

УДК 681.5.017 + 664.723

**М. С. Юхимчук, д-р техн. наук, проф.; В. О. Лесько, канд. техн. наук, доц.;
В. М. Дубовой, д-р техн. наук, проф.; Ю. Ю. Іванов, канд. техн. наук, доц.**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР НА ОСНОВІ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ

Дослідження присвячено розробці сучасної системи автоматичного керування процесом сушіння зерна, яка є складним багатопараметричним об'єктом із наявністю нелінійності та запізень. Традиційні системи, які базуються на ПД-регуляторах, часто не забезпечують необхідної точності та адаптивності до змінних властивостей сировини та зовнішніх умов, що призводить до надмірних енерговитрат і втрат якості продукту.

Інноваційність запропонованого підходу полягає в розробці гібридної системи моніторингу та керування, технічну основу якої становить комбінована сенсорна мережа.

Для підвищення точності та ефективності управління запропоновано впровадити на початку технологічного тракту комбінацію діелектричних сенсорів вологості та періодично калібрувальних NIR-сенсорів. Це створює синергетичний ефект, коли діелектричні датчики забезпечують оперативність, а NIR-сенсори – довгострокову метрологічну вірність. Отримані дані через стійкі до перешкод промислові інтерфейси (RS-485, I2C, SPI) надходять до IoT-контролера або PLC. На цьому рівні здійснюється первинна фільтрація сигналу, формування керуючих впливів на виконавчі механізми, а також передача відфільтрованих даних до хмарних SCADA-систем для моніторингу та аналізу.

Результати комп'ютерного імітаційного моделювання у розробленому додатку на мові програмування Python підтвердили ефективність цифрової фільтрації для усунення шумів і стабілізації сигналу, що забезпечує формування достовірного інформаційного потоку. Стійкість алгоритмів до високого рівня промислових завад була перевірена в імітаційному середовищі.

Таким чином, запропонована IoT-архітектура розв'язує дві ключові задачі: забезпечує надійний, завадостійкий вимірювально-керуючий тракт і формує технологічний фундамент для розгортання штучного інтелекту в управлінні агротехнологічними процесами. Впровадження цієї системи дозволить підтримувати оптимальні режими сушіння, мінімізуючи енерговитрати та втрати зерна, що є ключовим для розвитку точного землеробства та "розумних" аграрних технологій, сприяючи підвищенню загальної ефективності роботи.

Ключові слова: система автоматичного керування, IoT-контролер, процес сушіння, промислові інтерфейси, алгоритми штучного інтелекту.

Вступ

Післязбиральна обробка зернових культур є одним із найважливіших етапів технологічного процесу у виробництві сільськогосподарської продукції. Від ефективності цього етапу значною мірою залежать якість зерна, збереження його харчових та посівних властивостей, а також економічна ефективність діяльності аграрних підприємств. Серед операцій післязбиральної обробки особливе місце займає процес сушіння зерна, який забезпечує доведення його вологості до рівня, що гарантує тривале та безпечне зберігання. Невірно обраний режим сушіння може призвести до втрат маси, зниження схожості, руйнування крохмальних структур і навіть повного псування зернової маси [1, 2]. На рис. 1 представлено схему вимірювального тракту вологості зерна.

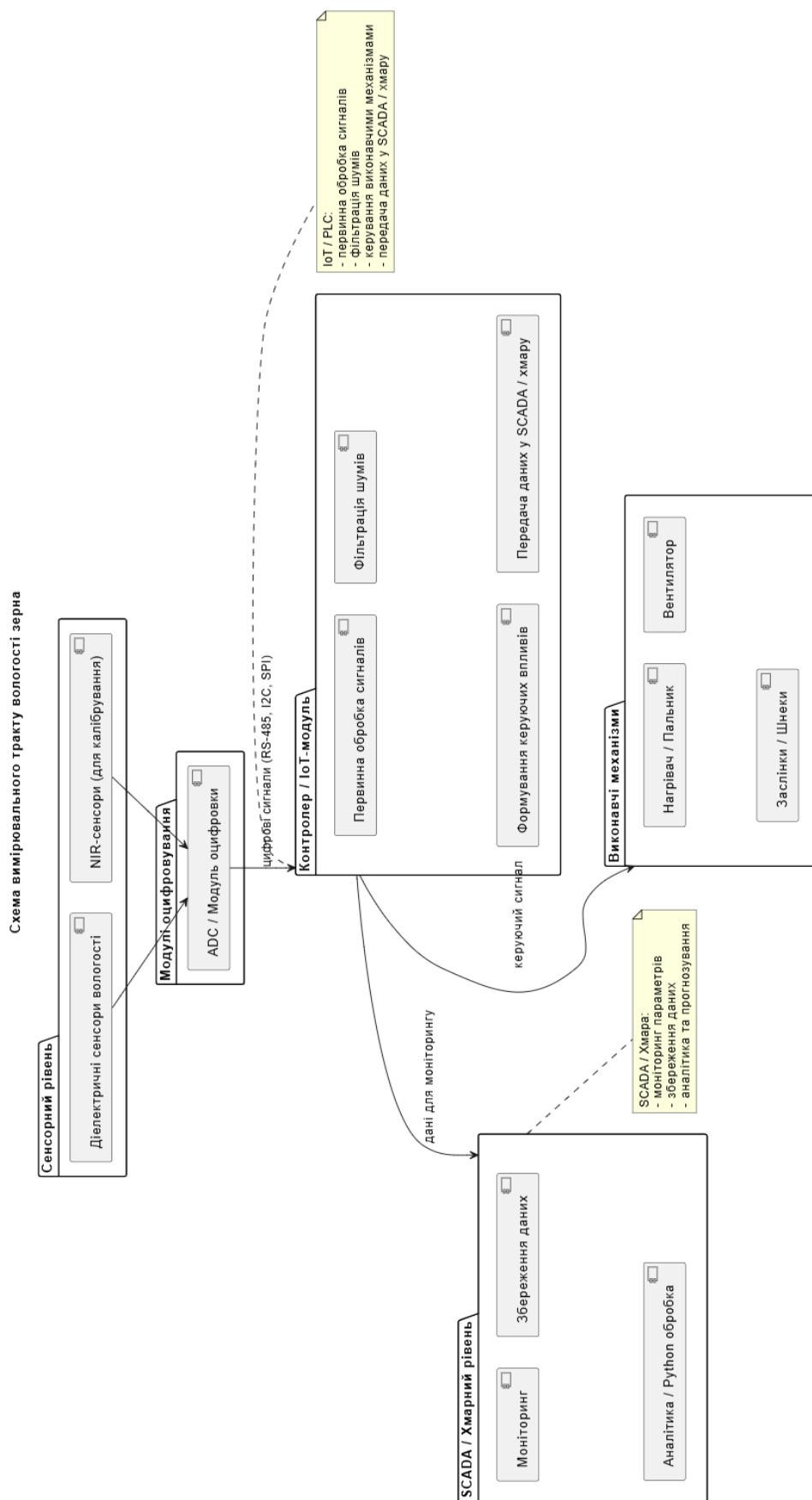


Рис. 1. Система вимірювального тракту вологості зерна

Процес сушіння є складним об'єктом керування, який характеризується багатопараметричністю, нелінійністю та наявністю часових запізнь. Внаслідок цього підтримання оптимальних режимів сушіння вимагає застосування сучасних методів автоматичного управління, здатних забезпечити стабільність технологічних параметрів за мінімальних енергетичних витрат. Традиційні системи керування, що базуються на використанні простих ПД-регуляторів [3], не завжди дозволяють досягнути необхідних показників точності та адаптивності, особливо за змінних умов навколишнього середовища та нерівномірності властивостей зернової маси.

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується активним впровадженням цифрових технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), систем дистанційного моніторингу, інтелектуальних сенсорів і алгоритмів штучного інтелекту [4 – 6]. Ці технології відкривають нові можливості для побудови «розумних» систем автоматичного управління, здатних самостійно аналізувати стан технологічного процесу, прогнозувати його зміну та адаптувати режими роботи обладнання до поточних умов. Використання IoT-платформ у системах сушіння зерна дозволяє здійснювати безперервний збір, обробку та передавання технологічних даних у хмарні середовища для подальшого аналізу й оптимізації режимів сушіння.

Використання IoT-сенсорів, хмарних технологій та інтелектуальних алгоритмів обробки сигналів дозволяє створити "розумні" системи керування сушінням. Це підвищує енергоефективність, точність регулювання та загальну продуктивність аграрних підприємств.

Мета роботи: дослідження процесу сушіння зернових культур як об'єкта автоматичного керування та розробка інтелектуальної IoT-системи, яка забезпечує підтримання оптимальних параметрів сушіння, підвищує точність контролю вологості та зменшує енергетичні витрати.

Для реалізації автоматизованого контролю вологості зерна необхідно побудувати вимірювальний тракт, що забезпечує безперервне отримання даних, їх обробку та передавання на рівень керування. Основними елементами тракту є сенсори вологості, модулі оцифровування сигналу, контролери, канали передачі даних та хмарні або локальні SCADA/IoT-системи [7, 8].

На вході тракту встановлюються діелектричні сенсори для безперервного вимірювання вологості потоку зерна та NIR-сенсори для періодичного калібрування. Сигнали від сенсорів надходять на модулі оцифровування (ADC), які переводять аналогові значення у цифровий формат для подальшої обробки. Для інтеграції у систему керування використовуються промислові інтерфейси: RS-485, I2C або SPI, що забезпечують надійну передачу даних у реальному часі. Для забезпечення максимальної надійності передачі даних у промислових умовах з високим рівнем перешкод, у каналах зв'язку може застосовуватися потужний завадостійкий турбо-код [9, 10].

Цифрові сигнали надходять до IoT-контролера або PLC, який виконує наступні функції:

- первинна обробка сигналу та фільтрація шумів;
- формування керуючих впливів на виконавчі механізми сушарки;
- передача оброблених даних у SCADA/хмарну систему для моніторингу, збереження та подальшого аналізу.

Ця схема дозволяє візуалізувати логіку тракту, показати взаємозв'язки між сенсорами, контролером та виконавчими механізмами, і пізніше її можна конвертувати у графічну діаграму.

Для Python-моделювання вимірювального тракту створюється віртуальний сенсорний блок, який генерує зміну вологості зерна у часі. Це дозволяє протестувати алгоритми обробки сигналу та керування без фізичної реалізації обладнання. Наприклад, для симуляції діелектричного сенсора використовується генератор сигналу з шумом, який імітує коливання

вологості. Результати симуляції роботи діелектричного сенсора представлено на рис. 2.

Цей підхід дозволяє не лише перевірити алгоритми обробки сигналу, а й підготувати дані для фільтрації шумів, калібрування сенсорів та прогнозного регулювання.

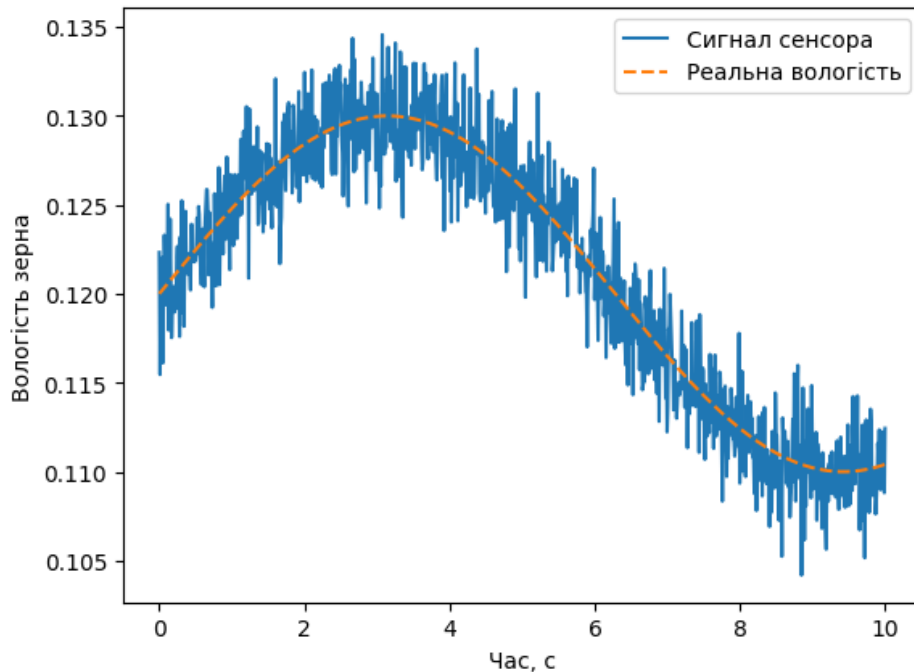


Рис. 2. Симуляція роботи діелектричного сенсора

Таким чином, побудова вимірювального тракту та його інтеграція в IoT-систему створює основу для інтелектуального контролю вологи́сть зерна, який стане серцевиною розроблюваної системи автоматичного управління сушінням.

Алгоритми обробки сигналів та фільтрація шумів

Для ефективного автоматичного керування процесом сушіння зерна необхідно забезпечити надійну обробку сигналів з сенсорів вологи́сть, що включає усунення шумів, калібрування та підготовку даних для регулятора. Сигнали, отримані від діелектричних та NIR-сенсорів, містять як корисну інформацію про зміну вологи́сть, так і випадкові коливання, пов'язані з електромагнітними перешкодами, нестабільністю контакту, механічними коливаннями зерна або шумом аналогових перетворювачів [1, 2, 7, 11].

Основні етапи обробки сигналів включають:

- попереднє калібрування сенсорів – встановлення початкових значень, перевірка лінійності та масштабування сигналу відповідно до фізичної вологи́сть.
- фільтрацію шумів – застосування цифрових фільтрів (низькочастотних, ковзного середнього, експоненціальних згладжувань) для усунення випадкових коливань без спотворення динаміки процесу.
- обчислення середніх значень та похідних – підготовка даних для алгоритмів регулювання та прогнозування вологи́сть.
- виявлення аномалій – контроль сигналів на наявність різких відхилень, що можуть свідчити про несправність сенсора або механічні проблеми в потоці зерна.

Для реалізації цих етапів у Python застосовуються стандартні методи обробки сигналів. Наприклад, використання ковзного середнього дозволяє згладити випадкові коливання, що представлено на рис. 3.

Для більш складних випадків можна застосовувати експоненціальні фільтри, що дозволяють швидше реагувати на зміну вологи́сть без втрати стабільності сигналу.

Такі алгоритми дозволяють отримати стабільний та точний сигнал, який можна використовувати для формування керуючих впливів у системі автоматичного управління.

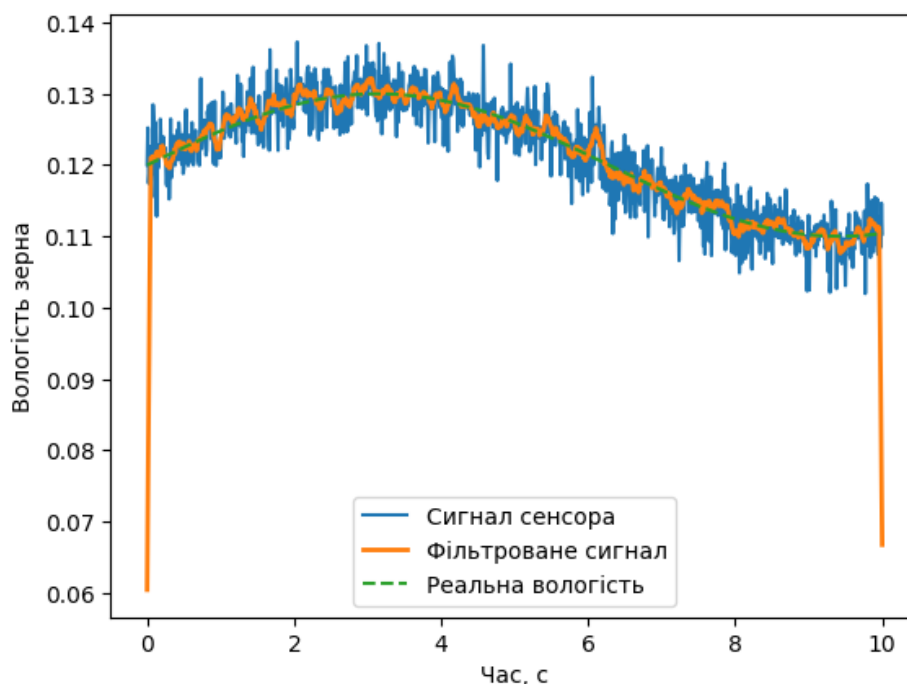


Рис. 3. Імітація фільтрації шумів за допомогою використання ковзного середнього

Таким чином, побудова алгоритмів обробки сигналу та фільтрація шумів є критичним етапом формування надійної та інтелектуальної системи контролю вологості зернових культур.

Використання IoT-сенсорів та передача даних у хмарне середовище

Інтеграція сенсорів вологості зерна у IoT-систему дозволяє організувати безперервний моніторинг процесу сушіння та автоматизоване керування на основі оброблених даних. Основними елементами такої системи є сенсори, контролери з можливістю підключення до мережі, комунікаційні протоколи та хмарне сховище або локальна SCADA-система [7, 11].

Архітектуру IoT-системи контролю вологості представлено на рис. 4.

Дана архітектура включає в себе:

- сенсорний рівень – діелектричні та NIR-сенсори, що безперервно вимірюють вологість зерна. Сигнали надходять на контролер, відбувається фільтрація шумів та первинна обробка.
- контролерний рівень – IoT-контролери або PLC збирають дані з сенсорів, виконують обчислення та формують пакет даних для передачі.
- комунікаційний рівень – застосовуються протоколи передачі даних, наприклад, MQTT, HTTP, CoAP або WebSocket, що забезпечують надійну і швидку доставку даних у хмару або на локальний сервер.
- хмарний або локальний рівень – дані зберігаються, обробляються та візуалізуються у SCADA або аналітичній платформі. Тут можливе використання машинного навчання для прогнозування вологості та формування рекомендацій для регулятора.



Рис. 4. Архітектура IoT-системи контролю вологості

Для симуляції потоку даних у Python використовується генерація сигналів з сенсорів, їх обробка та передача у вигляді пакета даних. На рис. 5 зображено імітований потік даних від сенсорів у хмару, де вони можуть зберігатися, аналізуватися та використовуватися для формування керуючих впливів.

```

Відправлено: {'timestamp': 1761613476.795857, 'moisture': np.float64(0.12904905676778367)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613477.796332, 'moisture': np.float64(0.12422765827373898)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613478.7968075, 'moisture': np.float64(0.12224418332822876)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613479.7973423, 'moisture': np.float64(0.11509484600507637)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613480.7979276, 'moisture': np.float64(0.11238500993902051)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613481.7985015, 'moisture': np.float64(0.11241880726502584)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613482.7990544, 'moisture': np.float64(0.11410988928570906)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613483.7996256, 'moisture': np.float64(0.11350048921066046)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613484.8001616, 'moisture': np.float64(0.11813743012988)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613485.8007271, 'moisture': np.float64(0.1227568199517133)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613486.8013365, 'moisture': np.float64(0.12932356378030882)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613487.801934, 'moisture': np.float64(0.12833707823052748)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613488.8024719, 'moisture': np.float64(0.13098605294551188)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613489.80308, 'moisture': np.float64(0.12425383748965246)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613490.8036554, 'moisture': np.float64(0.12079993215448293)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613491.8042653, 'moisture': np.float64(0.1165260943682976)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613492.8048418, 'moisture': np.float64(0.11433180521677763)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613493.8054144, 'moisture': np.float64(0.11184059279955229)}
Відправлено: {'timestamp': 1761613494.806015, 'moisture': np.float64(0.1102442776962869)}
  
```

Рис. 5. Імітація потоку даних від сенсорів у хмару

Завдяки такій архітектурі забезпечується безперервний моніторинг вологості зерна, можливість швидкої реакції на зміни процесу та інтеграція з алгоритмами інтелектуального регулювання.

Висновки

У статті проаналізовано процес сушіння зернових культур як складний багатопараметричний об'єкт керування. Розроблено структуру вимірювального тракту для контролю вологості зерна та показано переваги використання діелектричних і NIR-сенсорів у поєднанні з IoT-контролерами.

Проведене моделювання сигналів сенсорів у Python підтвердило можливість: усунення шумів за допомогою цифрових фільтрів; стабілізації даних для подальшого використання у

регулюванні; формування достовірного інформаційного потоку для хмарних систем моніторингу.

Запропонована IoT-архітектура забезпечує безперервний контроль вологості, передачу даних у хмару та можливість інтеграції алгоритмів прогнозного та адаптивного регулювання. Це створює основу для побудови інтелектуальної системи автоматичного керування сушінням, що підвищує ефективність технологічного процесу, зменшує втрати продукції та енергетичні витрати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Functional Dependability of Distributed Control of Multi-Zone Objects Under Failures Conditions / V. Dubovoi, et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 95736–95749. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3421380. URL: https://www.researchgate.net/publication/381892192_Functional_Dependability_of_Distributed_Control_of_Multi-zone_Objects_under_Failures_Conditions (дата звернення 04.12.2025).
2. Analysis of Methods and Means of Drying of Agricultural Materials / D. V. Borysiuk et al. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця: ВНАУ, 2025. Vol. 129. № 2. P. 54–62. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-2-7. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/49773/186678.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. (дата звернення 04.12.2025)
3. Model-Oriented Training of Coordinators of the Decentralized Control System of Technological Facilities with Resource Interaction / M. Yuhymchuk et al. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 13414–13426. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3528828. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10838564> (дата звернення 04.12.2025).
4. Юхимчук М., Лесько В. Інтеграція технічних систем з штучним інтелектом для автоматизованого розпізнавання зображень в енергетиці. *Міжнародна науково-технічна конференція з оптико-електронних та інформаційних технологій*. 2025. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ods/ods_2025/paper/viewFile/23067/19160 (дата звернення 02.12.2025).
5. Аналіз та експериментальне дослідження методу безмодельного навчання з підкріпленням / В. В. Півошенко та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2019. № 3. С. 40–49. DOI: 10.31649/1997-9266-2019-144-3-40-49. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2361> (дата звернення 04.12.2025).
6. Здітовецький Ю. С., Бісікало О. В., Іванов Ю. Ю. Інтелектуальна інформаційна система розпізнавання та аналізу складу продуктів харчування. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2023. № 2. С. 66–71. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-167-2-66-71. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2865> (дата звернення 04.12.2025).
7. Functional Safety Assessment of One-Level Coordination of Distributed Cyber-Physical Objects / V. M. Dubovoy et al. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97. P. 38–41. DOI: 10.1155/2022/2588364. URL: <https://sigma-not.pl/publikacja-133232-functional-safety-assessment-of-one-level-coordination-of-distributed-cyber-physical-objects-przegląd-elektrotechniczny-2021-9.html> (дата звернення 04.12.2025).
8. Перепелиця С., Юхимчук М., Лесько В. Моделювання кіберфізичних систем управління в умовах негативних зовнішніх факторів. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2025. № 1. С. 7–12. DOI: 10.31891/2219-9365-2025-81-1. URL: <https://vottp.khmnv.edu.ua/index.php/vottp/article/view/454/421> (дата звернення 04.12.2025).
9. Кулик А. Я., Кривоугубченко С. Г., Іванов Ю. Ю. Порівняльний аналіз складності реалізації методів декодування турбо-кодів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця, 2013. № 1. С. 26–31. URL: <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/113> (дата звернення 04.12.2025).
10. Kovtun V. V., Ivanov Yu. Yu. Crypto Coding System Based on the Turbo Codes with Secret Keys. *ICT Express*. South Korea, 2024. Vol. 10. № 2. P. 330–335. DOI:10.1016/j.icte.2023.08.007. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959523001091> (дата звернення 04.12.2025)
11. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Імітаційне моделювання в системі Scilab/xcos: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2018. 107 с. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/10dubovyj_imitacijne_modelyuvannya_v_systemi_Scilab-Xcos/txt/d&yu_zmist.html (дата звернення 04.12.2025).

Стаття надійшла до редакції 03.12.2025.

Стаття пройшла рецензування 06.12.2025.

Юхимчук Марія Сергіївна – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: umcmasha@gmail.com.

Лесько Владислав Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій і систем.

Наукові праці ВНТУ, 2025, № 4

Дубовой Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор кафедри комп’ютерних систем управління, e-mail: v.m.dubovoy@gmail.com.

Іванов Юрій Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: Yura881990@i.ua.

Вінницький національний технічний університет.