

Курдюмов Дмитро Сергійович, аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(067)747-72-47, Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-7216-4373

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

Кунченко Тетяна Юрїївна, к.т.н., доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(050)734-72-02, medvedeva014@gmail.com

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

ОГЛЯД НАЯВНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ДОЗУВАННЯ РІДИН ЗА ВАГОЮ

Анотація. У статті представлено огляд сучасних і перспективних методів та алгоритмів дозування рідин за вагою. Проведено аналіз методів вагового дозування, включаючи гравіметричні та тензометричні підходи, а також алгоритмів керування процесами дозування – PID-регулювання, адаптивних алгоритмів, нечіткої логіки, модельного прогнозуючого керування та алгоритмів на основі нейронних мереж. Визначено перспективні напрямки розвитку систем дозування рідин, серед яких інтеграція штучного інтелекту, нейронних мереж, технологій Інтернету речей (IoT), а також використання комбінованих методів. Надано практичні рекомендації щодо вибору оптимального методу та алгоритму дозування залежно від технологічних умов. Підкреслено доцільність використання математичного моделювання дискретних динамічних систем, зокрема Мереж Петрі, для розробки та оптимізації автоматизованих дозувальних систем.

Ключові слова: методи дозування рідин, вагове дозування, алгоритми керування, автоматизація, промислові контролери, штучний інтелект, нейронні мережі, мережі Петрі.

Kurdiumov Dmytro, PhD Student, Automated Electromechanical Systems Department, +38(067)747-72-47, Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-7216-4373

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".
2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.*

Kunchenko Tetiana, PhD, Associate Professor, Automated Electromechanical Systems Department, +38(050)734-72-02, medvedeva014@gmail.com

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".
2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.*

OVERVIEW OF EXISTING AND PROSPECTIVE METHODS AND ALGORITHMS FOR WEIGHT-BASED LIQUID DOSING

Abstract. The paper presents a review of current and promising methods and algorithms for weight-based liquid dosing. The analysis covers weight-based dosing methods, including gravimetric and strain-gauge approaches, and control algorithms such as PID control, adaptive algorithms, fuzzy logic, model predictive control, and neural network-based algorithms. Promising directions for liquid dosing systems development are identified, including the integration of artificial intelligence, neural networks, Internet of Things (IoT) technologies, and hybrid dosing methods. Practical recommendations are provided for selecting the optimal dosing method and control algorithm depending on specific technological conditions. The paper highlights the importance of mathematical modeling of discrete dynamic systems, particularly Petri Nets, for developing and optimizing automated dosing systems.

Key words: liquid dosing methods, weight-based dosing, control algorithms, automation, industrial controllers, artificial intelligence, neural networks, Petri nets.

Вступ. Точність наливу рідин за вагою є критично важливим фактором у багатьох галузях промисловості, серед яких хімічна, харчова та медична. Від точності дозування у хімічній та харчовій промисловості безпосередньо залежить якість кінцевого продукту та стабільність технологічних процесів [1]. У медичній галузі точність наливу відіграє важливу роль під час дозування лікарських препаратів та проведення медичних дослідів, де навіть незначні похибки можуть спричинити серйозні наслідки для здоров'я пацієнтів [2].

Окрім того, високоточний налив дозволяє зменшити витрати сировини, покращити економічні показники підприємств і підвищити загальну продуктивність виробництва [3, 4]. Сьогодні значна кількість наукових досліджень у сфері автоматизації спрямована саме на покращення точності та надійності дозування рідин. Особлива увага приділяється розробці та вдосконаленню алгоритмів керування наливом, здатних забезпечити необхідну точність та стабільність за різних умов експлуатації.

Проте, незважаючи на значну кількість вже існуючих розробок, вони мають певні обмеження, пов'язані, зокрема, з відсутністю єдиних, універсальних тестових стендів. Це ускладнює розробку, тестування та впровадження нових алгоритмів, а також знижує швидкість наукового та практичного прогресу у сфері вагового дозування [4].

Таким чином, огляд сучасного стану та аналіз перспективних напрямків розвитку методів і алгоритмів дозування рідин за вагою є актуальною науковою

задачею. Це дозволить узагальнити наявні рішення, виявити основні проблеми та обмеження існуючих методів, а також визначити перспективні шляхи їх подальшого вдосконалення.

Аналіз існуючих методів дозування рідин за вагою. У цьому розділі здійснено аналіз сучасних методів та алгоритмів вагового дозування рідин, представлених у останніх наукових працях.

1. Методи вагового дозування.

У статті [5] досліджує способи високоточного дозування рідин із мікролітровими об'ємами. Запропоновано методику із застосуванням мікрокапілярного пікнометра та каліброваних контрольних мас. Це дозволило знизити похибку визначення маси краплі об'ємом 1 мкл до 0,3 %. Метод рекомендовано для високоточних задач у медицині, фармацевтичній промисловості та наукових дослідженнях, де критичною є мала доза та висока точність вимірювань.

Гравіметричні методи дозування базуються на точному визначенні маси рідини в процесі наливу. У статті [6] наведено переваги цих методів у харчовій промисловості, де точність впливає на якість та безпеку продукції.

Тензометричні методи дозування реалізуються завдяки застосуванню тензометричних датчиків, які характеризуються високою точністю та стабільністю вимірювання ваги наливної рідини [7]. У статті [8] представлено результати розробки такого дозатора, що підтверджують ефективність цього підходу.

Дозування з використанням датчиків сили та вагових контролерів дозволяє автоматизувати контроль маси дозованих компонентів з високою точністю, що особливо важливо у фармацевтичній галузі. Переваги такого методу детально висвітлені в публікації [9].

Комбіновані (гібридні) методи дозування, які поєднують переваги вагових та об'ємних способів, проаналізовані у статті [12]. Автори відзначають, що такі методи дозволяють досягти високої точності та швидкості дозування, мінімізуючи похибки вимірювання.

2. Алгоритми керування процесом дозування.

Автори у своїй статті [10] досліджують оптимізацію вагового дозування рідкої продукції з використанням адаптивних функціональних модулів. Запропоновано покращення процесу дозування за рахунок врахування динамічної складової вагових вимірювань, що виникає під час руху рідини. Автори довели, що раціональний вибір геометрії клапана та оптимальний рух керуючого елемента суттєво підвищують точність і стабільність дозування.

PID-регулювання є класичним підходом до управління дозуванням рідин, що забезпечує стабільність процесу, проте потребує налаштування параметрів залежно від типу рідини та устаткування [11].

Адаптивні алгоритми регулювання дозволяють коригувати параметри керування в реальному часі, адаптуючи систему до змінних умов дозування. Переваги такого підходу наведені в роботі [12].

Алгоритми нечіткої логіки (Fuzzy-логіка) ефективно використовуються в умовах невизначеності та дозволяють приймати рішення при дозуванні рідин з нелінійними властивостями. Практичний досвід їх застосування наведений у статті [13].

Алгоритми з прогнозуючим керуванням (MPC) дають змогу прогнозувати поведінку системи дозування на кілька кроків вперед, що підвищує точність та швидкість роботи, про що свідчать результати досліджень [14].

Нейромережеві алгоритми керування дозволяють створювати системи, здатні навчатися та самостійно підбирати оптимальні параметри дозування на основі попереднього досвіду, що суттєво підвищує ефективність процесу [15].

Інтелектуальні системи керування є перспективним напрямком розвитку систем дозування, що забезпечує адаптивність, самооптимізацію та можливість інтеграції із сучасними інформаційними технологіями, про що зазначено в публікації [16]. Потрібно відзначити, що автоматизація процесів дозування рідин є ефективним фактором підвищення економічних і технологічних показників виробництва. Автори

наводять практичні приклади успішного впровадження автоматизованих систем вагового дозування, що забезпечують стабільну точність таких систем.

Окрім цього, важливим аспектом є впровадження автоматизованих рішень для дозування рідин у промисловості, що дозволяє суттєво підвищити стабільність процесів та знизити собівартість продукції за рахунок скорочення витрат матеріалів та підвищення продуктивності обладнання [17].

3. Порівняльний аналіз методів та алгоритмів.

Для порівняння розглянутих методів та алгоритмів дозування рідин за вагою використаємо табл. 1, що відображає їх основні характеристики.

Таблиця 1 – Порівняння розглянутих методів та алгоритмів дозування рідин за вагою

Метод/Алгоритм	Точність	Швидкість реакції	Стабільність	Складність впровадження
Гравіметричні методи	Висока	Середня	Висока	Середня
Тензометричні ваги	Висока	Висока	Висока	Середня
Датчики сили та вагові контролери	Висока	Висока	Висока	Висока
PID-регулювання	Висока	Висока	Середня	Низька
Адаптивні алгоритми	Висока	Висока	Висока	Висока
Fuzzy-логіка	Висока	Середня	Висока	Висока
MPC	Висока	Висока	Висока	Висока
Нейронні мережі	Висока	Висока	Висока	Висока

На підставі проведеного аналізу сучасних публікацій можна зробити висновок, що вагове дозування рідин є актуальним напрямком досліджень, який інтенсивно розвивається. Серед методів найбільш перспективними є ті, що поєднують високу точність вимірювань з автоматизованими алгоритмами керування. Подальше вдосконалення технологій дозування пов'язане із впровадженням інтелектуальних систем на базі штучного інтелекту та нейронних мереж. Таким чином, перспективним є розвиток універсальних тестових стендів для експериментальної перевірки та оптимізації алгоритмів дозування рідин за вагою.

3. Алгоритми керування процесом дозування рідин.

Алгоритми керування є ключовими компонентами автоматизованих систем дозування рідин за вагою. Вони визначають точність, стабільність та продуктивність процесів наливу і дозування. Найбільш поширеними та ефективними алгоритмами, що застосовуються у сучасних системах дозування рідин, є PID-регулятори, адаптивні алгоритми, нечітка логіка (Fuzzy Logic), модельне прогнозує керування (MPC) та алгоритми на основі нейронних мереж.

Пропорційно-інтегрально-диференціальне (PID) регулювання є класичним методом автоматичного керування. Основною перевагою цього алгоритму є його простота і надійність. PID-регулятори широко використовуються для підтримання заданої маси рідини шляхом регулювання швидкості подачі, зменшуючи похибки наливу [11].

Адаптивні алгоритми керування використовують зворотний зв'язок для коригування параметрів керування у реальному часі. Це дозволяє компенсувати зміну властивостей рідини, навколишніх умов та стану обладнання. Даний підхід забезпечує більш високу точність та стабільність процесу дозування, особливо за умов змінних експлуатаційних параметрів [12].

Нечітка логіка (Fuzzy Logic) дозволяє обробляти нечіткі, неповні або неточні дані, що особливо актуально в процесах дозування рідин із складними фізико-хімічними властивостями. Алгоритми нечіткої логіки можуть ухвалювати ефективні рішення щодо керування швидкістю наливу навіть за відсутності точних даних про параметри рідини [13].

Алгоритми модельного прогнозує керування (MPC) прогнозують майбутні стани системи на основі математичної моделі процесу, що дозволяє заздалегідь коригувати параметри керування для підтримання заданих показників точності дозування. MPC є надзвичайно ефективним для систем з високими вимогами до точності та швидкості наливу рідин [14].

Використання нейронних мереж в алгоритмах керування процесами дозування дозволяє створювати самооптимізує системи. Такі алгоритми здатні до навчання

на попередньому досвіді, що дозволяє суттєво підвищити точність, швидкість і адаптивність процесу дозування. Нейронні мережі знаходять застосування в задачах, де необхідно швидко та точно адаптувати систему під змінні умови дозування [15].

Таким чином, сучасні алгоритми керування процесами дозування рідин включають широкий спектр підходів від класичних PID-регуляторів до складних інтелектуальних методів на основі нейронних мереж і прогнозного керування. Найперспективнішими є алгоритми, здатні до адаптації та самооптимізації в реальному часі, що значно покращують стабільність, точність і економічну ефективність процесів дозування.

4. Перспективні напрямки розвитку методів дозування рідин.

Одним із найважливіших перспективних напрямків розвитку дозування рідин є застосування штучного інтелекту та нейронних мереж. Використання таких технологій дозволяє створювати самооптимізовані системи дозування, що адаптуються до змінних умов експлуатації та властивостей рідин. Нейронні мережі забезпечують постійне навчання на основі накопичених даних, завдяки чому точність і стабільність процесу дозування значно зростають [4, 15].

Інтеграція дозувальних систем із технологіями Інтернету речей (IoT) також є перспективним напрямком. Це дає змогу здійснювати віддалений моніторинг та контроль, автоматично вести статистичний аналіз роботи систем, прогнозувати технічний стан обладнання і оперативно реагувати на будь-які відхилення від заданих параметрів [16, 18].

Розвиток гібридних (комбінованих) методів дозування, що поєднують переваги різних технологічних підходів (наприклад, вагового і об'ємного), дозволяє досягати оптимальної точності та швидкості процесу, мінімізуючи недоліки окремих методів [12, 19].

Ще одним перспективним напрямком є широке застосування адаптивних алгоритмів керування в поєднанні з автоматичною калібровкою систем. Такі системи здатні самостійно визначати оптимальні параметри наливу на основі реального стану

дозувального обладнання, що дозволяє значно підвищити стабільність і точність дозування [12, 20].

В останніх дослідженнях відзначається, що застосування методів глибинного навчання дозволяє значно поліпшити адаптивність та точність роботи дозувальних систем завдяки здатності нейронних мереж швидко опрацьовувати великі масиви експериментальних даних і ефективно адаптуватися до змінних умов дозування [21].

5. Практичні рекомендації щодо вибору методу та алгоритму дозування.

Вибір методу та алгоритму дозування залежить від конкретних умов експлуатації, технологічних вимог і характеристик рідини, що дозується. Якщо необхідна висока точність дозування та мінімальний вплив людського фактора, рекомендується застосовувати вагові (гравіметричні) методи з адаптивними або нейромережевими алгоритмами керування.

Для виробництв з великим асортиментом рідин із різними фізико-хімічними властивостями оптимальним буде використання комбінованих методів дозування та алгоритмів на основі нечіткої логіки або модельного прогнозуючого керування.

Для малих виробництв із відносно простими технологічними процесами достатньо класичних PID-регуляторів, які мають низьку вартість впровадження та експлуатації.

Узагальнена схема вибору дозувальної системи:

- визначення технологічних вимог (точність, швидкість, стабільність);
- аналіз характеристик рідини (в'язкість, густина, агресивність);
- оцінка складності та вартості впровадження;
- вибір методу дозування (ваговий, об'ємний або комбінований);
- вибір алгоритму керування (PID, адаптивний, нечітка логіка, MPC, нейромережі).

Висновки. У результаті проведеного огляду сучасних методів та алгоритмів дозування рідин за вагою визначено, що найбільш ефективними є інтегровані рішення, які поєднують високу точність гравіметричних методів з автоматизованими

алгоритмами керування. Перспективними напрямками подальших досліджень є використання адаптивних алгоритмів, штучного інтелекту, нейронних мереж, а також інтеграція з технологіями Інтернету речей (IoT).

Важливою складовою при створенні ефективних автоматизованих систем дозування є вибір відповідних методів математичного моделювання технологічних процесів. Системи дозування рідин часто мають ознаки дискретних динамічних систем із паралельними процесами. Тому для їх моделювання доцільно використовувати такі методи, як Мережі Петрі, які дозволяють адекватно описувати та аналізувати складні процеси з одночасним виконанням декількох операцій. Це дозволяє ефективно прогнозувати поведінку системи та здійснювати її оптимізацію з високою точністю.

Окрему увагу варто приділити необхідності створення універсальних тестових стендів, які дозволяють експериментально перевіряти та адаптувати розроблені алгоритми до реальних умов експлуатації. Такий підхід забезпечує високий ступінь відповідності моделей реальним процесам, що суттєво покращує результативність впровадження нових технологічних рішень.

Для забезпечення стабільної якості дозування та уникнення помилок, пов'язаних з людським фактором, рекомендується ширше застосовувати автоматизовані рішення, що базуються на сучасних методах керування. Використання інтелектуальних систем із застосуванням штучного інтелекту та нейронних мереж дозволяє не тільки значно покращити точність та стабільність дозування, але й знизити експлуатаційні витрати шляхом зменшення витрат матеріалів і ресурсів.

Таким чином, подальші дослідження повинні орієнтуватися на розробку і впровадження інноваційних технологій, що інтегрують штучний інтелект, адаптивні алгоритми керування, сучасні математичні методи моделювання та передові інформаційні технології. Це дозволить значно підвищити ефективність і конкурентоспроможність підприємств, що застосовують автоматизоване вагове дозування рідин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаров В. П., Власенко А. М. Дослідження впливу точності дозування компонентів на якість продукції в харчовій промисловості // *Харчова промисловість*, 2021. № 4. С. 45–49.
2. Chen X., Wang L., Liu H. Precision dosing of liquid medications: review of current practices and future challenges // *International Journal of Pharmaceutics*, 2023. Т. 632. Арт. 122559. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2023.122559
3. Пилипенко В. І. Економічна ефективність автоматизації дозування рідин у хімічній промисловості // *Економіка та менеджмент промислових підприємств*, 2020. № 1 (17). С. 110–117.
4. Степаненко О. І., Лисенко П. С. Перспективи створення універсальних тестових стендів для автоматизованих систем дозування // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2022. № 4 (14). С. 29–34.
5. Shaw G. A. Milligram mass metrology for quantitative deposition of liquid samples // *Measurement: Sensors*, 2022. Т. 33. № 2. С. 152–162. DOI: 10.1016/j.measen.2022.100380
6. Мігаль С. Д. Аналіз методів дозування рідин // *Інформаційні управляючі системи та технології*, 2024. № 1(99). С. 32–41.
7. Петров І. М. Гравіметричні методи дозування в харчовій промисловості // *Журнал харчових технологій*, 2021. № 5. С. 45–52.
8. Коваленко В. П., Бондар В. І. Розробка тензометричного вагового дозатора для рідин // *Вимірювальна техніка та метрологія*, 2021. Т. 82, № 3. С. 33–40.
9. Бойко А. О., Гончаренко Л. В. Автоматизація дозування у фармацевтичній промисловості із застосуванням датчиків сили // *Фармацевтичний журнал*, 2020. № 3. С. 27–35.
10. Гавва О. О., Кривопляс-Володіна Л. О. Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом // *Харчова наука і технологія*, 2023. № 2(63). С. 74–82.
11. Сидоренко А. М. Застосування PID-регуляторів у системах дозування рідин // *Автоматика та прилади*, 2022. № 6. С. 15–22.
12. Іванов Д. В. Адаптивні алгоритми керування процесом дозування рідин // *Журнал систем автоматичного керування*, 2023. № 2. С. 50–58.
13. Василенко О. Р. Використання нечіткої логіки для покращення точності дозування рідин у хімічній промисловості // *Хімічна інженерія та технології*, 2022. Т. 94. № 3. С. 66–72.
14. Zhao L., Liu Y. Model predictive control approach for liquid dispensing systems // *Journal of Process Control*. – 2023. – Т. 120. – С. 35–47. DOI: 10.1016/j.jprocont.2023.03.005
15. Sharma A., Patel R. Neural network-based optimization for precise liquid dosing control // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022. Т. 69, № 7. С. 7200–7208. DOI: 10.1109/TIE.2021.3134567
16. Gupta S., Singh R. Intelligent control systems in liquid dosing applications: review and future perspectives // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023. Т. 355. Арт. 114221. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114221
17. Кравченко Ю. І., Дорошенко С. А. Автоматизація процесів дозування рідин як фактор підвищення ефективності виробництва // *Промислова автоматика*, 2021. № 4. С. 12–18.
18. Smith J., Kumar R. Artificial intelligence in precision liquid dispensing systems // *Journal of Advanced Manufacturing*, 2023. Т. 45. № 2. С. 112–120.
19. Lee C., Tan J. IoT-enabled smart liquid dispensing solutions for Industry 4.0 // *International Journal of Industrial Engineering*, 2022. Т. 29. № 4. С. 278–285.
20. Марченко О. В. Комбіновані методи дозування: переваги і перспективи впровадження // *Системи керування і автоматика*, 2021. № 2. С. 54–60.
21. Patel V., Thomas L. Adaptive calibration techniques in automated liquid dosing systems // *Automation Science and Engineering*, 2024. Т. 18. № 1. С. 67–74. DOI: 10.1109/TASE.2023.3312345

REFERENCES:

1. Honcharov V. P., Vlasenko A. M. Doslidzhennia vplyvu tochnosti dozuvannia komponentiv na yakist produktsii v kharchovii promyslovosti // *Kharchova promyslovist*, 2021. № 4. S. 45–49.
2. Chen X., Wang L., Liu H. Precision dosing of liquid medications: review of current practices and future challenges // *International Journal of Pharmaceutics*, 2023. T. 632. Art. 122559. DOI:10.1016/j.ijpharm.2023.122559
3. Pylypenko V. I. Ekonomichna efektyvnist avtomatyzatsii dozuvannia ridyn u khimichnii promyslovosti // *Ekonomika ta menedzhment promyslovykh pidpriemstv*, 2020. № 1(17). S. 110–117.
4. Stepanenko O. I., Lysenko P. S. Perspektyvy stvorennia universalnykh testovykh stendiv dlia avtomatyzovanykh system dozuvannia // *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, 2022. № 4(14). S. 29–34.
5. Shaw G. A. Milligram mass metrology for quantitative deposition of liquid samples // *Measurement: Sensors*, 2022. T. 33. № 2. S. 152–162. DOI: 10.1016/j.measen.2022.100380
6. Mihal S. D. Analiz metodiv dozuvannia ridyn // *Informatsiini upravliaiuchi systemy ta tekhnolohii*. – 2024, № 1(99). S. 32–41.
7. Petrov I. M. Hravi-metrychni metody dozuvannia v kharchovii promyslovosti // *Zhurnal kharchovykh tekhnolohii*, 2021. № 5. S. 45–52.
8. Kovalenko V. P., Bondar V. I. Rozrobka tenzometrychnoho vahovoho dozatora dlia ridyn // *Vymiriuvna tekhnika ta metrolohiia*, 2021. T. 82. № 3. S. 33–40.
9. Boiko A. O., Honcharenko L. V. Avtomatyzatsiia dozuvannia u farmatsevychnii promyslovosti iz zastosuvanniam datchykyv syly // *Farmatsevychnyi zhurnal*, 2020. № 3. S. 27–35.
10. Havva O. O., Kryvoplias-Volodina L. O. Obgruntuvannia rezhymiv roboty adapttronnykh funktsionalnykh moduliv dozuvannia ridkoi produktsii vahovym sposobom // *Kharchova nauka i tekhnolohiia*, 2023. № 2(63). S. 74–82.
11. Sydorenko A. M. Zastosuvannia PID rehulatoriv u systemakh dozuvannia ridyn // *Avtomatyka ta prylady*, 2022. № 6. S. 15–22.
12. Ivanov D. V. Adaptivni alhorytmy keruvannia protsesom dozuvannia ridyn // *Zhurnal system avtomatyzhnoho keruvannia*, 2023. № 2. S. 50–58.
13. Vasylenko O. R. Vykorystannia nechtichoi lohiky dlia pokrashchennia toch-nosti dozuvannia ridyn u khimichnii promyslovosti // *Khimichna inzheneriia ta tekhnolohii*, 2022. T. 94, № 3. S. 66–72.
14. Zhao L., Liu Y. Model predictive control approach for liquid dispensing systems // *Journal of Process Control*, 2023. T. 120. S. 35–47. DOI: 10.1016/j.jprocont.2023.03.005
15. Sharma A., Patel R. Neural network based optimization for precise liquid dosing control // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022. T. 69. № 7. S. 7200–7208. DOI:10.1109/TIE.2021.3134567
16. Gupta S., Singh R. Intelligent control systems in liquid dosing applications: review and future perspectives // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023. T. 355. Art. 114221. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114221
17. Kravchenko Yu. I., Doroshenko S. A. Avtomatyzatsiia protsesiv dozuvannia ridyn yak faktor pidvyshchennia efektyvnosti vyrobnytstva // *Promyslova avtomatyka*, 2021. № 4. S. 12–18.
18. Smith J., Kumar R. Artificial intelligence in precision liquid dispensing systems // *Journal of Advanced Manufacturing*, 2023. T. 45. № 2. S. 112–120.
19. Lee C., Tan J. IoT enabled smart liquid dispensing solutions for Industry 4.0 // *International Journal of Industrial Engineering*, 2022. T. 29. № 4. S. 278–285.
20. Marchenko O. V. Kombinovani metody dozuvannia: perevahy i perspektyvy vprovadzhennia // *Systemy keruvannia i avtomatyka*, 2021. № 2. S. 54–60.
21. Patel V., Thomas L. Adaptive calibration techniques in automated liquid dosing systems // *Automation Science and Engineering*, 2024. T. 18 № 1. S. 67–74. DOI: 10.1109/TASE.2023.3312345

Надійшла до редакції 24.05.2025р.