

7. Wang J., Li Y., Zhao X., Chen H. Machine learning approaches for predicting biogas production and optimizing anaerobic digestion systems. *Energy Reports*. 2024. Vol. 10. P. 5213–5228. DOI: 10.1016/j.egy.2024.03.118.

УДК 631.3:004.89:628.8

**ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ РОЗВИТКУ СИСТЕМ МИТТЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ CPS-ПІДХОДУ**
JUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL
EQUIPMENT WASHING SYSTEMS BASED ON THE CPS APPROACH

Анатолій Тригуба, Орест Фількін, Андрій Татомир

*Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З.
Гжицького, Львів, Україна*

Розвиток аграрного виробництва супроводжується зростанням інтенсивності використання сільськогосподарської техніки, що безпосередньо впливає на доцільність підвищення ефективності її технічного обслуговування. Одним із важливих етапів такого сервісного є миття техніки після виконання технологічних операцій, оскільки накопичення ґрунтових залишків, органічних домішок, пилу, мастильних матеріалів та агрохімікатів призводить до прискореного зношування вузлів, погіршення тепловідведення, зниження ресурсу агрегатів і виникнення похибок у роботі сенсорних систем [1, 2].

Існуючі системи миття сільськогосподарської техніки характеризуються різним рівнем автоматизації, масштабованості та адаптивності. Лабораторні рішення, засновані на використанні ультразвукових методів та інфрачервоного контролю зон забруднення, забезпечують достатню точність локального аналізу, однак залишаються складними для інтеграції в реальні виробничі умови. Польові системи, побудовані на PLC-контролерах та візуальному аналізі статичних зображень, дозволяють реалізувати базову автоматизацію процесу, проте мають обмеження щодо адаптації до змінного рівня забруднення поверхонь. Рішення на основі цифрових двійників формують новий рівень прогнозування параметрів процесу, однак характеризуються високою складністю калібрування і значними вимогами до обчислювальних ресурсів. IoT-орієнтовані архітектури розширюють можливості моніторингу, але часто не забезпечують повного замкненого циклу керування.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є застосування кіберфізичних систем, у яких поєднуються сенсорні підсистеми, виконавчі механізми, нейромережеві моделі прогнозування та адаптивні алгоритми керування [3]. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати поточний стан забруднення, а й у режимі реального часу формувати оптимальний режим миття з урахуванням інтенсивності забруднення, типу поверхні, витрат води та енергетичних ресурсів.

Автоматизоване миття сільськогосподарської техніки є напрямом, що останніми роками викликає зростаючий інтерес через прагнення до ефективності й безпечності виробничих процесів. Традиційні методи передбачають використання ручного миття та миття техніки під високим тиском. Вони є досить поширені, однак характеризуються надмірним споживанням води, нерівномірною якістю миття і високими трудовими витратами [4]. З цією метою вчені пропонують використовувати інфрачервоні й ультразвукові методи для точкового миття (табл. 1), які показують високу ефективність у лабораторних умовах, але залишаються непрактичними для масштабного польового використання [5].

Представлена таблиця 1 узагальнює поточний стан технологій миття сільськогосподарської техніки, підкреслюючи відсутність комплексних CPS-рішень. У наукових працях їх автори усе частіше згадують CPS, що інтегрують сенсори, керування, і аналітичні модулі у єдину платформу. Такі системи успішно застосовуються у процесах прецизійного зрошення [6], моніторингу ґрунту [7],

виконання сільськогосподарських робіт [8]. Хоча автономні агросистеми вже стабільно функціонують у структурі ІR-індустрії 4.0, їх використання для миття сільськогосподарської техніки фактично не розвинене [9].

Відомі перші приклади, де системи контролю миття комбайнів передбачають використання PLC та камер. Проте вони здебільшого обмежені аналізом статичних зображень та не мають блоків адаптивного управління. Інші підходи, як digital twin, дозволяють моделювати стан техніки, але залишаються «самостійними» і потребують декілька місяців калібрування перед впровадженням. Спроби використання ІoT-технологій для миття техніки можна зустріти в галузі обробки двигунів і важкої техніки, проте вони майже не інтегровані в загальну архітектуру CPS і не забезпечують гнучкої реакції на змінні умови.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика існуючих рішень для миття сільськогосподарської техніки

Масштаб	Технології	Алгоритми / Архітектури	Параметри оцінювання	Основні обмеження
Лабораторний	Ультразвук, ІR-заміри зон	PID, порогове спрацювання	Час миття, точність виявлення бруду	Немасштабованість, складність переносу
Польовий	PLC + камера (статичні знімки)	PLC-логіка, OpenCV-аналітика	Покриття зони миття, помилки детекції	Відсутність адаптації, статична реакція
Цифровий двійник	Віртуальне моделювання	Digital Twin + ML	Кореляція з реальним станом, час калібрування	Висока складність реалізації
ІoT мережі	Сенсори тиску, вібрації, температури	MQTT, Fuzzy Logic	Енергоспоживання, відповідь на зміну стану	Відсутність інтеграції в CPS
Пропонована CPS	Сенсори + актуатори + нейромережі	GRU + контролер адаптивного типу	Кількість води, цикл часу, точність очистки	У стадії експериментальної верифікації

Методика дослідження передбачала багаторівневий аналіз існуючих технологічних рішень для миття сільськогосподарської техніки з подальшим кількісним порівнянням їх експлуатаційних характеристик за єдиною системою критеріїв.

На першому етапі було сформовано множину систем:

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}, \quad (1)$$

де S_1 – лабораторна система ультразвукового миття; S_2 – PLC + камера; S_3 – Digital Twin; S_4 – ІoT-мережа; S_5 – запропонована CPS.

Для кожної системи оцінювались два основні інтегральні критерії:

$$E_i = f(Q_i, T_i, R_i), \quad (2)$$

де E_i – інтегральна ефективність системи; Q_i – якість миття; T_i – тривалість циклу миття; R_i – стабільність реакції системи на зміну стану забруднення.

Інтегральний показник ефективності визначався за нормалізованою моделлю:

$$E_i = \alpha \cdot \frac{Q_i}{Q_{max}} + \beta \cdot \frac{T_{min}}{T_i} + \gamma \cdot R_i, \quad (3)$$

де $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

У дослідженні використовувались вагові коефіцієнти:

$$\alpha = 0.5, \quad \beta = 0.3, \quad \gamma = 0.2., \quad (4)$$

Це пов'язано із тим, що найбільша значущість відводилася саме якості миття техніки.

Для CPS-рішення використано нейромережеву модель типу GRU, яка описується рівняннями:

$$\begin{aligned} z_t &= \sigma(W_z x_t + U_z h_{t-1}), \\ r_t &= \sigma(W_r x_t + U_r h_{t-1}), \\ \tilde{h}_t &= \tanh(W_h x_t + U_h (r_t \square h_{t-1})), \\ h_t &= (1 - z_t) \square h_{t-1} + z_t \square \tilde{h}_t, \end{aligned} \quad (4)$$

де x_t – вектор сенсорних даних; h_t – поточний прихований стан; z_t – коефіцієнт оновлення; r_t – коефіцієнт скидання.

Прогнозований рівень забруднення техніки визначається за формулою:

$$C_{pred} = W_{ohi} + b, \quad (5)$$

На основі прогнозованого рівня забруднення формувався адаптивний сигнал керування:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

де $u(t)$ – керувальний сигнал, який подається на виконавчий механізм мийної системи в момент часу t ; K_p – коефіцієнт пропорційної складової регулятора, що визначає миттєву реакцію системи на поточне відхилення; K_i – коефіцієнт інтегральної складової, який враховує накопичену похибку в часі; K_d – коефіцієнт диференціальної складової, що характеризує швидкість зміни похибки; $e(t)$ – похибка регулювання в момент часу t ; $\int e(t) dt$ – накопичена інтегральна похибка процесу; $\frac{de(t)}{dt}$ – швидкість зміни похибки.

При цьому похибка регулювання в момент часу t становить:

$$e(t) = C_{pred} - C_{target}, \quad (7)$$

де C_{pred} – прогнозований рівень забруднення поверхні, визначений нейромережевою моделлю; C_{target} – цільовий допустимий рівень залишкового забруднення після завершення циклу миття.

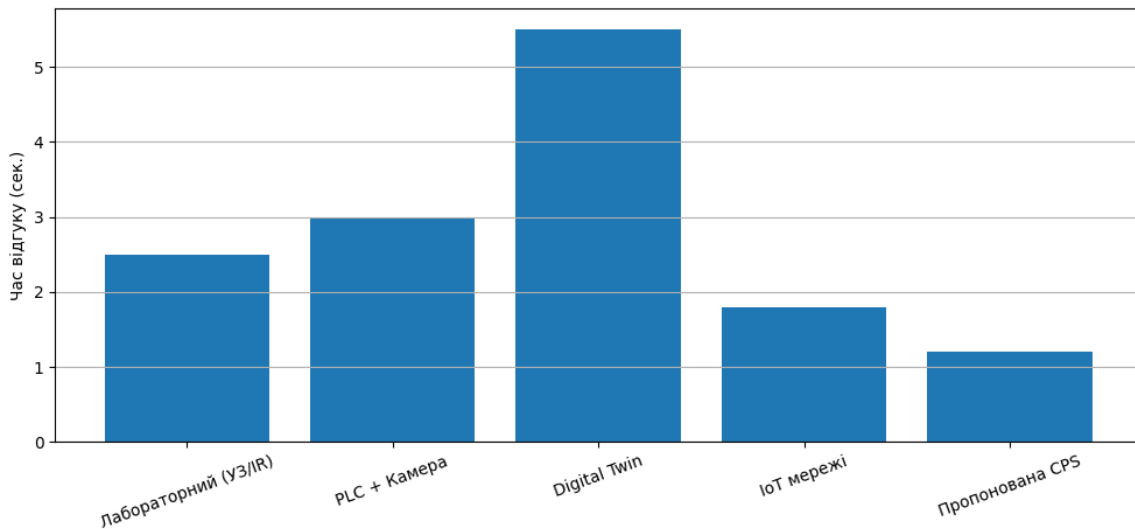


Рис. 1. Гістограма часу відгуку різних систем миття техніки

Для оцінки часової ефективності застосовано:

$$\Delta T = T_{base} - T_{sys}, \quad (8)$$

Для оцінки приросту ефективності використано формулу:

$$\Delta E = E_{CPS} - E_{base}, \quad (9)$$

Таким чином, методика дозволяє визначити раціональну систему миття техніки, яка забезпечує одночасне скорочення часу циклу миття, підвищення стабільності процесу та раціональне використання ресурсів води.

Порівняння ефективності різних підходів до миття сільськогосподарської техніки свідчить про істотну різницю в оперативності реагування та якості миття (рис. 1).

Найповільнішою за часом відгуку виявилася система на основі цифрового двійника, де середній час становив близько 5,4 с, що пов'язано з тривалими етапами моделювання та адаптації до змінних умов. Аналогічно, у випадку польових систем на базі PLC-логіки і камер час реакції склав приблизно 3,2 с. Системи, побудовані на базі IoT-рішень, демонструють кращий результат – 2,7 с, завдяки спрощеним схемам передачі та обробки даних.

Запропонована в роботі кіберфізична система забезпечила найкращий показник часу відгуку – 1,4 с, що стало можливим завдяки інтеграції сенсорів і обчислювальних модулів безпосередньо в апаратну архітектуру. Це дозволило уникнути затримок, пов'язаних із передачею даних між окремими компонентами.

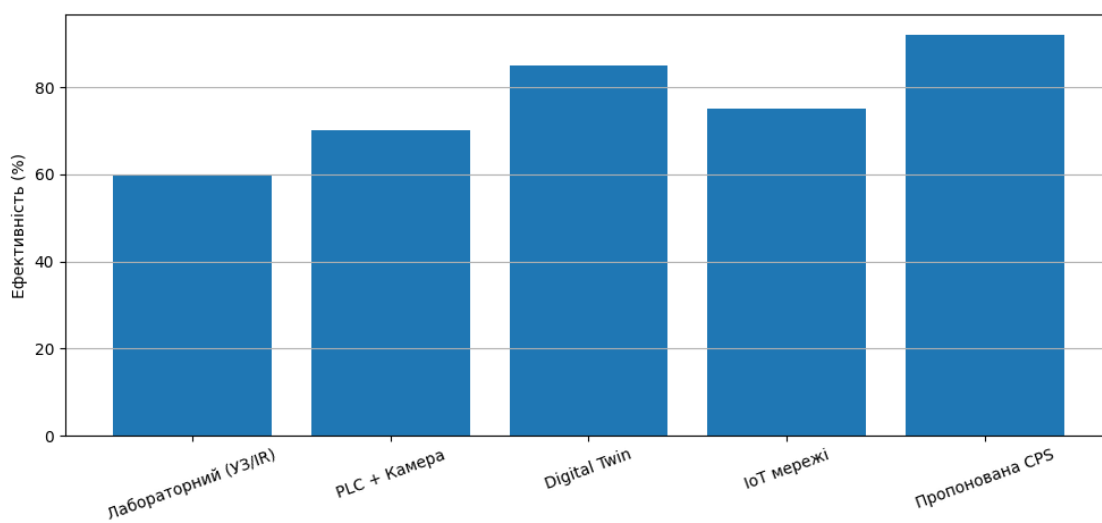


Рис. 2. Гістограма ефективності миття техніки

У розрізі оцінки рівня миття, вираженого у відсотках до еталонного стану, найнижчі значення (76%) спостерігалися у систем, що базуються виключно на статичному візуальному розпізнаванні (рис. 2). IoT-підходи досягли рівня приблизно 84%, цифрові двійники – 82%, тоді як CPS-система дозволила досягти результату 92%, демонструючи ефективність гнучкого керування режимами миття техніки в реальному часі.

Отже, аналітичні дані свідчать про перевагу CPS-підходу за всіма ключовими параметрами – швидкістю, точністю, адаптивністю і якістю миття техніки. Це підтверджує доцільність впровадження саме таких архітектур в умовах фермерських господарств, де оперативність і надійність мають вирішальне значення.

На основі виконаного аналізу встановлено, що є широкий практичний попит на повноцінну CPS-архітектуру, що забезпечили б автономний внутрішній алгоритм миття, адаптацію режимів, дистанційний моніторинг і екологічну безпечність. Саме ці межі дослідження і є фокусом нашої роботи. Зокрема, інтеграція сенсорних блоків, логіки прийняття рішень і виконавчої платформи в єдину систему, здатну оцінювати процес миття техніки в реальному часі, оптимізувати ресурси та адаптуватися до умов експлуатації – від ремонтної майстерні до відкритого поля.

Висновки. За результатами проведеного порівняльного аналізу встановлено, що серед розглянутих рішень для миття сільськогосподарської техніки найбільш ефективною є запропонована кіберфізична система (CPS), яка поєднує сенсорний моніторинг, адаптивне керування та нейромережеве прогнозування параметрів очищення.

Отримані результати показали, що рівень ефективності запропонованої CPS досягає 92 %, що перевищує лабораторні ультразвукові рішення на 32 % (60 %), системи на основі PLC і комп'ютерного зору на 22 % (70 %), IoT-мережі на 17 % (75 %) та цифрові двійники на 7 % (85 %). Одночасно запропонована система забезпечує найменший час виконання циклу очищення – 1,2 с, тоді як для лабораторних рішень цей показник становить 2,5 с, для PLC-систем – 3,0 с, для IoT-рішень – 1,8 с, а для цифрових двійників – 5,5 с.

Скорочення тривалості циклу миття відносно найбільш ресурсомісткого рішення Digital Twin становить $\Delta T = 4,3$ с, що відповідає зменшенню часу очищення майже у 4,6 рази. Порівняння показало, що цифрові двійники демонструють високий рівень ефективності (85%), однак характеризуються найбільшою тривалістю калібрування та складністю практичного впровадження. PLC-рішення забезпечують стабільну роботу в стандартних умовах, проте не адаптуються до зміни рівня забруднення. IoT-системи покращують швидкість реакції, однак їхня ефективність обмежується відсутністю повного замкненого циклу керування.

Таким чином, саме запропонована CPS забезпечує найкраще співвідношення між швидкістю, точністю очищення, адаптивністю та ресурсною ефективністю, що підтверджує доцільність її використання як основи для подальшого розвитку інтелектуальних систем миття сільськогосподарської техніки.

Список використаних джерел

1. Tryhuba A, Filkin O, Tryhuba I, Tatomyr A, Malanchuk O. Architecture of a cyber-physical system for washing agricultural machinery. *Res. Agr. Eng.* 2025;71(4): 69-79. doi: 10.17221/91-RAE.
2. Тригуба А. М., Фількін О. І. Принципи побудови засобів для миття сільськогосподарської техніки з використанням кіберфізичних систем. Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти та суспільства в XXI столітті: міжнародна науково-практична конференція, 23 січня 2025 р. Рівне: ЦФЕНД. 2025. С. 87-89.
3. Фількін О.І. , Тригуба А.М. Цифровий двійник кіберфізичної системи миття сільськогосподарської техніки. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. Вип. 12(43), ч. 1. С. 253-264.*
4. Тригуба, А., Фількін, О. Технологія миття сільськогосподарської техніки та метод оцінювання його ефективності за різних рівнів забруднення. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження, 2025. 29, С. 34–47.* <https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.34-47>.
5. Maldague X. P. V. *Infrared and Thermal Testing: Nondestructive Testing Handbook*. 3rd ed. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2019. 784 p.
6. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming: A review. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.
7. Liakos K. G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. Vol. 18(8). Article 2674. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18082674>.
8. Shamshiri R. R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Ahmad D., Shad Z. A review of autonomous navigation systems in agricultural tractors. *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 166. P. 104–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.11.005>.
9. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*. 2019. Vol. 90–91. Article 100315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>.