

Розділ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 631.363:631.354

ТЕХНОЛОГІЯ МИТТЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗА РІЗНИХ РІВНІВ ЗАБРУДНЕННЯ

Анатолій Тригуба, д. т. н., Орест Фількін, аспірант

Львівський національний університет природокористування,

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

e-mail: trianamik@gmail.com; filkin.orest@gmail.com

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.34-47>

Тригуба А., Фількін О. Технологія миття сільськогосподарської техніки та метод оцінювання його ефективності за різних рівнів забруднення

Виконано аналіз існуючих технологій та підходів до миття сільськогосподарської техніки. Встановлено, що, попри їхню поширеність, вони зосереджуються переважно на окремих показниках ефективності і не враховують комплексного впливу часу, енергетичних витрат та якості змивних вод. Обґрунтована доцільність удосконалення технології миття сільськогосподарської техніки та розроблення методу, який дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність процесу за різних рівнів забруднення. Удосконалена технологія миття сільськогосподарської техніки ґрунтується на поєднанні традиційних операцій із сучасними інтелектуальними підходами до контролю якості. Алгоритм цієї технології охоплює 18 кроків, що забезпечують використання машинного зору для початкової оцінки рівня забруднення та адаптацію послідовності операцій до фактичного стану поверхонь. Передбачено виконання додаткового миття для видалення стійких нашарувань та повторний контроль після основного очищення, що формує замкнений цикл процесу з урахуванням сенсорних даних, зменшення витрат ресурсів і підвищення екологічної безпеки. Розроблений метод оцінювання ефективності миття складається з 6 блоків і забезпечує комплексний підхід до аналізу результативності, поєднуючи критерії очищення поверхонь, якість змивних вод, тривалість операцій та витрати ресурсів в інтегральний індекс. Це дозволяє об'єктивно порівнювати режими миття, враховуючи технологічні й економічні аспекти, та формує підґрунтя для впровадження систем автоматизованого контролю. У результаті проведених досліджень виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R у складі з причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за трьох рівнів забруднення. Встановлено, що при низькому рівні інтегральний показник ефективності досяг найвищих значень завдяки оптимальному співвідношенню якості очищення та ресурсних витрат. Водночас за високого рівня забруднення ключовими чинниками зниження ефективності є надмірні витрати води та енергії, а також збільшена тривалість циклу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних кіберфізичних систем миття, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи з урахуванням фактичного рівня забруднення, витрат ресурсів та екологічних вимог.

Ключові слова: миття, сільськогосподарська техніка, ефективність, алгоритм, метод, забруднення, кіберфізична система.

Tryhuba A., Filkin O. Technology for washing agricultural machinery and a method for evaluating its effectiveness at different levels of contamination

An analysis of existing technologies and approaches to washing agricultural machinery has been carried out. It has been established that, despite their prevalence, they focus mainly on individual performance indicators and do not take into account the complex impact of time, energy consumption, and the quality of wash water. The feasibility of improving the technology for washing agricultural machinery and developing a method that allows for an objective assessment of the process effectiveness at different levels of contamination has been substantiated. The improved technology for washing agricultural machinery is based on a combination of traditional operations with modern intelligent approaches to quality control. The algorithm of this technology includes 18 steps that ensure the use of machine vision for the initial assessment of the level of contamination and the adaptation of the sequence of operations to the actual condition of the surfaces. Additional washing is provided to remove difficult stains and re-control after basic cleaning, which forms a closed cycle of the process, taking into account sensor data, reducing resource consumption and improving environmental safety. The developed method for evaluating washing efficiency consists of six blocks and provides a comprehensive approach to performance analysis, combining surface cleaning criteria, wash water quality, operation duration, and resource consumption into an integrated index. This allows for an objective comparison of washing modes, taking into account technological and economic aspects, and forms the basis for the implementation of automated control systems. As a result of the research, the washing efficiency of

a John Deere 6130R tractor with a Horsch Pronto 6 DC trailer seed drill was evaluated at three levels of contamination. It was found that at a low level, the integral efficiency index reached the highest values due to the optimal ratio of cleaning quality and resource consumption. At the same time, at a high level of contamination, the key factors reducing efficiency are excessive water and energy consumption, as well as increased cycle duration. Further research should be focused on the development of adaptive cyber-physical washing systems capable of optimizing operating modes in real time, taking into account the actual level of contamination, resource consumption, and environmental requirements.

Keywords: washing, agricultural machinery, efficiency, algorithm, method, pollution, cyber-physical system.

Постановка проблеми. У сільськогосподарських підприємствах широко використовується високопродуктивна техніка. Вона працює в умовах підвищеного пилового та ґрунтового навантаження. Трактори, комбайни та причіпні сільськогосподарські машини під час виконання технологічних операцій контактують із вологим ґрунтом, органічними залишками рослин, мінеральними добривами, а також мастильними матеріалами. Унаслідок цього на поверхнях цих машин утворюються щільні нашарування бруду різної природи. Це не лише погіршує технічний стан вузлів та агрегатів сільськогосподарської техніки, а й сприяє розвитку корозійних процесів [15]. Додатковим негативним чинником є накопичення патогенних мікроорганізмів у вологих місцях на техніці. Це створює ризики санітарного характеру, особливо під час транспортування зерна або ж кормів [13].

Традиційні технології миття сільськогосподарської техніки, які ґрунтуються на застосуванні ручних апаратів високого тиску, є недостатньо ефективними за різних рівнів забруднення. Для слабого шару пилу чи ґрунту витрата води часто є надмірною, тоді як за наявності значних масляних або комбінованих нашарувань механічного впливу струменя виявляється недостатньо [5]. Це зумовлює нерациональне використання водних і енергетичних ресурсів та збільшує час обслуговування техніки. Крім того, оператор не завжди може об'єктивно оцінити ступінь забруднення, що призводить до суб'єктивності у виборі режимів миття.

У сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяється використанню сенсорних систем та інтелектуальних алгоритмів для адаптації технологічних режимів до фактичних умов експлуатації [16]. Зокрема, застосування кіберфізичних систем, що поєднують датчики тиску, вологості, каламутності стоків і системи комп'ютерного зору, дозволяє формувати цифровий образ забруднення і на його основі керувати параметрами миття. Це створює передумови для суттєвого підвищення ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення при одночасній економії води та електроенергії [1]. Проте від-

сутній адаптивний метод кількісної оцінки результатів миття, що потребує подальших наукових досліджень. Отже, аналіз та розробка підходу до оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки із використанням кіберфізичних систем за різних рівнів забруднення є досить актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно миття сільськогосподарської техніки виконується з використанням апаратів високого тиску та піноутворювачів. Однак ефективність цих підходів значною мірою залежить від типу й рівня забруднення сільськогосподарської техніки, конструкційних особливостей машин та режимів подачі води або ж реагентів. В опублікованих наукових працях, які стосуються процесів миття техніки, їх автори наголошують на тому, що визначальною є кінетична енергія крапель. Надмірний тиск мийної рідини пошкоджує поверхні, недостатній – не забезпечує десорбції бруду. Також окремі науковці рекомендують діапазони тисків і витрат рідини, які в подальшому використовують в автоматизації процесу миття техніки [17]. Наявні практичні настанови для фермерських господарств щодо миття техніки. У них робиться акцент на безпеку, біозахист, а також черговість виконання окремих операцій щодо миття техніки. Основний цикл миття сільськогосподарської техніки передбачає виконання операцій «очистити – помити – продезінфікувати (за потреби)» [5; 7].

На сьогодні формується дослідницький напрям, де науковці використовують засоби комп'ютерного зору та сенсори для створення «карт забруднення», що забезпечують використання технологій адаптивного керування миттям техніки. Системи миття техніки з глибинним навчанням уже демонструють точне виявлення і сегментацію бруду на складних фонах. Це дозволяє адресно змінювати траєкторії струменів і режими подачі мийної рідини [5]. У кіберфізичних системах для АПК (CPS/CAS) використовують сенсорні мережі, моделі стану та виконавчі модулі. Їх поєднують через обчислювальний рівень, де алгоритми (нечітка логіка та машинне навчання (ML))

забезпечують адаптацію процесу до поточного стану об'єкта [3; 13]. Такі підходи можна використовувати для оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки. Зокрема, сенсори забруднення стоків та якості води (NTU, за ISO 7027) дають кількісні критерії завершення циклу та економії ресурсів [10; 101].

Аналіз нормативно-методичних матеріалів з біобезпеки підкреслює, що «очищення» і «дезінфекція» – різні, але послідовно взаємодоповнювані етапи. При цьому саме якісне зняття органічного шару визначає результат наступного знезараження. Для сільськогосподарських машин, які працюють із рослинною сировиною або ж ґрунтом, це зумовлює їх забруднення та порушує пожежну безпеку [11]. У публікаціях, які стосуються технологій миття техніки, їх автори описують мобільні автономні комплекси. Вони використовуються для миття техніки (окремі системи з пом'якшенням води, резервуаром і рекуперацією) і доцільні за наявності

окремих майданчиків для обслуговування. Однак вони не мають сенсорного зворотного зв'язку, що зумовлює потребу в досвідчених операторах [12].

З урахуванням зазначеного, існують сучасні тенденції, які зумовлюють перехід від статичних регламентів до адаптивних систем миття, які використовують:

- ✓ комп'ютерний зір для локалізації й ранжування плям із брудом;
- ✓ сенсори тиску / витрати / каламутності для онлайн-індикаторів ступеня очищення;
- ✓ обчислювальні моделі (CPS) для вибору режимів миття техніки.

Саме комбінація цих елементів створює підґрунтя для об'єктивного оцінювання ефективності миття за різних рівнів забруднення і для подальшої економії води, часу та енергії.

Ми виконали аналіз технологій миття сільськогосподарської техніки, результати якого представлено у табл. 1.

Таблиця 1. Аналіз існуючих технологій миття сільськогосподарської техніки
Table 1. Analysis of existing technologies for washing agricultural machinery

Технологія / рішення	Суть підходу	Переваги	Обмеження	Типові параметри / датчики	Джерела
Ручні апарати високого тиску	Струмінь води / розчину з регульованим тиском і насадками	Дешевизна, мобільність, універсальність	Результат залежить від оператора; ризик неповного миття або пошкодження при неправильному тиску	Тиск 1,4...2,1 МПа, витрата ~7,5 л/хв	[5, 8, 167]
Пінні системи (попереднє змочування)	Нанесення піни – пауза – змив	Краще розм'якшення органіки, менше механічних зусиль	Потребує реагентів і контролю концентрації	pH / концентрація, час експозиції 5...15 хв	[7, 19]
Стационарні пости / бокси	Виділене місце з уловлювачем, фільтрацією, можливо, із підігрівом	Організоване відведення стоків, безпека	Менша мобільність; інвестиції в інфраструктуру	Тиск 0,6...1,2 МПа, фільтрація, підігрів 30...40 °С	[7, 9]
Візуально кероване миття (DL / CV)	Камери + моделі DL для карти забруднень і локального змиву	Адресність обробки, економія води / часу	Потрібне калібрування освітлення; обчислювальні ресурси	2-4 IP-камери, модель сегментації (U-Net / YOLO), FPS 10-30	[6]
CPS-архітектури (сенсори + керування)	Злиття даних (тиск / витрата / NTU) – алгоритм – приводи	Адаптивні режими, автоматичне завершення циклу	Складність інтеграції; потреба в надійних датчиках	Датчики тиску / витрати, NTU за ISO 7027, MQTT / PLC	[2, 4, 18, 21]

Аналізуючи наведені в табл. 1 технології миття сільськогосподарської техніки, ми встановили, що класичні апарати високого тиску залишаються найбільш поширеним і доступним рішенням. Їх перевага полягає в мобільності та простоті експлуатації. Однак результат значною мірою залежить від досвіду оператора. За низького рівня забруднення така технологія є ефективною, однак при щільних мастильних чи комбінованих нашаруваннях її можливості суттєво обмежуються. Власне, відсутність об'єктивного зворотного зв'язку не дозволяє чітко оцінити ефективність миття сільськогосподарської техніки та своєчасно завершити процес, що призводить до перевитрати води й енергії.

Пінні системи забезпечують кращу підготовку поверхні до основного змивання. Особливо це стосується випадків, коли сільськогосподарська техніка забруднена органічними залишками чи налиплими добривами. Їхня сильна сторона – це рівномірне покриття й можливість зменшення механічного навантаження на деталі машини. Водночас використання мийних реагентів піднімає питання екологічної безпеки та потребує додаткового контролю концентрації. Тому вибір цієї технології доцільний за середніх і високих рівнів забруднення. Однак існує потреба в розробці методу оцінки ефективності миття сільськогосподарської техніки, адже суб'єктивна візуальна перевірка не дає точного та об'єктивного результату.

Стационарні пости є ефективнішим варіантом, оскільки це дозволяє централізовано відводити та очищати стічні води. Вони зручні в господарствах із великим парком техніки, але суттєвим обмеженням є низька мобільність та значні інвестиційні витрати. При цьому ефективність миття сільськогосподарської техніки залежить від оператора, адже автоматизований контроль рівня забруднення зазвичай відсутній. Тому стаціонарні комплекси варто розглядати в поєднанні із системами сенсорного моніторингу або машинного зору, які б забезпечили об'єктивну оцінку ефективності миття сільськогосподарської техніки.

Найбільш перспективним напрямом є застосування комп'ютерного зору, що дозволяє створювати карту забруднень і здійснювати локальне миття. Це забезпечує економію ресурсів і мінімізує час миття, особливо за низького або середнього рівня забруднення, коли можна уникнути повного миття сільськогосподарської техніки. Водночас такі системи вимагають високих обчислювальних ресурсів, належного калібрування камер та

стійкості до змінних умов освітлення. Саме тут виникає потреба в наявності чітких показників ефективності, які поєднують дані машинного зору зі сенсорами каламутності стоків чи витрати води.

Кіберфізичні системи, що інтегрують датчики й алгоритми керування, фактично задають новий стандарт оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки. Їх перевагою є те, що вони здатні працювати адаптивно – система завершує цикл лише тоді, коли показники чистоти досягають заданого порогу. Таким чином, з одного боку, забезпечується необхідна якість миття техніки, а з іншого – оптимізуються витрати ресурсів. Це особливо важливо у випадках високого рівня забруднення, коли повторні цикли миття є неминучими, і саме адаптивна система може визначити оптимальну кількість цих циклів.

Отже, виконаний аналіз показує, що для розробки методу оцінки ефективності миття сільськогосподарської техніки важливо враховувати специфіку кожної технології. Традиційні методи доцільно застосовувати в поєднанні зі сенсорними чи візуальними системами контролю. Тоді як перспективні рішення на основі кіберфізичних систем дають змогу формалізувати критерії оцінки та автоматизувати процес миття. Саме вони створюють основу для визначення ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення і відкривають шлях до стандартизації підходів у цьому напрямі.

Постановка завдання. Для підвищення ефективності технологічних процесів обслуговування та експлуатації сільськогосподарської техніки пропонується алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення, який є інноваційним інструментом оцінювання та оптимізації стану забруднення цієї техніки. Запропонована технологія ґрунтується на використанні диференційованих режимів миття, що враховують тип і ступінь забруднення, фізико-хімічні характеристики відкладеного бруду та вимоги до кінцевої чистоти поверхонь, які оцінюються за допомогою машинного зору. Це дозволяє зменшити витрати води, мийних реагентів і часу, одночасно забезпечуючи належну якість очищення та підвищення безпеки експлуатації машин.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні алгоритму технології миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення, а також розробленні методу кількісного оцінювання ефективності миття з урахуванням комплексних критеріїв. До таких критеріїв належать рівень видалення

органічних і мінеральних складових бруду, зміна показників забрудненості та рН змивних вод, тривалість операцій і витрати ресурсів. Результати дослідження спрямовані на створення методологічної основи для раціональної організації процесів миття сільськогосподарської техніки та подальшого розроблення і впровадження систем автоматизованого контролю їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Миття сільськогосподарських машин є важливою складовою системи їх технічного обслуговування, оскільки цей процес забезпечує не лише естетичний вигляд, а й безпеку експлуатації, збереження технічних характеристик та зниження ризиків поширення збудників хвороб. Теоретичні основи процесу миття ґрунтуються на принципах масообміну та гідродинаміки, які визначають взаємодію потоку мийного середовища з поверхнею агрегату. Згідно із законом Ньютона для в'язких середовищ, зусилля, що виникають під час змиву, залежать від в'язкості рідини, швидкості її руху та кута атаки струменя:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

де τ – зсувне напруження, Па; μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; $\frac{du}{dy}$ – градієнт швидкості у напрямку нормалі до поверхні.

Для випадку дії струменя під кутом θ до поверхні, ефективна сила змиву F на одиницю площі (тиск з урахуванням кута атаки) описується формулою

$$F = \tau \cdot \cos \theta = \mu \cdot \frac{du}{dy} \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

де θ – кут атаки струменя відносно нормалі до поверхні.

Таким чином, зусилля змиву прямо пропорційне динамічній в'язкості середовища та швидкісному градієнту потоку, а також залежить від геометрії взаємодії струменя з поверхнею.

Отже, вибір параметрів тиску та витрати води є основою для досягнення ефективного миття сільськогосподарської техніки.

Рівень забруднення сільськогосподарської техніки визначається множиною чинників – вид оброблюваної культури, погодні умови, ступень прилипання часток ґрунту та органічних решток до техніки, наявність мастильних матеріалів чи продуктів зносу техніки тощо [13; 21]. Умовно можна виокремити три основні види забруднення сільськогосподарської техніки: 1) слабе (пил, сухі

нашарування); 2) середне (суміш органіки та вологи, що утворює липкий шар); 3) сильне (грубі нашарування ґрунту та залишків рослин з вмістом органічних сполук). Для кожного з цих видів забруднення характерні різні режими миття, які потребують адаптації часу, тиску, температури та використання додаткових реагентів.

Згідно зі сучасними дослідженнями, ефективність миття можна описати коефіцієнтом очищення:

$$E = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де m_0 – маса забруднень до миття; m_1 – маса залишкових забруднень після обробки.

Цей показник дозволяє кількісно оцінити вплив різних технологічних режимів на результат миття сільськогосподарської техніки.

Важливим теоретичним аспектом є також хімічна взаємодія мийних розчинів із забрудненнями на поверхні техніки. Поверхнево-активні речовини знижують міжфазну напругу, що сприяє відриву частинок від поверхні металу або полімерних матеріалів сільськогосподарської техніки. Для органічних нашарувань доцільно застосовувати піноутворювальні реагенти з подальшою паузою для розм'якшення бруду. Тоді як для мінеральних забруднень ефективними є струмені підвищеного тиску та підвищена температура води.

На основі означених положень та доцільності використання машинного зору розроблено алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення (рис. 1). Він передбачає виконання 19 кроків.

Крок 1. Початковий огляд на основі машинного зору. На цьому етапі система формує зображення поверхні машини за допомогою камер. Отримані дані аналізуються для виявлення ділянок забруднень. Для кількісної оцінки вводиться показник:

$$Z = \frac{S_z}{S_t}, \quad (4)$$

де S_z – площа забруднених ділянок, м²; S_t – загальна площа поверхні, м².

Крок 2. Оцінка рівня забруднення. Після цього виконується класифікація рівня забруднення за трьома категоріями – низький ($Z < 0.3$), середній ($0.3 \leq Z < 0.6$), високий ($Z \geq 0.6$). Це визначає подальший режим роботи мийної установки.

Крок 3. Перевірка умови, чи наявний високий рівень забруднення. Алгоритм виконує логічну умову:

$$High = \begin{cases} 1, & Z \geq 0.6, \\ 0, & Z < 0.6. \end{cases} \quad (5)$$

Якщо рівень високий, активується сухе очищення, якщо ні – перехід одразу до етапу підготовки.

Крок 4. Сухе очищення. Видаляються грубі залишки ґрунту й рослинності механічними засобами (щітки, шкребки, стиснене повітря). Це зменшує навантаження на систему миття.

Крок 5. Підготовка до миття. Закриваються чутливі електричні вузли, перевіряється система безпеки, оператор підтверджує готовність.

Крок 6. Попереднє змочування або нанесення піни. На поверхню рівномірно подається вода або мийний розчин.

Крок 7. Експозиція. Витримка розчину протягом $t_{exp} \in [5;15]$ хв, що забезпечує розм'якшення стійких нашарувань із брудом.

Крок 8. Миття високим тиском. Основний процес змивання виконується з регулюванням витрати та тиску:

$$Q = Q_0 + k_Q \cdot Z, \quad (6)$$

$$P = P_0 + k_P \cdot Z, \quad (7)$$

де Q_0 , P_0 – базові параметри; k_Q , k_P – коефіцієнти, що враховують інтенсивність забруднення.

Крок 9. Перевірка умови, чи залишилися стійкі плями. Порівнюється залишкова площа забруднення:

$$\frac{Z_1}{Z_0} > \delta, \quad (8)$$

де Z_1 – площа плям із брудом після миття, m^2 ; Z_0 – початкове значення площі плям із брудом, m^2 ; δ – допустимий поріг (наприклад, 0.1). Якщо умова (8) виконується, запускається додаткове очищення.

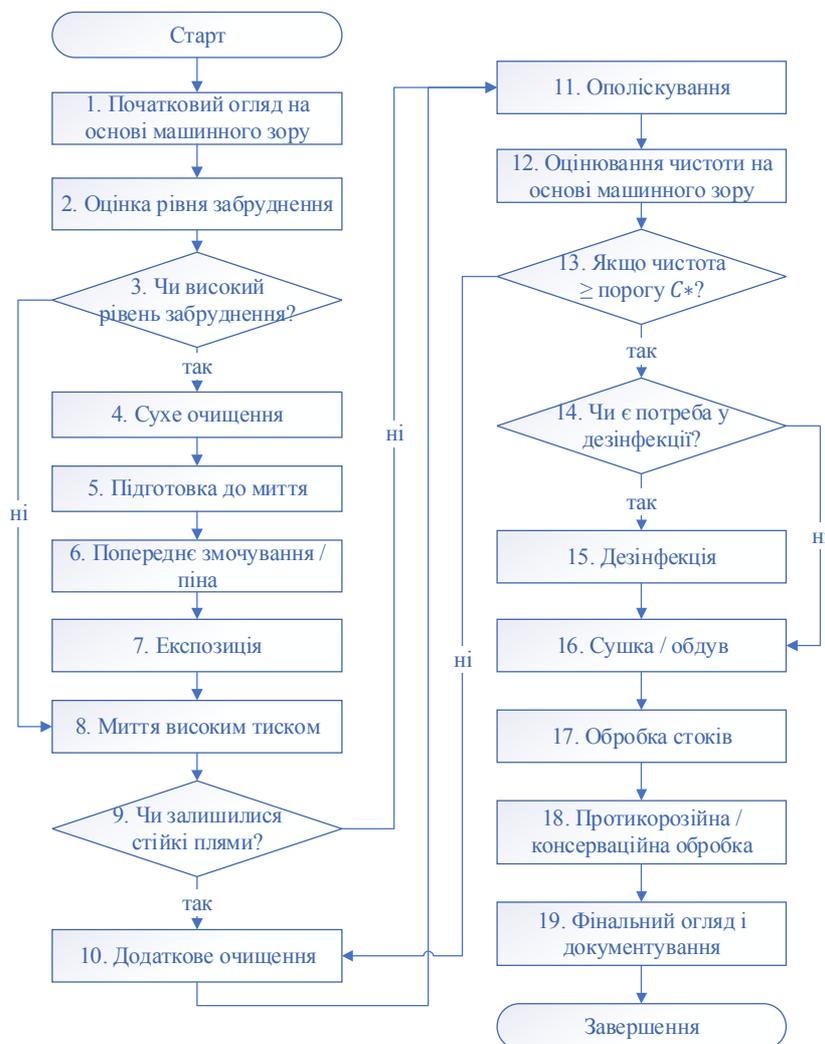


Рис. 1. Алгоритм технології миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення
Fig. 1. Algorithm for washing agricultural machinery under different levels of contamination

Крок 10. Додаткове очищення. Локальний змив або застосування щіток у зонах із підвищеною стійкістю нашарувань.

Крок 11. Ополіскування. Подання чистої води для видалення залишків розчинів та бруду.

Крок 12. Оцінювання чистоти на основі машинного зору. У цьому кроці оцінювання чистоти поверхні здійснюється на основі комп'ютерного аналізу за наданими зображеннями. Для цього вводиться індекс машинного зору:

$$C_{mv} = 1 - \frac{D_n}{D_o}, \quad (9)$$

де D_o – площа виявлених забруднень, визначена алгоритмом сегментації перед миттям; D_n – площа забруднень після миття.

Тобто формула (9) описує лише оцінку за візуальними ознаками (машинним зором), пов'язану лише з площею забруднення на поверхні техніки.

Крок 13. Перевірка умови, чи чистота більша або рівна пороговому значенню C^ .* Умова набуває вигляду:

$$C \geq C^*, \quad (10)$$

де C^* – допустимий рівень чистоти техніки (наприклад, 0,9). Якщо умова (10) виконується – перехід до дезінфекції. Якщо ні – цикл повторюється.

Крок 14. Перевірка умови, чи є потреба дезінфекції.

Крок 15. Дезінфекція (за потреби). Виконується нанесення дезінфекційних розчинів для зниження мікробіологічних ризиків.

Крок 16. Сушка або обдув. Видалення залишків вологи за допомогою компресорів або вентиляторів.

Крок 17. Обробка стоків. Відстоювання, фільтрація та утилізація використаної води.

Крок 18. Протикорозійна чи консерваційна обробка. Нанесення спеціальних складів для захисту металевих поверхонь від корозії.

Крок 19. Фінальний огляд і документування. Фотофіксація результату, логування параметрів (тиск, витрата, час, NTU), формування звіту.

У результаті сільськогосподарська машина вважається підготовленою до подальшої експлуатації.

Описаний алгоритм технології миття сільськогосподарських машин, представлений на рис. 1, окреслює послідовність виконання основних операцій залежно від рівня забруднення. Він дає можливість представити загальну логіку процесу із використанням машинного зору. Водночас сам

алгоритм не забезпечує кількісної оцінки досягнутої якості миття. Окрім того, він не дозволяє об'єктивно порівнювати різні режими чи технологічні операції. Саме тому виникає потреба в розробці методу, що ґрунтується на комплексних критеріях і враховує не лише ступінь видалення бруду з поверхні сільськогосподарської техніки, а й хімічні характеристики мийної речовини, витрати ресурсів та тривалість операцій.

Запропонований метод кількісного оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення є логічним продовженням алгоритму його технології. Вона враховує послідовність дій через систему вимірюваних показників і формулює інтегральний індекс, який використовується для автоматизованого контролю кіберфізичних систем.

В основі запропонованого методу є визначення інтегрального показника ефективності миття сільськогосподарської техніки, який враховує не лише зменшення площі забруднень, а й інші параметри. До них належать хімічні характеристики змивних вод, витрати часу та споживання ресурсів. Це дозволяє забезпечити об'єктивну оцінку та формувати основу для впровадження автоматизованих систем контролю. Для цього насамперед аналізується ступінь видалення бруду з поверхні техніки, який визначається за формулою

$$E_z = 1 - \frac{Z_n}{Z_o}, \quad (11)$$

де Z_o – початковий індекс забрудненості; Z_n – залишковий показник після миття.

Додатково враховуються характеристики змивних речовин, адже саме вони відображають інтенсивність процесу та ступінь видалення органіки і мінералів. Зокрема, визначається зміна каламутності та кислотно-лужного балансу змитої речовини. Для цього вводиться індекс:

$$E_w = \frac{C_o - C_t}{C_o}, \quad (12)$$

де C_o – початковий рівень забрудненості води, NTU або мг/л; C_t – значення рівня забрудненості води після завершення процесу.

Значення рН додатково використовується для контролю залишків мийних засобів, оскільки відхилення від нейтрального середовища свідчить про недостатнє ополіскування.

Для ефективної організації процесів миття велике значення має тривалість виконання операцій. Час, витрачений на повний цикл, порівнюється з гранично допустимим значенням, яке визначається технологічними регламентами:

$$E_t = 1 - \frac{t}{t_{max}} \quad (13)$$

Якщо миття сільськогосподарської техніки займає занадто багато часу, індекс знижується, навіть за умови досягнення високого рівня чистоти. Це зумовлює пошук оптимального співвідношення між якістю та швидкістю миття сільськогосподарської техніки.

Не менш важливими є чинники витрат ресурсів – води та електроенергії. Для їх інтеграції у спільну систему оцінювання використовується формула

$$E_r = 1 - \frac{\alpha Q + \beta W}{Q_{max} + W_{max}}, \quad (14)$$

де Q – витрата води; W – споживання енергії; α і β – вагові коефіцієнти залежно від того, який ресурс є вагомим для конкретного господарства.

Узагальнений індекс ефективності миття сільськогосподарської техніки визначається як зважена сума часткових показників:

$$E_{int} = w_1 E_z + w_2 E_w + w_3 E_t + w_4 E_r, \quad (15)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти впливу чинників на ефективність миття сільськогосподарської техніки.

При цьому $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$. Вибір ваг дозволяє адаптувати процес оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин до конкретних виробничих умов. Зокрема, у разі жорстких санітарних вимог більшу вагу отримують параметри чистоти та хімічних показників, а в умовах дефіциту води основним стає ресурсний індекс.

Структура методу оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин представлена у вигляді схеми (рис. 2), де відображено, як вхідні дані із сенсорів та системи машинного зору об'єднуються в обчислювальному модулі, а на виході формується інтегральний індекс ефективності.

Розглянемо структурну схему методики оцінювання ефективності миття сільськогосподарських машин за різних рівнів забруднення, яка складається з шести блоків.

Блок 1. Дані зі сенсорів забрудненості (каламутність, рН). Цей блок збирає показники з датчиків, встановлених у системі збору та відведення змивної води. Значення каламутності (NTU) характеризує концентрацію завислих часток, тоді як рН дає змогу оцінити нейтралізацію мийних засобів та наявність кислотних або лужних залишків.

Блок 2. Машинний зір (аналіз площі забруднення). Використання камер та алгоритмів комп'ютерного аналізу зображень дозволяє визначати частку поверхні, покритої органічними чи мінеральними нашаруваннями. Це дає змогу кількісно оцінювати індикатор Z , який використовується для подальшого розрахунку ефективності очищення.

Блок 3. Час і тривалість операцій. Цей блок забезпечує фіксування загальної тривалості циклу миття сільськогосподарської техніки від початкового огляду до фінального ополіскування. Порівняння фактичного часу з нормативним дозволяє визначати індекс E_t , що враховує продуктивність процесу миття.

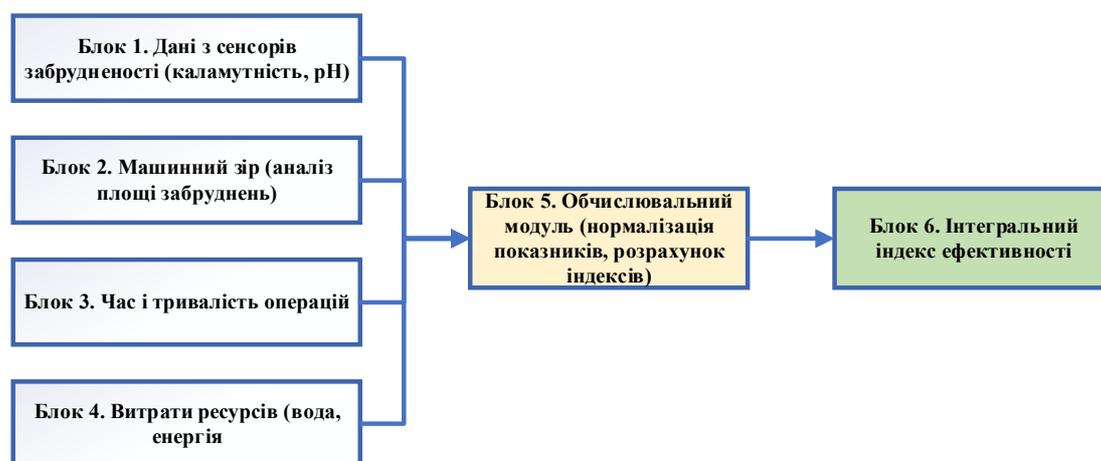


Рис. 2. Структурна схема методу оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення

Fig. 2. Structural diagram of the method for evaluating the effectiveness of washing agricultural machinery under different levels of contamination

Блок 4. Витрати ресурсів (вода, енергія). У цьому блоці розраховується кількість використаної води та електроенергії. Отримані дані нормалізуються, щоб оцінити ефективність витратних компонентів, які в багатьох господарствах є обмеженими.

Блок 5. Обчислювальний модуль (нормалізація показників, розрахунок індексів). Він є основним блоком. Тут здійснюється обробка даних з усіх попередніх блоків, нормалізація значень у межах від 0 до 1 та формування часткових індексів E_z, E_w, E_t, E_r . Після цього за допомогою вагових коефіцієнтів розраховується інтегральний індекс ефективності.

Блок 6. Інтегральний індекс ефективності. У цьому блоці визначається індекс E_{int} , який є вихідним результатом оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення. Він є безрозмірною величиною, що показує загальну ефективність миття з урахуванням усіх вищеописаних критеріїв. Якщо E_{int} перевищує встановлений поріг E_{int}^* , то миття сільськогосподарської техніки вважається успішним, а не то запускається повторний або локальний цикл миття сільськогосподарської техніки.

На підставі використання запропонованого методу виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R із причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за різних рівнів забруднення: 1) після легкого пилу на сухому ґрунті (низький); 2) після оранки на вологому ґрунті (середній); 3) після переміщення агрегату та робіт на перезволоженому ґрунті за умов випадіння опадів перед поверненням до господарства, із наявністю залишків добрив на сошниках (високий рівень).

Для кожного сценарію визначали площу забруднених поверхонь до та після миття машинно-тракторного агрегату, аналізували каламутність і рН змивної води, фіксували тривалість циклу та витрати води й електроенергії. Для забезпечення коректності оцінювання ефективності миття було проведено експериментальні вимірювання параметрів забруднення та процесу очищення під час миття трактора John Deere 6130R із причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC. Усі вимірювання виконувалися за уніфікованою процедурою, що передбачає визначення площі забруднення, характеристик змивної рідини та показників витрат ресурсів. Для визначення початкових і залишкових площ забруднених зон використовувався метод машинного зору з подальшою сегментацією зображень. Фотофіксація здійснювалася камерою

Sony Alpha A6000 (24 Мп) під кутом 90° відносно поверхні, при стабільному освітленні 5500 К. Оброблення виконували у середовищі Python / OpenCV. Площі визначалися за алгоритмом порогової сегментації та морфологічної фільтрації, після чого контури забруднень перераховувалися у реальні площі на основі метричного калібрування. Показники NTU вимірювали портативним турбідиметром Nach 2100Q, який забезпечує діапазон 0...1000 NTU з точністю $\pm 2\%$. Зразки відбирали на початку та в кінці циклу миття з ємності для збору стоків. Перед вимірюванням виконувалося калібрування приладу стандартними розчинами формазину. Рівень кислотності визначали цифровим рН-метром Hanna HI9812-5, призначеним для польових вимірювань. Електрод перед тестуванням промивали дистильованою водою та калібрували у буферних розчинах рН 4.01, 7.00 і 10.01. Вимірювання проводили негайно після відбору проби. Витрати води визначали за допомогою імпульсного водолічильника Powogaz JS 1.6, під'єданого на вході мийної установки. Дані знімали у вигляді накопиченого об'єму за цикл. Споживання електроенергії фіксувалося окремим лічильником DDSU666-H, що дозволяє реєструвати миттеву та сумарну активну енергію під час роботи насоса, компресора та системи освітлення. Час виконання операцій фіксували секундоміром та дублювали у лог-файлі програми керування мийною установкою. Отримані результати розрахунку ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC наведено в табл. 1.

Для коректного визначення узагальненого індексу ефективності миття техніки було визначено числові значення вагових коефіцієнтів, які характеризують відносну важливість кожного часткового індикатора для досліджуваного технологічного процесу. Вибір ваг ґрунтувався на поєднанні експертних оцінок (три фахівці з виробничого підрозділу господарства) та аналізі нормативних вимог щодо санітарного стану сільськогосподарської техніки. З урахуванням того, що пріоритетним завданням є досягнення необхідної чистоти техніки та дотримання санітарних вимог, найбільшу питому вагу було надано показникам очищення поверхні та якості змивної рідини. Менший, але суттєвий внесок мають тривалість миття та витрати ресурсів, оскільки їх відхилення впливають на економічну доцільність операцій. Вагові коефіцієнти було прийнято такими для індексу: 1) очищення поверхні – $w_1 = 0,4$; 2) каламутності та хімічної якості змивної води – $w_2 = 0,25$; 3) тривалості миття – $w_3 = 0,2$; 4)

витрат води та електроенергії – $w_4 = 0,15$. Сума вагових коефіцієнтів становить одиницю:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1,00.$$

Запропоновані значення ваг відображають реальні виробничі пріоритети. Зокрема, забезпечення чистоти та дотримання хімічної безпечності є критичним для санітарної експлуатації, тоді як ресурсомісткість і тривалість циклу миття розглядаються як оптимізаційні параметри другого рівня. У разі зміни технологічних умов коефіцієнти адаптуються до процесу миття техніки, однак у наведеному дослідженні використані саме зазначені значення.

Таблиця 2. Результати розрахунку ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC

Table 2. Results of calculating the washing efficiency of a John Deere 6130R tractor with a Horsch Pronto 6 DC seed drill

Рівень забруднення	Ситуація	Z_o	Z_n	E_z	Каламутність (NTU), до миття → після миття	E_w	Час, хв	E_t	Вода, л / енергія, кВт·год	E_r	E_{int}
Низький	Пил після сухого поля	0,20	0,02	0,90	220 → 30	0,86	15/30	0,50	100 / 0,5	0,70	0,80
Середній	Робота на вологому ґрунті	0,45	0,08	0,82	350 → 65	0,81	28/30	0,07	200 / 1,0	0,40	0,63
Високий	Із наявністю залишків добрив на сошниках	0,70	0,15	0,79	480 → 120	0,75	38/40	0,05	280 / 1,5	0,15	0,53

Для середнього рівня забруднення спостерігається помітне падіння інтегрального показника до $E_{int} = 0,63$. Хоча індекс видалення нашарувань і залишився на прийнятному рівні $E_z = 0,82$, істотне зростання часу миття (28 хв) і витрати ресурсів негативно позначилися на результаті. Це свідчить про потребу у використанні попередніх етапів. Наприклад, механічного очищення або піноутворення, що дозволить знизити навантаження на основне миття високим тиском.

Найгірші показники зафіксовані для високого рівня забруднення, де інтегральний індекс не перевищив $E_{int} = 0,53$. Попри те, що майже 79 % забруднень було видалено, саме значні витрати води (280 л) та тривалість процесу (38 хв) істотно знизили загальну ефективність. У цьому випадку доцільно застосовувати комбіновані рішення. Зокрема, поєднання сухого очищення, використання мийних реагентів і адресного змиву найбільш забруднених ділянок за допомогою машинного зору. Це дозволить скоротити витрати та зменшити загальний час роботи.

Отримані дані підтверджують, що за низького і середнього рівнів забруднення достатньо застосовувати стандартні режими миття, тоді як

Аналіз результатів, наведених у табл. 2, показує, що ефективність миття сільськогосподарської техніки суттєво залежить від початкового рівня забруднення. У разі легкого пилу на поверхні трактора та сівалки вдалося досягти високого індексу очищення $E_z = 0,9$, а інтегральний показник ефективності становив $E_{int} = 0,8$. Це зумовлено невеликими витратами часу (15 хв) та помірним використанням води й електроенергії. Такий сценарій можна вважати оптимальним з погляду співвідношення витрат і результатів.

для високого рівня забруднення потрібна оптимізація процесу з акцентом на підготовчі операції та раціональне використання ресурсів.

У процесі оцінювання ефективності миття техніки спостерігається взаємозв'язок між тривалістю циклу, витратою води та споживанням електроенергії. Чим довше триває миття, тим більшим є сумарне споживання ресурсів. Разом з тим час операції виконує не лише допоміжну функцію, а є самостійною характеристикою технологічного процесу, що впливає на продуктивність мийних робіт, здатність господарства обслуговувати наявну кількість техніки за добу та відповідність регламентам технічної експлуатації. Саме тому час миття доцільно розглядати як окремий чинник. Його роль виходить за межі простого відображення обсягів ресурсів. Навіть за невеликих витрат води й електроенергії надмірна тривалість операції знижує продуктивність системи та є непринятною в польових умовах. Час є обмежувальним параметром для технологічних процесів, де слід забезпечити швидку зміну агрегатів або їхнє повернення до виконання польових робіт. Включення тривалості циклу миття до загальної моделі дає можливість комплексно оцінювати якість миття, поєднуючи санітарні вимоги, ресурсну ефективність та

оперативність технологічних операцій. Водночас витрати води та електроенергії, незважаючи на часткову залежність від часу, залишаються окремими показниками, оскільки вони відображають технічні характеристики обладнання (продуктивність насоса, тиск, інтенсивність подачі) і можуть змінюватися незалежно від загальної тривалості циклу миття.

На рис. 3 наведено діаграму, що відображає часткові індекси E_z, E_w, E_t, E_r для кожного сценарію миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC. Вона наочно показує, що за високого рівня забруднення основним чинником зниження інтегрального показника є низькі значення E_t і E_r , тоді як якість миття поверхонь E_z залишається досить високою.

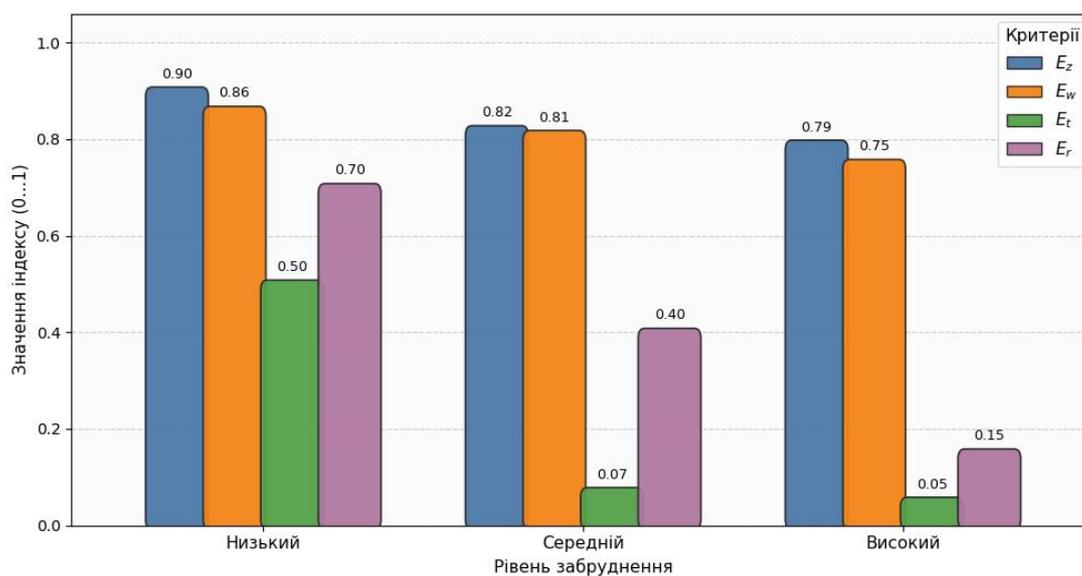


Рис. 3. Тенденції зміни часткових індексів ефективності миття для різних рівнів забруднення
Fig. 3. Trends in changes of partial washing efficiency indices for different levels of contamination

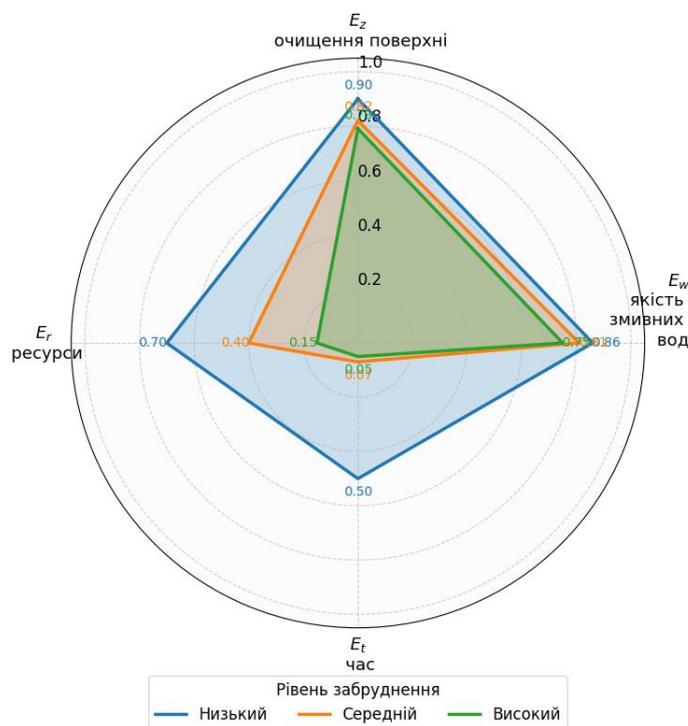


Рис. 4. Радар-графік порівняння ефективності миття за всіма критеріями для різних рівнів забруднення
Fig. 4. Radar chart comparing washing performance across all criteria for different levels of contamination

Для більш комплексної оцінки ефективності миття трактора John Deere 6130R із сівалкою Horsch Pronto 6 DC було побудовано радар-графік (рис. 4). Він дозволяє одночасно порівняти ефективність миття за всіма критеріями, оскільки відображає баланс між якістю миття, очищенням змивних вод, тривалістю процесу та витратами ресурсів.

Представлений графік відображає, що за низького рівня забруднення інтегральний показник $E_{int} = 0,8$ демонструє оптимальний баланс – висока якість очищення, помірні витрати ресурсів і короткий час миття техніки. Для середнього рівня забруднення інтегральний показник знижується $E_{int} = 0,63$ в основному через збільшення тривалості циклу миття та споживання води. У разі високого рівня забруднення спостерігається найменше значення інтегрального показника $E_{int} = 0,53$, що зумовлено значними витратами ресурсів та часу. Це свідчить про потребу вдосконалення системи подачі води та локалізації змиву.

Запропонований метод оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення ґрунтується на комплексному підході. Він враховує не лише ступінь видалення нашарувань з поверхонь, а й якість змивних вод, тривалість виконання операцій та витрати ресурсів. Використання інтегрального показника ефективності дозволяє поєднати окремі критерії в єдину систему, що забезпечує об'єктивність і системність результатів у різних сценаріях миття техніки. Використання запропонованого методу створює передумови для розроблення систем автоматизованого контролю на основі сенсорних технологій та машинного зору, що дає змогу підвищити рівень біобезпеки, знизити витрати води та енергії, а також оптимізувати організацію процесів миття техніки у сільськогосподарських підприємствах. У подальшому цей метод є основою для впровадження кіберфізичних систем, здатних у режимі реального часу адаптувати режими миття до фактичного стану забруднення сільськогосподарської техніки, що підвищить ефективність та екологічну безпечність процесів миття сільськогосподарської техніки.

Висновки. 1. Виконаний аналіз існуючих технологій та підходів до миття сільськогосподарської техніки показав, що, попри їхню поширеність, вони мають як переваги, так і суттєві обмеження. Зокрема, більшість методів зосереджується на окремих показниках, таких як витрати води чи ступінь очищення поверхонь. Однак вони

не враховують комплексного впливу часу, енергетичних витрат та якості змивної води. Це свідчить про доцільність удосконалення технології миття сільськогосподарської техніки та розробки методу, який дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність зазначеного процесу за різних рівнів забруднення.

2. Удосконалена технологія миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення ґрунтується на поєднанні традиційних операцій миття із сучасними інтелектуальними підходами до контролю якості. Запропонований алгоритм цієї технології (див. рис. 1) передбачає виконання 18 кроків, які базуються на використанні машинного зору для початкового огляду техніки та оцінювання рівня забруднення, що дозволяє адаптувати послідовність операцій миття сільськогосподарської техніки залежно від фактичного стану її поверхонь. Важливою особливістю цієї технології є інтеграція блоку додаткового миття для видалення стійких плям, а також застосування повторного контролю після основного миття. Це дає змогу забезпечити високий рівень чистоти перед наступними операціями – дезінфекцією, сушінням, обробкою стоків та протикорозійною консервацією. Зазначена технологія формує замкнений цикл із гнучкою адаптацією до рівня забруднення, використанням сенсорних даних та машинного зору для оцінювання якості виконаних операцій, що забезпечує раціональне використання ресурсів, скорочення часу та підвищення екологічної безпеки процесу миття сільськогосподарської техніки.

3. Розроблений метод оцінювання ефективності миття сільськогосподарської техніки за різних рівнів забруднення складається з шести блоків, які забезпечують комплексний підхід до аналізу результативності процесу, поєднуючи критерії оцінювання видалення нашарувань, зміни характеристик змивних вод, тривалості операцій та витрат ресурсів у єдиний інтегральний індекс. Такий підхід дозволяє об'єктивно порівнювати різні режими миття, враховуючи не лише кінцевий візуальний результат, а й технологічні та економічні аспекти. Запропонований метод лежить в основі впровадження систем автоматизованого контролю та адаптивного керування процесом миття сільськогосподарської техніки, які здатні коригувати параметри зазначеного процесу в реальному часі залежно від рівня забруднення та умов експлуатації техніки. Застосування цього методу сприяє підвищенню ефективності використання водних і енергетичних ресурсів, забезпечує задану якість миття та зростання екологічної й біобезпекової складових зазначеного процесу.

4. На підставі використання запропонованого методу виконано оцінювання ефективності миття трактора John Deere 6130R в агрегаті з причіпною сівалкою Horsch Pronto 6 DC за різних рівнів забруднення. Встановлено, що за низького рівня забруднення (після легкого пилу на сухому ґрунті) інтегральний показник ефективності миття становив $E_{int} = 0,8$, що відображає оптимальне поєднання високого ступеня очищення поверхні ($E_z = 0,9$) і помірних витрат ресурсів ($E_r = 0,7$). Для середнього рівня забруднення (після оранки на вологому ґрунті) значення інтегрального показника знизилося до $E_{int} = 0,63$ при збереженні високого рівня очищення поверхні ($E_z = 0,82$), але за значного збільшення часу операцій ($E_t = 0,07$) та витрат води й енергії ($E_e = 0,4$). Найнижча ефективність процесу миття спостерігається за високого рівня забруднення (після переміщення агрегату на перезволоженому ґрунті за умов випадіння опадів та за наявності залишків добрив на сошниках), де інтегральний показник ефективності становив лише $E_{int} = 0,53$. У цьому випадку, попри високий ступінь очищення ($E_z = 0,79$), спостерігаються низькі значення індексів часу ($E_t = 0,05$) та ресурсів ($E_r = 0,15$), що значно знижує загальну ефективність процесу миття техніки. Отримані кількісні результати підтверджують, що найважливішими чинниками за високого рівня забруднення техніки є надмірні витрати води та енергії, а також тривалість циклу, що вимагає оптимізації підготовчих операцій і режимів миття сільськогосподарської техніки. Подальші дослідження слід проводити в напрямі розроблення адаптивних кіберфізичних систем миття сільськогосподарської техніки, здатних у реальному часі оптимізувати режими роботи з урахуванням рівня забруднення, витрат ресурсів та екологічних вимог.

Бібліографічний список

1. Крупецьких В. П., Домарацький О. О., Ревтьо О. Я. Ефективність використання машинно-тракторних агрегатів у рослинництві. *Таверійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 96–104. doi: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.13>.
2. Adaptive Pressure Control System Based on the Maximum Power Transfer Theorem for Water Supply Systems / T. K. S. Flores, L. A. F. Magalhães, P. C. Cortez, A. H. Brito. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 3. doi: <https://doi.org/10.3390/s21155156>.
3. Application of sarima models in information systems forecasting seasonal volumes of food raw materials of procurement on the territory of communities / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. No. 3295. P. 64–75.
4. Batyuk B., Dyndyn M. Coordination of configurations of complex organizational and technical systems for development of agricultural sector branches. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 2, No. 2. P. 63–76.
5. DeCooman C. Prioritize safety when using pressure washers. *AgProud*. 2023. URL: <https://www.agproud.com/articles/58447-prioritize-safety-when-using-pressure-washers>. (дата звернення: 21.01.2025).
6. Deep learning for automated visual inspection in manufacturing and maintenance: A survey of open-access papers / N. Hütten et al. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 11. doi: <https://doi.org/10.3390/asi7010011>.
7. Evaluation of cleaning and disinfection protocols for commercial farm equipment following a foreign animal disease outbreak / Boe T. et al. *Remediation Journal*. 2023. Vol. 33, No. 3. P. e21762. doi: <https://doi.org/10.1002/rem.21762>.
8. Forecasting the risk of the resource demand for dairy farms basing on machine learning / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. No. 2631. P. 327–340.
9. Innovative carwash wastewater treatment and reuse through nature-based solutions / A. Torrens, P. Sepúlveda-Ruiz, M. Aulinas, M. Folch. *Clean Technologies*. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 12. doi: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7010012>.
10. In-situ optical water quality monitoring sensors-applications, challenges, and future opportunities / M. Kumar, K. Khamis, R. Stevens, D. M. Hannah. *Frontiers in Water*. 2024. No. 6. P. 1380133. doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>.
11. ISO 7027-1:2016. Water quality – Determination of turbidity – Part 1: Quantitative methods. Geneva: ISO, 2016.
12. Jensen T. A., Antille D. L., Tullberg J. N. Improving on-farm energy use efficiency by optimizing machinery operations and management: A review. *Agricultural Research*. 2025. No. 14. P. 15–33. doi: <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00824-5>.
13. Microbial Inoculants in Sustainable Agriculture: Advancements, Challenges, and Future Directions / A. M. Díaz-Rodríguez et al. *Plants*. 2025. Vol. 14, No. 2. P. 191. doi: <https://doi.org/10.3390/plants14020191>.
14. Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters / Krklješ D. B. et al. *Sensors*. 2023. No. 23. P. 6396. doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3368560>.
15. Nasr G., Abdel Hamid Z., Refai M. Agricultural Machinery Corrosion. *Agricultural Machinery Corrosion. IntechOpen*. 2023. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108918>.
16. Overview of Agricultural Machinery Automation Technology for Sustainable Agriculture / L. Jiang, B. Xu, N. Husnain, Q. Wang. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, No. 6. P. 1471. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061471>.
17. Process engineering variables in the spray washing of meat and produce / L. O. Pordesimo,

E. G. Wilkerson, A. R. Womac, C. N. Cutter. *Journal of Food Protection*. 2002. Vol. 65, No. 1. P. 222–237. doi: <https://doi.org/10.4315/0362-028x-65.1.222>.

18. Real-Time Control of Urban Water Cycle under Cyber-Physical Systems: Framework, Interoperability and Case Study in Barcelona / C. Sun, L. Shu, X. Gu, D. Li, W. Li. *Water*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 406. doi: <https://doi.org/10.3390/w12020406>.

19. Stubenrauch C., Drenckhan W. Cleaning solid surfaces with liquid interfaces and foams: From theory to applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2024. No. 72. P. 101818. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101818>.

20. Tomašková M., Sobotova L., Matiskova D. Machinery Fire in Agriculture and its Impact on the

Environment. *International Council on Technologies of Environmental Protection (ICTEP)*, October 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/ICTEP48662.2019.8968991>.

21. Tryhuba A., Tryhuba I., Bashynsky O. Conceptual model of management of technologically integrated industry development projects. *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. P. 155–158. doi: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321903>.

22. Tyrovolas M., Hajnal T. Inter-communication between Programmable Logic Controllers using IoT technologies: A Modbus RTU/MQTT. 2021. Approach. arXiv preprint arXiv: 2102.05988. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.05988>.

Стаття надійшла 25.01.2025