

**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 застосування систем точного землеробства при обприскуванні посівів»

Виконав:

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ **Курса В.В.**

\_\_\_\_\_ (Прізвище, ініціали)

Група:

\_\_\_\_\_ **СТЗ 2301-1м**

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ **Зубко В.М.**

\_\_\_\_\_ (Прізвище, ініціали)

Суми – 2025

## **АНОТАЦІЯ**

**Курса В.В.**

**Дослідження ефективності застосування систем точного землеробства при обприскуванні посівів**

**ОПП Системи точного землеробства**

**Спеціальність 208 Агроінженерія**

**Сумський національний аграрний університет**

**М. Суми, 2025р.**

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 39 сторінках 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

кожну 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

**Kursa V.V.**

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

**EP Precision Farming Systems**

**Specialty 208 Agricultural Engineering**

**Sumy National Agrarian University**

**Sumy, 2025**

The final qualification work is presented on 39 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
1 Стан питання і задачі досліджень.....	9
1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування.....	9
1.2 Аналіз досліджень роботи систем автоматичного керування обприскуванням.....	11
2 Методика досліджень.....	15
2.1 Машини і обладнання.....	15
2.2 Польові дослідження.....	16
2.3 Статичні випробування.....	19
3 Результати досліджень та їх аналіз .....	21
Висновки.....	34
Список використаних джерел.....	37

## ВСТУП

Сучасний ринок сільськогосподарської техніки пропонує широкий вибір рішень, здатних докорінно змінити технології вирощування культур. Використання інноваційних обприскувачів дає змогу суттєво підвищити продуктивність, обробляючи великі площі за менший час. Це стає можливим завдяки широкому захвату штанги, активній підвісці, автоматизованому керуванню та точному дозуванню робочої рідини. Завдяки сучасним технологічним розпилювачам, спеціально розробленим для різних культур, значно знижується ризик неякісної обробки.

Однак багато аграріїв досі не звертають достатньої уваги на ефективність нанесення препаратів і контроль якості обприскування. Часто для обробки різних культур і препаратів використовують однакові форсунки з незмінними параметрами, а також працюють за несприятливих погодних умов. Багато господарств усе ще застосовують застарілі обприскувачі з обмеженими можливостями регулювання, що негативно позначається на якості обробки. Наприклад, нерегульована по висоті штанга без стабілізації коливань, нестабільна подача розчину, стрибки тиску при зміні швидкості руху, відсутність або несправність приладів контролю призводять до нерівномірного розподілу препарату.

Втім, варто відзначити, що в останні роки ситуація значно покращилася, і все більше аграріїв віддають перевагу сучасним технологічним рішенням.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1 Фактори, що впливають на якість обприскування

Якість обприскування залежить від кількох основних факторів, серед яких технічні параметри обприскувача, погодні умови, фізико-хімічні властивості робочого розчину, а також правильність налаштувань та дотримання агротехнічних вимог. Важливу роль відіграє тип форсунок, оскільки вони визначають рівномірність розподілу крапель і їх розмір, що впливає на ефективність покриття рослин і зменшення знесення препарату. Тиск у системі обприскувача також є критичним показником, оскільки надто високий тиск може спричинити утворення дрібних крапель, які швидко випаровуються або зносяться вітром, тоді як надто низький тиск призводить до нерівномірного розподілу рідини. Швидкість руху обприскувача впливає на якість покриття: надмірно висока швидкість може спричинити пропуски або нерівномірне нанесення препарату, а занадто низька – перевитрату робочого розчину. Важливим фактором є погодні умови, зокрема швидкість вітру, температура та вологість повітря. Оптимальними умовами для обприскування є температура в межах 15–25°C, вологість не нижче 60% і швидкість вітру до 3–4 м/с, оскільки сильний вітер може зменшувати точність нанесення і спричиняти знесення препарату на сусідні ділянки. Якість води, що використовується для приготування робочого розчину, також суттєво впливає на ефективність дії пестицидів, оскільки тверда або забруднена вода може змінювати властивості препаратів і засмічувати форсунки. Важливим аспектом є правильний вибір препарату та його концентрації, оскільки недотримання норм внесення може знизити ефективність обробки або спричинити фітотоксичність для рослин. Крім того, регулярне технічне обслуговування обприскувача, перевірка герметичності системи та чистота фільтрів і форсунок є необхідними для забезпечення стабільної роботи обладнання і рівномірного розподілу робочого розчину.

Застосування автоматичних систем керування обприскуванням має ряд значних переваг, які підвищують ефективність сільськогосподарського виробництва. Передусім, такі системи забезпечують точне дозування засобів захисту рослин та добрив, що зменшує їх витрати та мінімізує негативний вплив на довкілля. Завдяки використанню GPS-навігації та сенсорних технологій обприскування здійснюється з високою точністю, уникаючи пропусків і перекриттів, що сприяє рівномірному розподілу рідини на полі. Крім того, автоматичне керування дозволяє адаптувати норми внесення залежно від рельєфу, типу ґрунту та стану рослин, що підвищує ефективність агротехнологій. Важливою перевагою є також зменшення впливу людського фактора, що знижує ймовірність помилок, покращує умови праці операторів та сприяє економії часу. Додатково, сучасні системи можуть інтегруватися з іншими цифровими платформами аграрного менеджменту, що забезпечує більш комплексний підхід до управління господарством. У підсумку, впровадження автоматичних систем керування обприскуванням підвищує врожайність, знижує витрати та сприяє сталому розвитку агросфери.

Точність автоматичних систем керування обприскуванням залежить від ряду факторів, які впливають на рівномірність внесення робочої рідини, ефективність обробки та мінімізацію втрат. Одним із ключових факторів є точність дозування, що залежить від стабільності тиску в системі, правильності калібрування форсунок та якості датчиків потоку. Також важливу роль відіграє система навігації та визначення положення агрегату, зокрема використання GPS- і RTK-сигналів для забезпечення точності руху. Метеорологічні умови, зокрема швидкість і напрямок вітру, температура та вологість повітря, впливають на процес розпилення, адже сильний вітер може спричинити знос крапель, а температура й вологість – зміну їх випаровуваності. Технічний стан і конструктивні особливості обприскувача також визначають точність, адже зношені або забиті форсунки, негерметичність системи або нерівномірний розподіл рідини по штанзі

можуть призводити до нерівномірного внесення препарату. Програмне забезпечення і алгоритми керування визначають швидкість реакції системи на зміну умов роботи, коригування подачі робочої рідини та дотримання заданої норми витрати. Окрім того, людський фактор, такий як правильне налаштування системи, якість підготовки оператора і дотримання регламенту обслуговування, також має значний вплив на точність роботи автоматичних систем обприскування.

## **1.2 Аналіз досліджень роботи систем автоматичного керування обприскуванням**

Ширина штанг сільськогосподарських обприскувачів продовжує збільшуватися. Нерідко можна побачити, як сьогодні використовуються ширина 36,6 м разом зі швидкістю руху близько 30 км/год для своєчасного покриття орних земель. Це збільшення ширини внесення в поєднанні з різними формами та розмірами полів, які зазвичай зустрічаються в південно-східній частині країни, вимагають стабільної та швидкої реакції управління для точного внесення продуктів і мінімізації помилок відхилень під час роботи в полі. Попередні опитування на фермах, включно з приватними аплікаторами гербіцидів, показали, що понад 50% обприскувачів відхилялися від прийнятого 10%-го відхилення від цільової норми внесення в основному через зношені наконечники форсунок, неточне калібрування або нездатність підтримувати необхідний потік під час польового застосування [3,7].

Контролери норми обприскування були впроваджені протягом багатьох років на сільськогосподарських обприскувачах, щоб ефективно підтримувати норми внесення зі змінами швидкості руху під час роботи в полі. Прийняття контролерів швидкості з можливістю підтримувати програму забезпечило явні переваги у зниженні відхилень. Однак системи контролю повинні мати більші можливості контролю для точного

застосування отрутохімікатів у межах поля, щоб мінімізувати вплив пестицидів на навколишнє середовище.

Сьогодні більшість, якщо не всі, контролери обприскування на великих самохідних обприскувачах оснащені контролерами норми, які керують системним потоком, а не обов'язково загальним тиском у системі. Ці системи керування намагаються підтримувати задану швидкість незалежно від ширини (секції чи форсунки увімкнено) та/або зміни швидкості руху.

Однак точність керування нормою внесення залежить від чутливості контролера разом із роздільною здатністю витратоміра для підтримки необхідної витрати в будь-який момент часу. Зросла (39 %) кількість роздрібних дилерських центрів, які надають оснащені GPS керування штангами обприскувача, а також кількість виробників (27 %), які зараз використовують технологію керування секціями. Технологія автоматичного керування секціями (ASC) вимикає окремі клапани секції штанги (автоматичне керування штангою) або соленоїди форсунок (автоматичне керування форсунками) під час перетину зони без обприскування або попередньо обприскованої зони та знову вмикає у необроблених зонах поля. Ця технологія продемонструвала значний потенціал для зменшення накладання вхідних даних, що призвело до економії вхідних ресурсів. Лак та ін. [8] зазначив, що ASC зменшив перекриття до 6,2 % порівняно з 12,4 % у порівнянні з ручним керуванням оператора. Крім того, площа покриття для поля може бути зменшена на 15,2-17,5 % при використанні ASC у полях неправильної форми. Однак існує додаткове занепокоєння щодо систем керування, що включають технологію ASC для великих сільськогосподарських обприскувачів, щодо точності обприскування під час польових умов експлуатації.

Системи контролю норми мають властиві часові затримки, коли потрібно коригувати норму під час застосування в полі. Затримка системи керування у відповіді на приймач DGPS при збереженні горизонтальної

точності 1 м може становити до 2,2 с. Крім системи керування та затримки часу відгуку GPS, [5,11] повідомили, що деякі системи контролю на основі потоку мають тенденцію до надмірного внесення, коли обприскується лише одна секція штанги. Гріссо та ін. [9] разом з Міллером і Смітом [10] повідомили, що бокове розташування форсунок вздовж штанги також може впливати на величину та часову появу помилок норми внесення.

Попередні дослідження стверджували, що підходи до точного землеробства повинні мати системи контролю зі своєчасним реагуванням на зміну системних вимог норм [12]. Оцінки ASC під час статичного випробування показали, що зміна тиску в соплах може коливатися від 6,7 до 20,0 %, що дорівнює збільшенню потоку через сопла на 3,7-10,6 %. Додаткове тестування ASC продемонструвало, що час стабілізації тиску на форсунках наближався до 25,2 с для автоматичної штанги та 15,6 с для автоматичного керування форсунками при вимкненні та повторному увімкненні секцій. Цей підвищений тиск у форсунці та час затримки стабілізації тиску вказують на те, що коли вручну вмикають/вимикають секції або впроваджують ASC під час роботи в полі, можуть виникати варіації в застосуванні.

Повідомлялося, що час встановлення швидкості потоку сопла коливався від 0,4 до 14,4 с, що призводило до швидкості відхилення сопла від -36,0 % до +28,7 % під час роботи точкового ряду. Розбіжності в реакції динамічного тиску та похибки відхилення вказують на те, що існують відмінності між секцією штанги та керуванням соплами. Час стабілізації потоку через сопло під час ASC також підкреслив неадекватний зворотний зв'язок із системою керування. Зокрема, це відбувалося, коли секції вимикалися або вмикалися швидше, ніж запланований час зворотного зв'язку та відгуку, щоб точно керувати бажаною цільовою нормою внесення. Незважаючи на те, що ASC надає переваги тим, хто використовує цю технологію, статичні випробування, що моделюють реальні польові сценарії, підкреслили, що безперервне ввімкнення/вимкнення форсунок

може спричинити коливання тиску на штанзі, що призводить до надмірного та недостатнього внесення [13].

Ступінь цих помилок може збільшуватися при обприскуванні на полях неправильної форми та при використанні більших обприскувачів. Хоча були зроблені спроби повідомити про затримки апаратного контролю потоку, необхідні дослідження, щоб зрозуміти рівномірність потоку сопла та стабільність норми внесення при використанні прецизійних технологій, таких як ASC. Оцінка рівномірності потоку форсунок і точності внесення також підтвердить здатність алгоритмів керування, що, по суті, є запатентованим елементом, керувати нормами внесення під час роботи в полі. Порівняння результатів статичних і польових випробувань може допомогти у прогнозуванні польових характеристик великих сільськогосподарських обприскувачів, а також у формулюванні плану експерименту, який може прискорити процес кількісного визначення рівномірності потоку форсунок і стабільності норми внесення. Таким чином, завдання цього дослідження полягали в тому, щоб: (1) оцінити в режимі реального часу рівномірність сопла (CV) по штанзі для двох систем ASC, і (2) кількісно визначити та порівняти час встановлення потоку сопла (ЧВП) і помилки відхилення від швидкості потоку рідини під час статичних та польових випробувань.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Машини і обладнання

Статичні та польові експерименти проводилися з використанням двох звичайних самохідних обприскувачів, які в подальшому називаються Обприскувач-1 і Обприскувач-2. Обприскувачі були оснащені наявними в продажу регуляторами норми з можливостями ASC. Обприскувач-1 був оснащений автоматичним керуванням штангою (рис. 1а), а Обприскувач-2 - автоматичним керуванням форсунок. Обприскувач-1 був із штангою шириною 36,2 м із 95 форсунками, розташованими на відстані 0,38 м поперек штанги. Штанга являє собою конструкцію, в якому трубопровід (наприклад, труба) виконує роль опорного механізму для кожного корпусу розпилювальної форсунки та транспортує розчин для обприскування. Цей обприскувач був налаштований на сім секцій штанги з керуванням увімкнення/вимкнення за допомогою семи існуючих клапанів секцій штанги.

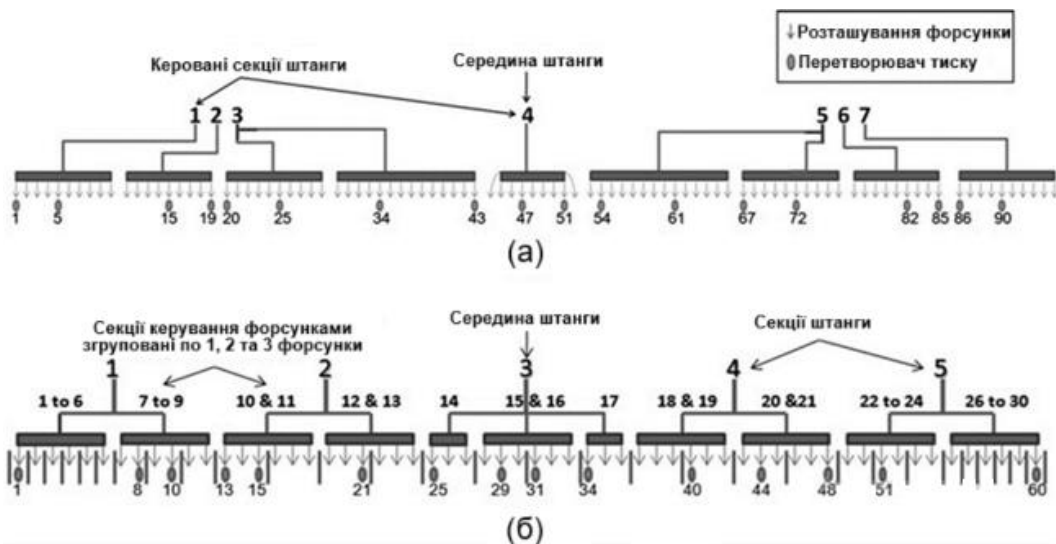


Рис 1 - Схема а) Обприскувач-1, що містить сім окремих секцій штанги, і б) Обприскувач -2, який включав 30 секцій форсунок з одним, двома або трьома форсунками. Секції пронумеровані зліва направо для обох штанг із числовим визначенням розташування сопел уздовж штанги.

На 1 і 7 секціях штанги було 10 форсунок; дев'ять форсунок на 2, 4 і 6 секціях штанги; і 24 форсунки на секціях штанги 3 і 5 (рис. 1а). Обприскувач-2 також мав штангу шириною 30,5 м і 60 форсунок, розташованих на відстані 51 см. Автоматичне керування форсунками для Обприскувач-2 було отримано за допомогою електромагнітних клапанів (Capstan Ag Systems, Inc., США), відображених у контролері таким чином, що шість зовнішніх форсунок з кожного боку керувалися окремо, а наступні шість внутрішніх форсунок – будь-яка сторона з'єднана, а інші керувалися в групах по три (рис. 1б). Система автоматичного керування секціями (ASC) складається з консолі (Topcon ×20, США) і 30-канального електронного блоку керування (Topcon Precision Ag, США) для приведення в дію окремих електромагнітних клапанів (Capstan Ag Systems, Inc., США), встановлених на корпусах розпилювальних форсунок для Обприскувача-1. Дисплей (GreenЧВPar-2, Deere & Company, США) і контролер (John Deere Spraystar, Deere & Company, США) для Обприскувача-2 включали сім каналів керування для приведення в дію запірних клапанів штанг.

Щоб регулювати потік через штанги обприскувача, контролери обох обприскувачів використовували зворотний зв'язок від вбудованих витратомірів, одночасно контролюючи швидкість гідравлічного насоса, а отже, загальну швидкість потоку системи через гідравлічні клапани за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Обидва обприскувачі також були оснащені системами автоматичного водіння.

## **2.2 Польові дослідження**

Польові дослідження проводили з цільовою нормою 93,5, 112,1 і 140,2 л/га для Обприскувача-1 та 93,5 і 140,2 л/га для Обприскувача-2. Обприскувач-2 використовувався для збору даних про внесення для трьох полів неправильної форми (поля 1, 2 і 4), що складаються з численних необприскуваних ділянок; переважно вкритих травою водних перешкод (рис. 2).

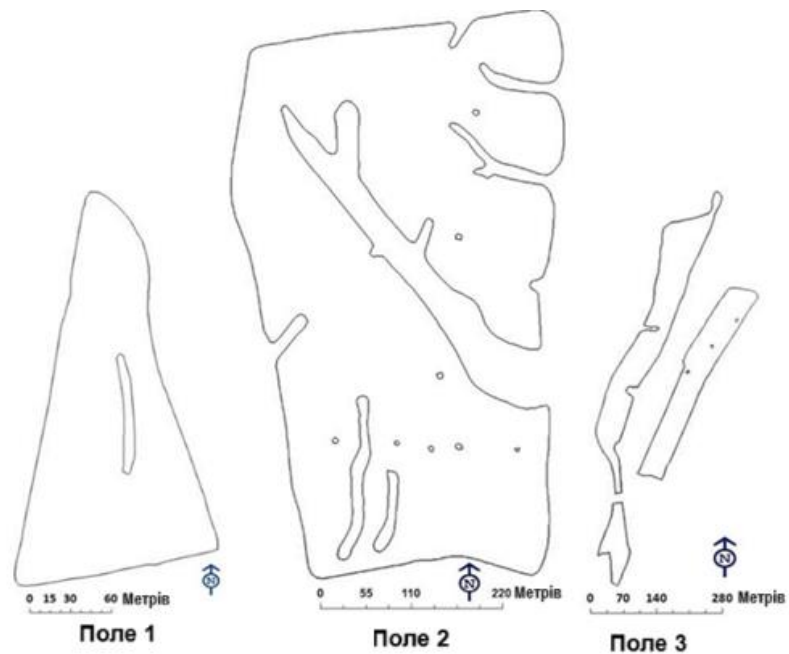


Рис. 2 - Межі поля 1, поля 2 і поля 4 для польових випробувань з використанням Обприскувача-2

Польові дослід з використанням Обприскувача-1 проводили на полях прямокутної та трикутної форми. Високочастотні (час відгуку  $\leq 1$  мс) датчики тиску (модель 1502 B81 EZ 100 PSI G, PCB Piezotronics Inc., США) з точністю  $\leq 0,25$  % шкали були встановлені на штангах обприскувача для реєстрації тиску в соплах. Для Обприскувач-1 було використано 18 перетворювачів, а для Обприскувач-2 – 15. Перетворювачі були встановлені таким чином, щоб принаймні два були розташовані в кожній секції залежно від наявної трубопровідної штанги (рис. 1). Для обох обприскувачів один датчик тиску був встановлений на головній лінії подачі (місце для наявного датчика тиску, що забезпечує зворотний зв'язок із контролером), для вимірювання загального тиску в системі.

Система збору даних, що складається з плат National Instruments, використовувалася для зчитування та запису всіх даних із частотою дискретизації 5 Гц під час польових випробувань і 50 Гц під час статичних випробувань. Дані про місцезнаходження та швидкість руху були зібрані одночасно та надані субметровим GPS-приймачем (Ag132, Trimble Navigation Ltd., США) для Обприскувач-2 і GNSS RTK-приймачем

(марсохід R8 і база R7 з Trimmark 3). радіопередавач Trimble Navigation Ltd., США) для Обприскувач-1. Усі дані були записані в текстовий файл для аналізу.

Тиск форсунок (Teejet AI11003 для Обприскувач-1 і Teejet TT11005 для Обприскувач-2, Spraying SyЧВПems Co., Wheaton, IL, USA) було перетворено на потік з використанням даних виробництва (Teejet Catalog 50A, Spraying SyЧВПems Co., Wheaton, IL, США). Рекомендований робочий тиск становив від 206,8–689,5 до 103,4–620,5 кПа для форсунок на Обприскувач-1 і Обприскувач-2 відповідно, а обприскувачі працювали в рекомендованих діапазонах тиску.

Фактична швидкість потоку (л/хв) штанги була розрахована шляхом підсумовування та усереднення швидкості потоку через сопло з тих секцій, які залишалися у стані УВІМКНЕНО на кожній мітці часу GPS. Коефіцієнт варіації (CV) був розрахований, враховуючи лише ON секції, що представляє однорідність потоку сопел через штангу. Цільовий потік через форсунки для кожної мітки часу GPS розраховувався з використанням кількості секцій ON (або форсунок) разом із дорожньою швидкістю та цільовою нормою внесення (встановленою оператором).

Консоль дисплея на Обприскувач-2 також записувала позначку часу разом із станом каналу керування (ON = 1 або OFF = 0) для кожної GPS-координати з частотою дискретизації 5 Гц. Файли, що містять дані про стан каналу керування та просторовий тиск, були синхронізовані та об'єднані за допомогою міток часу GPS у цих файлах. Статус контрольної секції використовувався для розрахунку ширини обприскування в кожній точці GPS.

Для Обприскувач-1 тиск у системі та середній тиск сопла в кожній секції використовувалися для визначення стану ON/OFF клапана штанги за допомогою MATLAB (версія R2008a). Було встановлено, що середній тиск на соплах для секцій ON знаходиться в межах  $\pm 5$  % від тиску в системі. Таким чином, для будь-якої секції штанги у стані «ВКЛЮЧЕНО» різниця

між середнім тиском на форсунках і тиском у системі менше –5 % означатиме, що ця секція ВИМКНЕНО на цю позначку часу. Подібним чином, якщо початковий стан секції штанги був ВИМКНЕНО, тоді середній тиск на форсунці >34,5 кПа в будь-яку позначку часу призведе до стану УВИМКНЕНО.

Нарешті, загальна швидкість відхилення сопла (похибка швидкості) була розрахована як відсоткова різниця від цільової швидкості за допомогою наступного рівняння:

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

Рівномірність витрати через сопло (CV) оцінювали шляхом обчислення середнього значення та стандартного відхилення потоку через сопло з усіх форсунок ON або секцій штанги. Під час польових і статичних випробувань похибки витрати рідини  $\pm 10,0$  % вважалися прийнятними. Нарешті, за допомогою ArcMap 9.3 від ESRI було створено карти відхилень і CV, щоб проілюструвати просторові результати на полях і вибрати приклади сценаріїв для подальшого дослідження.

### 2.3 Статичні випробування

Цільову норму 93,5 л/га та змодельовану швидкість руху 6,4 та 29,0 км/год для оцінки Обприскувач-2 було обрано на основі типових низьких і високих швидкостей руху, що спостерігалися під час польових випробувань. Оскільки Обприскувач-1 не міг імітувати різні швидкості руху, для проведення статичних випробувань були обрані системні тиски 138, 276, 414 і 552 кПа при постійних 19,3 км/год.

Зміна швидкості була виконана шляхом ручного вибору швидкостей за допомогою функції самотестування в контролері норми для Обприскувач-1, і оскільки ця функція була недоступна для контролера в Обприскувач-2, різні цільові робочі тиски були запрограмовані в його контролері норми під меню налаштування. Експерименти проводили; (1)

увімкнення та вимкнення окремих секцій (обидва обприскувачі); (2) послідовне вимикання та повторне вмикання всіх секцій з інтервалами в 1 та 5 с (обидва обприскувачі); і (3) зміна прискорення машини від 6,4 до 29,0 км/год і повернення уповільнення до 6,4 км/год (тільки для Обприскувач-2).

Під час кожного тесту вибрані секції вимикалися, доки потік через сопло не стабілізувався, а потім вибрані секції знову вмикалися. Середній потік через форсунки з використанням лише увімкнених форсунок використовувався для розрахунку сповільнення та витрати через форсунки ЧВП. Щоб зрозуміти вплив прискорення обприскувача та активації ASC, були визначені та проаналізовані конкретні сценарії активації ASC (тобто робота на поворотній смузі та в пунктирних рядах). Термін «повторний вхід» означав, що обприскувач входив у зону обприскування, тоді як «вихід» мав на увазі рух обприскувача із зони обприскування.

У прикладах, представлених у розділі результатів, сім окремих секцій штанги для Обприскувач-1 були зображені сірими багатокутниками, початкові проходи навколо межі поля зеленими заштрихованими областями, а зони, які охоплювали, коли кожна секція була УВІМКНЕНА, синім. MATLAB використовувався для обчислення змінних швидкості потоку через сопло, включаючи: цільову швидкість, кінцеву швидкість, відсоток відхилень і ЧВП. ЧВП визначається як різниця в часі між  $\pm 5\%$  (ЧВП5) або  $\pm 10\%$  (ЧВП10) від початкового потоку через сопло та моментом, коли потік через сопло нарешті досяг і залишається в межах  $\pm 5\%$  або  $\pm 10\%$  від кінцевого потоку через сопло .

Як  $\pm 5\%$ , так і  $\pm 10\%$  відхилення використовувалося для визначення ЧВП, оскільки статичні випробування були завершені зі стійкою штангою обприскувача на рівній поверхні. Таким чином, за цих контрольованих умов швидкість відхилення сопла була оцінена з використанням порогового значення  $\pm 5\%$ , тоді як  $\pm 10\%$  було включено як критерій, якому віддається перевага в галузі.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Полеві експерименти з використанням Обприскувач-1 (автоматична штанга) показали, що CV форсунок вище 10 % і швидкість потоку форсунки понад  $\pm 10$  % (рис. 3) від цільової норми спостерігалися час від часу, але вони були здебільшого скупчені на розворотах поля. Ці помилки були пов'язані з регулюванням регулятора норми для компенсації прискорення та уповільнення обприскувача. Активація ASC окремих секцій була мінімальною для цього поля через його прямокутну форму, причому майже всі секції вмикалися або вимикалися одночасно.

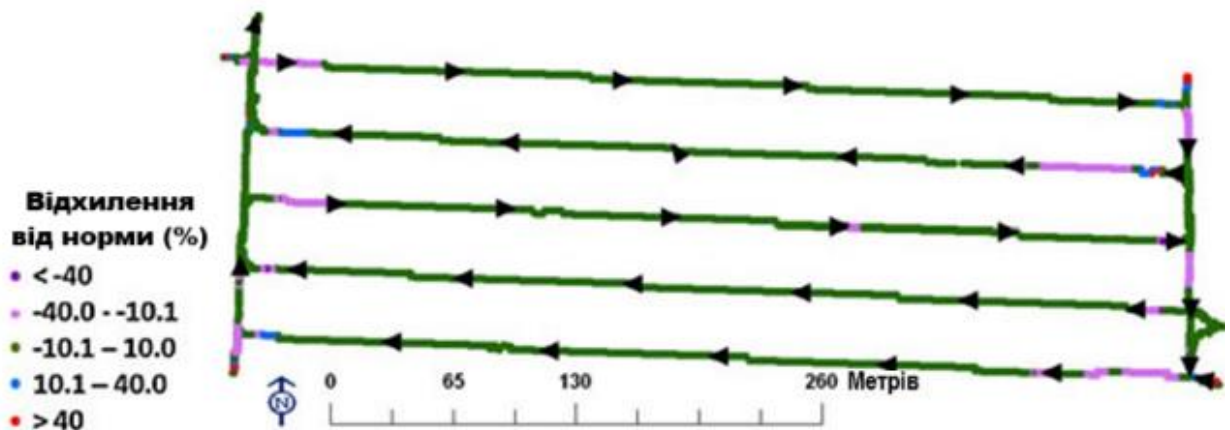


Рис. 3 - Карта відхилень форсунок для прикладу поля з використанням Обприскувач-1 із напрямком руху, позначеним чорними стрілками

Швидкість відхилення була в межах  $\pm 10$  % від цільової швидкості, оскільки робочі умови були стабільними (наприклад, постійна швидкість руху та всі секції увімкнено) для більшості польових робіт. Однак це приклад поля підкреслює небажану продуктивність розпилювальної форсунки внаслідок затримки системи керування, пов'язаної зі змінами швидкості руху. Цей результат повинен враховуватися оператором разом із конструкцією обприскувача та системи керування.

Результати Обприскувача-2 показали, що в середньому CV форсунки становили  $>10,0$  протягом 26 % часу (Рис. 4а), а швидкість перевищувала  $\pm 10,0$  % протягом 66 % часу (Рис. 4b) у трьох полях неправильної форми (Рис. 5). Коефіцієнти варіації форсунок і результати відхилень були

порівнянними (рис. 4) для трьох полів, навіть якщо ці поля відрізнялися за площею та формою. CV потоку форсунки перевищував 10% при виході та повторному вході в зону обприскування та активації ASC у зонах обприскування.

Обидві ситуації впливають на бічний розподіл обприскування, що призводить до нерівномірного нанесення. Недостатнє застосування може призвести до неефективного контролю шкідників. Усе це викликає занепокоєння операторів, які використовують технології точного застосування пестицидів. Спрацьовування автоматичного керування системою відбувалося протягом 63,2, 65,5 та 77,9 % часу в полях 1, 2 та 4 відповідно (рис. 6а). Швидкості для полів 1, 2 і 4 були в діапазоні від 16 до 24 км/год протягом 63,1, 51,7 і 41,7 % часу, відповідно (рис. 6б).

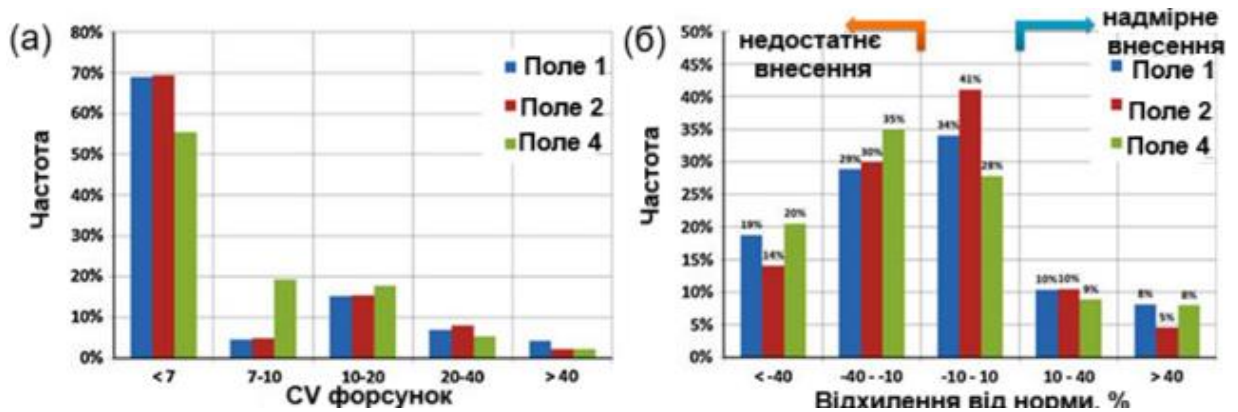


Рис. 4 – Графіки розподілу CV форсунки (а) та похибки відхилення від норми (б) для трьох полів із використанням Обприскувач-2

Швидкість руху змінювалася, коли оператор маневрував у межах поля, включно з трав'яними водними шляхами та перешкодами. Це призвело до прискорення та уповільнення обприскувача понад  $\pm 0,5$  м/с<sup>2</sup> протягом 26,6, 23,8 та 29,6 % часу в полях 1, 2 та 4, відповідно, і відхилень понад  $\pm 10$  %.

Спрацьовування ASC (контролер вмикає та вимикає секції керування форсункою та вказує кількість увімкнених секцій) і карти розподілу швидкості (рис. 7) вказують на те, що витрата системи змінюється частіше, ніж очікувалося, під час застосування в полі. Крім того, велика вимога була

висунута до контролера швидкості для швидкого керування змінами швидкості потоку системи під час активації ASC та/або зміни швидкості руху.

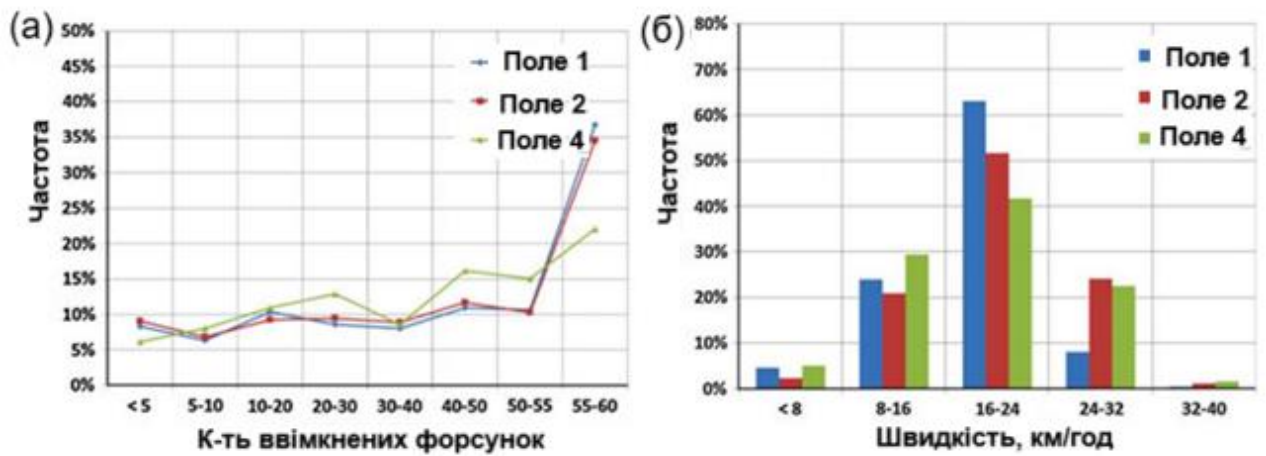


Рис. 5 – Графіки розподілу для а) кількості форсунок на та б) швидкості руху для кожного з трьох полів при використанні Обприскувача-2

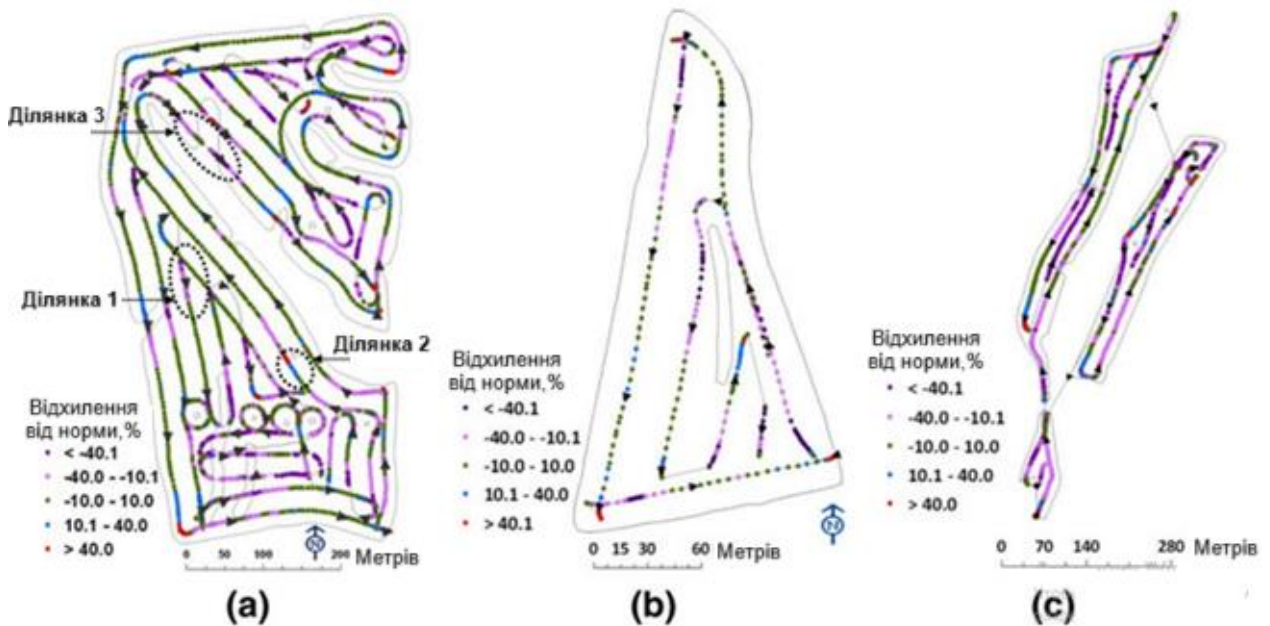


Рис. 6 – Карта відхилення норми форсунки під час внесення 93,5 л/га на полях неправильної форми 2(a), 1(b) та 4(c) з використанням Обприскувача-2. Чорні стрілки вказують напрямок руху

У цих випадках (рис. 7) системі керування потрібен час, щоб відреагувати та досягти необхідної швидкості потоку системи. Ці зміни призвели до помилок відхилення від швидкості під час роботи заїзду під

кутом та від'їзду до зон без обприскування (тобто вкритих травою водних шляхів та інших перешкод) у межах полів неправильної форми. Загалом відхилення форсунок певною мірою спостерігалось як для Обприскувача-1, так і для Обприскувача-2, причому робота за межами бажаних рівнів була проблематичною. Ці відхилення від норми слід виправляти, щоб підтримувати цільові норми на форсунках і зберегти бажану ефективність операції.

#### *Помилки тестів на прискоренні*

Приклад сценарію повторного входу було вибрано з Поля 2 (Ділянка 1, рис. 7), щоб продемонструвати реакцію системи керування та потенційний обсяг позанормового внесення для Обприскувача-2. Під час повторного входу під кутом  $30^\circ$  системний потік збільшився з 5,6 до 126,3 л/хв, коли обприскувач прискорювався з 8,0 до 26,9 км/год із увімкненими секціями 4-30 форсунок. Результати показали, що CV сопел перевищує +10,0 %, а відхилення становить до -40 % (рис. 5а, ділянка 1). Було виявлено, що високі CV по штанзі пов'язані з повторним увімкненням форсунок або секцій форсунок і, можливо, через невідповідність системи вимогам під час заповнення сантехніки (наприклад, шлангів і трубок), коли секції знову вмикаються.

Таким чином, кожного разу, коли керована секція змінювалася зі стану ВИМК. на УВИМК., CV сопла перевищували +10 % приблизно на 0,2 с. Цей приклад демонструє, що Обприскувач-2 пройшов приблизно 64 м, перш ніж контролер зміг досягти відповідної швидкості потоку рідини, оскільки секції форсунок були ввімкнені, а обприскувач прискорювався.

Подібний сценарій досліджувався і для Обприскувача-1 (рис. 8). Тут обприскувач прискорився з 5,7 до 20,7 км/год, а секції штанги 1-7 послідовно вмикалися, коли він знову входив у зону обприскування під кутом  $40^\circ$ . Результати показали, що похибка відхилення форсунки становила до +164,9 %, коли секції 1-3 увімкнено, і до -46,5 %, коли секції 4-7 увімкнено. Помилки відхилення від витрати сопла виникали протягом

майже 60 м до стабілізації в межах  $\pm 10,0\%$  від запланованої швидкості. Ці результати для Обприскувач-1 були порівняні з результатами, отриманими для Обприскувач-2 під час прискорення та повторного входу в зону обприскування.

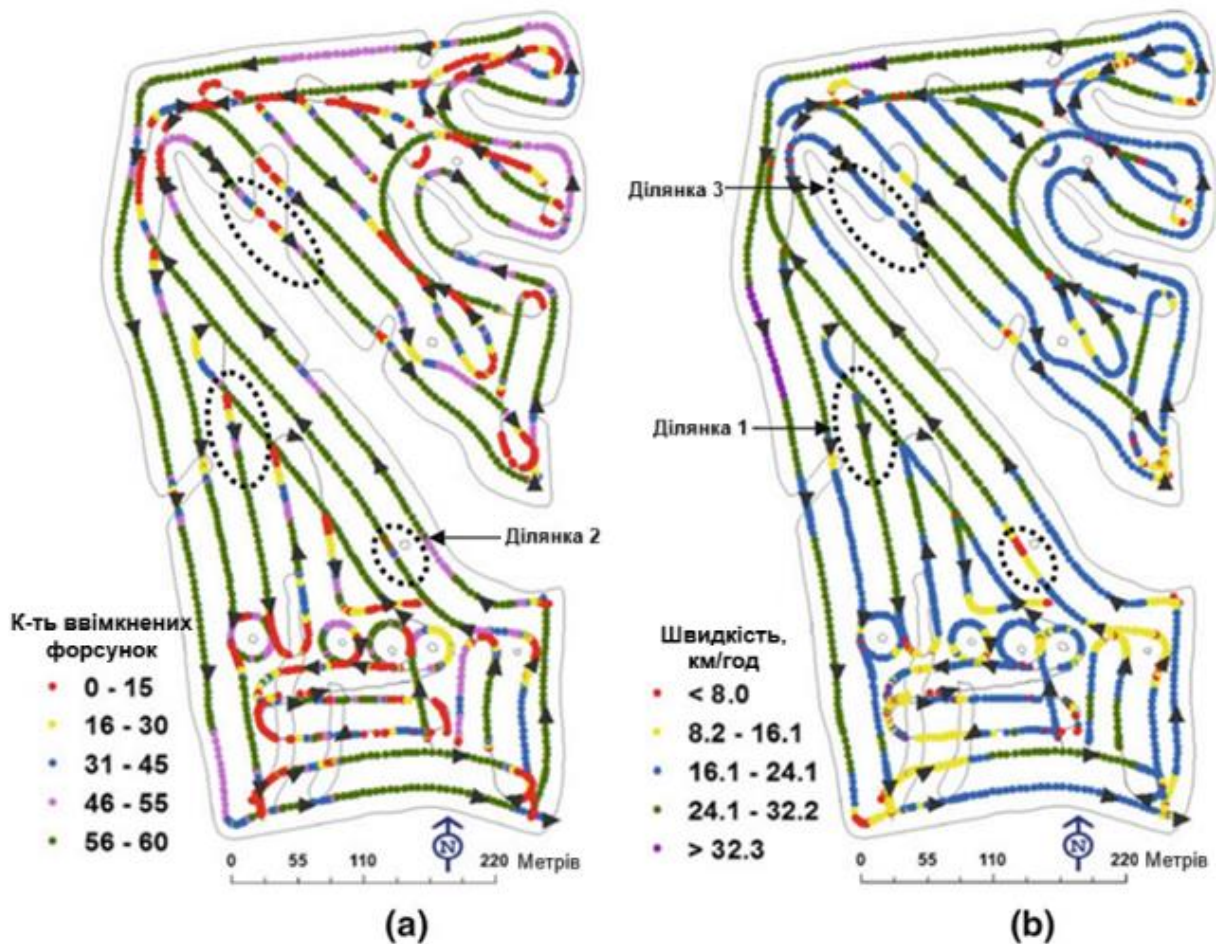


Рис. 7 - Карти внесення для Поля 2, які ілюструють: а) кількість форсунок і б) швидкість руху разом із напрямком руху (чорні стрілки) для Обприскувача-2

Коли обприскувач наближався до стовпа в точці 2, майже всі секції керування форсунками були УВІМКНЕНІ, поки 11 секцій керування не були вимкнені, коли обприскувач маневрував навколо перешкоди. Цей сценарій продемонстрував відхилення норми до  $+120\%$  для Обприскувача-2. Сценарій на рисунку 8 ілюструє приклад обприскувача-1, який сповільнюється з 24,3 до 7,4 км/год під час виходу із зони обприскування. Карта відхилення від норми (рис. 9) показала, що уповільнення призвело до похибок норми до  $+50\%$  для Обприскувача-1.

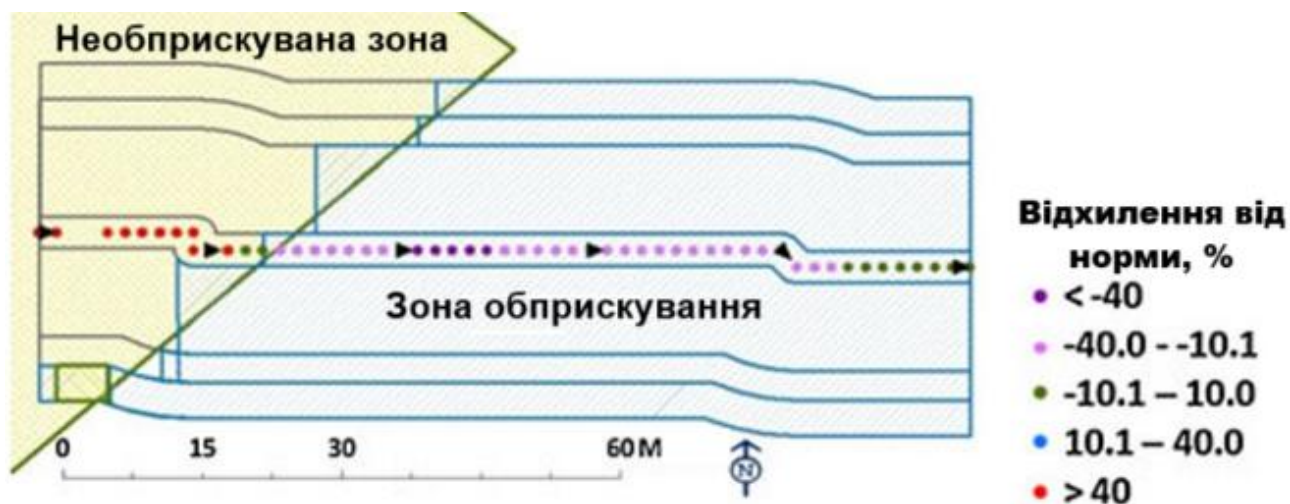


Рис. 8 – Приклад сценарію прискорення обприскувача-1 та активації ASC, коли він знову входить (увімкнення секцій) у зону обприскування (заштрихована синім кольором) при внесенні з цільовою нормою 140,2 л/га. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху

#### *Помилки польових тестів уповільнення*

Вплив уповільнення на величину відхилення форсунки спостерігався в кількох випадках для обох обприскувачів. ділянка 2 (рис. 5а, 7) зображує CV форсунок і швидкість потоку для Обприскувача-2 під час уповільнення, що супроводжується вимкненням секції. Обприскувач зменшив швидкість, щоб маневрувати навколо стовпа електропередач у цьому місці. Тут необхідна витрата системи зменшилася з 85,2 до 11,7 л/хв, оскільки обприскувач сповільнився з 18,7 до 3,2 км/год (рис. 7б, ділянка 2).

Уповільнення обприскувача-1 постійно вимагало нової швидкості потоку системи під час цих динамічних умов і припускає потенційні обмеження зворотного зв'язку та реакції для контролера швидкості. Однак під час цих двох сценаріїв CV форсунок були в межах 7,0 %, оскільки обприскувачі сповільнювалися, що вказує на рівномірний розподіл по штанзі.

#### *Результати статичних випробувань на прискорення та уповільнення.*

Статичні випробування для Обприскувач-2 показали, що прискорення

викликало відхилення від  $-7,8$  до  $7,4$  % від цільової норми внесення (Таблиця 1). Подібне, але більше за величиною, відхилення сопла від  $-7,5$  до  $37,2$  % відбулося під час уповільнення. Цікаво відзначити, що швидкість руху  $16,1$  км/год призвела до негативних значень. Загальний час встановлення потоку насадки ЧВП5 під час розгону та гальмування змінювався від  $5,6$  до  $20,8$  с (табл. 1). Статичні випробування показали, що незважаючи на те, що кінцева швидкість відхилення сопла була в межах  $\pm 10$  % (за винятком тесту  $9,7-6,4$  км/год), ЧВП були неочікувано довгими.

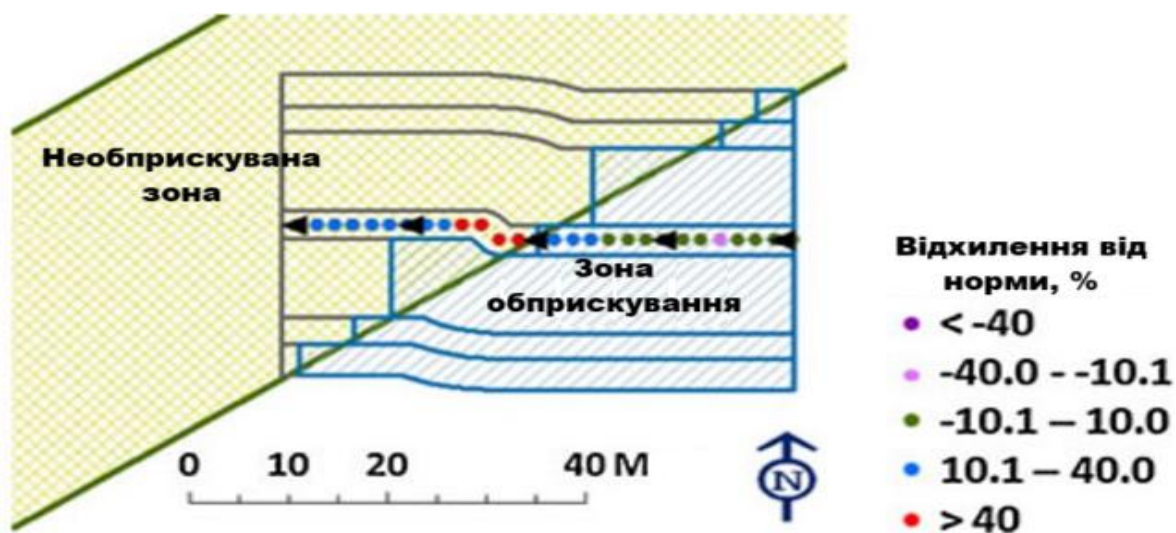


Рис. 9 - Приклад уповільнення обприскувача-1 під час виходу (секції вимкнено) із зони обприскування на попередньо оброблену ділянку (заштрихована зеленим) під час внесення з цільовою нормою  $93,5$  л/га. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху.

Тести на зміну швидкості проводилися в контрольованих робочих умовах, але результати ЧВП5 і ЧВП10 показали затримку реакції на соплі. Усі значення ЧВП5 були вищими за  $5,6$  с, що вказувало на те, що часте прискорення та уповільнення можуть призвести до помилок відхилень на соплі. Ці ЧВП та похибки відхилення від норми форсунки були очікуваними на основі карт (рис. 7, 5b), створених для Обприскувач-2 під час прискорення та уповільнення. ЧВП потоку через сопло також зменшувався

під час прискорення та збільшувався під час уповільнення, що очікувалося та спостерігалось в польових результатах.

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

Стаціонарний потік через сопло коливався навколо цільової швидкості нижче 16,1 км/год (91,7 л/хв). Ці коливання потоку або нестабільність могли бути наслідком того, що система керування намагалася швидко компенсувати, але постійно перевищувала задану точку. Ця надмірна компенсація призвела до несподівано довшого ЧВП і помилок відхилень, які досягли +37,2 %. Подібні відхилення від норми спостерігалися під час уповільнення обприскувача на ділянці-2. Важливо відзначити, що прискорення з 6,4 до 9,7 км/год вимагало збільшення потоку через сопло на 50%, тоді як зміна швидкості з 25,7 до 29,0 км/год потребувало збільшення лише на 12,5%. Таким чином, на реакцію системи керування (табл. 1) може впливати необхідна величина регулювання потоку, конфігурація системи керування та прискорення чи уповільнення обприскувача.

*Помилки спрацьовування ASC в польових тестах*

Сценарії для Обприскувача-1 (рис. 10) і Обприскувача-2 [ділянка-3, рис. 5(а)] були вибрані, щоб проілюструвати вплив спрацьовування ASC на помилку відхилення від норми. Для цих сценаріїв обприскувачі проходили зони без обприскування (водні шляхи з травою), де секції послідовно вимикалися, а потім вмикалися на швидкості руху 24 км/год. Швидкість зміни відхилення форсунки становила до  $-65\%$  для Обприскувача-1 та  $-68\%$  для Обприскувача-2 під час активації ASC у цих областях. CV форсунок становив  $>10\%$  протягом короткого часу (0,2–0,4 с) при повторному вході в зону обприскування. Загалом на картах показано, що активація ASC призвела до більш негативного відхилення або недостатнього застосування під час цих сценаріїв.

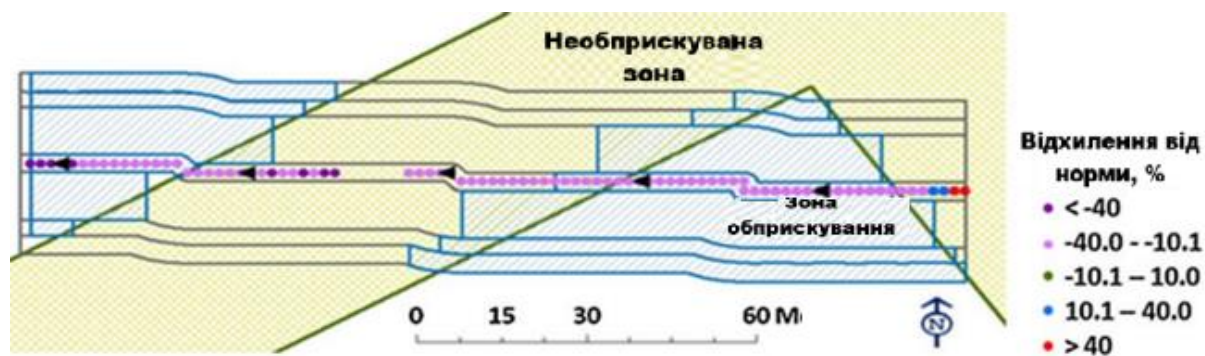


Рис. 10 - Приклад сценарію, у якому Обприскувач-1 входив у зону заборони обприскування, а потім виходив із неї (заштрихована зеленою ділянка), працюючи зі швидкістю 24 км/год. У контролері було встановлено цільову норму 140,2 л/га, і відсутність символів відхилення від норми відображає всі секції у стані відхилення. Різні горизонтальні області представляють секції штанги, а чорні стрілки вказують напрямок руху

Недостатнє застосування може бути результатом зворотного зв'язку або затримки відповіді системи керування. Наприклад, роздільна здатність і менший час відгуку витратоміра можуть забезпечити точний і швидкий зворотний зв'язок з контролером для реалізації стратегій управління витратою рідини. Окрім часу відгуку компонентів зворотного зв'язку та керування, стратегії та алгоритми керування, які використовуються для

управління відповіддю апаратного забезпечення керування, можуть значно вплинути на точність програми.

Система керування може відповідним чином дивитися наперед і може включати надійні алгоритми для доступу до необхідної величини зміни швидкості потоку. Ця оцінка може бути використана для вибору алгоритму динамічної реакції, щоб зменшити затримку в натисканні на шланги, мінімізувати відхилення норми внесення та швидко досягти стабільних умов.

Нарешті, точку керування потоком (наприклад, клапан штанги) можна перемістити якомога ближче до секції штанги, щоб зменшити перехідні помилки відхилення від швидкості потоку.

#### *Результати статичних випробувань на спрацьовування ASC*

Під час статичного випробування відхилення швидкості потоку форсунок під час спрацьовування ASC становили до  $-31,8$  % для Обприскувача-2 (рис. 11).

Аналіз потоку форсунок для Обприскувач-2 показав, що система керування швидко реагувала під час необхідних змін норми, але фактичний потік форсунок був меншим за цільовий. Часто система керування на Обприскувачі-2 не могла досягти цільового потоку форсунок під час спрацьовування ASC.

На рис. 11 показано, що система керування Обприскувач-2 мала повільну реакцію при збільшенні швидкості насоса для досягнення цільової витрати системи, оскільки секції керування послідовно вимикалися, а потім знову вмикалися з інтервалом у 5 с.

Повільна реакція системи також спостерігалася, коли 2, 3 або 4 секції штанги були одночасно ВИМКНЕНІ та знову УВИМКНЕНІ із загальною похибкою відхилення швидкості та ЧВП для форсунок, які залишалися увімкненими, до  $-23,1$  % та 54,6 с відповідно (табл. 2). Швидкість відхилення від норми для сопла становила лише 0,7 %, коли чотири секції

штанги були вимкнені, але це було досягнуто після 54,6 с нестабільності швидкості потоку сопла.

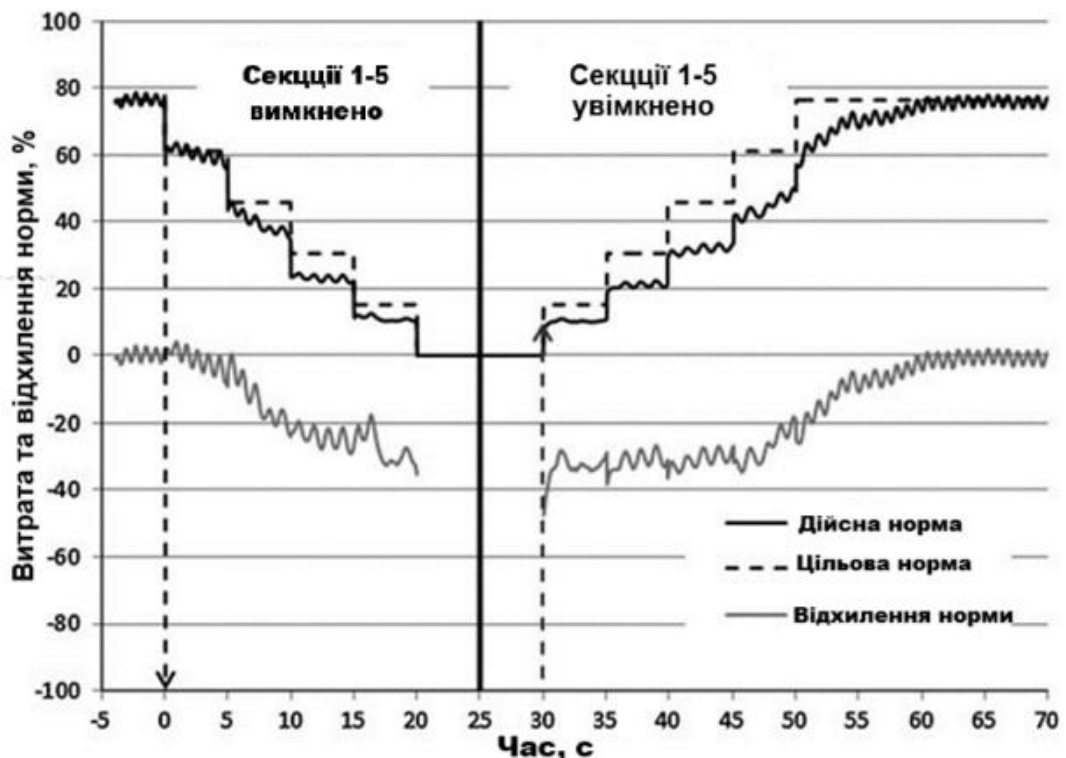


Рис. 11 - Загальна середня швидкість зміни потоку через сопло з урахуванням лише секцій штанги, які були увімкнені для Обприскувача-2 під час послідовного вимикання та вмикання клапанів секції штанги з інтервалом у 5 с. Обприскувач був налаштований на норму внесення 93,5 л/га та швидкість руху 16,1 км/год.

Таким чином, недостатнє внесення мало місце, доки всі секції не будуть увімкнені, а система стабілізується навколо цільової швидкості, що вимагає 0,3–5,1 с. Ці статичні результати відповідали спостережуваній відповіді в польових умовах у прикладах ділянок 1 і 3. Подібні експерименти при чотирьох цільових тисках з використанням Обприскувача-1 показали, що система керування змогла підтримувати швидкість потоку форсунки в межах  $\pm 10,0$  % від цільової при повороті усі секції штанги ВИМКНЕНО та УВІМКНЕНО (рис. 12). Під час цього випробування середня величина відхилення потоку сопла становила +3,8 %; однак миттєве падіння сталося, коли секції були вимкнені. Для цього

статичного випробування цільовий тиск було встановлено на рівні 414 кПа, а швидкість руху – 19,3 км/год, що еквівалентно цільовій нормі витрати 109,2 л/га або системному потоку 128,6 л/хв.

Таблиця 2 - Середня швидкість вимкнення форсунок і час стабілізації (ЧВП5) 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

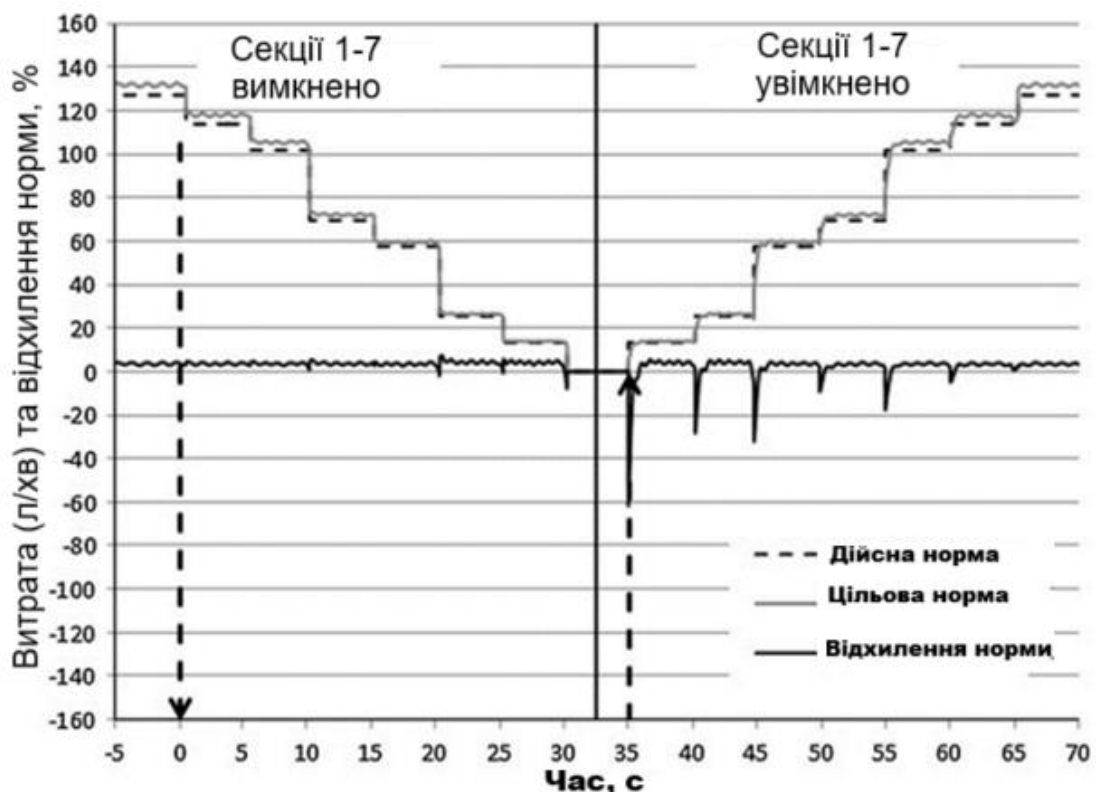


Рис. 12 - Загальний середній потік через сопло з урахуванням лише секцій штанги, які були ввімкнені, та відхилення від норми для Обприскувача-1 під час послідовного вимикання та вмикання секцій штанги з інтервалом у 5 секунд.

Ці стрибки, ймовірно, були результатом збільшення тиску та потоку в системі водопроводу, що було необхідно для досягнення цільової швидкості, і швидко спали. Подібна характеристика потоку сопла та швидкість відхилення спостерігалися для 138,0, 276,0 та 552,0 кПа. Статичні випробування на активацію ASC для Обприскувача-1 (автоматичне керування штангою) і Обприскувача-2 (автоматичне керування форсунками) показали, що між двома обприскувачами існують чіткі відмінності у реакції системи керування та управлінні витратою 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/](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