

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра агроінжинірингу

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Шуляк М.Л.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження ефективності роботи системи для внесення мінеральних добрив із змінною нормою»

Виконав:

(підпис)

Гуков Я.Ю.

(Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2302-1м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Харченко Ф.М.

(Прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 39 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 7 таблиць, 10 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Ключові слова: ДОБРИВА, ОБПРИСКУВАЧ; КОНТРОЛЬ ВИТРАТИ; ЯКІСТЬ ВНЕСЕННЯ, НОРМА ВНЕСЕННЯ, КАЛІБРУВАННЯ.

Це дослідження було зосереджено на оцінці точності обприскування за різних умов швидкості трактора за допомогою польових експериментів та аналізу даних. У цьому дослідженні використовується польовий обприскувач із крилами штанги, розділеними на праву та ліву секції, де швидкість потоку рідини до кожної секції контролюється пропорційними клапанами з часом повного відкриття та закриття 3 с, залежно від інформації про швидкість. Використовуючи замкнуту систему керування, що складається з витратоміра, пропорційного клапана та блоку керування, клапани контролюються внутрішніми блоками. Спостереження показують, що коли швидкість трактора зростає до певного рівня, система ефективно регулює норму внесення, близьку до цільового значення, і підтримує контроль над зміною швидкості руху під час усіх польових випробувань.

Зміст

Вступ.....	6
1 Стан питання і задачі досліджень.....	7
1.1 Агротехнічні вимоги до внесення рідких добрив обприскуванням.....	7
1.2 Фактори, що впливають на показники якості обприскування	12
1.3 Аналіз досліджень систем керування обприскуванням	17
2 Методика досліджень.....	19
3 Результати досліджень та їх аналіз	25
Висновки.....	36
Список використаних джерел.....	37

ВСТУП

У сучасному сільському господарстві, яке характеризується динамічним польовим середовищем, виникають проблеми з підтримкою стабільних норм внесення через різні швидкості трактора, польові умови та певні помилки калібрування. Звичайні системи керування, які покладаються на повільніші клапани, мають труднощі з адаптацією до цих динамічних умов поля. Навпаки, інтеграція швидкодіючих пропорційних клапанів покращує точність і гнучкість регулювання витрати під час розпилення.

Застосування диференційованих способів внесення добрив дозволяє раціонально використовувати дорогі мінеральні добрива, що в порівнянні з традиційним фоновим методом економить значні кошти.

Інвестиції у деякі елементи точного землеробства повертаються вже протягом першого маркетингового року. Наприклад, технологія змінних норм і автоматичного відключення секцій дозволяє здійснювати операції з автоматично-керованими змінними нормами внесення в межах неоднорідних ділянок поля. Це дає можливість ефективно використовувати ресурси та потенціал кожної ділянки поля, зокрема, різні запаси елементів живлення, продуктивної вологи, розподіл світла тощо.

Технологія диференційованого внесення добрив дозволяє оптимізувати використання ресурсів до 40%, а в деяких випадках і більше. Навіть перший, найпростіший крок до точного землеробства, який не потребує значних витрат — аналіз ґрунту і картографування його властивостей, дає можливість оптимізувати використання ресурсів і підвищити ефективність технології до 20% і вище.

1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Агротехнічні вимоги до внесення рідких добрив обприскуванням

Внесення рідких добрив обприскуванням є однією з важливих агротехнічних операцій, яка забезпечує оптимальне постачання рослин необхідними елементами живлення. Ефективність цього процесу залежить від правильної організації робіт, дотримання технічних та агрономічних вимог, а також використання сучасного обладнання.

Рідкі добрива, що вносяться методом обприскування, повинні відповідати певним стандартам якості. До них відносяться:

- Однорідність робочого розчину. Розчин повинен бути повністю гомогенним, без осаду та механічних домішок, що можуть засмічувати форсунки обприскувачів.
- Оптимальна концентрація діючої речовини. Для кожної культури і фази розвитку рослин необхідно дотримуватися рекомендованих норм внесення добрив. Недотримання концентрації може призвести до опіків рослин або недостатньої ефективності живлення.
- Стабільність добрив. Розчини не повинні втрачати своїх властивостей у процесі зберігання та використання. Важливо контролювати хімічний склад добрив перед приготуванням робочого розчину.

Час внесення рідких добрив обприскуванням відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного засвоєння елементів живлення рослинами. Основні вимоги включають:

- Фаза розвитку рослин. Найкращий ефект досягається при внесенні добрив у критичні фази росту та розвитку культури, коли рослини мають підвищену потребу в поживних речовинах.
- Погодні умови. Оптимальними умовами для обприскування є відсутність сильного вітру (швидкість до 3-4 м/с), низька вологість повітря та

температура не вище 25°C. Роботи слід проводити в ранкові або вечірні години для уникнення випаровування та фототоксичної дії добрив.

- Відсутність опадів. Після внесення добрив необхідно забезпечити період без дощу тривалістю не менше 4-6 годин для їх ефективного поглинання рослинами.

Для внесення рідких добрив використовуються спеціальні обприскувачі, які повинні відповідати ряду технологічних вимог:

- Стан обладнання. Форсунки, фільтри, насоси та інші вузли повинні бути справними, щоб забезпечувати рівномірний розподіл робочого розчину по поверхні рослин або ґрунту.
- Вибір форсунок. Тип форсунок залежить від конкретного завдання. Для рідких добрив зазвичай використовуються інжекторні або щілинні форсунки, що забезпечують великі краплі та мінімізують дрейф розчину під впливом вітру.
- Тиск обприскування. Оптимальний тиск повинен забезпечувати рівномірне розпилення добрив на заданій висоті, при цьому уникати занадто дрібних крапель, що можуть випаровуватись.
- Швидкість руху агрегатів. Робоча швидкість обприскувача повинна бути оптимальною (зазвичай 6-8 км/год) для забезпечення рівномірності внесення.
- Контроль норми внесення. Сучасні обприскувачі оснащені системами контролю витрати робочого розчину, що дозволяє точно дотримуватися заданої норми.

Для забезпечення ефективності та безпечності внесення рідких добрив необхідно дотримуватися агрономічних рекомендацій щодо норм внесення.

Важливо забезпечити:

- Розрахунок кількості добрив. Норма внесення залежить від потреб культури, вмісту поживних речовин у ґрунті та стадії розвитку рослин.

- Захист операторів. Працівники, які виконують обприскування, повинні використовувати засоби індивідуального захисту: спецодяг, рукавички, захисні окуляри та респіратори.
- Дотримання санітарних норм. Забороняється обприскування поблизу водних об'єктів, населених пунктів та пасік. Необхідно дотримуватись санітарно-захисної зони, що залежить від типу добрив і технічних характеристик обладнання.

Після обприскування необхідно оцінити ефективність операції для забезпечення її результативності. Основні показники включають:

- Візуальна оцінка стану рослин. Ознаки дефіциту або токсичності поживних речовин свідчать про недостатню або надмірну кількість добрив.
- Агрономічний аналіз. Відбір проб листя або ґрунту для визначення рівня засвоєння поживних речовин.
- Врожайність. Аналіз врожайності дає можливість оцінити економічну ефективність застосування рідких добрив.

Дотримання агротехнічних вимог до внесення рідких добрив обприскуванням є запорукою високої ефективності живлення рослин та оптимізації витрат на мінеральні добрива. Важливими умовами успішного проведення робіт є якість добрив, правильний вибір часу та технології обприскування, а також використання справного обладнання. Комплексний підхід до цього процесу дозволяє підвищити врожайність культур, забезпечити екологічну безпеку та зменшити витрати на агровиробництво.

1.2 Фактори, що впливають на показники якості обприскування

Фактори, що впливають на показники якості обприскування, є ключовими для забезпечення ефективного внесення пестицидів, рідких добрив та інших агрохімікатів у сільському господарстві. Від правильної якості обприскування залежить не лише ефективність дії препаратів, а й економічні витрати, мінімізація

негативного впливу на довкілля та забезпечення здоров'я працівників. Тому розуміння та дотримання основних факторів, що впливають на цей процес, є надзвичайно важливим.

Перш за все, одним із найважливіших факторів є вибір обприскувача та його технічний стан. Сучасні обприскувачі відрізняються конструктивними особливостями, що дозволяють забезпечувати точне та рівномірне розподілення робочого розчину. Стан форсунок має критичне значення, оскільки їхнє забруднення чи зношеність можуть призводити до нерівномірного покриття поверхні рослин або неправильного формування крапель. Форма, діаметр та тип форсунок визначають розмір крапель, а це, у свою чергу, впливає на якість обприскування. Наприклад, дрібні краплі краще вкривають листову поверхню, але водночас вони більш схильні до зносу вітром, тоді як великі краплі знижують ризик зносу, але можуть стікати з рослин.

Однією з важливих умов ефективного та економічно вигідного використання обприскувачів є їхнє правильне калібрування. Калібрування обприскувача передбачає точне встановлення швидкості руху, тиску живлення. Упущення на цьому етапі можуть призвести до нерівномірного прикриття рослин, проривів у обробітку та збільшення затрат на матеріали.

Правильна калібровка забезпечує рівномірний розпіл розчину по поверхні рослин, що сприяє високій ефективності дії засобів захисту. Рівномірне прикриття дозволяє забезпечити рослинам сприятливі умови для росту та розвитку.

Неточне калібрування призводить до різниці в розмірах крапель, що створює ризик стікання розчину та його потрапляння в ґрунт. Великі краплі часто не прилипають до поверхні листка, втрачаючись зря.

Отже, якість обприскування прямо залежить від точності калібрування обприскувача. Дотримання регуляторних параметрів дозволяє раціонально

використовувати засоби обробки, зменшуючи шкідливий вплив на довкілля та роблячи процес обробки більш результативним.

Також важливим фактором є робочий тиск у системі обприскування. Від величини тиску залежить швидкість виходу робочого розчину з форсунок та розмір утворених крапель. Занадто високий тиск спричиняє утворення надто дрібних крапель, що підвищує їх випаровуваність та ймовірність зносу на сусідні ділянки. Натомість низький тиск може призвести до формування великих крапель, що не забезпечать рівномірного покриття поверхні рослин. Оптимальний тиск має бути підібраний залежно від типу обприскувача, форсунок та умов навколишнього середовища.

Не менш важливу роль відіграє швидкість руху обприскувача під час обробки. Швидкість руху агрегату повинна бути стабільною, оскільки будь-яке її коливання впливає на рівномірність внесення розчину. При надмірно високій швидкості знижується кількість робочого розчину, що потрапляє на одиницю площі, а при низькій швидкості можливе надмірне перенасичення рослин препаратом. Досягнення рівномірності обробки вимагає також точного калібрування обприскувача.

Вплив швидкості руху на показники якості обприскування є однією з найважливіших тем у сучасному сільському господарстві. Якість обприскування безпосередньо впливає на ефективність захисту рослин, оптимальне використання добрив і пестицидів, а також на економічну доцільність проведення польових робіт. Обприскування як метод внесення робочих розчинів на поверхню рослин потребує точності та контролю над багатьма параметрами, серед яких ключовою є швидкість руху обприскувача.

Швидкість руху обприскувача визначає рівномірність покриття поверхні рослин робочим розчином. Зі збільшенням швидкості руху зменшується час, протягом якого розпилена рідина взаємодіє з цільовою поверхнею, що може призводити до нерівномірного розподілу препарату. У свою чергу, це може

спричинити як перевитрати хімічних засобів, так і недостатню їх кількість на окремих ділянках поля, що негативно впливає на контроль шкідників, хвороб та загальну ефективність обробки. Оптимальність швидкості руху є критично важливим фактором для забезпечення ефективного покриття, особливо при обробці культур з високою густотою рослинності.

Сучасні дослідження показують, що при збільшенні швидкості руху обприскувача краплі робочого розчину стають більшими за розміром, а їх кількість на одиниці площі зменшується. Це відбувається через зміни в характеристиках розпилення, оскільки зростає динамічний тиск у системі, а рідина розпилюється нерівномірніше. Зменшення кількості дрібних крапель, які краще утримуються на поверхні листя, призводить до втрат робочого розчину через стікання, випаровування або знесення вітром. Тому важливо правильно підбирати швидкість руху, зважаючи на тип розпилювальної форсунки, тиск у системі та умови навколишнього середовища.

Крім того, вплив швидкості руху на якість обприскування проявляється у відхиленнях від заданої норми внесення рідких добрив або засобів захисту рослин. За надто високої швидкості виникає проблема недовнесення препарату, що призводить до зниження ефективності обробки. Водночас при надто низькій швидкості є ризик перевищення норми внесення, що не лише є економічно не вигідним, а й може спричинити фітотоксичність культур та негативний вплив на довкілля. Оптимальне поєднання швидкості руху, тиску в системі та параметрів розпилювальних форсунок забезпечує дотримання заданої норми внесення та рівномірність покриття.

Слід зазначити, що швидкість руху обприскувача також впливає на втрати робочого розчину через знесення крапель вітром. Збільшення швидкості призводить до посилення турбулентних потоків повітря навколо обприскувача, що сприяє розсіюванню дрібних крапель на значні відстані. Це особливо актуально за вітряної погоди або в умовах нерівного рельєфу, коли втрати

робочого розчину можуть бути суттєвими. Для мінімізації цих втрат необхідно обирати оптимальну швидкість руху та застосовувати спеціальні форсунки з низьким ступенем утворення дрібних крапель.

Окрім того, на показники якості обприскування впливає тип обприскувача, його технічний стан та рівень автоматизації. Сучасні обприскувачі, оснащені системами контролю швидкості руху та автоматичним регулюванням тиску, дозволяють забезпечити стабільну якість обробки навіть при зміні швидкості руху в межах поля. Однак важливо, щоб оператор обприскувача дотримувався рекомендованих параметрів роботи та враховував умови навколишнього середовища.

Значний вплив на ефективність обприскування має тип культури та її фаза розвитку. У період активного росту рослин, коли листкова поверхня є найбільшою, необхідно забезпечити максимальну рівномірність покриття робочим розчином. У таких випадках навіть незначне збільшення швидкості руху може суттєво вплинути на якість обприскування. Тому для обробки культур з високою щільністю посіву рекомендується використовувати нижчу швидкість руху та відповідні форсунки, що забезпечують дрібнодисперсне розпилення.

Таким чином, швидкість руху обприскувача є важливим параметром, що визначає якість обприскування. Для досягнення оптимального результату необхідно враховувати взаємозв'язок між швидкістю руху, тиском у системі, типом форсунок, погодними умовами та характеристиками культур. Дотримання оптимальних параметрів роботи обприскувача дозволяє підвищити ефективність використання робочого розчину, знизити його втрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля. Впровадження сучасних технологій автоматичного контролю швидкості та параметрів обприскування є ключовим фактором підвищення продуктивності та якості сільськогосподарських робіт.

Погодні умови є ще одним ключовим фактором, що впливає на якість обприскування. Вітер є основною причиною зносу крапель, що знижує

ефективність внесення препарату та може спричинити забруднення навколишніх територій. Рекомендована швидкість вітру для проведення обприскування становить не більше 3-5 м/с. Температура та вологість повітря також впливають на випаровування робочого розчину. При високих температурах відбувається швидке випаровування дрібних крапель, що знижує ефективність обробки. Оптимальними умовами для обприскування вважаються ранкові та вечірні години, коли температура повітря нижча, а вологість вища.

Крім того, якість робочого розчину є визначальним чинником ефективного обприскування. Важливою є правильна підготовка робочого розчину з дотриманням норм концентрації препарату та використанням чистої води. Забруднення води або неправильне змішування компонентів можуть спричинити зниження ефективності препарату або навіть його фітотоксичну дію на рослини. Використання ад'ювантів та прилипачів дозволяє покращити якість покриття поверхні рослин робочим розчином і зменшити ризик його стікання.

Технічні аспекти внесення рідин включають також забезпечення однакової висоти штанги обприскувача над оброблюваною поверхнею. Від цього залежить рівномірність розподілення крапель. Занадто високе положення штанги підвищує ризик зносу розчину, а надто низьке може призвести до нерівномірного покриття через утворення тіней рослинами.

Особливу увагу слід приділяти правильному вибору робочої норми внесення препарату. Оптимальна кількість препарату на одиницю площі залежить від культури, фази її розвитку, типу препарату та мети обприскування. Недостатнє внесення призводить до низької ефективності захисту, тоді як надмірне застосування може викликати фітотоксичність або забруднення навколишнього середовища.

Вода є основним компонентом розчинів, які використовуються для обприскування рослин в сільському господарстві. Іноді порушення якості води може суттєво сказатися на ефективності дії пестицидів та інших засобів.

Особливо це стосується показників жорсткості води, реакції рН та присутності мінеральних домішок.

Жорсткість води щодо високого вмісту солей кальцію та магнію може створювати проблеми під час обприскування. При реакції солей з пестицидами утворюються нерозчинні сполуки, що різко знижують ефективність засобів. Прикладом таких пестицидів є глифосат, який втрачає свою дію у жорсткій воді.

Показник реакції рН також грає важливу роль. Вода зі луговою реакцією рН перешкоджає дії деяких фунгіцидів та інсектицидів. Для більшості засобів захисту рослин оптимальне середовище рН порядку 4,5-6,5. Якщо реакція води невідповідна, доцільно використовувати коректори рН. Окрім того, присутність органічних речовин, заліза, сірчаних сполук у воді можуть блокувати дію деяких засобів. Прикладом таких розчинів є вода, яка проходить через старі трубопроводи, що створює проблеми для захисних засобів.

Підсумовуючи, якість води є важливим чинником, що впливає на результати обприскування. При використанні неякісної води суттєво зменшується ефективність захисту рослин, що призводить до зниження урожайності та економічних втрат. Для усунення цієї проблеми доцільно проводити аналізи води та складати плани корекції складу розчинів.

Досягнення високої якості обприскування вимагає комплексного підходу з урахуванням усіх вищезазначених факторів. Правильний вибір обприскувальної техніки, дотримання рекомендацій щодо умов внесення, калібрування обладнання та контроль якості робочого розчину є запорукою ефективного та безпечного обприскування. Злагоджена робота техніки та грамотний підхід до агротехнічних вимог дозволять мінімізувати негативний вплив на довкілля.

1.3 Аналіз досліджень систем керування обприскуванням

Постійне вдосконалення технологій застосування пестицидів призвело до створення різноманітного асортименту пестицидів, які мають вирішальне

значення для задоволення сучасних потреб споживачів і забезпечення достатнього запасу продуктів харчування. Однак ці пестициди, хоч і сприяють захисту та росту рослин, створюють певні ризики для навколишнього середовища та здоров'я живих організмів, у тому числі людей [1–3]. Підтримання рівномірної норми внесення на одиницю площі має вирішальне значення для ефективного використання пестицидів за допомогою польових обприскувачів, оскільки їх нерівномірний розподіл знижує ефективність обробки та сприяє утворенню залишків нецільових пестицидів [4].

Помилки в застосуванні можуть призвести до виявлення залишків пестицидів у повсякденних споживчих продуктах, таких як приготовані страви, вода, вино, фруктові соки та корми для тварин [5]. Кілька факторів, пов'язаних з обладнанням і методами застосування, можуть впливати на охоплення та ефективність застосування пестицидів. Зокрема, такі параметри, як швидкість руху та тип сопла/розмір крапель, є вирішальними для впливу на покриття розпилення, якість, ефективність і потенційний дрейф крапель. Доведено, що більша швидкість руху призводить до посиленого утворення дрібних крапель, що, як наслідок, підвищує ризик знесення бризок.

Кілька досліджень задокументували більший дрейф пестицидів і зменшення покриття, пов'язане зі збільшенням швидкості руху трактора [6–10]. Крім того, з часом може розвинути стійкість до шкідників, що погіршує ефективність боротьби зі шкідниками. Успішне застосування пестицидів залежить від використання каліброваних розпилювачів, якими керують навчені особи [11]. Однак недоліки, що є результатом неправильно відкаліброваного обладнання, призводять до втрати тисяч галонів пестицидів і мільярдів доларів. [12–14]. Дослідження, проведене в Північній Дакоті в Сполучених Штатах, виявило значні варіації в нормах внесення пестицидів, при цьому 60% аплікаторів перевищували або занижували заплановану норму більш ніж на 10%, а в деяких випадках кількість перевищувала 30% [15]. Дослідження в першу чергу пояснює

ці проблеми такими факторами, як зношені наконечники сопел, неточно відкаліброване обладнання або нездатність підтримувати необхідну швидкість потоку під час польового застосування [16,17].

Ефективний контроль норми розпилення вважається важливим для точного застосування пестицидів. Традиційні польові обприскувачі на основі тиску, які не мають систем керування, вимагають від операторів постійного керування як швидкістю трактора, так і тиском у системі, щоб підтримувати постійну норму внесення.

Притаманні коливання швидкості руху тракторів під час застосування в поєднанні з помилками в експлуатації значно ускладнюють підтримку цільової швидкості. Однак досягнення бажаної цільової норми застосування є вирішальним для оптимального охоплення та ефективності [18], а також економічної життєздатності. Норма внесення (л/га) визначається витратою (л/хв) і швидкістю трактора (км/год). Таким чином, точність сигналів зворотного зв'язку від датчиків витрати та швидкості, а також точність клапанів, які контролюють потік, мають вирішальне значення для мінімізації помилок застосування.

Для вимірювання витрати в напірній лінії системи обприскувача існує декілька типів витратомірів рідини, таких як турбінні, вихрові, електромагнітні та ультразвукові витратоміри. При дослідженні різних систем вимірювання витрати ультразвукові витратоміри широко використовуються через їх високу чутливість [19]. З часом контролери норми розпилення були інтегровані в сільськогосподарські обприскувачі для ефективного керування нормами внесення у випадках, коли швидкість руху змінюється під час польових робіт. Деякі такі методи керування зараз широко доступні для використання в системах керування обприскуванням сільського господарства та суміжних галузях, а саме: PID (пропорційно-інтегральна похідна) керування, керування нейронною мережею та інтелектуальні системи управління [20]. Ці системи в основному

використовують пропорційні клапани для контролю потоку рідини в напірній лінії. Однак повільний час відкриття та закриття цих клапанів, що досягає 15 с, вказує на неприйнятну динаміку руху.

Коли обладнання розпилювача прискорюється або сповільнюється, обмеження регулятора норми та системи стають більш очевидними, що потенційно може призвести до недостатнього або надмірного внесення [22]. Поточне дослідження спрямоване на ефективний контроль норми внесення в польових обприскувачах за допомогою використання пропорційних клапанів із швидким реагуванням, щоб зменшити помилки через зміни швидкості.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Польові випробування проводилися на рівнинній ділянці площею 1,5 га. Система обприскувача, використана в цьому дослідженні, складалася з поршнево-мембранного насоса (71 л/хв, макс. 50 бар), бака ємністю 400 л і штанги шириною 10 м.

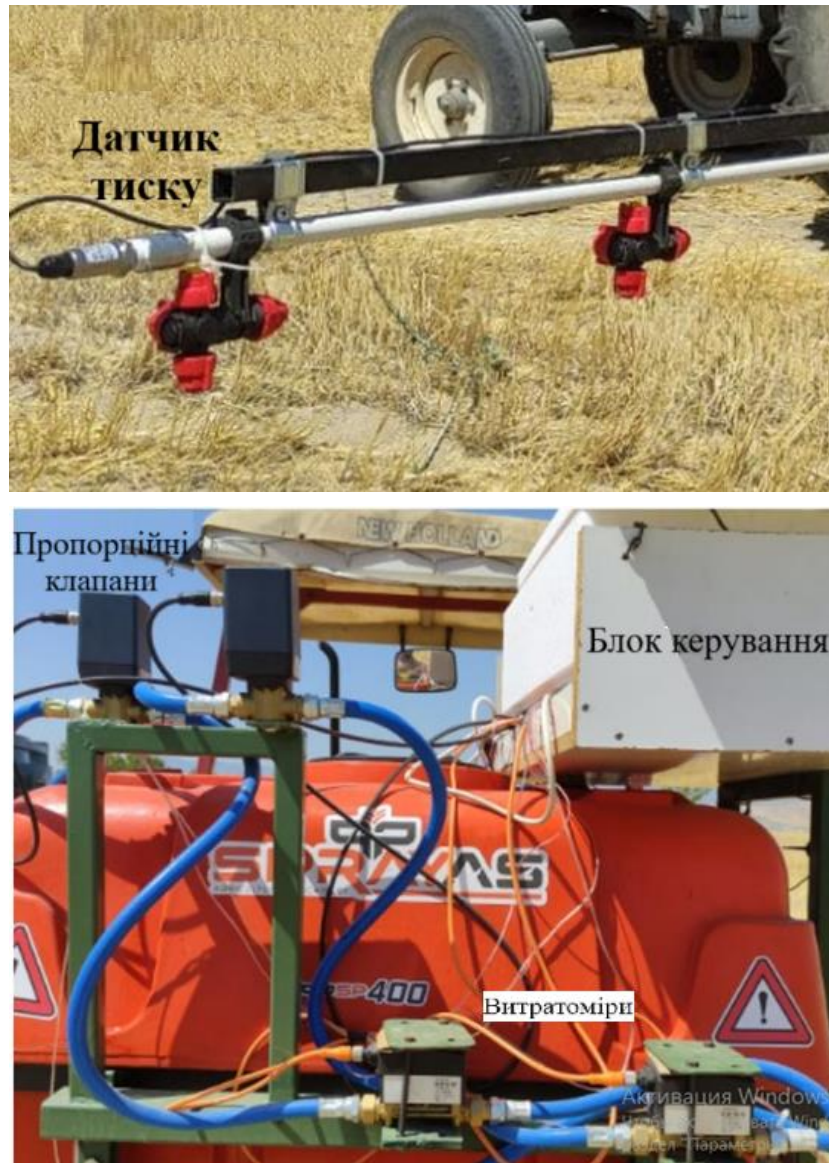


Рисунок 1 - Система обприскувача з регулятором норми внесення. Секції стріли та датчики тиску; (b) з'єднання пропорційного клапана та витратоміра.

Швидкість трактора вимірювалася за допомогою датчика наближення, прикріпленого до переднього колеса (див. рис. 2).

Щоб зафіксувати швидкість, 32 шматки металу рівномірно прикріпили до колеса через рівні проміжки. Щоб отримати інформацію про швидкість, значення імпульсу, визначені датчиком наближення, визначені відповідно до відстані, пройденої колесом за один оберт, подавались на вхід високошвидкісного лічильника (ВШЛ). У результаті цієї операції за допомогою математичних функцій у програмі ВШЛ була отримана швидкість у кілометрах на годину.



Рис. 2 - Вимірювання швидкості трактора

Стріла розділена на дві секції (праву та ліву), кожна з яких керується незалежно. Загалом 20 розпилувальних форсунок із плоским вентилятором (Agroer Co) були встановлені на штанзі з інтервалом 0,5 м. Кольорові коди та витрати форсунок були наступними: жовтий 0,65–1,03 л/хв, синій 0,97–1,53 л/хв і червоний 1,29–2,09 л/хв.

На основі інформації, зазначеної в каталозі продукції, для кожного окремого випробування вибирався відповідний тип насадки. Апаратне забезпечення системи керування витратою складалося з ПЛК (програмований логічний контролер) (S7 1200, 6ES7214-1AG40-0XB0, 14 цифрових входів, 10 цифрових виходів і 2 аналогових входи) з аналоговим модулем (SM 1234, 4 аналогових входи, 2 аналогових виходи), витратоміри (Christian Bürkert GmbH &

Co, 0,5–50 л/хв), пропорційні клапани (Christian Bürkert GmbH & Co 3280, Німеччина), з часом повного відкриття 3 с і вхідним сигналом 4–20 мА і датчиків тиску (Dwyer Instruments, LLC., США, 0–10 бар для правої та лівої секцій штанги та 0–100 бар для виходу регулятора). Пропорційні клапани та витратоміри були встановлені між вихідною точкою регулятора та обома секціями штанги (див. рис. 1). Живлення для ПЛК, датчиків, модему та клапанів подавалося від акумулятора трактора. Через різний рівень вхідної напруги використовуваного обладнання використовувався інверторний пристрій 12–220 В та перетворювальний пристрій 220–24 В.

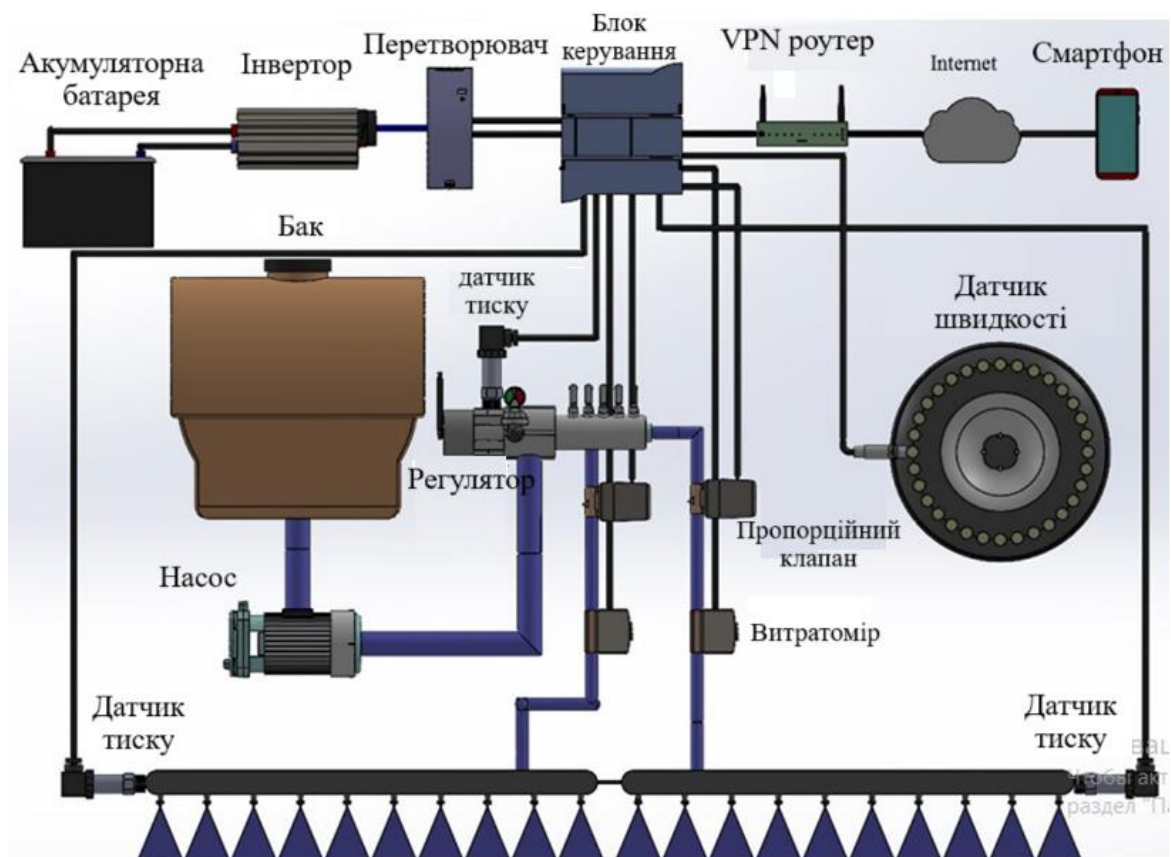


Рис. 3 - Загальна схема системи

Вихідні сигнали витратоміра (4–20 мА), вихідні сигнали датчика тиску секції штанги (4–20 мА) та вихідні сигнали датчика тиску регулятора (0–10 В) послідовно подаються на аналогові вхідні клеми модуля ПЛК (AI0, AI1, AI2, AI3

і AI4). Для керування пропорційними клапанами використовувалися блоки контролера PID (Proportional Integral Derivative), які зазвичай використовуються в програмуванні ПЛК. Цільову норму внесення розраховували залежно від швидкості трактора, швидкості потоку та ширини стріли для кожної секції стріли, а потім застосовували цільову норму внесення до вхідних клем. Керуючий сигнал (4–20 мА), створений регулятором з використанням цих параметрів, потім подавався на пропорційні клапани через аналогові вихідні клем (AQ0 і AQ1). Загальна структура використовуваної системи показана на рис. 3.

Було проведено п'ять різних випробувань цільової норми внесення (100, 150, 200, 250 і 300 л/га), кожне з трьома повторами, що призвело до 15 різних польових випробувань, проведених на різних швидкостях трактора від 5 до 10 км/год. Послідовний процес для кожного тесту був таким: (1) наповнення резервуара обприскувача водою, (2) визначення цільової норми внесення, (3) надсилання імпульсного сигналу на відповідний вхід контролера для запису даних, (4) запуск ВВП, (5) виконання програми в полі на різних швидкостях руху протягом приблизно 10 хвилин і (6) передача даних із пам'яті ПЛК на комп'ютер файлу у форматі «csv». Під час розрахунку похибки внесення було оцінено відхилення між фактичною нормою внесення та цільовою нормою внесення у відсотках, як показано у рівнянні 1.

$$\text{Абсолютна похибка норми внесення (\%)} = (|\text{Фактична норма внесення} - \text{цільова норма внесення}|) \times 100 / \text{цільова норма внесення} \quad (1)$$

Записані дані охоплювали швидкість трактора, швидкість потоку правої секції штанги (ШППС), швидкість потоку лівої секції штанги (ШПЛС), ступінь відкриття клапана правої секції штанги (СВКПС), ступінь відкриття клапана лівої секції штанги (СВКЛС), норма внесення правої секції штанги (НВПС), норма внесення лівої секції штанги (НВЛС), тиск регулятора (ТР), тиск правої секції штанги (ТПС) і лівої секції штанги (ТЛС). Реєстрація даних відбувалася щосекунди за допомогою блоку реєстратора даних у програмі ПЛК, який містив

такі п'ять інструкцій: (1) «DataLogCreate» для створення файлу журналу даних, (2) «DataLogOpen» для доступу до існуючого файлу журналу даних, (3) «DataLogWrite» для запису даних, (4) «DataLogClose» для завершення відкритого журналу даних і (5) «DataLogNewFile» для створити новий журнал даних із властивостями, подібними до існуючого файлу, але з новою назвою.

Аналіз даних показав, що раптові зміни в даних датчиків у реальному часі мають руйнівний вплив на вихідні значення блоків, відповідальних за регулювання пропорційної швидкості відкриття клапана. Щоб пом'якшити це, дані, отримані від датчиків у реальному часі, були згладжені за допомогою блоку «Moving Average». Цей блок обчислює (ковзне) середнє на основі встановленої ширини вікна, де ширина вікна вказує на максимальну кількість останніх зчитаних значень (встановлено на 100). Як тільки було досягнуто максимальної кількості значень, було встановлено «WindowSizeReached», і кожне нове прочитане значення замінювало найстаріше значення (принцип FIFO; First Input First Output).

Програмне забезпечення веб-сервера (TIA Portal V.15) було розроблено для моніторингу даних у режимі реального часу через Інтернет, які передаються через мобільний маршрутизатор 4G VPN (Robustel). Файл index.htm був створений для відображення даних датчика безпосередньо через веб-сервер PLC (PWS). Цей файл відображав вихідні дані датчиків, призначені змінним, у режимі реального часу через інтерфейс сервера. Перед проведенням випробувань було проведено тест на точне налаштування шляхом встановлення цільової норми внесення на 100 л/га, щоб визначити коефіцієнти PID-регулятора на основі варіацій швидкості потоку на різних швидкостях руху (5–10 км·год⁻¹). Для досягнення бажаної відповіді системи, мінімізації помилок, а також для покращення стабільності в системі керування було використано точне налаштування PID.

Компонент Р реагує на поточну помилку, яка є різницею між бажаним заданим значенням і фактичною змінною процесу, а компонент І враховує кумулятивну суму минулих помилок за час, що допомагає усунути будь-яку помилку в стаціонарному стані та привести систему до бажане задане значення. Компонент D передбачає майбутню тенденцію похибки на основі поточної швидкості зміни, допомагаючи гасити коливання та запобігати перевищенням. Це випробування включало постійне змінення швидкості трактора в певних межах. Приблизно після 20 хвилин тонкого налаштування було досягнуто отриманих коефіцієнтів PID, наведених у таблиці 1.

Таблиця 1 - Визначені коефіцієнти ПІД під час тонкого налаштування

Коефіцієнт	Права секція	Ліва секція
Пропорційне посилення	10,20958	17,89999
Інтегральний час дії, с	1,967492	2,348299
Час дії похідної, с	1,528921	0,590065

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На рис. 4 зображено норму внесення правої секції штанги (НВПС), норму внесення лівої секції штанги (НВЛС), цільову норму внесення (ЦН) і значення граничної похибки (ГП) для цільового обсягу 100 л/га тестової норми внесення. У цей період випробувань інтервальні коливання швидкості становили від 5,10 до 10,23 км/год. З тривалості 1726 с цього періоду випробування фактична норма внесення перевищувала межі похибки протягом 49 с, що представляє абсолютне середнє значення похибки внесення 2,81%. Примітно, що початкова зміна швидкості, яка була більшою, ніж наступні зміни швидкості руху під час внесення, затримала контролер у наближенні до заданої точки для цільової норми внесення. Повне закриття пропорційного клапана під час початкового руху призвело до того, що рідина не проходила через витратомір, навіть коли трактор рухався. Щоб вирішити цю проблему, на вихід витратоміра було надіслано сигнал тривоги протягом 3 с, коли швидкість руху досягла 1 км/год. У цьому сценарії клапан трохи відкрився, дозволяючи рідині потрапити в витратомір.

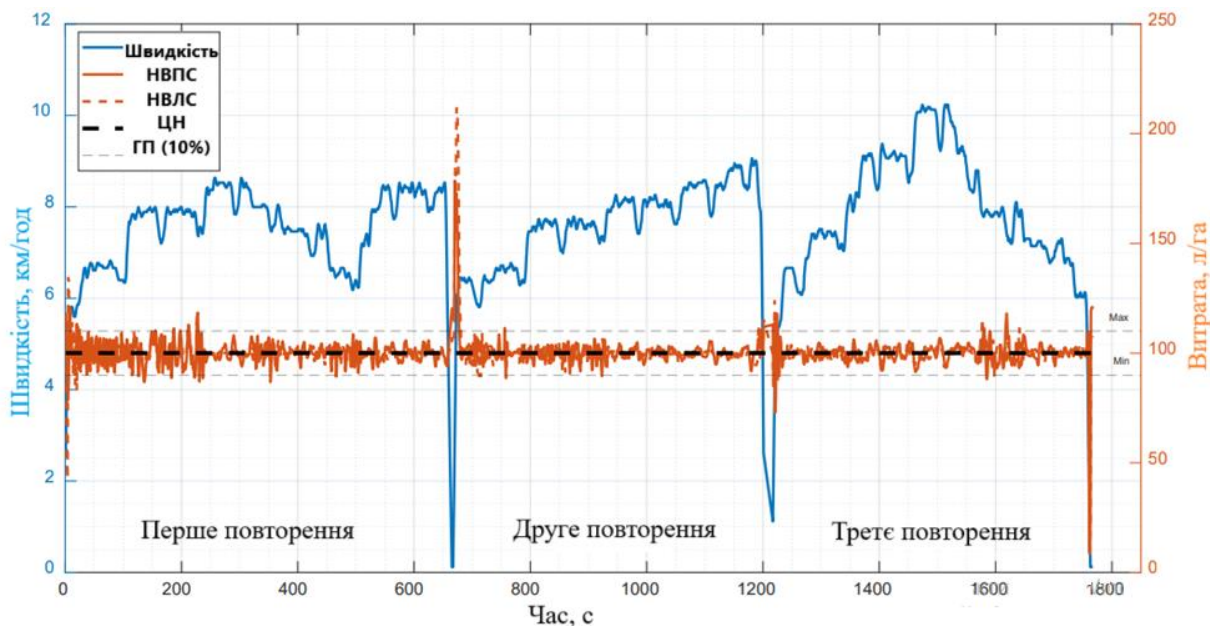


Рис. 4 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (100 л/га)

На рис. 5 показано графік фактичної норми внесення, що відповідає різним значенням швидкості руху для цільової норми внесення 150 л/га. У цей період випробувань інтервальні варіації швидкості коливалися від 4,64 до 9,91 км/год. З 1810 с тривалості цього періоду випробування фактична норма внесення перевищувала межі похибки протягом 46 с, що представляє абсолютне середнє значення похибки внесення 2,68%.

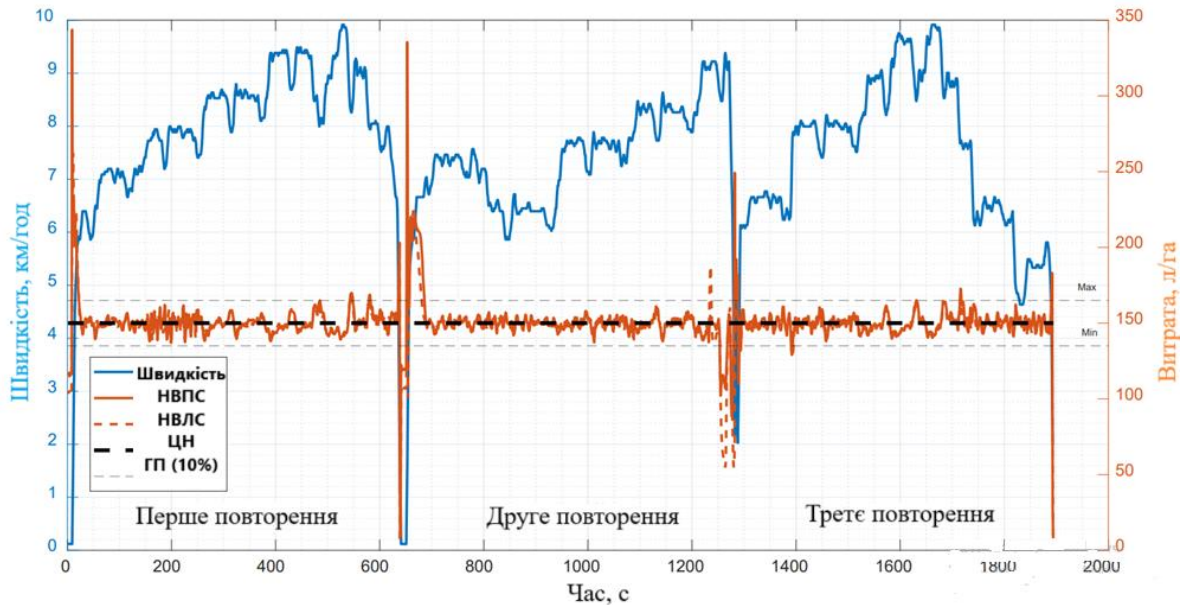


Рис. 5 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (150 л/га)

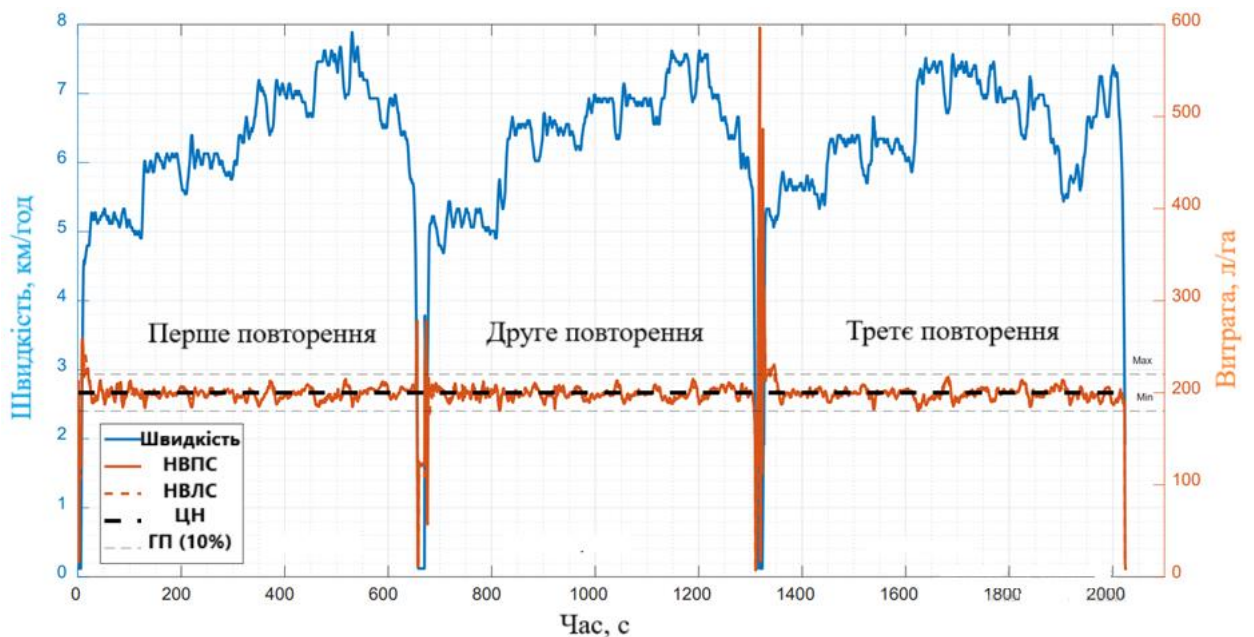


Рис. 6 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (200 л/га)

На рис. 6 показано графік фактичної норми внесення, що відповідає змінним значенням швидкості для цільової норми внесення 200 л/га. У цей період випробувань інтервальні варіації швидкості становили від 3,68 до 7,89 км/год. З тривалості цього періоду випробувань у 1973 секунди фактична норма внесення перевищувала межі похибки протягом 21 с, показуючи, як виявилось, що абсолютне середнє значення похибки внесення становило 2,28%. Протягом цього тестового періоду фактична норма внесення постійно залишалася в межах прийняттого рівня завдяки більш плавним змінам швидкості.

На малюнку 7 показано графік фактичної норми внесення, що відповідає змінним значенням швидкості для цільової норми внесення 250 л/год. У цей період випробувань інтервальні коливання швидкості становили від 4,80 до 8,21 км/год. З 1848 с тривалості цього періоду випробувань фактична норма внесення перевищувала межі похибки протягом 40 с, показуючи, що абсолютне середнє значення похибки внесення виявилось 2,14%. Під час другого та третього повторень цього періоду випробувань було помічено, що там, де була раптова зміна швидкості (приблизно 1 км/год), значення норми внесення перевищувало межі похибки на кілька секунд.

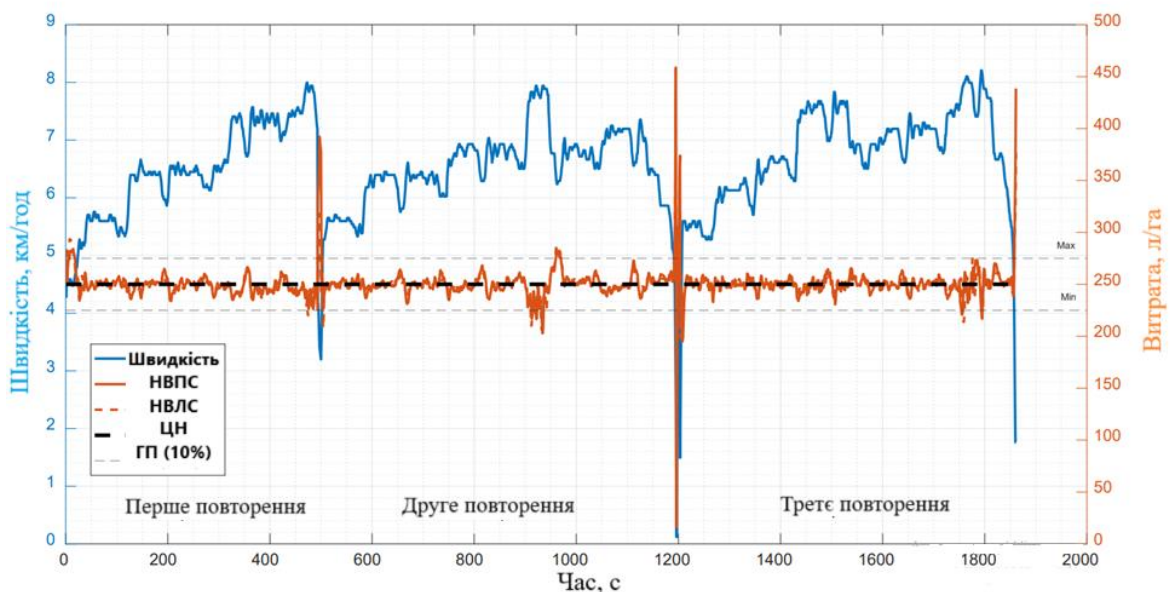


Рис. 7 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (250 л/га)

На рис. 8 показано графік фактичної норми внесення, що відповідає змінним значенням швидкості для цільової норми внесення 300 л/год. У цей період випробувань інтервальні коливання швидкості становили від 4,90 до 8,69 км/год. З 2168 с тривалості цього періоду випробувань фактична норма внесення перевищувала межі похибки протягом 53 с, показуючи, як виявилось, що абсолютне середнє значення похибки внесення становило 2,51%.

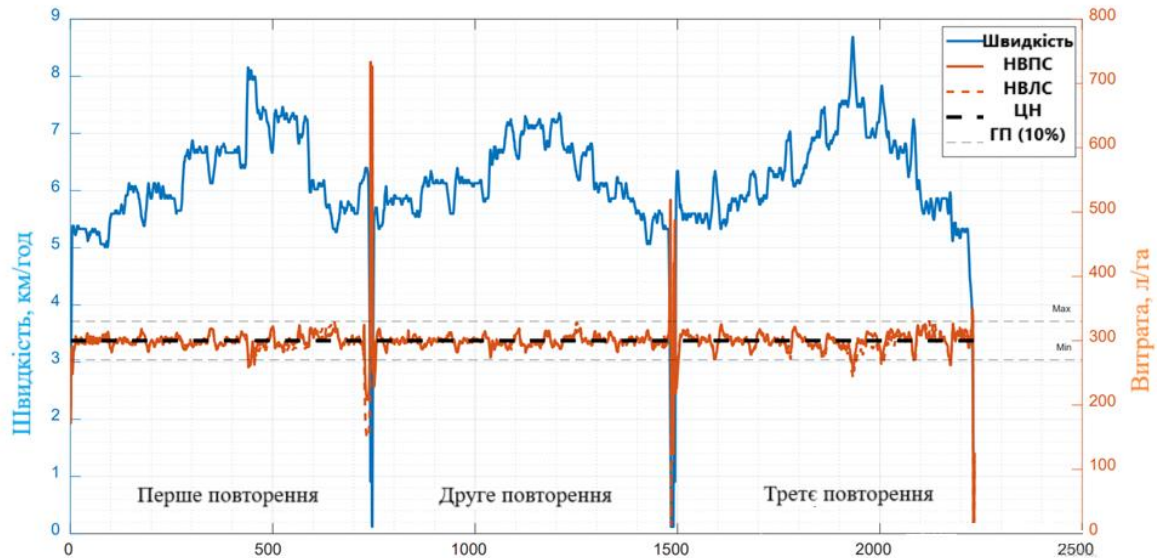


Рис. 8 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (300 л/га)

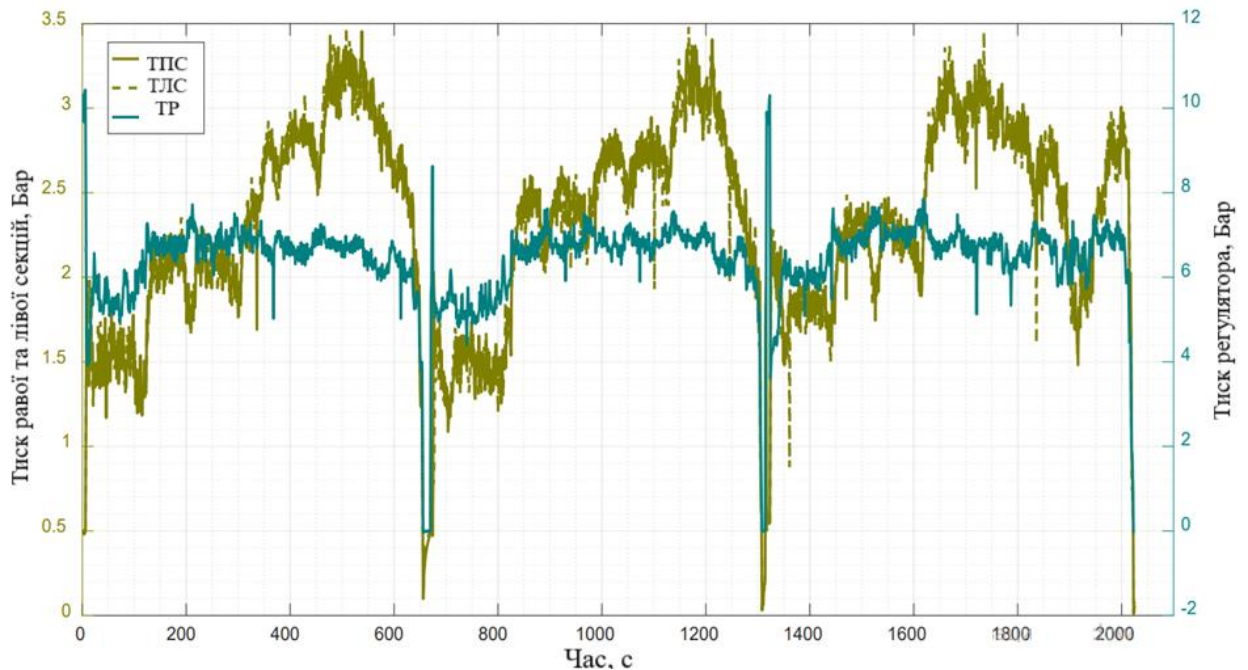


Рис. 9 - Секції штанги та регулятор тиску (200 л/га)

На рис. 9 представлено тиск регулятора, тиск правої секції штанги (ТПС) і тиск лівої секції штанги (ТЛС) для цільової норми внесення 200 л/га. Протягом усього застосування тиск регулятора (ТР) підтримував постійний рівень приблизно 6–7 бар, тоді як тиск, пов'язаний із секціями штанги, змінювався в діапазоні 1,5–3,5 бар, залежно від змін швидкості та, як наслідок, витрати. Примітно, що точне регулювання тиску рідини, що надходить від насоса, перед її подачею на пропорційні клапани значно сприяло підвищенню стабільності системи.

На рис. 10 показано співвідношення між швидкістю відкриття пропорційних клапанів (ШВПКПС і ШВПКЛС) і швидкістю і витратою в правій і лівій секціях штанги (ВПС і ВЛС). Ліва вісь ординат відображає швидкість руху трактора та швидкість потоку секцій штанги, тоді як права вісь ординат відображає швидкість відкриття клапана секцій штанги. Результати показують, що пропорційні клапани вміло регулюють швидкість потоку, ефективно реагуючи на зміни швидкості.

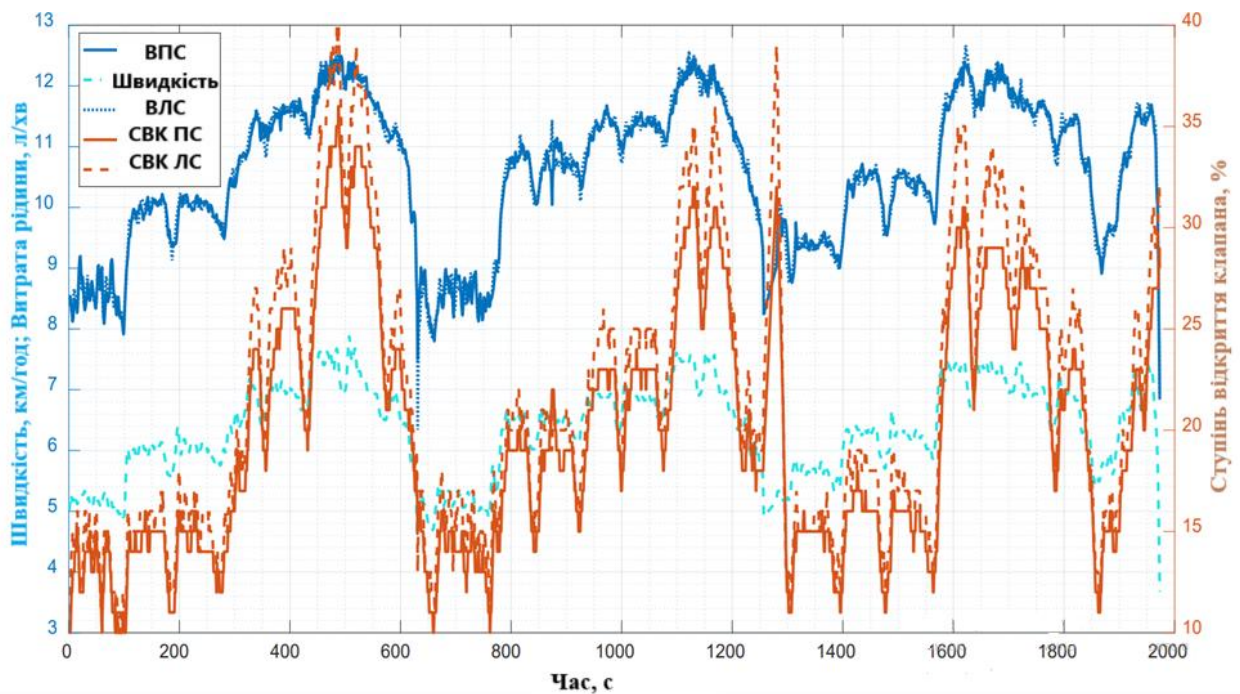


Рисунок 10 - Витрата рідини і швидкість відкриття пропорційного клапана (200 л/га)

Кореляційний аналіз, проведений для різних цільових норм внесення (100, 150, 200, 250 і 300 л/га), дає цінну інформацію про зв'язки між змінними як у правій, так і в лівій секціях штанги. Швидкість демонструє надійні позитивні кореляції, ступінь відкриття клапанів, швидкість потоку та тиск, що вказує на одночасне збільшення цих параметрів із збільшенням норми внесення. Ця кореляція особливо виражена при вищих нормах внесення. Позитивні кореляції між швидкістю та швидкістю потоку підкреслюють взаємозалежність між цими двома факторами. Це співвідношення вказує на те, що фактичне значення програми зберігається протягом усього періоду тестування. ступінь відкриття клапанів демонструє позитивну кореляцію зі швидкістю потоку та тиском, і кореляція стає більш стабільною при вищих нормах внесення.

Таблиця 2 - Кореляційний аналіз значень змінних для цільової норми внесення (100 л/га)

Змінні	Праве крило					Ліве крило				
	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE
Швидкість, км/год	1	0.696	0.959	0.787	7.55± 0.03	1	0.348	0.946	0.670	7.55±0.03
СВК, %		1	0.658	0.819	5.75± 0.05		1	0.356	0.638	6.56±0.07
Витрата, л/хв			1	0.770	6.29± 0.03			1	0.677	6.31± 0.03
Тиск, бар				1	1.49±0.01				1	1.36± 0.01

Кореляція між швидкістю та ступінню відкриття клапанів, а також кореляція між швидкістю та швидкістю потоку вказують на сильну взаємодію факторів у системі. Система регулює рідину, що подається до сопел, щоб забезпечити рівномірне нанесення, потенційно згладжуючи коливання, спричинені змінами швидкості та коефіцієнта відбиття. Подібним чином тиск показує позитивну кореляцію зі швидкістю, ступінню відкриття клапанів і

швидкістю потоку з цими кореляціями, коли норми внесення збільшуються. Ці результати вказують на синхронізовану поведінку змінних, особливо в сценаріях із підвищеною нормою внесення (див. таблиці 2–6).

Таблиця 3 - Кореляційний аналіз значень змінних для цільової норми внесення (150 л/га)

Змінні	Праве крило					Ліве крило				
	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE
Швидкість, км/год	1	0.471	0.951	0.859	7.55 ± 0.03	1	0.472	0.962	0.867	7.55 ± 0.03
СВК, %		1	0.578	0.720	12.59 ± 0.16		1	0.544	0.703	13.94 ± 0.17
Витрата, л/хв			1	0.898	9.47 ± 0.04			1	0.882	9.47 ± 0.04
Тиск, бар				1	1.94 ± 0.01				1	1.93 ± 0.01

Таблиця 4 - Кореляційний аналіз значень змінних для цільової норми внесення (200 л/га)

Змінні	Праве крило					Ліве крило				
	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE
Швидкість, км/год	1	0.765	0.972	0.894	6.25± 0.02	1	0.768	0.977	0.897	6.25± 0.02
СВК, %		1	0.762	0.853	19.47 ± 0.15		1	0.777	0.852	20.51 ± 0.16
Витрата, л/хв			1	0.883	10.37 ± 0.04			1	0.890	10.37 ± 0.04
Тиск, бар				1	2.32 ± 0.01				1	2.32± 0.01

Таблиця 5 - Кореляційний аналіз значень змінних для цільової норми
внесення (250 л/га)

Змінні	Праве крило					Ліве крило				
	Швидкіс	СВК	Витрата	Тиск	Середнє ± SE	Швидкіс	СВК	Витрата	Тиск	Середнє ± SE
Швидкість, км/год	1	0.677	0.696	0.658	6.33 ±0.02	1	0.504	0.738	0.663	6.33 ± 0.02
СВК, %		1	0.629	0.641	24.16 ±0.24		1	0.569	0.642	30.96 ±0.47
Витрата, л/хв			1	0.923	14.17 ±0.04			1	0.929	14.11 ±0.05
Тиск, бар				1	1.84 ± 0.01				1	2.32± 0.01

Таблиця 6 - Кореляційний аналіз значень змінних для цільової норми
внесення (300 л/га)

Змінні	Праве крило					Ліве крило				
	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE	Швидкість	СВК	Витрата	Тиск	Середнє± SE
Швидкість, км/год	1	0.677	0.916	0.898	6.20 ± 0.02	1	0.592	0.891	0.888	6.20 ± 0.02
СВК, %		1	0.688	0.721	25.58 ± 0.28		1	0.524	0.588	37.22 ± 0.57
Витрата, л/хв			1	0.918	15.47 ±0.04			1	0.905	15.39 ±0.04
Тиск, бар				1	2.19 ± 0.01				1	2.16 ±0.01

Відповідно до дисперсійного аналізу, виконаного на основі рандомізованого повного блокового дизайну, дисперсійний аналіз, виконаний для факторних секцій штанги та норми внесення, вказує на значний вплив на

змінну швидкості. Це означає, що зміни норми внесення мають значний вплив на змінну швидкості. Що стосується змінної СВК, дисперсійний аналіз, який вивчає взаємодію факторів секцій штанги та норми внесення з СВК, показує значні зміни у змінній СВК. Це вказує на те, що СВК може значно відрізнятись як у секціях штанги, так і в нормах внесення. Для змінної швидкості потоку дисперсійний аналіз секцій штанги та норми внесення показує значний вплив на змінну швидкість потоку. Це означає, що зміни норми внесення мають помітний вплив на швидкість потоку. Як і у випадку зі змінною величиною тиску, аналіз дисперсії, проведений із секціями штанги, і коефіцієнти норми внесення показують значну зміну змінної величини тиску. Це підкреслює значний вплив зміни норми внесення на тиск (див. Табл. 7).

Таблиця 7 – Дисперсійний аналіз для змінних

Змінні	Комбінації	SD	KO	F	<i>p</i>
Швидкість	Секції штанги	1	0,000	0,000	1,000
	Фактична норма	4	1849,475	1466,551	0,000
	Фактична норма × Секції штанги	4	0,000	0,000	1,000
	Помилка	19,288	1,261		
VOR	Секції штанги	1	89,485,513	501,684	0,000
	Фактична норма	4	396,758,542	2224,353	0,000
	Фактична норма × Секції штанги	4	23,481,152	131,643	0,000
	Помилка	19,288	178,370		
Витрата	Секції штанги	1	3,112	1,013	0,314
	Фактична норма	4	51,068,190	16,613,497	0,000
	Фактична норма × Секції штанги	4	1,630	0,530	0,713
	Помилка	19,288	3,074		
Тиск	Секції штанги	1	7,771	28,302	0,000
	Фактична норма	4	433,479	1578,791	0,000
	Фактична норма × Секції штанги	4	2,434	8,866	0,000
	Помилка	19,288	0,275		

Результати, отримані в результаті дисперсійного аналізу, пропонують більш детальне пояснення зв'язків, виявлених під час кореляційного аналізу. Наприклад, досліджуючи взаємодію швидкості з фактичною нормою внесення та факторами секції штанги, було помічено, що ці фактори мають значний вплив на швидкість. Подібним чином вплив СВК, швидкості потоку та тиску пов'язано як з факторами перерізу штанги, так і з фактичною нормою внесення.

Відсутність значущості для секцій штанги та значний вплив норми внесення (F-статистика: 2224,353, р-значення: 0,000) вказують на те, що зміни фактичної норми внесення мають виражений вплив на СВК, тоді як секції штанги не демонструють істотно вплинути на ці відносини. Дисперсійний аналіз показує, що фактична норма внесення значно впливає на швидкість потоку (F-статистика: 16 613,497, р-значення: 0,000), що підкреслює вплив змін фактичної норми внесення на змінність швидкості потоку. Проте не виявилось, що секції стріли мають істотний вплив на це співвідношення.

При внесенні пестицидів у польових умовах коефіцієнт помилок (відхилення між фактичною нормою внесення та цільовою нормою внесення) не повинен перевищувати 10 % [16,18]. У сучасних системах контролю норми внесення, які використовуються в комерційних цілях, було помічено, що пропорційний клапан, який відповідає за регулювання швидкості потоку, має обмежену здатність реагувати на керуючі сигнали.

У цьому дослідженні, якщо помилки в системі, що наближаються до заданого значення на початку кожного тесту, не враховуються (з моменту, коли значення помилки становить менше 10 відсотків), час застосування для всіх тестів і тривалість перевищення межі помилки ($\pm 10\%$) у межах часу нанесення показані наступним чином: 1726×49 , 1810×46 , 1973×21 , 1848×40 і 2168×53 с відповідно. Діапазон змін швидкості в межах цього часу застосування становив 5,10–10,23, 4,64–9,91, 3,68–7,89, 4,80–8,21 і 4,90–8,69 км/год відповідно.

Незважаючи на приблизно 2-кратну зміну швидкості в усіх тестах, абсолютний середній відсоток помилок застосування становив 2,81, 2,68, 2,28, 2,14 і 2,51 відповідно. В іншому дослідженні, проведеному [19] з використанням комерційно доступної системи контролю норми внесення, відсоток зміни норми внесення порівняно з відсотковими змінами норми для тих самих фактичних значень норми внесення був таким: 17–24,5, 4,9–13,9, 9,2–13,9, 3,5–6,6 і 5,8–7,9. Можна сказати, що пропорційні клапани, які відповідають за регулювання потоку та ефективно реагують на керуючий сигнал, підтримують фактичну норму внесення навколо заданої точки, коли норма змінюється.

ВИСНОВКИ

Помилки при обприскуванні можуть посилюватися, коли пропорційні клапани, відповідальні за контроль потоку в системах обприскувача, не можуть швидко реагувати на керуючі сигнали. У поточному дослідженні була реалізована замкнута система контролю, що складається з витратомірів і пропорційних клапанів, щоб зменшити такі помилки при застосуванні пестицидів за допомогою польових обприскувачів.

Штанга була розділена на незалежні праву та ліву секції, кожна з яких управлялася автономно. Було помічено, що розбіжності між цими двома розділами були статистично незначущими, що й очікувалося. Ці результати підкреслюють потенціал швидкодіючих пропорційних клапанів для підвищення продуктивності та адаптивності систем сільськогосподарських обприскувачів.

Отже, зі збільшенням швидкості трактора швидкість відкриття клапана зростає, наближаючи фактичну норму внесення до заданої. Коли швидкість руху трактора досягає певного рівня, система ефективно контролює фактичну норму внесення. Випадки раптового збільшення або зниження швидкості трактора тимчасово підштовхують значення фактичної норми внесення за допустимі межі; однак було також показано, що вони швидко повертаються в свої прийнятні межі. Незважаючи на навмисні зміни швидкості руху, застосовані в усіх тестах, проведених у поточному дослідженні, враховуючи, що зміни швидкості під час обприскування зазвичай більш плавні, було показано, що ця система вміло підтримує відхилення від норми в прийнятних межах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/ (accessed on 13 November 2022).
2. Virk, S.; Meena, R. Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers. University of Georgia Cooperative Extension, Athens, GA. Circular 1277; 2022; pp. 1–8. Available online: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277> (accessed on 14 February 2023).
3. Carroll, J. The Effects of Sprayer Speed and Droplet Size on Herbicide Burndown Efficacy. Master's Thesis, University of Arkansas, Fayetteville, AK, USA, 2017. Available online: <https://scholarworks.uark.edu/etd/2435> (accessed on 11 November 2022).
4. ASABE S572.3; Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
5. ASABE S592.1; Best Management Practices for Boom Spraying. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
6. Virk, S.; Prostko, E.; Kemerait, R.; Abney, M.; Rains, G.; Powell, C.; Carlson, D.; Jacobs, J.; Tyson, W. On-Farm Evaluation of Nozzle Types for Peanut Pest Management Using Commercial Sprayers. *Peanut Sci.* 2021, 48, 87–96.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkievicz, A.; Pecyna, A.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition

of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.

9. Amankulova K., Farmonov N., Mucsi L. Time-series analysis of Sentinel-2 satellite images for sunflower yield estimation, *Smart Agricultural Technology*, Vol. 3, 2023 DOI:10.1016/j.atech.2022.100098.

10. Grella, M.; Gioelli, F.; Marucco, P.; Zwertvaegher, I.; Mozzanini, E.; Mylonas, N.; Nuyttens, D.; Balsari, P. Field Assessment of a Pulse Width Modulation (PWM) Spray System Applying Different Spray Volumes: Duty Cycle and Forward Speed Effects on Vines Spray Coverage. *Precis. Agric.* 2022, 23, 219–252.

11. Kang, J.; Liu, G.; Guo, G. Image Preprocessing and Droplet Parameter Measurement Of-Sensitive Paper Based on ImagePy. *Sci. Technol. Eng.* 2021, 21, 10.

12. Процеси, машини таобладнання АПВ [Текст] : навч. посіб. / М. О. Свірень, В. П. Смірнов, І. М. Осипов та ін. - Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2018. - 296 с.

13. Ru Y, Liu Y Y, Qu R J, Patel M K. Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6): 1–6.

14. Appah, S., Jia, W., Ou, M., Wang, P., Gong, C. (2019b). Investigation of optimum applied voltage, liquid flow pressure, and spraying height for pesticide application by induction charging. *Appl. Eng. Agric.* 355, 795–804. doi: 10.13031/aea.13358.

15. Appah, S., Wang, P., Ou, M. X., Gong, C., Jia, W. D. (2019a). Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 122, 1–9. doi: 10.25165/j.ijabe.20191202.4673.

16. Ru, Y., Liu, Y. Y., Qu, R. J., Patel, M. K. (2020). Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 136, 1–6. doi: 10.25165/j.ijabe.20201306.5511

17. Wang, S., Li, X., Zeng, A., Song, J., Xu, T., Lv, X., et al. (2022). Effects of adjuvants on spraying characteristics and control efficacy in unmanned aerial application. *Agriculture* 12, 138. doi: 10.3390/agriculture12020138
18. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.
19. Jupp L. (2018). *Precision Farming From Above*. Writing Matters Publishing, 113 p.
20. Toraman, M.C. Effects of Leaf Surface Energy on Pesticidal Performance. *Tarim Bilim. Derg.* 2019, 25, 174–180.
21. Colaço, A., Bramley, R., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *F. Crop. Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.
22. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.
23. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.
24. Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2019. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agric.* 163, 104863. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863>.
25. Mendes, W.R., Araújo, F.M.U., Dutta, R., Heeren, D.M., 2019. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Syst. Appl.* 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

Додатки