

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

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Михайло ШУЛЯК

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження ефективності застосування елементів систем точного землеробства при обприскуванні посівів»

Виконав:

(підпис)

Андрій СИНЯКОВ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2401-2м

Науковий керівник:

(підпис)

Анатолій ЛЕБЕДЄВ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Михайло ШУЛЯК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Синяков Андрій Павлович

Дослідження ефективності застосування систем точного землеробства при обприскуванні посівів.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 43 сторінці машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 2 таблиці, 12 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Застосування автоматичного керування секціями (ASC) на сільськогосподарських обприскувачах залишається популярним, оскільки воно зменшує перекриття та внесення в небажані зони, що веде до економії витрат і покращує захист навколишнього середовища. Більшість контролерів обприскування намагаються підтримувати бажану цільову норму під час активації ASC (увімкнення та вимкнення секцій керування, які змінюють ширину секції штанги фактично обприскування), але існують обмежені відомості про реакцію контролера та зміну розряду форсунок під час роботи в полі. Таким чином, польові експерименти проводилися з використанням двох звичайних самохідних обприскувачів, оснащених комерційно доступними системами керування з можливостями ASC. Датчики тиску були встановлені на штангах обприскувача для реєстрації тиску в форсунках у режимі реального часу з даними, позначеними місцезнаходженням і часом GPS. Потік через сопло було отримано з тиску в соплі для обчислення рівномірності потоку через сопло або коефіцієнта варіації (CV) по всій штанзі, помилки відхилення (відсоткова різниця між фактичною та цільовою швидкістю потоку через сопло) і часу встановлення.

Результати показали, що CV форсунок становив $>10\%$ для обох систем керування автоматичною стрілою та автоматичним соплом, коли кожна з

секцій автоматичної стріли та автоматичного сопла було знову ввімкнено на 0,5 та 0,2 с відповідно. Крім того, похибки відхилення швидкості потоку через сопло, що перевищували $\pm 10\%$, виникали в полях як прямокутної, так і неправильної форми. Ці помилки відхилення від норми в основному виникали під час активації ASC, коли в той же час обприскувач прискорювався або сповільнювався. Збільшений час встановлення потоку через сопло до 20 с (затримка реакції) вказує на те, що контролеру норми можуть знадобитися інтелектуальні та покращені алгоритми керування, щоб мінімізувати стабілізацію потоку через сопло та, таким чином, зменшити помилки відхилення норми обприскувача під час роботи в полі.

Ключові слова: обприскування, норма внесення, пестициди, технологія змінних норм, автоматичне керування обприскуванням.

ANNOTATION

Sinyakov Andriy Pavlovich

Research into the effectiveness of precision farming systems in crop spraying.

Qualification work for a master's degree in the educational program "Precision farming systems" in specialty 208 "Agroengineering". Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The final qualification work is presented on 43 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 2 tables, 12 figures, 2 appendices, 25 literature sources.

The use of automatic section control (ASC) on agricultural sprayers remains popular because it reduces overlap and application to unwanted areas, which leads to cost savings and improves environmental protection. Most spray controllers attempt to maintain the desired target rate during ASC activation (switching on and off the control sections, which change the width of the boom section actually spraying), but there is limited information on the controller response and the change in nozzle discharge during field operation. Therefore, field experiments were

conducted using two conventional self-propelled sprayers equipped with commercially available control systems with ASC capabilities. Pressure sensors were installed on the sprayer booms to record nozzle pressures in real time with GPS location and time-tagged data. Nozzle flow was derived from nozzle pressure to calculate nozzle flow uniformity or coefficient of variation (CV) across the boom, deviation error (the percentage difference between actual and target nozzle flow rate), and setup time.

The results showed that the nozzle CV was $>10\%$ for both the autoboom and autonozzle control systems when each of the autoboom and autonozzle sections was turned back on for 0.5 and 0.2 s, respectively. Additionally, nozzle flow rate deviation errors exceeding $\pm 10\%$ occurred in both rectangular and irregularly shaped fields. These deviation errors mainly occurred during ASC activation, while at the same time the sprayer was accelerating or decelerating. The increased nozzle settling time of up to 20 s (response delay) indicates that the rate controller may need intelligent and improved control algorithms to minimize nozzle flow stabilization and thus reduce sprayer deviation errors during field operation.

Keywords: spraying, application rate, pesticides, variable rate technology, automatic spray control.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування.....	11
1.2 Аналіз досліджень роботи систем автоматичного керування обприскуванням.....	13
Розділ 2. Методика досліджень.....	18
2.1 Машини і обладнання.....	18
2.2 Польові дослідження.....	20
2.3 Статичні випробування.....	23
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	25
Висновки.....	38
Список використаних джерел.....	41

ВСТУП

1. Актуальність теми

Автоматичне керування секціями штангових обприскувачів (ASC) є одним із найпоширеніших рішень у галузі точного застосування пестицидів. Використання таких систем дозволяє мінімізувати перекриття та обробку небажаних зон, зменшуючи витрати хімічних препаратів та підвищуючи точність технологічного процесу. Проте, незважаючи на широке поширення ASC, існує обмежена кількість наукових даних щодо їх реакційних характеристик, стабільності подачі робочої рідини та впливу на якість обприскування за умов реальної польової експлуатації. Зокрема, недостатньо дослідженими залишаються динамічні процеси, що виникають під час прискорення, уповільнення або зміни ширини робочої зони при увімкненні й вимкненні секцій. Це формує потребу у проведенні прикладних досліджень, спрямованих на оцінювання ефективності застосування ASC та поведінки контролерів норми внесення в умовах змінних польових режимів.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Проблематика точності внесення пестицидів вивчається багатьма науковцями, які акцентують увагу на факторах, що визначають рівномірність розпилення, стабільність тиску та якість формування факела розпилу. Дослідження показують, що значний вплив на якість обприскування мають особливості конструкції розпилювачів, параметри гідравлічної системи, швидкість руху агрегату, погодні умови, а також особливості програмного забезпечення та алгоритмів роботи контролерів обприскувача.

Окремий напрям досліджень стосується роботи систем автоматичного керування секціями. Вчені відзначають, що ASC здатні суттєво зменшувати надлишкове внесення ЗЗР, однак їхня робота супроводжується перехідними процесами, які можуть призводити до значних відхилень норми внесення. У наукових джерелах подано результати аналізу різних типів контролерів та їх алгоритмів, але досі недостатньо вивчено реальну поведінку потоків через

форсунки під час динамічних змін у роботі обприскувача. Це створює наукову прогалину, що потребує дослідження за допомогою польових випробувань із використанням сучасних датчиків, інструментів фіксації параметрів та систем GPS-відстеження.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінювання ефективності застосування систем точного землеробства, зокрема автоматичного керування секціями обприскувача, та визначення їх впливу на якість обприскування за умов реальної експлуатації.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес обприскування посівів сільськогосподарських культур штанговими обприскувачами.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є параметри роботи систем автоматичного керування обприскуванням та їх вплив на рівномірність подачі робочої рідини, стабільність норми внесення та якість обприскування.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати чинники, що впливають на якість обприскування та роботу систем автоматичного керування.
2. Провести огляд існуючих технічних рішень у сфері ASC та визначити їх функціональні особливості.
3. Виконати польові дослідження роботи обприскувачів, оснащених ASC.
4. Дослідити динаміку зміни тиску в форсунках і рівномірність потоку під час активації систем керування.
5. Оцінити похибки відхилення норми внесення та визначити їх вплив на якість обприскування.
6. Узагальнити результати та сформулювати рекомендації щодо оптимізації роботи системи ASC.

7. Методи дослідження

У роботі застосовано комплекс методів: аналіз наукових джерел і технічної документації; інструментальні вимірювання параметрів роботи обприскувачів у польових умовах; методи GPS- і тензометричного моніторингу; математичні методи обробки експериментальних даних, зокрема аналіз коефіцієнта варіації, похибки відхилення та часу встановлення; статистичні методи оцінювання точності результатів.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 43 сторінці машинописного тексту, містить 2 таблиці, 12 рисунків і 2 додатки. Список використаних джерел включає 25 найменувань.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Фактори, що впливають на якість обприскування

Рівень якості обприскування визначається сукупністю основних чинників, серед яких вагоме значення мають технічні характеристики обприскувача, метеорологічні умови, фізико-хімічні властивості робочого розчину, а також правильність налаштувань обладнання та дотримання агротехнічних вимог. Одним із ключових елементів є тип встановлених форсунок, адже саме вони впливають на однорідність розподілу крапель, їхній діаметр та форму, що, у свою чергу, визначає ступінь покриття поверхні рослин і зменшує ризик знесення препарату повітряними потоками. Не менш важливим показником виступає тиск у системі подачі рідини: надмірно високий тиск спричиняє формування надто дрібних крапель, які легко випаровуються або зносяться вітром, тоді як занижений тиск веде до нерівномірного розподілу робочої суміші на площі обробки.

Швидкість руху обприскувача істотно впливає на якість нанесення препарату. Якщо агрегат рухається занадто швидко, виникають пропуски й нерівномірне покриття, тоді як надмірно повільна швидкість провокує перевитрату робочого розчину. Водночас вагому роль відіграють погодні чинники, зокрема швидкість вітру, температура довкілля та рівень вологості. Оптимальними вважаються умови, коли температура повітря перебуває в межах 15–25°C, відносна вологість не опускається нижче 60%, а сила вітру не перевищує 3–4 м/с. При порушенні цих параметрів, особливо за сильного вітру, значно знижується точність обприскування і зростає ризик знесення препарату на сусідні поля або інші культури.

Стан і якість води, що використовується для приготування робочого розчину, також мають суттєвий вплив на результат обробки. Тверда або забруднена вода здатна змінювати властивості пестицидів, викликати утворення осаду й засмічення форсунок, що ускладнює рівномірне розпилення. Не менш важливою складовою є коректний підбір препарату та

концентрації розчину: порушення норм внесення може спричинити зниження ефективності дії або навіть фітотоксичний ефект для культур. Для забезпечення стабільної роботи обприскувальної техніки необхідно проводити регулярне технічне обслуговування, перевіряти герметичність системи, чистоту фільтрів і стан форсунок, що гарантує надійне функціонування обладнання та стабільну якість обприскування.

Використання автоматизованих систем керування процесом обприскування має низку відчутних переваг, що сприяють підвищенню ефективності аграрного виробництва. Насамперед такі системи забезпечують максимально точне дозування засобів захисту рослин і мінеральних добрив, що дає змогу скоротити їх витрати та знизити шкідливий вплив на екосистему. Завдяки інтеграції GPS-навігації, сенсорних технологій і електронного контролю обприскування відбувається з високою точністю, без пропусків і перекриттів, що гарантує рівномірне нанесення робочої рідини на поверхню поля.

Крім того, автоматичні системи дозволяють адаптувати норми внесення з урахуванням особливостей рельєфу, типу ґрунту, стану посівів і фаз розвитку культур, що забезпечує більш раціональне використання агротехнологій. Ще однією важливою перевагою є мінімізація людського фактора, оскільки автоматизація зменшує ризик помилок, полегшує умови праці операторів і сприяє економії робочого часу. Сучасні комплекси можуть бути інтегровані з іншими цифровими платформами аграрного менеджменту, створюючи цілісну систему управління господарством на основі даних. У підсумку, впровадження інтелектуальних систем контролю обприскування сприяє підвищенню врожайності, зниженню витрат і забезпечує сталий розвиток сучасного агросектору.

Рівень точності автоматизованих систем управління процесом обприскування визначається сукупністю чинників, що впливають на рівномірність розподілу робочої рідини, ефективність обробки посівів і скорочення втрат препаратів. Одним із найважливіших аспектів є коректність

дозування, яка напряду залежить від стабільності тиску в системі, точності калібрування розпилювачів та технічного стану датчиків витрати. Не менш значущу роль відіграють навігаційні системи та засоби позиціонування агрегату, зокрема використання сигналів GPS і RTK, що забезпечують високий рівень точності руху під час роботи в полі.

Метеорологічні параметри, такі як швидкість і напрям повітряних потоків, температурний режим і відносна вологість, також істотно впливають на процес розпилення. Сильний вітер може зносити дрібні краплини за межі робочої зони, тоді як підвищена температура або низька вологість змінюють швидкість їх випаровування.

Велике значення має й технічний стан обприскувача разом із його конструктивними особливостями. Зношені чи забруднені форсунки, негерметичні з'єднання або нерівномірна подача рідини по довжині штанги часто стають причиною неоднорідного внесення робочого розчину.

Необхідно враховувати і якість програмного забезпечення, що забезпечує функціонування системи. Саме алгоритми керування визначають оперативність реагування обладнання на зміни умов праці, коригування витрати розчину й підтримання встановленої норми внесення.

Крім того, суттєвий вплив має людський чинник – правильне налаштування техніки, рівень підготовки оператора, уважність під час роботи та дотримання регламентів технічного обслуговування. Всі ці елементи у взаємодії формують загальну точність і стабільність функціонування автоматичних систем керування процесом обприскування.

1.2 Аналіз досліджень роботи систем автоматичного керування обприскуванням

Ширина робочих штанг сучасних сільськогосподарських обприскувачів постійно зростає. Нині дедалі частіше можна спостерігати використання агрегатів із шириною захвату близько 36,6 м, що працюють на швидкості приблизно 30 км/год, аби забезпечити своєчасне покриття великих площ орних

земель. Таке збільшення ширини внесення у поєднанні зі складною геометрією та різноманітними розмірами полів, характерними для південно-східних регіонів країни, вимагає від оператора та систем керування високої стабільності, оперативної реакції й точності під час роботи. Це необхідно для забезпечення рівномірного розподілу робочого розчину та мінімізації похибок при обприскуванні.

Результати попередніх досліджень та опитувань, проведених серед фермерів і приватних аплікаторів гербіцидів, свідчать, що понад половина обприскувачів демонстрували відхилення від заданої норми внесення більше ніж на 10 %. Основними причинами таких помилок визначено зношування наконечників форсунок, неправильне калібрування обладнання або неспроможність системи підтримувати стабільний потік під час роботи у полі [3, 7].

Для усунення подібних проблем протягом останніх десятиліть у конструкції польових обприскувачів поступово запроваджувалися контролери норми подачі, які здатні автоматично регулювати витрату робочої рідини залежно від швидкості руху машини. Використання таких систем дозволило істотно зменшити коливання фактичної норми внесення, що позитивно позначилося на якості обробки посівів. Разом із тим сучасні умови господарювання потребують ще більш досконалих засобів керування, здатних забезпечувати високоточне застосування засобів захисту рослин у межах кожного конкретного поля та мінімізувати негативний вплив пестицидів на довкілля.

На сьогодні практично всі великі самохідні обприскувачі обладнуються електронними системами, які контролюють норму внесення через регулювання об'ємної подачі робочої рідини, а не лише загального тиску у системі. Такі контролери підтримують задану норму незалежно від кількості активованих секцій штанги чи зміни швидкості руху агрегату.

Точність роботи цих систем безпосередньо залежить від чутливості контролера та роздільної здатності витратоміра, що забезпечують стабільну

витрату рідини в будь-який момент обприскування. В останні роки спостерігається значне поширення технологічних рішень — зокрема, кількість дилерських центрів, що пропонують обладнання з GPS-системами керування секціями обприскувача, зросла майже на 40 %, тоді як частка виробників, які інтегрують системи секційного керування, збільшилася приблизно на 27 %.

Сутність автоматичного керування секціями (ASC) полягає у вибіркового вимкненні клапанів секцій штанги або електромагнітних клапанів на форсунках у тих ділянках, які вже були оброблені або знаходяться поза межами робочої зони. При поверненні у необроблену частину поля система знову автоматично вмикає відповідні секції. Такий підхід дозволяє уникати накладання шарів розчину та забезпечує помітну економію матеріальних ресурсів.

За результатами досліджень, проведених Лаком та співавт. [8], застосування ASC зменшило перекриття робочих зон до 6,2 %, тоді як під час ручного керування оператором цей показник становив 12,4 %. Крім того, при роботі у полях неправильної конфігурації загальна площа покриття може бути скорочена на 15–18 %, що свідчить про значну ефективність автоматизованого керування.

Разом із тим для великих самохідних обприскувачів залишаються актуальними питання, пов'язані з точністю обприскування під час реальних польових умов експлуатації. Особливе занепокоєння викликає те, наскільки надійно системи з технологією ASC здатні підтримувати необхідну норму внесення на різних типах рельєфу, при зміні швидкості руху та різних агротехнічних режимах роботи.

Системи регулювання норми внесення характеризуються наявністю певних часових затримок, які проявляються у процесі коригування подачі під час роботи в полі. Так, реакція системи керування на сигнал від приймача DGPS, навіть при збереженні горизонтальної точності на рівні близько 1 м, може мати затримку до 2,2 секунди. Окрім уповільнення, спричиненого самою системою управління та часовими втратами GPS-відгуку, [5, 11] зазначають,

що деякі потокоорієнтовані контролери схильні до перевищення заданої норми внесення у випадках, коли активована лише одна секція штанги обприскувача. За даними Гріссо та співавт. [9], а також Міллера і Сміта [10], розташування форсунок уздовж штанги по боках також може впливати як на величину, так і на момент появи похибок у фактичному дозуванні робочої рідини.

Раніше проведені дослідження наголошували, що для ефективного функціонування технологій точного землеробства необхідно мати системи керування, здатні оперативно реагувати на зміни вимог до норм внесення [12]. Під час статичних випробувань систем автоматичного контролю секцій (ASC) виявлено, що коливання тиску у форсунках може сягати від 6,7 % до 20,0 %, що відповідає зростанню потоку рідини через сопла на 3,7–10,6 %. Додаткові тести показали, що стабілізація тиску на форсунках тривала до 25,2 секунди для автоматичної штанги та приблизно 15,6 секунди для системи з автоматичним керуванням окремими форсунками після вимкнення або повторного їх увімкнення. Підвищений тиск у соплах разом із затримкою стабілізації свідчить, що під час ручного або автоматичного керування секціями в польових умовах можливі помітні коливання у фактичному дозуванні речовини.

Було зафіксовано, що час досягнення сталої швидкості потоку через сопло змінювався в межах 0,4–14,4 секунди, що викликало відхилення швидкості подачі від –36,0 % до +28,7 % під час руху по рядку. Такі розбіжності у динамічній реакції тиску та відхиленнях подачі підтверджують наявність різниці між роботою секцій штанги та індивідуальним управлінням соплами. Встановлено також, що час стабілізації потоку в режимі ASC вказує на недостатній рівень зворотного зв'язку між системою контролю та виконавчими механізмами. Це особливо помітно, коли перемикання секцій відбувається швидше, ніж дозволяє передбачений інтервал зворотної реакції системи, необхідний для точного регулювання заданої норми внесення. Хоча використання ASC має очевидні переваги для операторів, результати

статичних випробувань, які імітують реальні умови роботи, показали, що часте ввімкнення та вимкнення форсунок може спричиняти істотні коливання тиску в системі, що своєю чергою призводить до надмірного або недостатнього внесення препарату [13].

Величина зазначених похибок особливо збільшується при роботі на ділянках неправильної форми або за використання обприскувачів великої ширини захвату. Попри наявність окремих публікацій щодо апаратних затримок систем контролю потоку, все ще бракує досліджень, присвячених оцінці рівномірності подачі рідини через форсунки та стабільності фактичної норми внесення у процесі застосування високоточних технологій, зокрема ASC. Аналіз однорідності потоку форсунок і точності дозування є важливим для підтвердження спроможності алгоритмів управління — ключового елементу запатентованих систем — забезпечувати стабільну роботу під час польових умов. Порівняння результатів статичних та польових експериментів може допомогти у прогнозуванні реальної продуктивності великих машин для обприскування, а також у розробці експериментальної методики, що дозволить прискорити кількісну оцінку стабільності потоку форсунок і точності дозування. У зв'язку з цим основними завданнями даного дослідження визначено:

(1) провести оцінку у реальному часі рівномірності роботи форсунок (коефіцієнта варіації, CV) уздовж штанги для двох типів систем ASC;

(2) кількісно встановити та порівняти час досягнення сталої подачі (час встановлення потоку, ЧВП) і відхилення швидкості потоку під час як статичних, так і польових випробувань.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Машини і обладнання

Статичні та польові дослідження здійснювалися із застосуванням двох стандартних самохідних обприскувачів, які надалі позначено як Обприскувач – 1 та Обприскувач – 2. Кожен із них був обладнаний серійними регуляторами норми внесення робочої рідини, що підтримують функцію ASC. Перший обприскувач мав систему автоматичного керування штангою (рис. 1а), тоді як другий — систему автоматичного керування форсунками. Обприскувач – 1 був оснащений штангою завширшки 36,2 м, на якій змонтовано 95 форсунок, розташованих через кожні 0,38 м по всій її довжині.

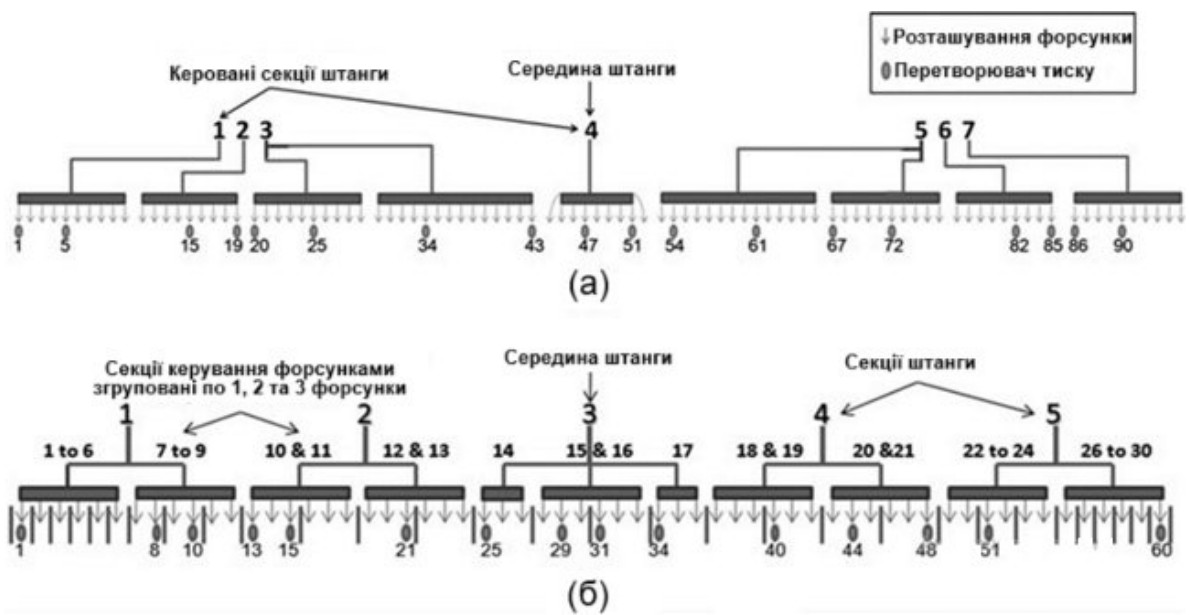


Рис 1 - Схема а) Обприскувач-1, що містить сім окремих секцій штанги, і б) Обприскувач -2, який включав 30 секцій форсунок з одним, двома або трьома форсунками. Секції пронумеровані зліва направо для обох штанг із числовим визначенням розташування сопел уздовж штанги.

Конструктивно штанга являє собою несучу систему, де трубопровід (труба) одночасно виконує функції опорного елемента для кожного корпусу розпилювальної форсунки та каналу для подачі робочого розчину. Налаштування цього обприскувача передбачало поділ штанги на сім окремих

секцій, роботу яких контролювали через сім наявних секційних клапанів, що забезпечували автоматичне вмикання та вимикання подачі рідини у відповідні зони.

На першій та сьомій секціях штанги встановлено по десять розпилювальних форсунок; на другій, четвертій і шостій секціях — по дев'ять; а на третій і п'ятій секціях розташовано по двадцять чотири форсунки відповідно (рис. 1а). Обприскувач-2 мав штангу завширшки 30,5 метра, на якій рівномірно розміщено 60 форсунок із міжцентровою відстанню 51 сантиметр.

Автоматизоване керування роботою форсунок у цьому обприскувачі забезпечувалося за допомогою електромагнітних клапанів (*Capstan Ag Systems*). У контролері вони були згруповані таким чином: шість крайніх форсунок із кожного боку мали індивідуальне керування, наступні шість внутрішніх форсунок — поєднані попарно, а решта розділені на групи по три розпилювачі (рис. 1б).

Система автоматичного керування секціями (ASC) для Обприскувача-1 складалася з консолі Topcon ×20 (США) та 30-канального електронного блоку управління *Topcon Precision Ag* (США), який забезпечував подачу сигналів до окремих електромагнітних клапанів (*Capstan Ag Systems, США*), змонтованих безпосередньо на корпусах форсунок. Для Обприскувача-2 використовувалися дисплей *Greenstar – 2* (*Deere & Company, США*) та контролер *Spraystar* (*Deere & Company, США*), що мали сім каналів управління для активації запірних клапанів секцій штанги.

Регулювання подачі робочої рідини через штанги обох обприскувачів здійснювалося шляхом використання сигналів зворотного зв'язку від вбудованих витратомірів. Контролери в режимі реального часу керували швидкістю гідравлічного насоса, змінюючи загальний потік через систему завдяки роботі гідравлічних клапанів, які функціонували за принципом широтно-імпульсної модуляції.

Крім того, обидва обприскувачі були обладнані сучасними системами автоматичного водіння, що забезпечували стабільний рух агрегатів під час виконання технологічних операцій.

2.2 Польові дослідження

Польові експерименти здійснювали з розрахунковими нормами внесення 93,5; 112,1 та 140,2 л/га для Обприскувача-1, а також 93,5 і 140,2 л/га для Обприскувача-2. Другий обприскувач застосовували з метою отримання даних щодо процесу розпилення на трьох ділянках неправильної конфігурації (поля 1, 2 і 4), які включали численні необроблені зони, здебільшого зайняті трав'яною рослинністю або природними водними перешкодами (рис. 2).

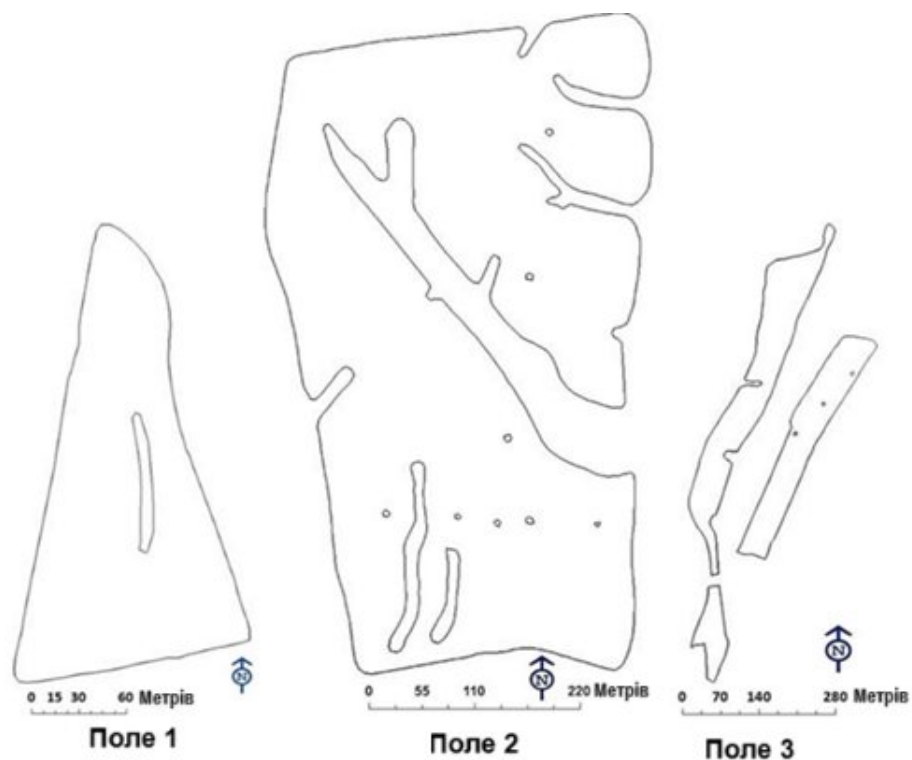


Рис. 2 - Межі поля 1, поля 2 і поля 4 для польових випробувань з використанням Обприскувача-2

Польові експерименти із застосуванням Обприскувача-1 проводилися на ділянках прямокутної та трикутної конфігурації. Для фіксації тиску в соплах на штангах були змонтовані високочастотні датчики тиску (1502 B81 EZ 100 PSI G, виробництва PCB Piezotronics Inc., США) з часом

відгуку не більше 1 мс та точністю вимірювання до 0,25 % шкали. Для Обприскувача-1 використовували 18 таких перетворювачів, а для Обприскувача-2 — 15. Розміщення сенсорів здійснювали таким чином, щоб кожна секція штанги мала принаймні два вимірювальні пристрої, відповідно до конфігурації трубопровідної системи (рис. 1). Крім того, на обох машинах один з датчиків встановлювався на основній лінії подачі у місці штатного контролера тиску, що забезпечував зворотний зв'язок і дозволяв вимірювати загальний тиск у гідравлічній системі.

Для збору даних використовували систему на базі плат National Instruments, яка забезпечувала зчитування та реєстрацію всіх параметрів із частотою дискретизації 5 Гц під час польових експериментів і 50 Гц у разі проведення лабораторних (статичних) тестів. Паралельно фіксували координати та швидкість руху, отримані за допомогою GPS-приймача з субметровою точністю (Ag132, Trimble Navigation Ltd., США) для Обприскувача-2, та GNSS RTK-системи (база R7 з радіомодулем Trimmark 3, Trimble Navigation Ltd.) для Обприскувача-1. Усі зібрані показники зберігали у текстовому форматі для подальшого аналітичного опрацювання.

Тиск на форсунках (моделі Teejet AI11003 для Обприскувача-1 і Teejet TT11005, Spraying Systems Co., Wheaton, IL, США для Обприскувача-2) перетворювали у значення витрати, використовуючи дані з офіційного каталогу виробника (Teejet Catalog 50A). Рекомендований робочий тиск становив 206,8–689,5 кПа для Обприскувача-1 та 103,4–620,5 кПа для Обприскувача-2, при цьому обидва агрегати функціонували у межах зазначених параметрів.

Фактична витрата через штангу (л/хв) визначалася шляхом підсумовування та усереднення потоків крізь форсунки тих секцій, що залишалися у стані «Увімкнено» у кожен момент часу за GPS-мітками. Коефіцієнт варіації (CV) обчислювали, враховуючи лише активні секції, що

відображало однорідність подачі рідини по всій ширині штанги. Цільова витрата через форсунки для кожної часової позначки визначалась із урахуванням кількості працюючих секцій, швидкості руху машини та встановленої оператором норми внесення препарату.

Консоль управління Обприскувача-2 одночасно фіксувала часову мітку та стан кожного каналу (1 – вкл., 0 – викл.) для всіх координат GPS із частотою 5 Гц. Файли, що містили інформацію про стан секцій і тиск, були синхронізовані за часовими позначками та об'єднані в єдину базу даних. Визначений таким чином стан секцій використовувався для обчислення ширини обприскування у кожній GPS-точці.

Для Обприскувача-1 тиск у системі та середній тиск форсунок у кожній секції застосовували для ідентифікації режиму роботи клапанів штанги (ON/OFF) за допомогою програмного середовища *MATLAB R2008a*. Було встановлено, що середнє значення тиску на форсунках активних секцій відрізняється від системного не більш ніж на $\pm 5\%$. Отже, якщо різниця між середнім тиском секції та загальним тиском у системі перевищувала -5% , це означало вимкнення секції у відповідний момент часу. У випадку, коли початково секція перебувала у вимкненому стані, підвищення середнього тиску на форсунках понад 34,5 кПа трактувалося як вмикання секції.

Зрештою, загальну похибку швидкості подачі розраховували у відсотковому відношенні як різницю між фактичною та цільовою витратою згідно з таким рівнянням:

$$\text{Загальна витрата форсунки (\%)} = \frac{(\text{Фактична швидкість потоку форсунки} - \text{цільова швидкість потоку форсунки}) \times 100}{\text{цільова швидкість потоку форсунки}}, \quad (1)$$

Рівномірність витрати розчину через сопло (CV) визначали шляхом розрахунку середнього показника та стандартного відхилення потоку рідини, що проходила через сопла всіх увімкнених форсунок або окремих секцій штанги. Під час проведення як польових, так і лабораторних (статичних) тестів відхилення у витраті рідини в межах $\pm 10,0\%$ розглядалися як допустимі. Для

візуалізації просторового розподілу отриманих результатів на полях та вибору характерних прикладів сценаріїв для детальнішого аналізу були створені карти варіацій і коефіцієнтів CV за допомогою програмного забезпечення ArcMap 9.3, розробленого компанією ESRI.

2.3 Статичні випробування

Для оцінки Обприскувача-2 було обрано цільову норму 93,5 л/га та змодельовані швидкості руху 6,4 і 29,0 км/год, що базувалися на типових низьких та високих швидкостях, які фіксувалися під час польових тестувань. Оскільки Обприскувач-1 не мав можливості імітувати різні швидкості, для проведення статичних експериментів були встановлені системні робочі тиски 138, 276, 414 та 552 кПа при постійній швидкості 19,3 км/год. Зміна швидкості руху виконувалася ручним вибором у контролері норми через функцію самотестування на Обприскувачі-1. Для Обприскувача-2, де аналогічна функція відсутня, різні цільові тиски були заздалегідь запрограмовані у його контролері через меню налаштувань. Експериментальна робота включала такі сценарії: (1) послідовне увімкнення та вимкнення окремих секцій (обидва обприскувачі); (2) поетапне відключення всіх секцій та повторне включення з інтервалами 1 та 5 секунд (обидва апарати); (3) зміну швидкості від 6,4 до 29,0 км/год із подальшим поверненням до 6,4 км/год (лише Обприскувач-2).

Під час кожного тесту обрані секції відключалися до стабілізації потоку через сопло, після чого вони знову підключалися. Для розрахунків сповільнення та витрати через форсунки ЧВП використовувався середній потік лише тих форсунок, які залишалися увімкненими. Загальна величина відхилення потоку форсунок відображала стабільність норми внесення під час різних статичних та польових випробувань, забезпечуючи оцінку надлишкового та недостатнього внесення рідини.

Для аналізу впливу прискорення машини та активації ASC визначалися конкретні сценарії роботи системи (наприклад, рух у зоні повороту та через пунктирні ряди). Термін «повторний вхід» описував процес входження обприскувача в зону обробки, тоді як «вихід» означав його переміщення з оброблюваної ділянки.

У прикладах, наведених у розділі результатів, сім секцій штанги Обприскувача-1 були представлені сірими багатокутниками, початкові проходи вздовж межі поля — зеленими заштрихованими зонами, а ділянки, покриті при увімкнених секціях, — синім кольором. Для обчислення змін швидкості потоку через сопло, включно з цільовою та кінцевою швидкістю, відсотком відхилень і ЧВП, застосовувався MATLAB. ЧВП визначався як проміжок часу між моментом, коли потік через сопло виходить за межі $\pm 5\%$ (ЧВП5) або $\pm 10\%$ (ЧВП10) від початкового значення, та моментом стабілізації потоку у межах ± 5 або $\pm 10\%$ від кінцевого показника. Обидва пороги відхилень, $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$, використовувалися для розрахунків ЧВП, оскільки статичні випробування проводилися на нерухомій штанзі обприскувача на рівній поверхні. За таких контрольованих умов оцінка відхилень потоку проводилася за критерієм $\pm 5\%$, тоді як поріг $\pm 10\%$ застосовувався як галузевий орієнтир.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Польові випробування за участю Обприскувач-1 із автоматичною штангою продемонстрували, що коефіцієнт варіації (CV) форсунок перевищував 10 %, а швидкість подачі рідини окремих форсунок відхилялася більш ніж на ± 10 % від встановленої норми (рис. 3). Такі коливання спостерігалися періодично, проте переважно вони зосереджувалися в зонах розвороту агрегату на полі. Основною причиною цих відхилень було налаштування регулятора норми для компенсації прискорень і гальмувань обприскувача під час руху. Використання системи автоматичного керування секціями (ASC) на цьому полі було мінімальним через його прямокутну конфігурацію, внаслідок чого практично всі секції активувалися або вимикалися одночасно.

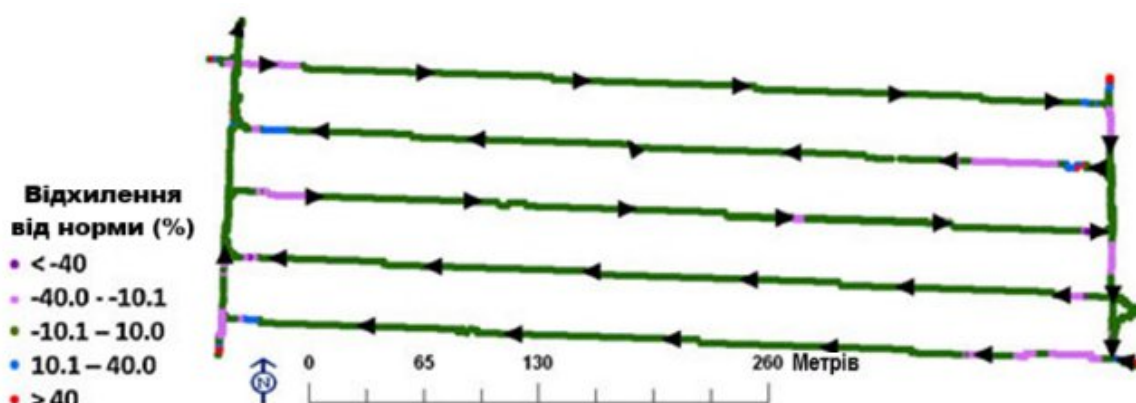


Рис. 3 - Карта відхилень форсунок для прикладу поля з використанням Обприскувач-1 із напрямком руху, позначеним чорними стрілками

Швидкість відхилення утримувалася в межах ± 10 % від запланованого показника завдяки стабільним умовам роботи, зокрема постійній швидкості руху та активності всіх секцій, що характерно для більшості польових операцій. Проте наведений приклад демонструє небажану продуктивність розпилювальної форсунки, спричинену затримкою системи керування під час змін швидкості. Ці результати повинні враховуватися оператором у поєднанні з конструктивними особливостями обприскувача та його системи управління.

Дослідження Обприскувача-2 показали, що середнє значення CV форсунок перевищувало 10,0 протягом 26 % часу (Рис. 4а), а швидкість відхилення перевищувала $\pm 10,0\%$ у 66 % часу (Рис. 4б) на трьох полях складної форми (Рис. 5). Коефіцієнти варіації потоку та відхилення форсунок були порівнянними (Рис. 4) для всіх трьох ділянок, незважаючи на різні площі та конфігурації. CV потоку форсунок перевищував 10 % під час виходу та повторного входу в зону обприскування, а також при активації ASC у відповідних зонах.

Обидві ситуації впливали на бічний розподіл рідини, що призводило до нерівномірного покриття поверхні. Недостатнє нанесення може спричинити зниження ефективності контролю шкідників. Такі явища викликають занепокоєння у операторів, які застосовують технології точного внесення пестицидів. Активізація автоматичного керування системою відбувалася протягом 63,2, 65,5 та 77,9 % часу у полях 1, 2 та 4 відповідно (Рис. 6а). Швидкості руху для ділянок 1, 2 і 4 варіювалися від 16,0 до 24,0 км/год у 63,1, 51,7 та 41,7 % часу відповідно (Рис. 6б).

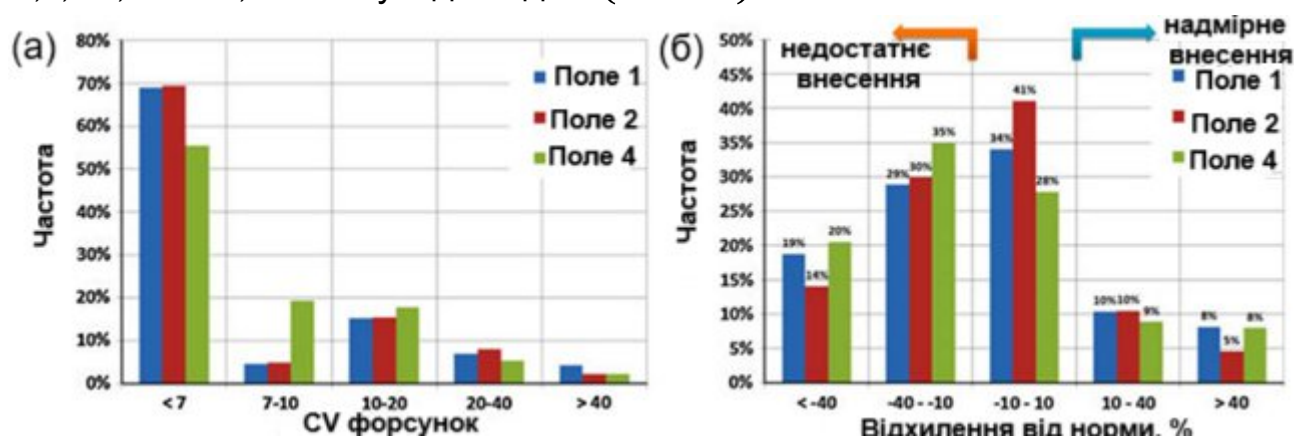


Рис. 4 – Графіки розподілу CV форсунок (а) та похибки відхилення від норми (б) для трьох полів із використанням Обприскувач-2

Швидкість транспортного засобу змінювалася під час маневрування оператором на території полів, включно з ділянками, де проходили трав'яні та водні канали або знаходилися перешкоди. Внаслідок цього спостерігалось як прискорення, так і уповільнення обприскувача з величиною понад $\pm 0,5$ м/с²

протягом 26,6 %, 23,8 % та 29,6 % часу для полів 1, 2 і 4 відповідно, а також фіксувалися відхилення швидкості, що перевищували ± 10 %.

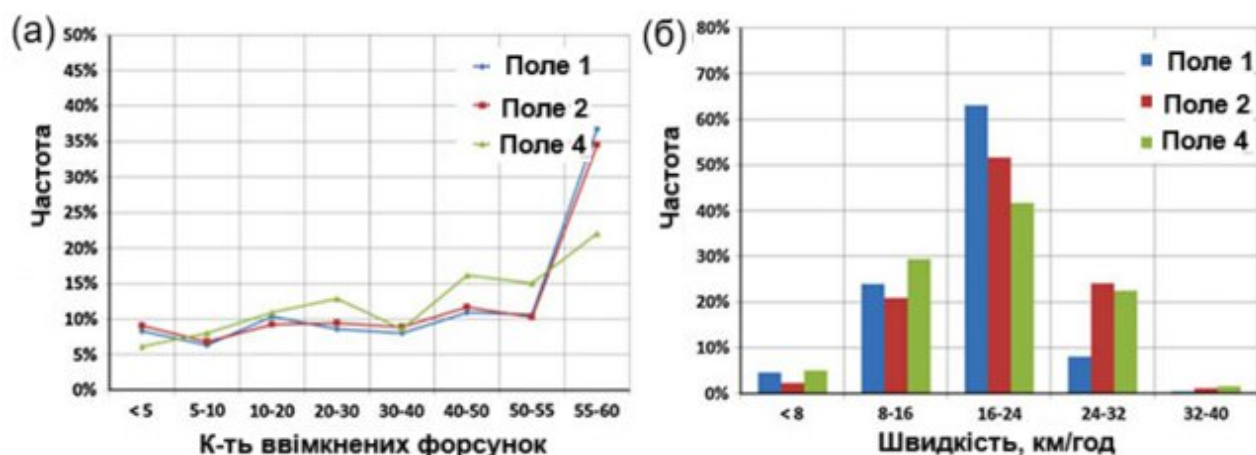


Рис. 5 – Карта відхилення норми форсунки під час внесення 93,5 л/га на полях неправильної форми 2(a), 1(b) та 4(c) з використанням Обприскувача-2. Чорні стрілки вказують напрямок руху

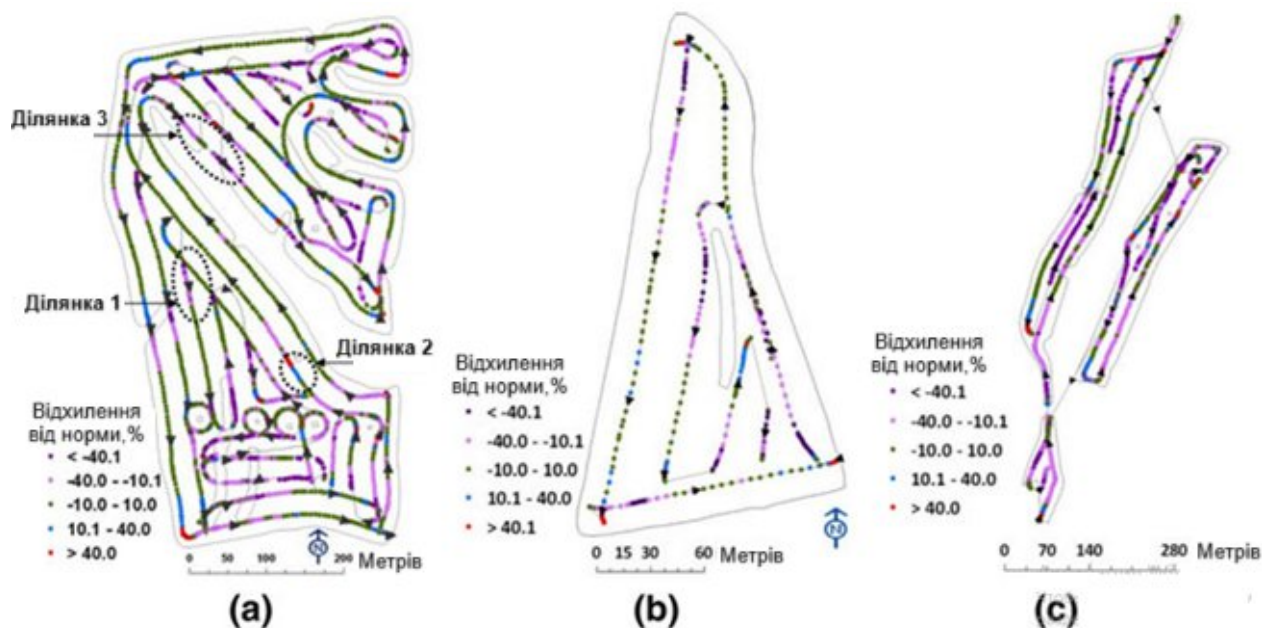


Рис. 6 – Графіки розподілу для а) кількості форсунок на та б) швидкості руху для кожного з трьох полів при використанні Обприскувача-2

Активация ASC (контролер автоматично вмикає та вимикає секції форсунок, водночас відображаючи кількість активних секцій) та карти розподілу швидкості (рис. 7) демонструють, що витрати системи змінюються частіше, ніж прогнозувалося, під час польових випробувань. Крім того,

контролер швидкості отримує високу вимогу щодо швидкого реагування на коливання потоку системи під час роботи ASC або при зміні темпу руху техніки.

У таких ситуаціях (рис. 7) системі управління потрібен певний час для адаптації та досягнення заданої швидкості потоку. Ці коливання призводять до помилок відхилення від потрібного рівня швидкості при русі під кутом або під'їзді до зон без обприскування (наприклад, ділянок з трав'яними смугами, водними каналами та іншими перешкодами) на полях неправильної форми. В цілому, відхилення форсунок спостерігалось як у Обприскувача-1, так і в Обприскувача-2, при цьому підтримувати роботу в межах бажаних норм виявилось складним. Такі відхилення необхідно коригувати для забезпечення цільових показників роботи форсунок та підтримки високої ефективності операції.

Помилки тестів на прискоренні

Для ілюстрації реакції системи керування та можливого обсягу позанормового внесення для Обприскувача-2 було обрано приклад повторного входу з Поля 2 (Ділянка 1, рис. 7). Під час повторного входу під кутом 30° потік у системі зріс з 5,6 до 126,3 л/хв у той час, коли швидкість обприскувача збільшувалася з 8,0 до 26,9 км/год за умови роботи секцій 4–30 форсунок. Аналіз показав, що коефіцієнт варіації (CV) сопел перевищував +10,0 %, а відхилення сягало до -40 % (рис. 5а, ділянка 1). Було встановлено, що високі значення CV по штанзі здебільшого пов'язані з повторним увімкненням форсунок або секцій, а також можуть виникати через невідповідність системи технічним вимогам під час заповнення сантехнічних елементів (наприклад, шлангів і трубок), коли секції активуються повторно.

Таким чином, щоразу при переході керованої секції зі стану ВИМК. у стан УВИМК., CV сопла перевищували +10 % приблизно протягом 0,2 с. Цей приклад свідчить про те, що Обприскувач-2 пройшов близько 64 м, перш ніж контролер зміг забезпечити відповідну швидкість потоку рідини, оскільки секції форсунок були активовані, а обприскувач одночасно розганявся.

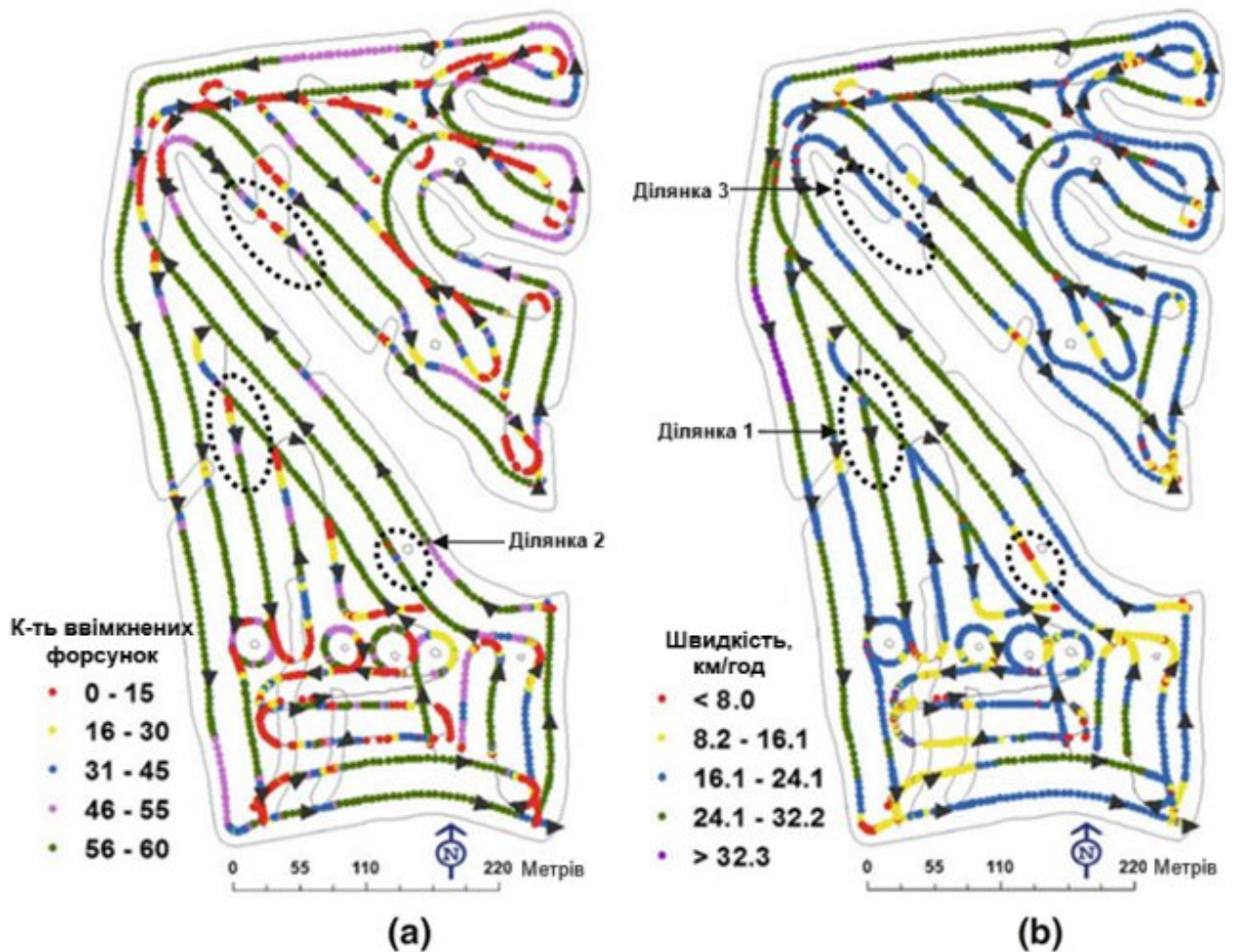


Рис. 7 - Карти внесення для Поля 2, які ілюструють: а) кількість форсунок і б) швидкість руху разом із напрямком руху (чорні стрілки) для Обприскувача-2

Аналогічний сценарій був вивчений і для Обприскувача-1 (рис. 8). У цьому випадку апарат збільшив швидкість руху від 5,7 до 20,7 км/год, при цьому секції штанги 1–7 підключалися по черзі, коли техніка знову заходила в зону обприскування під кутом 40°. Аналіз показав, що відхилення витрати через форсунки досягало +164,9 % під час роботи секцій 1–3 і знижувалося до –46,5 % при активних секціях 4–7. Похибки у регулюванні подачі рідини виникали на протязі приблизно 60 м до моменту, коли значення стабілізувалися у межах $\pm 10,0$ % від встановленої швидкості руху. Отримані дані для Обприскувача-1 були зіставлені з показниками Обприскувача-2 під час розгону та повторного входження в зону обприскування.

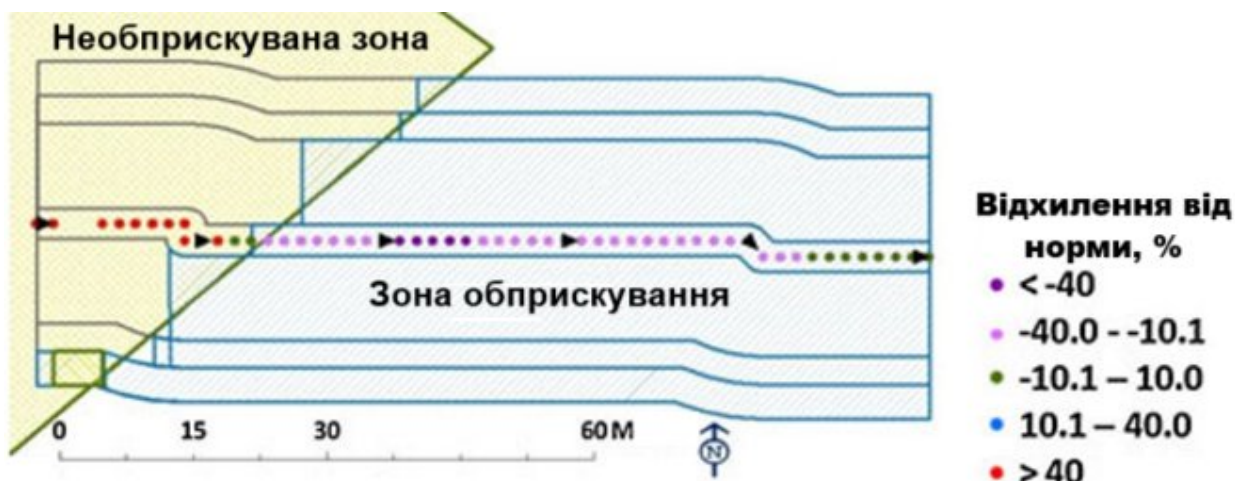


Рис. 8 – Приклад сценарію прискорення обприскувача-1 та активації ASC, коли він знову входить (увімкнення секцій) у зону обприскування (заштрихована синім кольором) при внесенні з цільовою нормою 140,2 л/га. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху

Помилки польових тестів уповільнення

Був помітний вплив уповільнення на величину відхилення роботи форсунок у кількох експериментах для обох типів обприскувачів. Ділянка 2 (рис. 5а, 7) демонструє CV форсунок та швидкість потоку для Обприскувача-2 під час зниження швидкості, що супроводжувалося тимчасовим вимкненням секції. У цьому місці техніка зменшила швидкість, щоб обійти стовп лінії електропередач. В результаті витрата системи знизилася з 85,2 до 11,7 л/хв, оскільки швидкість обприскувача зменшилася з 18,7 до 3,2 км/год (рис. 7б, ділянка 2).

Коли Обприскувач-2 підходив до стовпа, майже всі секції форсунок залишалися ввімкненими, поки 11 секцій не були вимкнені під час маневрування навколо перешкоди. У цьому випадку відхилення норми досягло +120 %. На рисунку 8 наведено приклад Обприскувача-1, який сповільнювався з 24,3 до 7,4 км/год під час виходу з оброблюваної зони. Карта відхилень від норми (рис. 9) показала, що уповільнення викликало похибки до +50 % для Обприскувача-1.

Зниження швидкості Обприскувача-1 постійно вимагало корекції витрати потоку системи в умовах динамічного руху та свідчить про можливі обмеження зворотного зв'язку та швидкості реакції контролера. Водночас у обох сценаріях CV форсунок залишався в межах 7,0 %, що підтверджує рівномірний розподіл робочого розчину по штанзі навіть під час уповільнення.

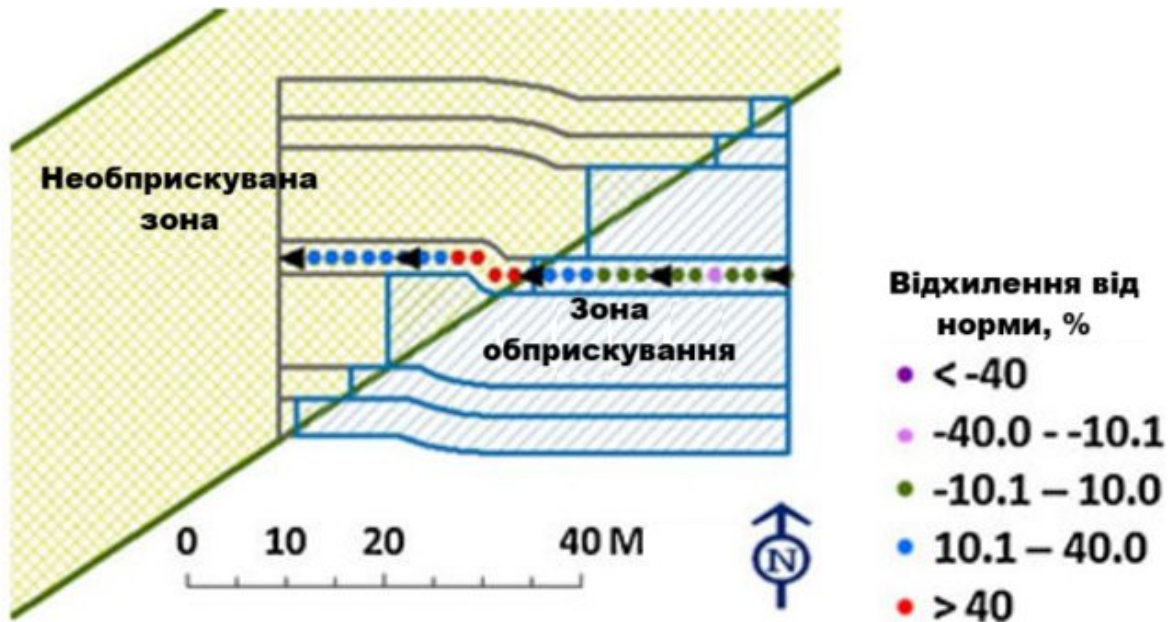


Рис. 9 - Приклад уповільнення обприскувача-1 під час виходу (секції вимкнено) із зони обприскування на попередньо оброблену ділянку (заштрихована зеленим) під час внесення з цільовою нормою 93,5 л/га. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху

Результати статичних випробувань на прискорення та уповільнення. Статичні тести обприскувача Обприскувач-2 продемонстрували, що прискорення викликало відхилення від заданої норми внесення в межах від -7,8 до 7,4 % (Таблиця 1). Під час уповільнення відхилення насадки були більш вираженими, коливаючись від -7,5 до 37,2 %. Цікаво, що при швидкості руху 16,1 км/год фіксувалися негативні значення. Час стабілізації потоку насадки ЧВП5 у процесі розгону та гальмування варіювався від 5,6 до 20,8 секунд (Таблиця 1). Результати статичних випробувань свідчать про те, що, хоча кінцеві відхилення насадок у більшості випадків залишалися в межах ± 10 %

(за винятком тесту при швидкості 9,7 – 6,4 км/год), час стабілізації ЧВП виявився значно довшим, ніж очікувалося.

Таблиця 1 - Середня швидкість відключення сопла та час встановлення потоку (ЧВП) під час моделювання статичних випробувань на прискорення та уповільнення

Прискорення				Сповільнення			
Зміна швидкості, км/год	Відх. від норми, %	ЧВП5, с	ЧВП10, с	Зміна швидкості, км/год	Відх. від норми, %	ЧВП5, с	ЧВП10, с
6,4-9,7	7,4	20,5	12,8	29,0-25,7	-6,4	5,6	-
9,7-12,9	6,5	19	11,7	25,7-22,5	-4,7	7,3	1,6
12,9-16,1	0,9	10,2	2,9	22,5-19,3	-7,5	7,0	1,5
16,1-19,3	-2,0	7,0	0,9	19,3-16,1	-5,1	8,2	2,7
19,3-22,5	-3,5	7,5	1,3	16,1-12,9	4,7	20,8	15,3
22,5-25,7	-5,8	6,2	0,1	12,9-9,7	9,9	20,4	15,1
25,7-29,0	-7,8	6,0	-	9,7-6,4	37,2	20,0	14,8

Випробування на зміну швидкості здійснювалися в умовах контрольованої роботи, проте результати ЧВП5 та ЧВП10 продемонстрували затримку відповіді сопла. Всі показники ЧВП5 перевищували 5,6 с, що свідчило про те, що часте прискорення та гальмування може викликати помилки відхилень у роботі форсунки. Значення ЧВП та відповідні похибки від номінальної продуктивності форсунки відповідали очікуванням на основі карт (рис. 7, 5b), створених для Обприскувач-2 під час режимів прискорення та уповільнення. Потік рідини через сопло зменшувався під час розгону та збільшувався при гальмуванні, що відповідало прогнозованим результатам та підтверджувалося польовими даними. Стаціонарний об'єм струменя коливався біля цільового значення при швидкості нижче 16,10 км/год (91,70 л/хв). Такі коливання або нестабільність могли виникати через те, що система керування намагалася оперативно компенсувати відхилення, але часто перевищувала заданий параметр. Надмірна корекція спричиняла подовження

ЧВП та збільшення помилок відхилень до +37,2 %. Подібні відхилення спостерігалися під час уповільнення обприскувача на ділянці-2. Важливо зауважити, що розгін із 6,4 до 9,7 км/год потребував підвищення потоку через сопло на 50%, у той час як зміна швидкості з 25,7 до 29,0 км/год вимагала лише 12,5% збільшення. Тому на реакцію системи керування (табл. 1) значний вплив можуть мати величина регулювання потоку, структура системи контролю та характер прискорення або уповільнення машини.

Помилки спрацьовування ASC в польових тестах

Сценарії для Обприскувача – 1 (рис. 10) та Обприскувача – 2 [ділянка – 3, рис. 5 (а)] були обрані спеціально, щоб показати, як спрацьовування ASC впливає на похибку відхилення від заданих норм. У цих ситуаціях машини проходили ділянки, де обприскування не проводилось (водні канали з трав'яним покриттям), і під час руху з швидкістю 24 км/год відповідні секції обприскувача послідовно вимикалися та знову включалися. Максимальні швидкості зміни відхилення форсунки досягали –65 % для Обприскувача-1 та –68 % для Обприскувача-2 під час активації ASC у таких зонах. Коефіцієнт варіації (CV) форсунок перевищував 10 % протягом коротких проміжків часу (0,2 – 0,4 с) при повторному вході машини в ділянки обприскування. Загалом, карти демонструють, що робота ASC спричиняла більш значні негативні відхилення або недостатнє внесення рідини під час цих тестових сценаріїв.

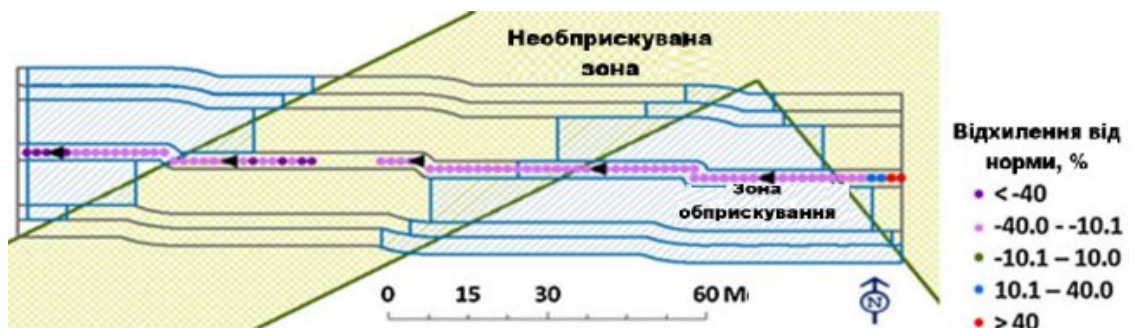


Рис. 10 - Приклад сценарію, у якому Обприскувач-1 входив у зону заборони обприскування, а потім виходив із неї (заштрихована зеленою ділянка), працюючи зі швидкістю 24 км/год. У контролері було встановлено

цільову норму 140,2 л/га, і відсутність символів відхилення від норми відображає всі секції у стані відхилення. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху

Недостатній вилив в системі може виникати через затримки у зворотному зв'язку або уповільнену реакцію керуючого блоку. Наприклад, підвищена роздільна здатність витратоміра та скорочений час його відгуку дозволяють забезпечити швидкий і точний сигнал контролеру, що сприяє ефективному впровадженню методів регулювання обсягу рідини. Окрім характеристик часу відгуку елементів керування та зворотного зв'язку, на точність роботи системи значний вплив можуть мати обрані стратегії та алгоритми управління апаратними компонентами.

Контролююча система здатна прогнозувати необхідні дії та застосовувати надійні алгоритми для визначення оптимальної величини зміни швидкості потоку. Отримані оцінки дозволяють підібрати відповідний алгоритм динамічної реакції, що допомагає зменшити затримку при зміні витрати, мінімізувати відхилення від заданих норм та швидко стабілізувати робочі умови.

Крім того, місце керування потоком, наприклад клапан на штанзі, доцільно розташовувати максимально близько до відповідної секції, щоб скоротити перехідні помилки та зменшити відхилення від потрібної швидкості потоку.

Результати статичних випробувань на спрацьовування ASC

Під час проведення статичних випробувань відхилення витрати рідини форсунки при спрацьовуванні системи ASC досягало $-31,80\%$ для Обприскувача – 2 (рис. 11). Детальний аналіз витрати рідини через форсунки Обприскувача-2 показав, що система управління реагувала оперативно при необхідності зміни норми внесення, проте фактична витрата була нижчою від встановленої цільової. У багатьох випадках керуюча система Обприскувача-2 не змогла забезпечити досягнення заданого потоку форсунок під час роботи ASC.

На рис. 11 видно, що при збільшенні швидкості насоса для забезпечення потрібної витрати система керування Обприскувача-2 діяла повільно. Це відбувалося через послідовне вимикання та повторне включення секцій керування з інтервалом близько 5 секунд.

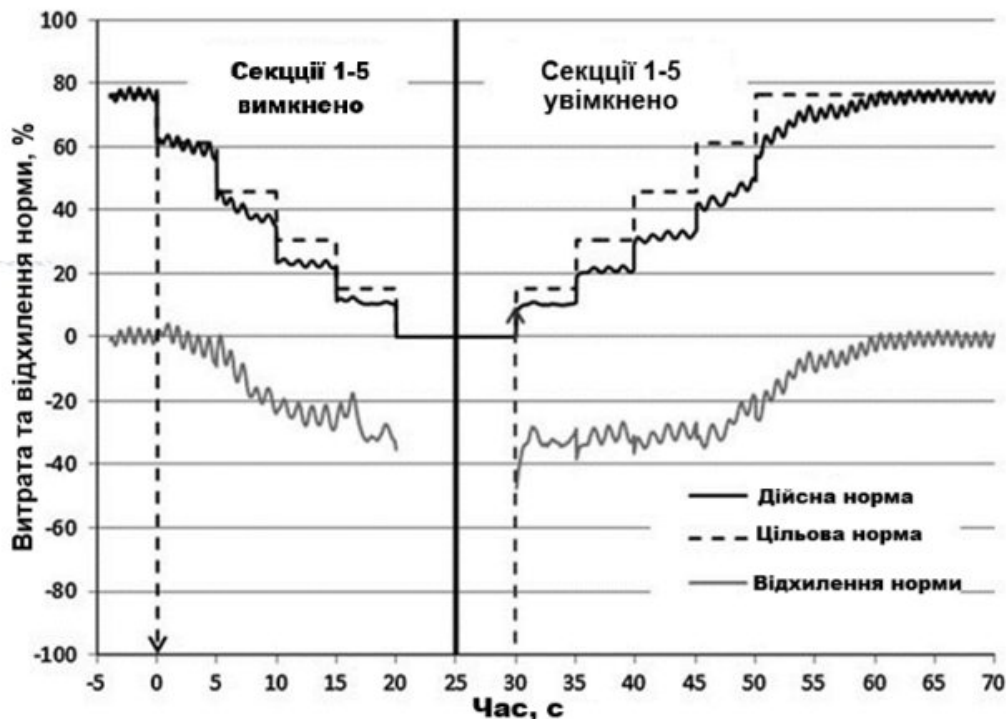


Рис. 11 - Загальна середня швидкість зміни потоку через сопло з урахуванням лише секцій штанги, які були увімкнені для Обприскувача-2 під час послідовного вимикання та вмикання клапанів секції штанги з інтервалом у 5 с. Обприскувач був налаштований на норму внесення 93,5 л/га та швидкість руху 16,1 км/год.

Таблиця 2 - Середня швидкість вимкнення форсунок і час стабілізації (ЧВП) під час вимкнення та повторного увімкнення секцій штанги при швидкості руху вперед 24,1 км/год і нормі внесення 140,2 л/га для Обприскувача-2

Штанги вимк.	Секції вимк.		Всі секції увімкн.	
	Відх. норми, %	ЧВП5, с	Відх. норми, %	ЧВП5, с
1,2	-11,7	0,6	0,6	0,3
1,2, 3	-23,1	17,5	1,2	2,3
1, 2, 3, 4	0,7	54,6	1,2	5,1

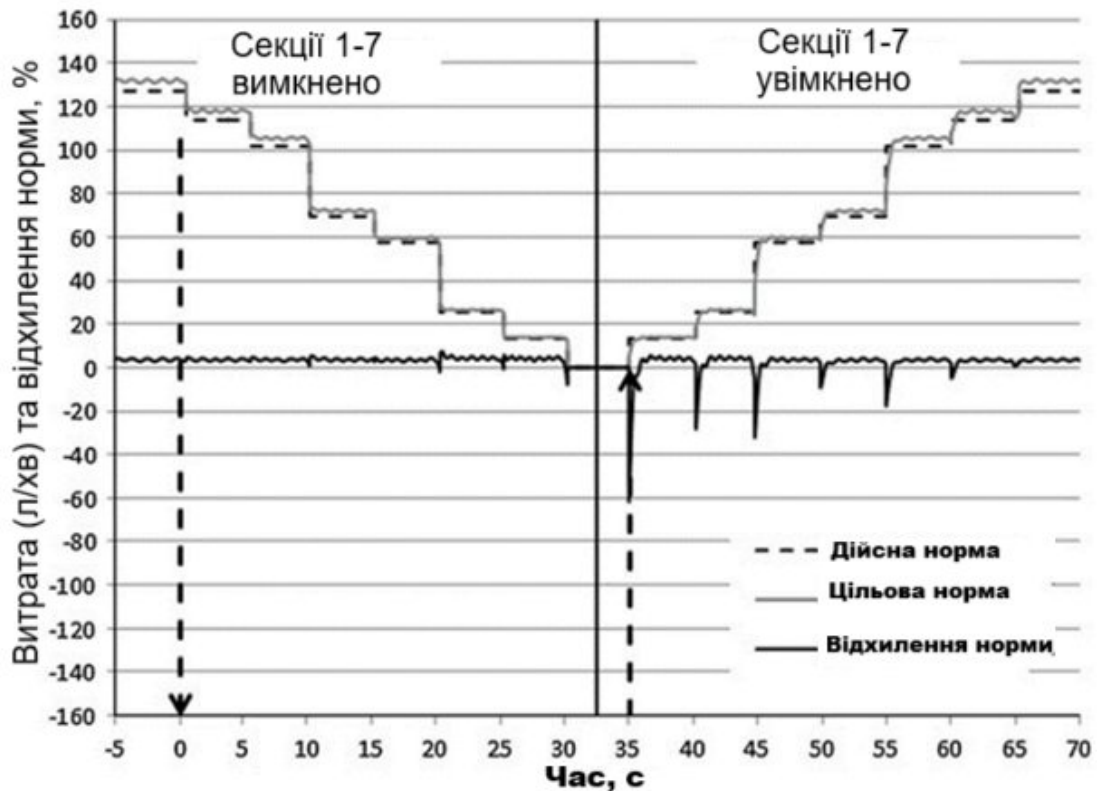


Рис. 12 - Загальний середній потік через сопло з урахуванням лише секцій штанги, які були ввімкнені, та відхилення від норми для Обприскувача-1 під час послідовного вимкнення та вмикання секцій штанги з інтервалом у 5 секунд.

Також спостерігалася уповільнена реакція, коли одночасно 2, 3 або 4 секції штанги були тимчасово вимкнені та знову активовані. У таких випадках загальна похибка витрати для включених форсунок досягала $-23,1\%$, а час відновлення стабільної витрати складав 54,6 секунд (табл. 2). Навіть коли всі чотири секції штанги були вимкнені, відхилення швидкості від норми для одного сопла становило всього $0,7\%$, проте це відбулося лише після 54,6 секунд нестабільної роботи потоку.

Отже, недостатнє внесення спостерігалася доти, доки не були активовані всі секції, а система не стабілізувалася навколо заданої швидкості, що займало від 0,3 до 5,1 секунди. Статичні результати цього дослідження відповідали фактичній реакції, зафіксованій у польових умовах на прикладах ділянок 1 та 3. Аналогічні випробування при чотирьох різних цільових тисках з використанням Обприскувача-1 продемонстрували, що система керування

здатна утримувати витрату потоку форсунки в межах $\pm 10,0\%$ від встановленої величини навіть під час включення та виключення окремих секцій штанги (рис. 12). Під час цих тестів середнє відхилення потоку сопла становило $+3,8\%$, проте спостерігалися миттєві зниження значення у момент активації секцій. Для проведення статичного випробування цільовий тиск було встановлено на 414 кПа, а швидкість руху — на рівні 19,3 км/год, що відповідало нормі витрати 109,2 л/га або загальному системному потоку 128,6 л/хв.

Різкі зміни швидкості та витрати, ймовірно, були спричинені тимчасовим збільшенням тиску та потоку в магістралі, необхідним для досягнення заданої швидкості, після чого вони швидко стабілізувалися. Подібна динаміка потоку сопла та відхилення швидкості спостерігалася також при тисках 138,0, 276,0 та 552,0 кПа. Статичні дослідження активації системи ASC для Обприскувача-1 (автоматичне регулювання штанги) та Обприскувача-2 (автоматичне керування форсунками) показали, що між цими машинами існують помітні відмінності у поведінці системи керування та контролі витрати форсунок.

ВИСНОВКИ

CV форсунок перевищував 10 % протягом короткого періоду часу, коли кожна з секцій автоматичної штанги (0,5 с) і автоматичної форсунки (0,2 с) були ввімкнені, тоді як CV потоку форсунок зазвичай були нижче 10 % під час стабільних робочих умов. Підвищені CV, ймовірно, були результатом відповідності системи між наконечником сопла та точкою керування потоком, яка була більшою для системи автоматичного керування штангою порівняно з автоматичним керуванням соплом. Хоча CV розраховувалися лише з використанням увімкнених секцій, було помічено, що форсунки у вимкнених секціях продовжували розпилювати протягом до 3,5 с для автоматичних секцій штанги та 0,2 с для систем автоматичного керування форсунками.

Відхилення норми під час польових експериментів пояснювали нездатністю системи керування підтримувати цільову норму внесення під час активації ASC та коливань швидкості руху. Результати показали, що уповільнення обприскувача в поєднанні з активацією ASC (секції вимкнені) сприяли надмірному внесенню, тоді як активація ASC (секції увімкнено) і прискорення обприскувача призвели до недостатнього внесення.

Статичні експерименти для Обприскувача-2 підтвердили результати польових випробувань, які показали, що недостатнє внесення може відбуватися частіше, ніж надмірне внесення через активацію ASC та зміни швидкості руху. Результати статичних випробувань для Обприскувача-2 продемонстрували, що надмірне внесення було пов'язане з нижчою швидкістю руху, щоб краще підтримувати цільовий потік через сопло під час активації ASC та прискорення та уповільнення обприскувача.

Алгоритм керування може бути розроблений для прогнозування кінцевої цільової норми та автоматичного вибору алгоритмів динамічного керування на основі прискорення/уповільнення обприскувача, активації ASC та величини необхідної зміни норми. Статичні випробування для

Обприскувач-1 показали, що система керування змогла підтримувати цільову норму під час активації ASC.

Загалом статичні експерименти показали, що реакція системи керування була швидкою та точною для Обприскувача-1. Однак загальні результати свідчать про те, що відхилення від норми для форсунки можуть виникнути незалежно від типу застосованої технології контролю. Зі збільшенням кількості секцій керування (наприклад, автофорсунка для Обприскувача-2) роздільна здатність управління (ширина управління) стає меншою, що вимагає швидшої реакції системи керування під час спрацьовування ASC та зміни швидкості руху.

У той час як збільшення кількості секцій керування може підвищити точність застосування, зростає попит на покращений час відгуку системи керування. Таким чином, нездатність системи керування швидко реагувати під час ASC може призвести до помилок відхилення від частоти. Тому продуктивність обприскувача в полі може змінюватися залежно від вибраного механізму зворотного зв'язку, а також алгоритмів, які використовуються системами контролю норми.

Результати цього дослідження показують, що існує компроміс між роздільною здатністю керування та поточними можливостями реагування контролера. Оператори, які прагнуть звести до мінімуму вплив тиску в соплах або зміни потоку, повинні знати про цей компроміс. Зведення до мінімуму коригувань системного потоку, необхідних для активації ASC або зміни швидкості руху, може допомогти вирішити деякі проблеми, про які повідомляється в цьому дослідженні.

Навички та поведінка оператора сприяють прискоренню, уповільненню обприскувача та активації ASC, необхідних під час роботи в полі. Форма та розмір поля можуть впливати на те, як оператор обирає перетин поля під час обприскування. Тому оператори повинні бути навчені розуміти поточну технологію керування обприскувачем, щоб допомогти підвищити ефективність системи.

Нарешті, подібність між статичними та польовими випробуваннями свідчить про те, що статичні випробування можуть забезпечити розуміння продуктивності обприскувача під час роботи в полі. Хоча системи керування зменшили загальне неправильне застосування, слід проявляти обережність під час підвищення вимог до системи контролю.

Необхідно провести порівняльні польові випробування обприскувачів з різними системами керування, щоб краще зрозуміти потенційні помилки внесення та покращити конструкцію та налаштування системи. У результаті цього дослідження було зроблено наступні висновки:

- Коефіцієнти варіації форсунок були $>10\%$ протягом короткого періоду, ймовірно, через відповідність системи.

- Похибки відхилення від норми для форсунки перевищували $\pm 10\%$.

- Помилка відхилення норми форсунки була пов'язана з активацією ASC та прискоренням/уповільненням.

- Похибки відхилення від частоти свідчать про те, що вдосконалення модифікації алгоритмів керування може бути покращено для покращеного реагування на вимоги керування під час польових операцій.

- Алгоритми керування можуть бути модифіковані для покращення відгуку та зменшення відхилень.

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.; Kraszkiewicz, 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