях, визначити порогові рівні впливу та відпрацювати алгоритмічні стратегії компенсації шумів. Крім того, доцільно розширити MCDA-матрицю, включивши економічні та енергетичні показники, і випробувати результати на різних типах сирів та в різних виробничих умовах для побудови універсальних рекомендацій.

Висновки

Проведений аналіз сучасних електротехнічних методів спектрального аналізу – NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, флуоресцентна та раманівська спектроскопії, імпедансна спектроскопія й гіперспектральне зображення – підтвердив їхню високу потенційну придатність для автоматизованого контролю якості молочних продуктів, проте вказав на необхідність розроблення уніфікованої системи критеріїв оцінювання точності, швидкодії, надійності й інтеграції.

Теоретичні дослідження та класифікація джерел електромагнітних завад засвідчили, що змінні поля можуть істотно впливати на інтенсивність і стабільність флуоресцентного сигналу білків, що актуалізує потребу у визначенні порогових рівнів впливу та впровадженні алгоритмічних стратегій компенсації шумів з метою забезпечення відтворюваності результатів.

Запропонована багатокритеріальна матриця (MCDA) із вагами для кожного критерію дозволяє прозоро порівняти спектральні методики та обирати оптимальний інструмент залежно від виробничих пріоритетів – від високої продуктивності до преміальної якості продукції.

Практичні рекомендації з пілотного тестування, калібрування, моніторингу KPI та адаптивного оновлення моделей створюють фундамент для успішної інтеграції спектральних систем в інтелектуальні лінії контролю відповідно до стандарту ISO/IEC 17025.

Подальші дослідження мають зосередитися на систематичних експериментах із варіюванням параметрів електромагнітного впливу в сирних матрицях, розширенні MCDA-матриці економічними показниками та застосуванні розроблених підходів на різних типах сирів і виробничих майданчиках для формування універсальних практичних рекомендацій.

Список використаної літератури

1. Різак Г. В. Синтез, фізико-хімічні та біологічні властивості 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів: монографія. Київ, 2016. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52778 (дата звернення: 06.06.2025).

2. Різак Г. В., Шемчук Л. А., Левашов Д. В., Євсюкова В. Ю., Криськів О. С. Синтез 2-ацилокси-4-оксо(іміно)-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів та амідоксидів β-(2,4-діоксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d] піримідин-1-іл) пропіонових кислот та їх антимікробна активність. *Вісник фармації*. 2011. Т. 68. № 4. С. 39–41. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52761 (дата звернення: 06.06.2025).

3. Surkova A., Bogomolov A. Analysis of milk microstructure using Raman hyperspectral imaging. *Molecules*. 2023. Vol. 28. № 6. Article 2770. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28062770

4. Pereira C. G., Luiz L. C., Bell M. J. V., Anjos V. Near and mid infrared spectroscopy to assess milk products quality: A review of recent applications. *Dairy Research and Technology*. 2020. Vol. 10. Article 14. DOI: https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014

5. Ashoorirad M., Baghbani R., Ghalamboran M. R. Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*. 2021. Vol. 15. № 1. С. 611–618. DOI: https://doi.org/10.1049/nbt2.12056

6. Ceniti C., Spina A. A., Piras C., Oppedisano F., Tilocca B., Roncada P., Britti D., Morittu V. M. Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid-infrared spectroscopy. *Foods*. 2023. Vol. 12. № 15. Article 2917. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12152917

7. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Słowiński R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. arXiv. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.07378

8. De Marchi M., Penasa M., Zidi A., Manuelian C. L. Invited review: Use of infrared technologies for the assessment of dairy products – Applications and perspectives. *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101. № 12. С. 10589–10604. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2018-15202

9. Ríos-Reina R., Azcarate S. M. How Chemometrics Revives the UV–Vis Spectroscopy Applications as an Analytical Sensor for Spectralprint (nontargeted) Analysis. *Chemosensors*. 2023. Vol. 11. № 1. Article 8. DOI: https://doi.org/10.3390/chemosensors11010008

10. Du L., Hu G., Hu Y., Wang Q. Acoustic Forceps Based on Focused Acoustic Vortices with Different Topological Charges. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 15. Article 6874. DOI: https://doi.org/10.3390/s23156874

11. Freire P., Zamora A., Castillo M. Synchronous front-face fluorescence spectra: A review of milk fluorophores. *Foods*. 2024. Vol. 13. № 5. Article 812. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13050812

12. In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle / Giannuzzi D. et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 8058. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-11799-0

13. Guerra A., Boselli C., Galli T., Ciofi L., Fichi G., De Marchi M., Manuelian C. L. Low effectiveness of mid-infrared spectroscopy prediction models of Mediterranean Italian buffalo bulk milk coagulation traits. *Foods*. 2024. Vol. 13. № 13. Article 1957. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13131957

14. Hetterich J. Using analytical hierarchy process (AHP) to introduce weights to social life cycle assessment of mobility services. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. № 3. Article 1258. DOI: https://doi.org/10.3390/su13031258

15. Hu H., Zhou H., Cao K., Lou W., Zhang G., Gu Q., Wang J. Biomass estimation of milk vetch using UAV hyperspectral imagery and machine learning. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. № 12. Article 2183. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16122183

16. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. *ISO: website*. 2017. URL: https://www.iso.org/standard/66912.html (date of access: 06.01.2025).

17. Khristoforova Y., Bratchenko L., Bratchenko I. Combination of Raman spectroscopy and chemometrics: A review of recent studies published in the Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Journal. *arXiv*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10051

18. Medina-García M., Amigo J. M., Martínez-Domingo M. A., Valero E. M., Jiménez-Carvelo A. M. Strategies for analysing hyperspectral imaging data for food quality and safety issues – A critical review of the last 5 years. *Microchemical Journal*. 2025. Vol. 214. Article 113994. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113994

19. Panagiotidou E., Chountalas P. T., Magoutas A. I., Kotsopoulos T. A. Systematic identification and validation of critical success factors for ISO/IEC 17025 implementation. *Administrative Sciences*. 2025. Vol. 15. № 2. Article 60. DOI: https://doi.org/10.3390/admsci15020060

20. Scandurra G., Cardillo E., Ciofi C., Ferro L. UHT milk characterization by electrical impedance spectroscopy. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 15. Article 7559. DOI: https://doi.org/10.3390/app12157559

21. Ma Y. B., Amamcharla J. K. A rapid method to quantify casein in fluid milk by front-face fluorescence spectroscopy combined with chemometrics. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104. № 1. С. 243–252. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799

22. Zhang H., Wisuthiphaet N., Cui H., Nitin N., Liu X., Zhao Q. Spectroscopy approaches for food safety applications: Improving data efficiency using active learning and semi-supervised learning. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03765

23. Zhang Z.-Y., Su J.-S., Xiong H.-M. Technology for the quantitative identification of dairy products based on Raman spectroscopy, chemometrics, and machine learning. *Molecules*. 2025. Vol. 30. № 2. Article 239. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules30020239

References

1. Rizak H. V. (2016) Syntez, fizyko-khimichni ta biolohichni vlastyvosti 2,4-diokso- ta 4-imino-2-okso-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d]pirymidyniv: monohrafiia [Synthesis, physicochemical and biological properties of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidines: monograph]. Kyiv. Retrieved from https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52778 [in Ukrainian].

2. Rizak H. V., Shemchuk L. A., Levashov D. V., Yevsiukova V. Yu., Kryskiv O. S. (2016) Syntez 2-atsyloksy-4-okso(imino)-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d]pirymidyniv ta amidoksydiv β-(2,4-diokso-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d]pirymidyn-1-il) propionovykh kyslot ta yikh antymikrobna aktyvnist [Synthesis of 2-acyloxy-4-oxo(imino)-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidines and amidoxides of β-(2,4-dioxo-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidin-1-yl)propionic acids and their antimicrobial activity]. *Visnyk farmatsii*, vol. 68, no. 4, pp. 39–41. Retrieved from https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52761

3. Surkova A., & Bogomolov A. (2023) Analysis of milk microstructure using Raman hyperspectral imaging. *Molecules*, vol. 28, no. 6, 2770. https://doi.org/10.3390/molecules28062770

4. Pereira C. G., Luiz L. C., Bell M. J. V., & Anjos V. (2020) Near and mid infrared spectroscopy to assess milk products quality: A review of recent applications. *Dairy Research and Technology*, no. 10, 14. https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014

5. Ashoorirad M., Baghbani R., & Ghalamboran M. R. (2021) Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*, vol. 15, no. 1, pp. 611–618. https://doi.org/10.1049/nbt2.12056

6. Ceniti C., Spina A. A., Piras C., Oppedisano F., Tilocca B., Roncada P., Britti D., & Morittu V. M. (2023) Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid-infrared spectroscopy. *Foods*, vol. 12, no. 15, 2917. https://doi.org/10.3390/foods12152917

7. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Słowiński R. (2021). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.07378

8. De Marchi M., Penasa M., Zidi A., & Manuelian C. L. (2018) Invited review: Use of infrared technologies for the assessment of dairy products – Applications and perspectives. *Journal of Dairy Science*, vol. 101, no. 12, pp. 10589–10604. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15202

9. Ríos-Reina R., & Azcarate S. M. (2023) How chemometrics revives the UV–Vis spectroscopy applications as an analytical sensor for spectralprint (nontargeted) analysis. *Chemosensors*, vol. 11, no. 1, 8. https://doi.org/10.3390/chemosensors11010008

10. Du L., Hu G., Hu Y., & Wang Q. (2023) Acoustic forceps based on focused acoustic vortices with different topological charges. *Sensors*, vol. 23, no. 15, 6874. https://doi.org/10.3390/s23156874

11. Freire P., Zamora A., & Castillo M. (2024) Synchronous front-face fluorescence spectra: A review of milk fluorophores. *Foods*, vol. 13, no. 5, 812. https://doi.org/10.3390/foods13050812

12. Giannuzzi D., Mota L. F. M., Pegolo S., Gallo L., Schiavon S., Tagliapietra F., …& Cecchinato A. (2022) In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle. *Scientific Reports*, no. 12, 8058. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11799-0

13. Guerra A., Boselli C., Galli T., Ciofi L., Fichi G., De Marchi M., & Manuelian C. L. (2024) Low effectiveness of mid-infrared spectroscopy prediction models of Mediterranean Italian buffalo bulk milk coagulation traits. *Foods*, vol. 13, no. 13, 1957.https://doi.org/10.3390/foods13131957

14. Hetterich J. (2021) Using analytical hierarchy process (AHP) to introduce weights to social life cycle assessment of mobility services. *Sustainability*, vol. 13, no. 3, 1258. https://doi.org/10.3390/su13031258

15. Hu H., Zhou H., Cao K., Lou W., Zhang G., Gu Q., & Wang J. (2024) Biomass estimation of milk vetch using UAV hyperspectral imagery and machine learning. *Remote Sensing*, vol. 16, no. 12, 2183. https://doi.org/10.3390/rs16122183

16. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (2017) *ISO: website*. Retrieved from https://www.iso.org/standard/66912.html

17. Khristoforova Y., Bratchenko L., & Bratchenko I. (2022) Combination of Raman spectroscopy and chemometrics: A review of recent studies published in the Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy journal. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10051

18. Medina-García M., Amigo J. M., Martínez-Domingo M. A., Valero E. M., & Jiménez-Carvelo, A. M. (2025) Strategies for analysing hyperspectral imaging data for food quality and safety issues: A critical review of the last 5 years. *Microchemical Journal*, no. 214, 113994. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113994

19. Panagiotidou E., Chountalas P. T., Magoutas A. I., & Kotsopoulos T. A. (2025) Systematic identification and validation of critical success factors for ISO/IEC 17025 implementation. *Administrative Sciences*, vol. 15, no. 2, 60. https://doi.org/10.3390/admsci15020060

20. Scandurra G., Cardillo E., Ciofi C., & Ferro L. (2022) UHT milk characterization by electrical impedance spectroscopy. *Applied Sciences*, vol. 12, no. 15, 7559. https://doi.org/10.3390/app12157559

21. Ma Y. B., & Amamcharla J. K. (2021). A rapid method to quantify casein in fluid milk by front-face fluorescence spectroscopy combined with chemometrics. *Journal of Dairy Science*, vol. 104, no. 1, pp. 243–252. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799

22. Zhang H., Wisuthiphaet N., Cui H., Nitin N., Liu X., & Zha Q. (2021) Spectroscopy approaches for food safety applications: Improving data efficiency using active learning and semi-supervised learning. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03765

23. Zhang Z.-Y., Su J.-S., & Xiong H.-M. (2025) Technology for the quantitative identification of dairy products based on Raman spectroscopy, chemometrics, and machine learning. *Molecules*, vol. 30, no. 2, 239. https://doi.org/10.3390/molecules30020239

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025