

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 впливу елементів точного землеробства на ефективність роботи обприскувача»

Виконав:

(підпис)

Олександр ЛАЗОРЕНКО
(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)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Лазоренко Олександр Вячеславович

Дослідження впливу елементів точного землеробства на ефективність роботи обприскувача.

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 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 8 таблиць, 12 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Було проведено дослідження, метою якого було детально оцінити реакцію системи в режимі реального часу, що застосовується для керування відхиленнями витрати окремих форсунок у типовому польовому обприскувачі, обладнаному системою ASC. Для цього використовувався обприскувач із робочою шириною 18,3 м, який був додатково оснащений комерційно доступними індивідуальними форсунками, а також стандартними системами керування секціями штанги, що дозволяють здійснювати точне вмикання та вимикання подачі робочої рідини.

У межах дослідження було виконано серію спеціально змодельованих випробувань, спрямованих на імітацію виходу обприскувача з рядів у зону, де розпилення не проводиться, а також подальшого повернення машини в робочу зону розпилення. Для підвищення достовірності результатів використовували різні варіанти руху, зокрема вибір рядів із кутами 20° та 70°, що дозволяло створити різні сценарії навантаження на систему керування.

Отримані значення тиску в кожній форсунці перетворювалися у відповідні значення витрати розпилювача згідно з залежностями, наведеними у технічній документації виробника, де описано співвідношення між тиском та продуктивністю форсунки. На основі цих даних проводили обчислення основних параметрів, зокрема часу затримки реакції витрати у форсунці, часу

встановлення стабільного режиму роботи, величини відсоткового відхилення (яке характеризує різницю між фактичною та цільовою витратою) та показника рівномірності подачі робочої рідини у форсунці, вираженого через коефіцієнт варіації (CV).

Випробування з використанням системи автоматичного керування секціями штанги проводили як у режимі роботи з компенсацією зміни витрати, так і без застосування компенсаційних алгоритмів. У свою чергу, сценарії з автоматичним керуванням на рівні окремих форсунок проводилися у режимі без компенсації потоку, що дозволило порівняти реакцію різних систем керування та визначити вплив кожного режиму на стабільність та рівномірність роботи форсунок під час реальних змін траєкторії руху обприскувача.

Ключові слова: добрива, обприскувач; контроль витрати; якість внесення, норма внесення.

ABSTRACT

Lazorenko Oleksandr Vyacheslavovich

Study of the influence of precision farming elements on the efficiency of the sprayer.

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

The graduation qualification work is presented on 44 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 8 tables, 12 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

A study was conducted, the purpose of which was to assess in detail the response of the system in real time, used to control the flow deviations of individual nozzles in a typical field sprayer equipped with the ASC system. For this purpose, a sprayer with a working width of 18.3 m was used, which was additionally equipped

with commercially available individual nozzles, as well as standard boom section control systems that allow for precise switching on and off of the working fluid supply.

As part of the study, a series of specially simulated tests were performed aimed at simulating the sprayer's exit from the rows to the area where spraying is not carried out, as well as the subsequent return of the machine to the working spraying area. To increase the reliability of the results, various movement options were used, in particular, the selection of rows with angles of 20° and 70° , which allowed creating different load scenarios on the control system. Ten high-frequency pressure sensors were installed on the sprayer boom in arbitrary places, which allowed for high-precision recording of pressure changes in specific nozzles in dynamics.

The obtained pressure values in each nozzle were converted into the corresponding values of the sprayer flow rate according to the dependencies given in the manufacturer's technical documentation, which describes the relationship between pressure and nozzle performance. Based on these data, calculations were made of the main parameters, in particular, the delay time of the flow rate response in the nozzle, the time to establish a stable operating mode, the percentage deviation value (which characterizes the difference between the actual and target flow rate) and the indicator of the uniformity of the working fluid supply in the nozzle, expressed through the coefficient of variation (CV).

Tests using the automatic control system for boom sections were carried out both in the operating mode with compensation for flow rate changes and without the use of compensation algorithms. In turn, scenarios with automatic control at the level of individual nozzles were carried out in the mode without flow compensation, which made it possible to compare the response of different control systems and determine the impact of each mode on the stability and uniformity of the nozzles during real changes in the sprayer's trajectory.

Keywords: fertilizers, sprayer; flow control; application quality, application rate.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
Розділ 2. Технічне забезпечення та методика досліджень	16
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	26
3.1 Автоматичне керування штангою біля рядів під кутом 70°	26
3.2 Автоматична керування секцією для кута рядків 20°	33
3.3 Пофорсуночне керування для кутів рядів 20° і 70° – без компенсації потoku.....	36
Висновки.....	40
Список використаних джерел.....	42

ВСТУП

1. Актуальність теми

У сучасних умовах розвитку сільського господарства технології точного землеробства відіграють ключову роль у підвищенні ефективності виробництва, зменшенні витрат та забезпеченні раціонального використання ресурсів. Одним із найважливіших елементів цих технологій є точне внесення робочих рідин, зокрема під час обприскування сільськогосподарських культур. Від якості роботи обприскувача залежить рівномірність покриття поверхні рослин, дотримання норм внесення препаратів та мінімізація втрат, що безпосередньо впливає на урожайність і екологічну безпеку агровиробництва.

Системи автоматичного керування секціями штанги (ASC), а також пофорсуночне регулювання витрати є сучасними інженерними рішеннями, здатними знизити кількість перекриттів та пропусків робочої рідини, підвищити рівномірність обробки та оптимізувати процес обприскування в умовах неоднорідності рельєфу та складних траєкторій руху. Проте реальна ефективність таких систем, особливо в динамічних режимах роботи, потребує детального вивчення, оскільки їхня реакція на зміну положення обприскувача чи швидкості руху визначає якість внесення.

У зв'язку з цим дослідження впливу елементів точного землеробства на ефективність роботи обприскувача є актуальним та необхідним для удосконалення технологічних процесів у сучасному рослинництві.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питання підвищення точності внесення робочих рідин обприскувачами активно досліджуються вітчизняними і зарубіжними науковцями. Значна увага приділяється вивченню впливу систем автоматичного вимкнення секцій, індивідуального керування форсунками, стабільності тиску та реакції гідравлічної системи на динамічні зміни під час руху агрегату. У літературних

джерелах описано методи підвищення рівномірності внесення, алгоритми компенсації потоку, моделі взаємодії робочого тиску та витрати форсунок.

Разом з тим, недостатньо дослідженою залишається реакція системи керування витратою форсунок у режимі реального часу при складних траєкторіях руху, зміні кутів заїзду в робочу зону, асиметричному навантаженні на секції штанги та застосуванні різних варіантів керування – з компенсацією та без неї. Також потребує подальшого вивчення порівняльна оцінка ефективності алгоритмів ASC і пофорсуночного керування в умовах, максимально наближених до реальних.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є визначення впливу елементів точного землеробства, зокрема систем автоматичного керування секціями та пофорсуночного регулювання витрати, на ефективність роботи обприскувача в умовах змінних траєкторій руху.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес внесення робочих рідин сільськогосподарським обприскувачем.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є динамічні параметри роботи систем ASC та пофорсуночного керування форсунками, які впливають на точність і рівномірність внесення робочої рідини.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні технічні рішення у сфері автоматичного керування обприскувачами.
2. Провести експериментальні дослідження роботи обприскувача при різних кутах виходу та входу в робочу зону.
3. Порівняти ефективність роботи ASC та пофорсуночного керування без компенсації потоку.

7. Методи дослідження

У роботі використано такі методи: аналітичний огляд наукових джерел, експериментальні методи для дослідження роботи обприскувача, методи математичної обробки даних, розрахунок параметрів витрати за технологічною документацією, статистичний аналіз (визначення CV, порівняння режимів роботи).

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 44 сторінки машинописного тексту, у ній наведено 8 таблиць, 12 рисунків, 2 додатки та 25 використаних літературних джерел.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Гербициди та поживні речовини є невід'ємними компонентами для високоефективного та економічно обґрунтованого вирощування сільськогосподарських культур. Підвищення вартості вхідних ресурсів та витрати на агрохімікати, що сягнули 11,5 мільярдів доларів у 2019 році [1], разом із постійним тиском на виробників щодо зменшення надмірного застосування пестицидів і добрив стимулювали вдосконалення розпилювального обладнання з метою підвищення точності внесення. Урожайність і якість продукції значною мірою визначаються рівномірністю розподілу пестицидів по всьому полю. Надмірне застосування може спричинити зростання виробничих витрат і потенційну шкоду посівам та довкіллю, тоді як недостатнє внесення може призвести до низької ефективності контролю шкідників і, як наслідок, втрати врожаю.

Впровадження систем контролю норми значно покращило точність внесення агрохімікатів на полі. Контролери норми для обприскувачів здебільшого класифікують як системи, що працюють на основі тиску, або витрати. Тискозалежні системи регулюють швидкість потоку через зміни тиску в системі відповідно до розміру отвору форсунки, тоді як витратні системи використовують дані з витратоміра для забезпечення точного внесення речовини.

Сучасні самохідні обприскувачі здебільшого оснащені контролерами, що працюють на основі витрати. Такі системи відстежують та коригують норми внесення в реальному часі, враховуючи швидкість руху машини та ширину оброблюваної смуги, тоді як оператор контролює загальний процес. Інтерфейс користувача надає можливість моніторингу та оперативного коригування параметрів внесення під час роботи. Системи керування тиском тестувалися ще з 1990-х років, демонструючи похибку менше 5% при швидкості руху від 3,2 до 9,7 км/год. Використання регулятора норми дозволяло знизити помилки внесення порівняно з традиційними наземними

системами з 18% і 5% до 7% і 1%. У рамках досліджень було спроектовано польовий обприскувач із форсункою прямого впорскування зі змінною швидкістю, який потребував 3,8 с для переходу від 10% до 90% крокового введення. Періодичне включення та вимикання форсунок з одного боку може збільшувати робочий тиск на іншій частині, що потенційно викликає похибки внесення через різницю тиску та швидкості потоку [2–6].

Випробування обприскувача із змінною нормою внесення виявили, що зазвичай коригування норми гербіциду відбувається поступово, через плавне збільшення або зменшення, за винятком різких переходів, коли встановлена норма змінюється з ВИМК. на УВИМК. Використання швидкодіючого регулювального клапана призводило до раптових коливань витрати, які сягали 450 л/га при переході від попередньої (ВИМК.) до нової цільової норми 300 л/га [7].

Застосування технології автоматичного керування секціями штанги (ASC) у штаті Алабама дозволило зменшити надмірне внесення пестицидів і мінеральних добрив на 1–12% під час одного проходу по полях, а також сприяло кращому захисту навколишнього середовища, обмежуючи потрапляння хімікатів на нецільові ділянки, включно з рослинними фільтрувальними смугами та водними каналами з трав'яним покривом [7]. Система ASC автоматично закриває електромагнітні клапани форсунок та секцій штанги, коли обприскувач проходить ділянку, яка вже була оброблена, або над зонах без обприскування в проміжних рядах (див. рис. 1).

Контролери норми внесення використовують супутникову систему глобального позиціонування (GPS) для визначення просторового розташування та регулювання потоку рідини до кожної секції штанги чи насадки. Завдяки цьому оператор ніколи не обробляє одну і ту ж ділянку двічі, усуваючи перекриття, підвищуючи ефективність застосування, економлячи час і ресурси фермерського господарства та зберігаючи природні ресурси.

Використання ASC потенційно знижує площу обприскування на 15,2–17,5% завдяки точному управлінню секціями штанги. Фермери можуть

скоротити ділянки надмірного внесення з 12,4% до 6,2%, замінюючи ручне вмикання/вимикання секцій на автоматичне керування через ASC.

Попри всі очевидні переваги, впровадження ASC у комплект систем керування обприскувачами відбувається поступово через простоту використання та поступове усвідомлення аграріями практичних вигод, зокрема економії ресурсів. Ефективність точного просторового внесення за допомогою ASC напряму залежить від здатності контролера витрати підтримувати правильні норми під час активації системи. Робота в режимі ВІМК./УВІМК. потребує високошвидкісної реакції апаратних компонентів для забезпечення ефективності застосування.

Проте контролери внесення мають обмеження щодо швидкості реагування. Помилки при обробці системами прямого вприскування можуть досягати 40% на неправильно оброблених ділянках поля, а концентрація хімікатів у віддалених форсунках іноді змінюється після проходження 80 м від моменту команди на зміну норми [8]. Затримка для систем контролю норми, щоб забезпечити точність внесення в межах бажаної величини, може становити від 15 до 55 секунд. Швидкість реакції контролера на дані DGPS іноді досягає 2,2 секунди при збереженні горизонтальної точності 1 м [9].

Крім затримок у системі керування та GPS, розташування форсунок уздовж штанги також впливає на величину та час виникнення помилок норми внесення. Дослідження показали, що затримки та похибки внесення тісно пов'язані з використанням систем контролю швидкості та значною мірою залежать від алгоритму керування апаратними компонентами, який регулює реакцію системи [5, 11].

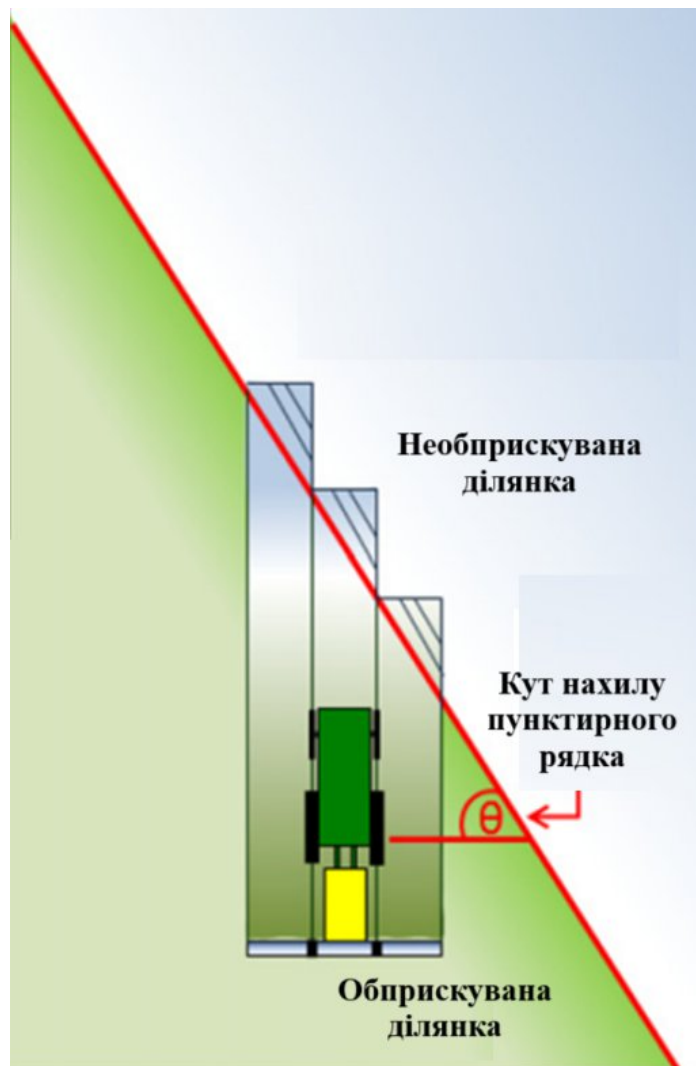


Рис. 1 - Ілюстрація ASC для трисекційної штанги обприскувача, що рухається із зони розпилення в зону відсутності розпилення під кутом. У цьому прикладі показано роботу розпилювача в пунктирних рядках

Повний ефект від застосування технологій точного землеробства (РА) можливий лише за умови їх правильної та акуратної експлуатації. На сучасних сільськогосподарських підприємствах існує серйозна екологічна занепокоєність щодо надмірного використання добрив і пестицидів, оскільки це може спричиняти небажаний вплив на довкілля, наприклад, забруднення водойм, що розташовані поруч із полями. Згідно з нормами ISO 5682-3 та стандартом ASABE S386.2 (ASABE, 2009), коефіцієнт варіації (CV) виступає показником, який характеризує рівномірність бокового розподілу розпилюваного розчину по штанзі обприскувача. Ці стандарти також визначають методика проведення випробувань для оцінки ефективності

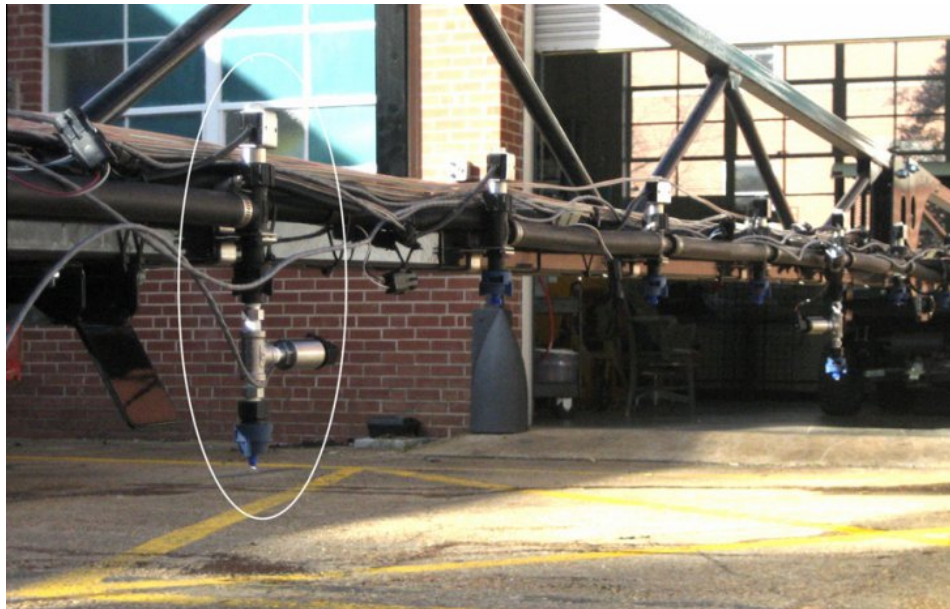
обприскувача у контрольованих умовах. Незважаючи на численні спроби оцінити апаратні затримки, жодне з попередніх досліджень не зафіксувало стабільність динамічного потоку форсунок під час використання системи автоматичного регулювання тиску (ASC).

Метою цього дослідження було: (1) проаналізувати вплив кута розташування пунктирного ряду на реакцію потоку через штангу та витрату рідини сопел при застосуванні ASC; та (2) визначити і порівняти поведінку витрати рідини сопла під час автоматичного управління секціями штанги та автономного контролю кожної форсунки.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дане дослідження здійснювалося за допомогою обприскувача довжиною 18,3 метра, який був змонтований на три точки навіски виробництва Schaben Industries. Для проведення всіх випробувань обприскувач встановлювався у нерухомому положенні та працював із водою, відповідно до вимог стандарту ISO 5682-3. Джерелом гідравлічної потужності для даного обприскувача виступав трактор J. Deere 6420, оснащений відцентровим насосом моделі FMC – 150 – HYD – 206 (ACE Pumps Corp.).

Система розподілу рідини обприскувача включала штангу (рис. 2), яка складалася з трьох окремих секцій: лівої (1), центральної (2) та правої (3). На штанзі було встановлено 37 форсунок з кроком 0,51 м між ними. Ліва та права секції мали ширину 6,1 м та включали по 12 форсунок у кожній, у той час як центральна частина штанги мала ширину 6,6 м та містила 13 форсунок (рис.



3).

Рис. 2 - Ілюстрація соленоїдів і датчиків тиску, встановлених на патрубках уздовж секцій штанги

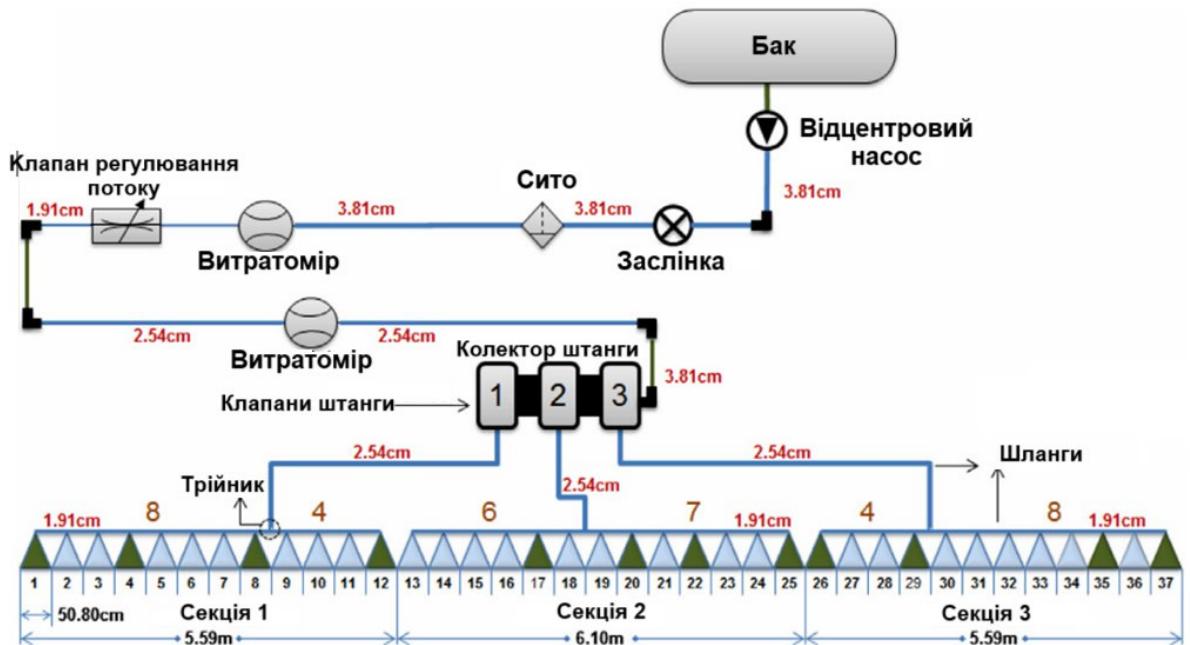


Рис. 3 – Конфігурація водопроводу обприскувача, що ілюструє розміщення клапана регулювання потоку, клапани штанги, ширину секцій штанги 1–3, відстань між форсунками, розміри шлангів і розподіл форсунок.

Форсунки були пронумеровані зліва направо (ID від 1 до 37). Форсунки, оснащені датчиками тиску, показані чорним кольором

Розміри шлангів визначалися за внутрішнім діаметром 2,54 см і використовувалися між клапанами стріли та Т-подібним фітингом у кожній із трьох секцій штанги. Для підключення окремих корпусів форсунок застосовувався шланг з внутрішнім діаметром 1,91 см (див. рис. 3). Довжина магістралі від клапанів до секцій штанги становила 7,62 м для першої та третьої секцій і лише 2,44 м для другої секції. В обприскувачі встановлювалися плоскі розпилувачі TeeJet 11003 (виробник TeeJet Technologies, Wheaton).

Кожен форсунковий блок оснащувався електромагнітним клапаном на 12 В постійного струму (рис. 2; Capstan Ag Systems Inc.), що дозволяло індивідуально керувати включенням і вимиканням форсунки. Система обприскування була налаштована на норму 140,5 л/га при швидкості руху агрегату 9,7 км/год. Для контролю роботи застосовувався комерційно доступний контролер Raven Viper-II. У складі системи використовувався турбінний поліметричний витратомір діаметром 3,81 см (модель RFM-15,

Raven Industries) та батерфляй-клапан діаметром 2,54 см для регулювання загальної швидкості потоку рідини.

Номер калібрування клапана регулювання потоку (VCN) встановлювався на значення 2123 у контролері для всіх експериментальних випробувань відповідно до рекомендацій виробника. Ці чотири цифри VCN (таблиця 1) визначають поведінку системи при подачі сигналу. Номер 2123 задає контролеру короткий імпульс із відносно швидким відгуком на клапан, формуючи таким чином точку розриву на 20% та зону нечутливості 3%.

Таблиця 1 – Номер калібрування клапана регулювання потоку, цифри з 1 по 4 контролюють час реакції системи дросельного клапана

№	Параметр	Значення
1	<i>Цифра люфту клапана</i> - контролює час першого імпульсу корекції після виявлення зміни напрямку корекції.	Діапазон від 1 до 9; де 1 означає короткий імпульс, а 9 - довгий імпульс
2	<i>Цифра швидкості клапана</i> - контролює час відгуку двигуна регулюючого клапана та може бути встановлена від...	1 (повільно) до 9 (швидко)
3	<i>Цифра точки гальмування</i> - встановлює відсоток від цільової швидкості, при якому двигун керуючого клапана починає обертатися з меншою швидкістю, щоб не перевищувати бажану швидкість	Діапазон від 0 до 9. Де 0 - 5%. 1 - 10% і 9-90%
4	<i>Цифра зони нечутливості</i> - визначає допустиму різницю між цільовою та фактичною нормою внесення, де корекція норми не виконується.	Діапазон від 1 до 9. Де 1-1% і 9-9%

Контролер швидкості виконував корекцію потоку при активації автоматичного режиму керування, тоді як у ручному режимі така компенсація не застосовувалася. Тиск на форсунках фіксувався тонкоплівковими перетворювачами (модель 1502 B81 EZ 100 PSI G; рис. 2а; PCB Piezotronics Inc., Дерев, NY, США) з частотою дискретизації 50 Гц. При цьому датчики тиску були стратегічно розташовані для точного вимірювання тиску в форсунках у різних положеннях секцій штанги.

Позиція вимірювача продуктивності форсунки відповідала стандарту ISO 5682–3 (ISO, 1997). Додатковий датчик встановлювався на колекторі

клапана штанги для моніторингу загального тиску в системі. Це розташування відповідало існуючому аналоговому манометру, за яким спостерігав оператор під час роботи. Для реєстрації тиску та вхідних сигналів штанги використовувався контролер National Instruments CompactRIO™ cRIO – 9014 зі шасі cRIO-9103 та двома аналоговими модулями серії NI 9221 С.

Загальну швидкість потоку визначали за допомогою інтегрованого витратоміра, підключеного до цифрового модуля введення/виведення серії NI 9403 С. Два цифрові модулі виведення NI 9475 С, встановлені на одному шасі, застосовувалися для автоматичного ввімкнення та вимкнення трьох клапанів штанги або 37 соленоїдів форсунок. Проміжну функцію керування виконували реле або модулі введення/виведення (модель 70G-ODC15), які дозволяли вмикати та вимикати електромагнітні клапани секцій штанги або форсунок.

Для оцінки у реальному часі нерівномірного внесення та коефіцієнта варіації (CV) по штанзі під час застосування ASC у типовому польовому режимі було обрано два ряди рослин із кутами пересічення 20° і 70° . Нерегулярні межі полів (рис. 4) аналізувалися в ArcGIS, що дозволило відібрати для тестування на пунктирних рядках найбільш характерні найвищий (70°) і найнижчий (20°) кути між рядами.

Сценарії автоматичного контролю штанги виконувалися як із компенсацією потоку, так і без неї, тоді як автоматичне керування форсунками



проводилося без корекції потоку. Контролер швидкості не вдалося налаштувати для компенсації потоку при пофорсуночному управлінні. Контролер норми був запрограмований для моделювання швидкості руху 9,7 км/год, норми внесення 140,3 л/га та ширини обробки штанги або форсунки (рис. 3). Теоретичний час відкриття та закриття кожної секції штанги або форсунки при обприскуванні рядів точок розраховувався на основі швидкості руху (9,7 км/год) та відстані між форсунками (рис. 3). Результати перемикання для рядів із кутами 20° та 70° наведено в таблиці 2. Секції послідовно вимикалися під час виходу обприскувача з ряду і знову активувалися при наближенні до необробленого рядка.

Рис. 4 – Приклад меж поля

Природа цього експерименту у контексті використаної випробувальної установки (системи керування) та контрольованих показників, таких як

швидкість руху та норма внесення, мала певні відмінності від вимог стандарту ISO 5682 – 3 (ISO, 1997). Під час проведення дослідження положення стандарту було максимально враховано, проте параметри швидкості пересування, норми внесення та порядок включення секцій штанги змінювалися для відтворення реальних польових умов експлуатації. Для автоматизації процесу увімкнення і вимкнення всіх запірних електромагнітних клапанів штанг або форсунок використовувалася програма, розроблена в середовищі LABVIEW-8.6, яка керувала роботою клапанів на основі заздалегідь встановленого часу (табл. 2). Це дозволяло моделювати функціонування обприскувача на рядках із переривчастим нанесенням рідини під різними кутами. У симуляційній моделі також були передбачені спеціальні часові затримки для того, щоб система встигала стабілізуватися під час виходу обприскувача з рядків і повторного входу в них.

Таблиця 2 - Передбачуваний час керування вимкненням/увімкненням секції та цільова швидкість потоку, визначені шляхом розрахунку часу між активацією сусідніх секцій штанги або форсунки, для імітації 20° та 70° рядків при нормі внесення 140,5 л/га

Кут входу в рядок	Параметр	Секція			Форсунка
		1	2	3	
20°	ON/OFF Час спрацьовування (сек)	0,8	0,9	0,8	0,1
	Цільова швидкість потоку (л/хв)	13,6	14,9	13,6	1,1
70°	ON/OFF Час спрацьовування (сек)	6,3	6,8	6,3	0,5
	Цільова швидкість потоку (л/хв)	13,6	14,9	13,6	1,1

Усі експерименти (Таблиця 3) проводилися тричі, що в сумі дало 18 окремих тестів. Сценарії з акцентом на штангу та форсунки були відібрані для

того, щоб визначити наявність різниці між автоматичною регуляцією секцій штанги та автоматичним управлінням форсунками. Головна відмінність між цими двома підходами полягає в тому, що потік рідини відкривається та закривається безпосередньо на кожній форсунці, а не на клапані штанги, який зазвичай розташований перед форсунками (рис. 3). Кожен зібраний набір даних для випробувань керування штангою був поділений на шість сегментів: штанга 1 ВИМКНЕНА, штанги 1 і 2 ВИМКНЕНІ, штанги 1, 2 і 3 ВИМКНЕНІ, штанга 1 УВИМКНЕНА, штанги 1 і 2 УВИМКНЕНІ та штанги 1, 2 і 3 УВИМКНЕНІ.

Таблиця 3 - Короткий опис режиму випробувань для автоматичного керування штангою (АКШ) і автоматичного керування орсункою (АКФ) для кутів входження в ряд.

Норма внесення, л/га	Швидкість, км/год	Кут радка	Спосіб керування	Налаштування контролера
140,5	9,7	20°	Секціями штанги	Компенсація
		70°	Пофорсуночно	Без компенсації
			Секціями штанги	Без компенсації
			Пофорсуночно	Компенсація
				Без компенсації

Усі шість сценаріїв мали унікальні відмінності, які полягали у тому, що під час експерименту активувалася різна комбінація секцій штанги. Дані, систематизовані для цих шести випадків, включаючи випробування автоматичного керування штангою, аналізувалися окремо для кожного сценарію. Для досліджень автоматичного керування пофорсуночно розглядалися дані щодо виходу з ряду та повторного входу в нього, причому ці показники розглядалися окремо від інших параметрів. Програмне забезпечення LabVIEW (LabVIEW, 2009) здійснювало реєстрацію сигналів датчика тиску та керуючого сигналу штанги з частотою 50 Гц, доповнюючи дані міткою часу для подальшого аналізу.

Тиск у форсунці перетворювали на швидкість потоку через неї (рис. 5), використовуючи співвідношення тиск/потік, зазначене виробником. Цільова

швидкість потоку визначалася з урахуванням норми внесення, швидкості руху агрегату та числа активних секцій штанги. Кількість секцій, що працювали в будь-який момент під час експерименту, визначалася за допомогою вимірюного сигналу керування для кожного клапана. Так само MATLAB застосовувався для фіксації спрацьовування окремого сопла. Далі за допомогою MATLAB обчислювалися середні значення початкової швидкості потоку (IFR), кінцевої швидкості (FR), середньої витрати через сопло (OR), час затримки (DT) та час встановлення (ST). Microsoft Excel використовувався для визначення коефіцієнта варіації (CV) для кожного сопла (табл. 4). Рівномірність подачі (CVs) розраховували згідно з вимогами ISO 5682 – 3 та стандарту ASABE S386.2.

Відсоткова різниця між фактичною та цільовою витратою сопла обчислювалася для оцінки відхилень. Швидкість зміни цього параметра визначалася з використанням аналогічних змінних, що застосовувалися при розрахунку середнього відхилення «D» згідно з ISO 5682-2. Незважаючи на це, для характеристики використовувався термін «відхилення», оскільки він найточніше відображає різницю фактичної подачі від цільового значення.

Експерименти проводилися у контрольованих умовах: штанга обприскувача залишалася стаціонарною та горизонтальною, а зона нечутливості становила $\pm 3\%$. Вважається, що швидкість потоку через форсунки понад $\pm 5\%$ відхилення сигналізує про занижені показники. Для часу встановлення був обраний діапазон $\pm 2\%$, оскільки це стандартне значення для оцінки реакції системи керування. Для наочності створювалися графіки, що ілюстрували зміну відхилень та CV під час виходу та повторного входу в рядки під різними кутами. На цих графіках суцільна чорна лінія слугує візуальним розділенням: ліва частина відповідає виходу з ряду, а права — реакції на повторний вхід.

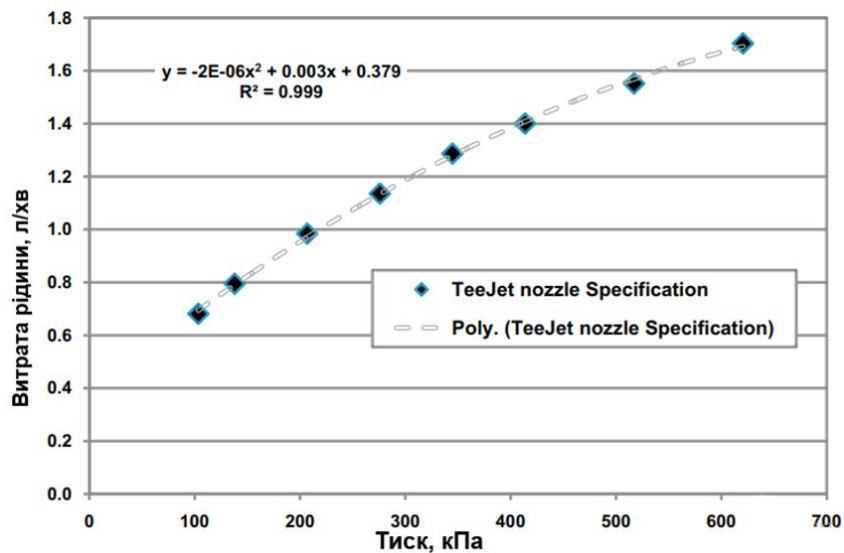


Рис. 5 – Крива залежності швидкості потоку розпилювача від тиску та поліноміальна підгонка (TeeJet)

Також пунктирні чорні смуги використовуються для позначення моментів, коли штанги чи форсунки переходили в стан увімкнення або вимкнення.

Таблиця 4 – Номенклатура та визначення для різних вимірних і обчислених змінних

Змінна	Позначення	Визначення
Початковий потік	ПП	Середня початкова накопичена швидкість потоку сопла трьох секцій штанги до виходу або після повторного входу в рядки
Час затримки	ЧЗ	Представляє різницю між часом, коли вхідний сигнал до клапана(ів) штанги та соленоїдів форсунок було надіслано, та часом, коли спостерігалася зміна витрати на $\pm 2\%$, враховуючи лише ті секції, які були увімкнені під час кожної позначки часу
Час налаштування	ЧН	Різниця між часом(ами), коли швидкість потоку сопла перевищувала $\pm 2\%$ після вимкнення/увімкнення секції(ів), і часом, коли швидкість потоку сопла встановилася та залишалася в межах $\pm 2\%$ від кінцевого значення
Витрата	В	Середня загальна системна або сукупна швидкість потоку сопла з урахуванням лише ON сопел під час виходу та повторного входу в рядки
Поза нормою	ПН	Середня швидкість відхилення сопла, коли секція (секції) виходили з рядків або знову

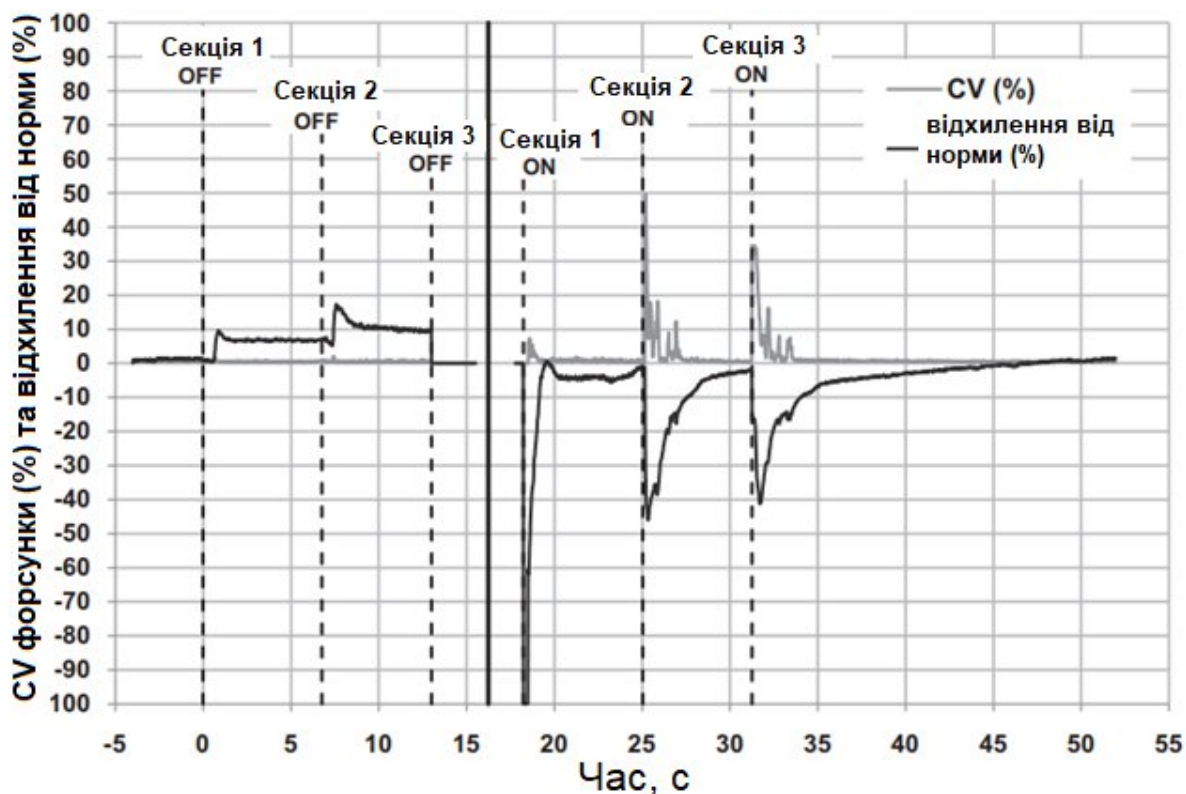
		входили в рядки, враховуючи лише секцію (секції) або сопла ON
Час поза нормою	ЧПН	Загальний час, протягом якого OR перевищувало $\pm 5\%$, коли секція(и) стріли виходила з точкових рядів або знову входила в них
Коефіцієнт варіації	КВ	Відображає рівномірність потоку сопла по всій штанзі під час виходу та повернення до рядків. Розраховується шляхом взяття середнього значення та стандартного відхилення лише тих значень тиску на соплах, які були увімкнені під час кожної позначки часу

Дисперсійний аналіз здійснювався з використанням процедури узагальнених лінійних моделей (GLM) у середовищі SAS, при цьому оцінювалися такі параметри, як час осідання сопла та швидкість відхилення. Для багаторазового порівняння результатів різних тестів застосовували метод Тьюкі–Крамера з 95% довірчим інтервалом, що дозволяло визначити наявність чи відсутність статистично значущих відмінностей між виходами та повторними входами в рядок точок як з компенсацією, так і без неї.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Автоматичне керування штангою біля рядів під кутом 70°

Реакція потоку через сопло під час проведення випробувань АВС із компенсацією потоку наведена на рисунку 6. Час затримки реакції потоку в соплі склав 0,7 секунди, тоді як період встановлення варіювався в межах від 0,4 до 1,3 секунди (табл. 5). Значення часу затримки та періоду встановлення у відповідь на подачу вхідного сигналу до секції штанги 1 під час виходу з послідовності з 70 точок відображено на рисунку 7. Під час повторного введення сигналу час затримки коливався від 0,1 до 0,3 секунди, а період стабілізації потоку знаходився між 3,9 та 14,4 секунди (табл. 6). Затримка при виході та повторному вході головним чином обумовлена часом, який потрібен клапану штанги для повного закриття або відкриття після отримання вхідного



сигналу.

Рис. 6 – CV форсунки та відхилення для сценарію з ASC із кутом 70°

до ряду

Отриманий результат пояснюється тим, що швидкість потоку через сопло в секціях, де воно ВИМКНЕНО, відповідала величині потоку в секціях, що були УВИМКНЕНО, під час виходу. При цьому потік залишався рівним нулю після того, як секції стріли повторно потрапляли в ряди точок протягом періоду затримки. Відмінність у тривалості цієї затримки під час виходу та повторного входу, ймовірно, зумовлена різницею імпульсу рідини на клапанах стріли під час їх закриття та відкриття, хоча теоретично час відкриття або закриття клапанів стріли мав залишатися однаковим.

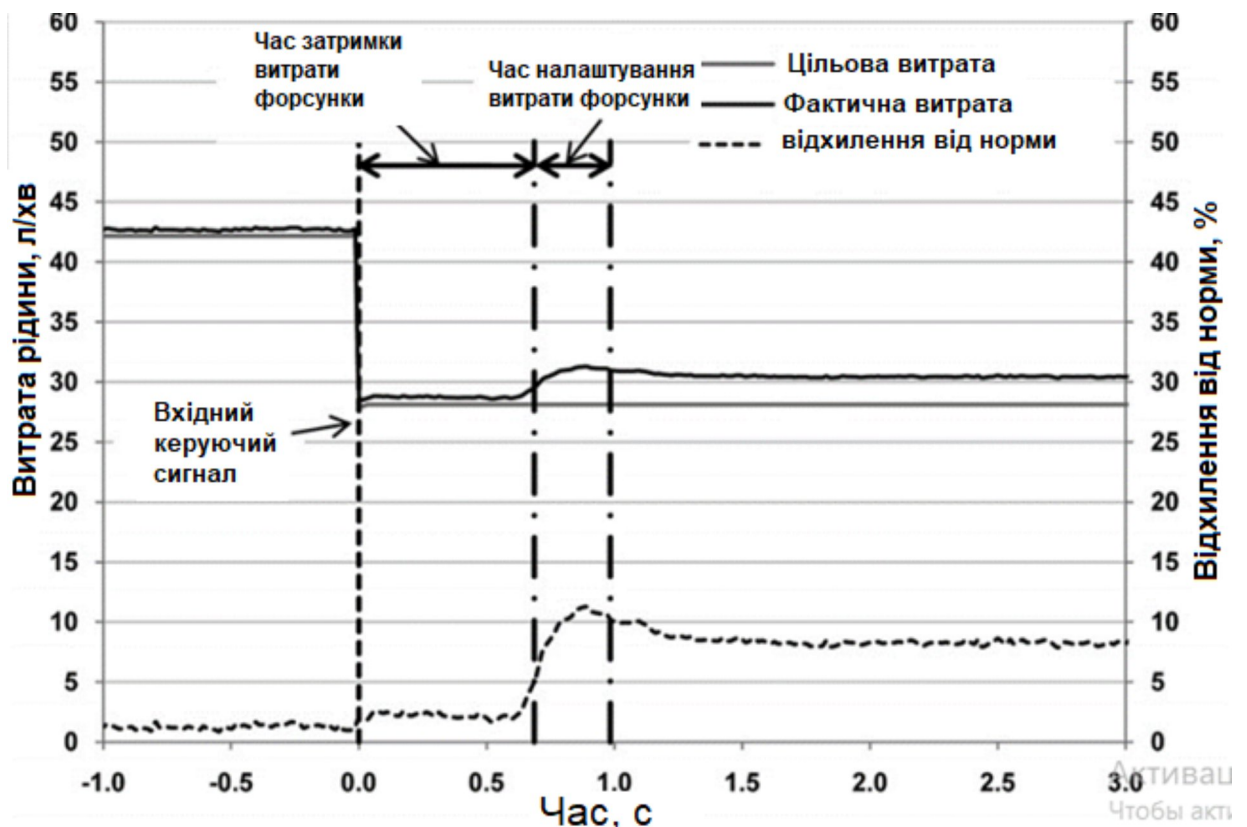


Рис. 7 – Затримка витрати через сопло, час налаштування і реакції на відхилення від вхідного сигналу до клапана секції 1 при виході з рядів з кутом 70°

У даному дослідженні перевірка сумісності шлангів не проводилася, проте імпульс рідини може змінюватися через коливання енергії всередині самих шлангів. Під час початкового виходу швидкість потоку встановлювалася досить швидко, тоді як при повторному входженні вона досягала стабільного значення лише через 14,4 с, що відповідає очікуванням, оскільки необхідний час для створення тиску на насадках і, відповідно,

досягнення заданої швидкості рідини. Відхилення швидкості від норми під час виходу було позитивним, що призводило до перевищення нормованого внесення, у той час як при повторному входженні обприскувача спостерігалось негативне відхилення, тобто недостатнє внесення рідини. Передбачалося, що система компенсації потоку, керована контролером, буде підтримувати відхилення швидкості у межах $\pm 5\%$, оскільки контролер налаштований на нечутливу зону 3% . Проте середнє значення відхилення при випробуваннях компенсації потоку коливалося від $+6,6\%$ до $+10,7\%$ під час виходу з рядів (див. таблиця 5), тоді як при повторному входженні розпилювача швидкість відхилення змінювалася від $36,3\%$ до $15,6\%$ (див. таблиця 6).

Таблиця 5 - Підсумок часу затримки сопла (ЧЗ), часу налаштування (ЧВ), кінцевої витрати (КВ), середньої витрати сопла (СВ) і часу виходу (середні значення представлені зі стандартними відхиленнями в дужках), при виході з ряду під кутом 70° під час випробувань секції без компенсації (потoku)

Початковий стан		Секції штанги							
		Секція 1				Секція 2			
КВ, л/хв	СВ, %	ЧЗ, с	ЧВ, с	СВ, %	Час вих., с	ЧЗ, с	ЧВ, с	СВ, %	Час вих., с
<i>Компенсація</i> 42.5 (0.0)	0,9 (0,0)	0,7 (0,0)	0,4 (0,1)	6,6 (0,8)	6,1 (0,0)	0,7 (0,0)	1,3 (0,3)	10,7 (0,4)	6,2 (0,0)
<i>Без компенсації</i> 43.4 (0.1)	2,9 (0,1)	0,6 (0,0)	0,1 (0,0)	12,5 (0,1)	6,1 (0,0)	0,6 (0,0)	0,0 (0,0)	21,3 (0,1)	6,2 (0,0)

Очевидно, що, хоча швидкість відхилення перевищувала $\pm 5\%$ від встановленої цільової швидкості сопла під час виходу, вона залишалася в межах допустимого діапазону $\pm 5\%$ лише під час повторного входу (рис. 6). Час роботи сопла показує, що надмірне внесення матеріалу відбувалося протягом 6,1–6,2 секунд під час виходу (рис. 6), тоді як недостатнє внесення тривало від 3,6 до 5,1 секунд під час повторного входу (рис. 8).

Рівномірність потоку через сопло, оцінена за коефіцієнтом варіації (CV), залишалася нижче 1,0% протягом усього періоду виходу з рядів точок, що відповідало очікуваному стабільному результату. Навпаки, під час короткого проміжку повторного входу показник рівномірності потоку коливався до 50,0% (рис. 6), хоча середнє значення CV знову залишалось менше 1,0%, підтверджуючи загальну стабільність процесу.

Таблиця 6 - Підсумок часу затримки витрати сопла (ЧЗ), часу налаштування (ЧВ), кінцевої витрати (КВ), середньої витрати сопла (СВ) і часу виходу (середні значення представлені зі стандартними відхиленнями в дужках), при повторному вході в рядки 70° під час випробувань без компенсації.

Початковий стан	Повторне введення секцій штанги											
	Секція 1				Секція 2				Секція 3			
КВ, л/хв	ЧЗ, с	ЧВ, с	СВ, %	Час вих., с	ЧЗ, с	ЧВ, с	СВ, %	Час вих., с	ЧЗ, с	ЧВ, с	СВ, %	Час вих., с
<i>Компенсація</i> 0.0 (0.0)	0.3 (0.0)	4.6 (1.2)	-36.6 (2.0)	3.9 (1,1)	0.2 (0.0)	3.9 (0.2)	-20.9 (0.3)	3.6 (0.4)	0.1 (0.1)	14.4 (0.7)	-15.6 (0.3)	5.1 (0.3)
<i>Без компенс.</i> 0.0 (0.0)	0.3 (0.0)	0.4 (0.0)	14.7 (0.1)	6.8 (0.0)	0.2 (0.0)	0.7 (0.1)	8.6 (0.1)	6.2 (0.0)	0.2 (0.0)	2.0 (0.5)	-22.3 (0.2)	0.9 (0.9)

Рівномірність роботи сопла змінювалася переважно в моменти, коли секції штанги 2 та 3 повторно активувалися. Одне з можливих пояснень цього явища пов'язане з протитиском, який супроводжувався складними динамічними процесами всередині секцій. Це відбувалося через компенсацію потоку та перерозподіл енергії рідини, що, у свою чергу, спричиняло коливання тиску вздовж бона. Цікаво, що під час виходу з рядів спостерігалася недостатньо демпфована реакція, тоді як повторне увімкнення секцій викликало надмірну або критично демпфовану відповідь на робочих соплах.

Під час експериментів без використання автоматичної компенсації штанги час затримки реакції потоку на соплі складав 0,6 с під час виходу і від 0,2 до 0,3 с під час повторного входу (див. табл. 6). Ці значення затримки без компенсації були порівнянні з показниками системи з компенсацією потоку,

що вказує на затримку часу відгуку механізмів обладнання, зокрема клапанів штанги. Потік на соплі встановлювався майже миттєво під час виходу, тоді як час стабілізації коливався в межах від 0,2 до 2,0 с під час повторного входу. Менший час встановлення пояснювався відсутністю компенсаційних механізмів, однак це призводило до тимчасових відхилень швидкості потоку як під час виходу, так і при повторному вході.

Відхилення від номінальної швидкості або надмірне її збільшення під час виходу секцій штанги (12,5–21,3%) та повторного входу секцій 1 і 2 (8,6–14,7%) без компенсації очевидно виникали через підвищений потік та прагнення системи штанги досягти рівноваги при максимальній швидкості подачі рідини. Ці коливання швидкості потоку призводили до часу відключення сопла, що складав 6,1–6,2 с під час виходу і 6,2–6,8 с під час повторного входу в ряди точок. Коли третя секція штанги знову включалася в робочий процес, відхилення швидкості сопла досягало 22,9% протягом 0,9 с, після чого вона стабілізувалася в межах $\pm 5\%$.

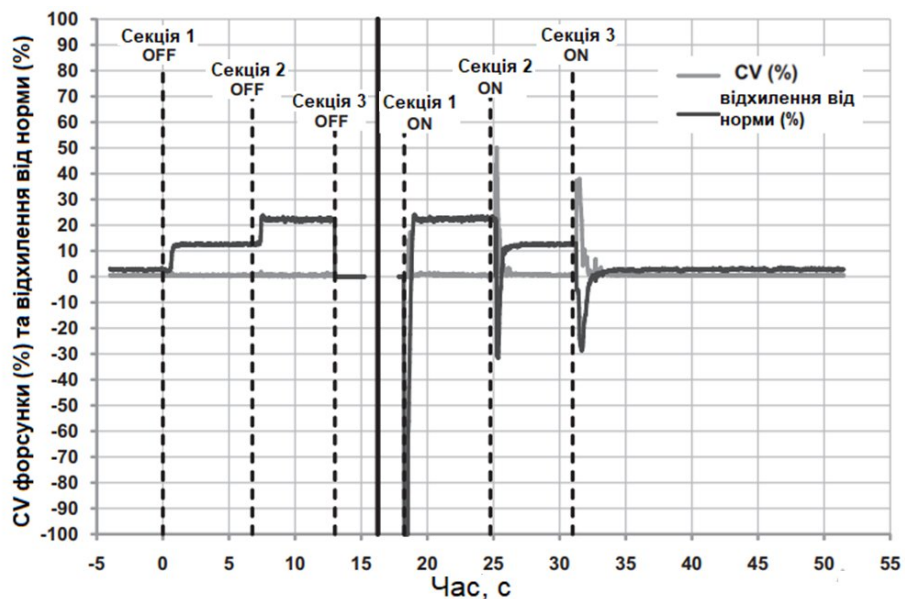


Рис. 8 – CV сопла та швидкість відхилення від норми для руху з автоматичним контролем із кутом рядків 70° без компенсації

Коефіцієнти варіації форсунок демонстрували високі значення лише протягом короткого інтервалу при повторному включенні, особливо після активації секції штанги 3, тоді як у інших випадках вони залишалися на рівні близько 1,0% (рис. 8). Змінність CV для сопла була подібною до показників

компенсації потоку (рис. 6), проте мала короткочасний характер через відсутність корекції (рис. 8) під час повторного включення секцій штанг 2 та 3. Порівняння даних на рис. 6 і 8 показує помітні відмінності, що вказує на більш швидку стабілізацію потоку форсунок за відсутності компенсації.

Разом із тим, відсутність компенсаційного механізму призводила до надмірного розпилення протягом усього часу, коли був активний ASC. Головна різниця між випробуваннями з компенсацією та без неї полягала у можливості регулюючих клапанів підлаштовуватися під заданий потік у процесі компенсаційних випробувань. Несправності швидкості та час встановлення під час виходу та повторного входу для випробувань із компенсацією можуть пояснюватися реакцією клапана регулювання потоку на дії ASC.

Таблиця 7 - Результати дисперсійного аналізу для часу налаштування форсунки (ЧН), відхилення від норми (ВН) і часу відхилення протягом випробувань автоматичної штанги для 70°

Показник	Сума квадратів	Середній квадрат	F	Pr>F
Час налаштування (ЧН)	518,05	57,56	256,69	<,0001
Похибка ЧН	4,48	0,22		
Відхилення норми (ВН)	10592,32	1176,92	147,00	<,0001
Похибка (ВН)	160,13	8,00		
Час поза нормою	90,55	10,06	73,82	<,0001
Похибка часу поза нормою	2,73	0,13		

Статистичні результати випробувань автоматичних штанг з компенсацією потоку та без неї для кута рядків 70° представлені в таблицях 7 і 8. Дисперсійний аналіз показав, що існують підстави стверджувати про значущі відмінності середніх величин часу налаштування, розмірів відхилень від норми та тривалості відхилень. Детальні порівняння демонструють, що час налаштування, показники відхилень від нормативних значень та тривалість

відхилень для обприскувачів з компенсацією при виході з ряду істотно відрізняються від аналогічних показників під час повторного входу ($p > 0,0001$). Крім цього, середні значення часу встановлення та швидкості вимикання для випробувань із компенсацією виявилися значно відмінними порівняно з тестами без компенсації при куті 70° , за винятком швидкості вимкнення, коли секція 1 була ВИМКНЕНА на виході, а секція 3 повторно включалася під час повторного входу (Табл. 7).

Таблиця 8 - Час налаштування швидкості потоку через форсунку (ЧН), витрата поза нормою (ВН) і кратне порівняння часу витрати поза нормою зі статистичного аналізу

Випробування	Групування		
	ЧН	ВН	Час ВН
1 Секція OFF - Компенсація	D	B	AB
2 Секція OFF- Компенсація	C, D	R	A
1 Секція OFF – Без компенсації	D	B	AB
2 Секція OFF - Без компенсації	D	A	A
1 Секція ON - Компенсація	B	D	C
2 Секція ON - Компенсація	B	C	C
3 Секція ON - Компенсація	A	C	B
1 Секція ON - Без компенсації	D	AB	A
2 Секція ON - Без компенсації	C, D	B	A
3 Секція ON - Без компенсації	C	c	C

Передбачалося, що випробування з компенсацією та без компенсації для рядів під кутом 70° покажуть різну швидкість відхилення форсунки від заданих параметрів, оскільки регулюючий клапан не забезпечував корекцію потоку. Хоча час виходу з ряду значно варіювався при повторному вході, сумарний час проходження ряду залишався приблизно однаковим як у випадку з компенсацією, так і без неї.

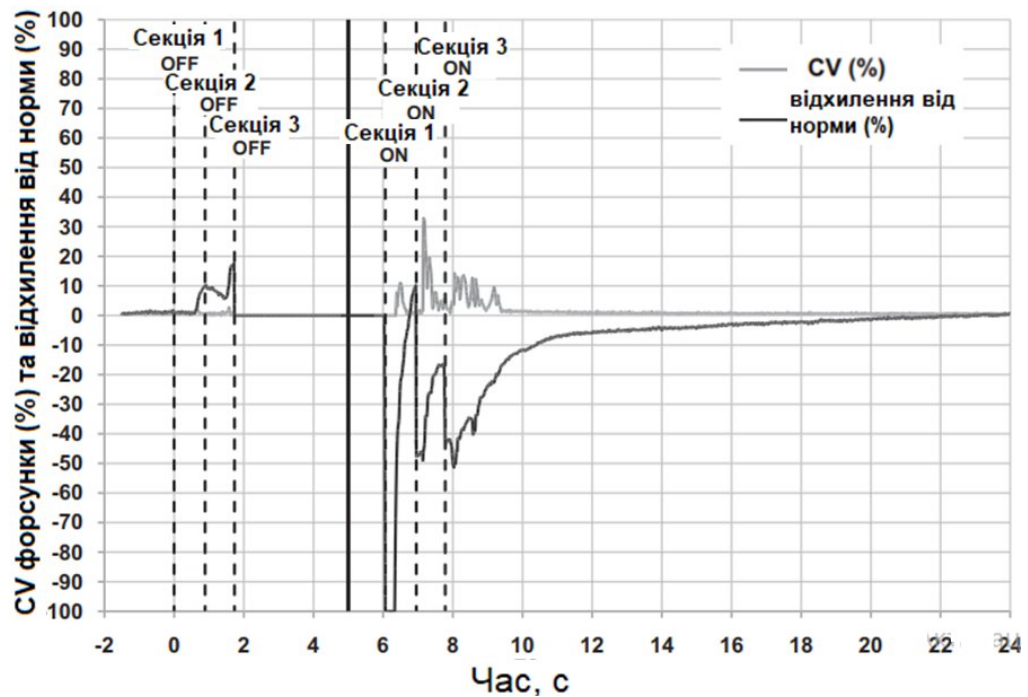
Крім того, подовжений період налаштування свідчить про те, що у напрямку поздовжнього руху відхилення швидкості може проявлятися

протягом тривалого часу, що значно перевищує початкові очікування. Механізм управління потоком і система зворотного зв'язку потребують детальнішого дослідження, щоб зменшити відхилення від нормативних значень при використанні технологій автоматичного керування окремими секціями.

3.2 Автоматична керування секцією для кута рядків 20°

Під час випробувань із кутом рядків 20° спостерігалось нестабільне функціонування витрати рідини при виході та повторному вході секцій у ряди, як у випадку застосування компенсації (рис. 9), так і без неї (рис. 10), за винятком ситуацій, коли третя секція штанги знову починала обробляти ряди. Фіксувався проміжок часу 0,7 с після виходу першої секції та 0,3 с при її повторному вході в ряди. Період стабілізації витрати форсунки (13,6 с) при повторному вході третьої секції під кутом 20° був приблизно рівним часу налаштування для рядів із кутом 70° (14,4 с).

Випробування, проведені на 70°, продемонстрували, що системі керування необхідно більше ніж 1,0 секунди для адекватної реакції та



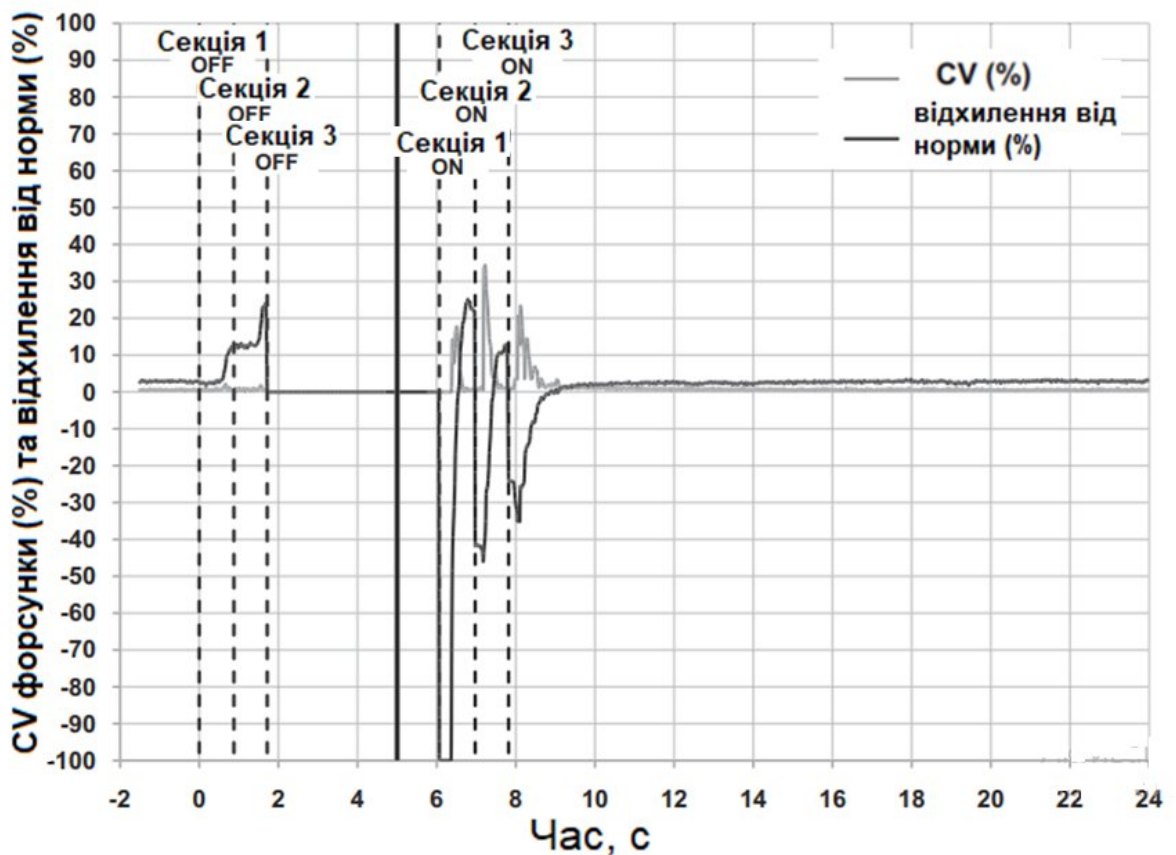
регулювання швидкості потоку через сопло під час активації ASC при виході з ряду, а також кілька секунд для повторного входження у ряд. Час, потрібний для вимкнення та повторного ввімкнення секцій штанги, не перевищував однієї секунди у всіх 20 проведених тестах (Таблиця 2). Таким чином, аналіз 20 результатів вказав на те, що активація ASC відбувалася надто швидко, і контролеру було складно оперативно відреагувати. Швидкість відхилення при цьому залишалася поза межами $\pm 5\%$ і стабілізувалася лише після того, як третій розділ знову ввійшов у ряд контрольних точок. Коефіцієнт варіації (CV) форсунок залишався нижче 0,6%, за винятком ситуацій, коли секції 2 і 3 штанги поверталися у ряд — у ці моменти CV форсунок протягом короткого проміжку часу досягав значень до 30,0%.

Рис. 9 – CV форсунок та величина відхилення витрати для 20° ряду при автоматичному керуванні з компенсацією потоку

Порівняння показників роботи системи з компенсацією потоку та без неї (див. рис. 9 і 10) продемонструвало, що механізм з зворотним зв'язком дійсно намагався регулювати подачу рідини через форсунок, однак контролер

отримував нову установчу величину раніше, ніж встигав змінити фактичний об'єм потоку. В результаті, щодо параметрів швидкості подачі, часу налаштування та розмірів відхилень можна дійти висновку, що відгук під час активації для ряду під кутом 20° при автоматичному управлінні буде приблизно однаковим, незалежно від застосування або відсутності компенсації потоку.

Для менших кутів рядків (приблизно 20°) контролер швидкості повинен реагувати максимально оперативно, у проміжку менше секунди, оскільки активація ASC відбувається саме на цьому етапі. Такий короткий інтервал



може не залишати достатньо часу для регулятора, щоб ефективно відреагувати на включення ASC. У подібній ситуації виникає потреба в новому значенні швидкості потоку, оскільки секція може вимикатися або включатися ще до того, як контролер пристосується до попередньої витрати після останньої активації секції.

Рис. 10 - CV форсунки та величина відхилення від норми для 20° рядів при автоматичному керуванні без компенсації

Отже, при менших кутах рядків доцільно прогнозувати та адаптуватися до фінальних робочих параметрів, коли всі секції активні, замість спроб забезпечувати регулювання потоку в реальному часі під час запуску ASC. Такі експерименти можуть демонструвати реакцію системи керування під час повороту на розворотній смузі і підтверджують, що контроль витрати через форсунки реально здійснений за певних умов експлуатації.

Необхідно враховувати, що для отримання точного відгуку системи у будь-яких умовах, де потрібна блискавична реакція (менше однієї секунди), керування швидкістю обприскувача потребує наступного: (1) швидкого та точного зворотного сигналу від витратоміра з точністю до мілісекунд, (2) миттєвої реакції контролера норми разом із високошвидкісною обробкою даних та (3) швидкодіючого регулювального клапана. Хоча в цьому дослідженні використовувався лише один контролер і конкретні налаштування обприскувача, отримані результати підкреслюють важливість правильної координації потоку через сопла під час зміни швидкості, щоб мінімізувати відхилення від встановленої норми для будь-якого типу контролера.

3.3 Пофорсуночне керування для кутів рядів 20° і 70° – без компенсації потоку

Для рядів із кутами 20° та 70° проміжок часу, протягом якого надсилався вхідний сигнал на соленоїд кожної форсунки, виявився значно коротшим у порівнянні зі сценарієм, де здійснювалося автоматичне регулювання секцій штанги (табл. 2). Загальний період виходу з рядів 20° та 70° складав 2,5 та 18,7 с відповідно. Продуктивність подачі рідини форсунки змінювалася лінійно, знижуючись і підвищуючись на 17,7 л/хв/с для ряду 20° (рис. 11) та на 2,3 л/хв/с для ряду 70° (рис. 12) під час виходу і повторного входу.

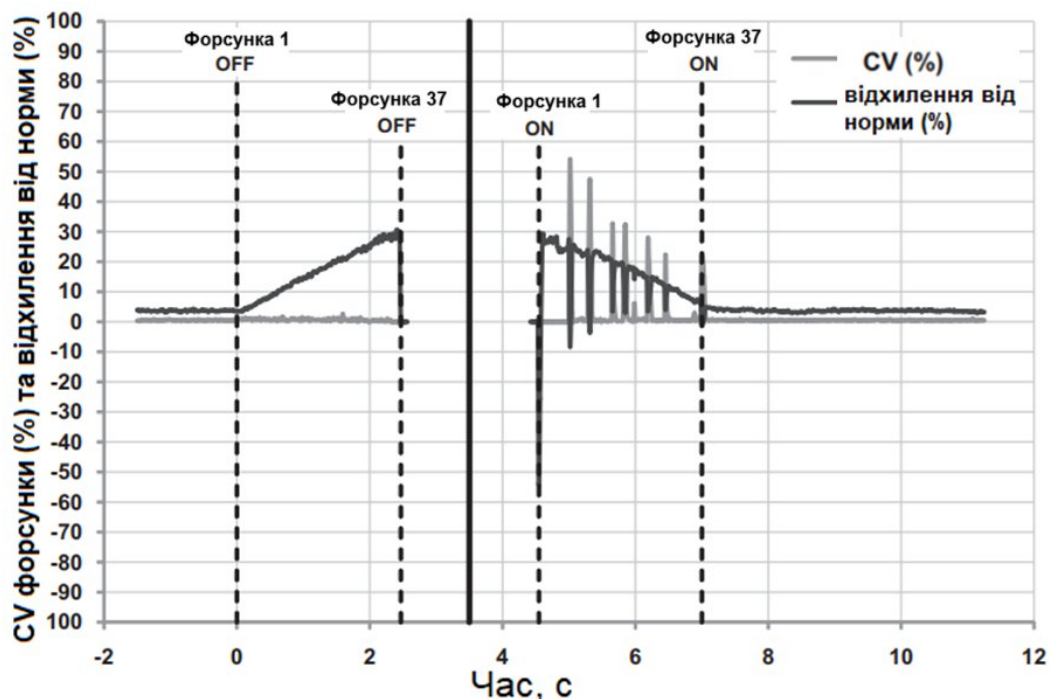


Рис. 11 – CV сопла та швидкість відхилення (пунктирні лінії показують, коли сопло 1 і 37 увімкнено або вимкнено) для 20-точкового ряду ANC без компенсації

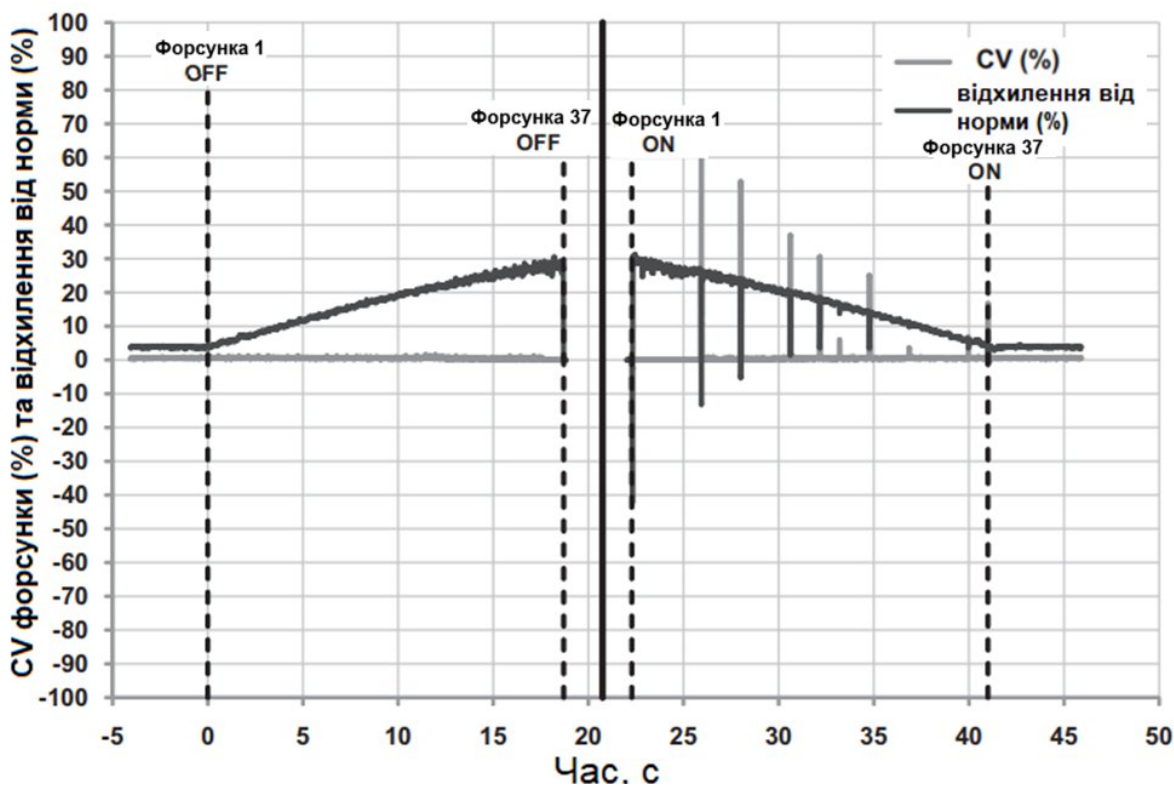
Показник відхилення зростає від +3,7% до 28,7% під час тестів для кутів 20° і 70° при виході, а під час повторного входу він зменшувався. Оскільки контрольний датчик розташовувався на корпусі кожної форсунки, вплив відключення кожного соленоїда проявлявся практично миттєво.

Рівномірність роботи форсунки проявляла короткочасні коливання до 65,0% під час повторного входження в ряди і мала меншу тривалість у порівнянні з ASC. Такі підвищені значення CV були спричинені коротким часом активації соленоїда форсунки (<100 мс), що забезпечує стабілізацію при повторному вході. По суті, таких сплесків могло бути 37, якби датчики тиску

були встановлені на всіх 37 форсунках. Високі CV при виході з рядів не спостерігалися, адже після відключення відповідної секції форсунки її дані більше не бралися до аналізу, а швидкість потоку в увімкнених залишкових секціях миттєво зростала. Поведінка системи в цілому нагадувала результати випробувань з автоматичною штангою без компенсації (рис. 8 і 12), проте лінійне збільшення та зниження витрати рідини через сопло при пофорсуночному управлінні могло спричиняти більш інтенсивне надмірне внесення як під час виходу, так і під час повторного входу в ряди.

Такий результат був передбачуваним, оскільки кожне відключення соленоїда призводило до незначної зміни об'єму (1,14 л/хв) у швидкості потоку системи. Частково цей об'єм викликав підвищення витрати форсунки до того моменту, поки швидкість потоку не стабілізувалася на максимальній величині.

У цьому дослідженні було акцентовано увагу на реакції системи керування та рівні відхилення витрати форсунки при застосуванні ASC. Час



відгуку системи для регулювання потоку через форсунку (час налаштування) виявився більшим, ніж очікували дослідники, особливо під час повторного увімкнення третьої секції штанги. Додатково, при куті ряду 20° система не забезпечувала достатньо швидку реакцію для точного регулювання потоку форсунок у моменти включення та вимкнення секцій штанги. Під час випробувань автоматичних форсунок помітне збільшення помилки відхилення було зафіксовано для кожної форсунки при виході з ряду та повторному вході до нього.

Рис. 12 – CV сопла та зміна витрати (пунктирні лінії показують, коли сопло 1 і 37 увімкнено або вимкнено) для 70° ряду без компенсації

Оскільки відстань між форсунками на цьому обприскувачі становила 0,51 м, окремі форсунки виходили та знову входили в ряди швидше, ніж при керуванні секціями штанги шириною 6,2 м. Результати тестів автоматичних форсунок свідчать про те, що з ростом потреби у зменшенні роздільної здатності програм керування, для мінімізації помилок, виявлених у цьому дослідженні, необхідні системи керування з відгуком швидшим, ніж час

включення або вимкнення секцій. Одним із ключових висновків є те, що зменшення кута ряду знижує вимогу до швидкості реагування системи, що відповідає очікуванням. Проте у певний момент запит на швидку реакцію стає надто великим або практично нереалістичним для існуючої системи, оскільки вона не здатна реагувати достатньо оперативно.

Ми робимо припущення, що для системи керування більш ефективним є орієнтування на кінцеву контрольну точку під час активації ASC, а не на намагання забезпечити миттєве регулювання потоку у режимі реального часу.

Водночас, якщо під час експлуатації потрібне керування в реальному часі, тоді для підтримки заданих параметрів знадобиться швидкодіючий регулюючий клапан, високоточний витратомір з відмінною роздільною здатністю для забезпечення оперативного зворотного зв'язку, а також потужна обробка даних контролером під час необхідних змін траєкторії. Ми усвідомлюємо, що реальні польові умови можуть вимагати зовсім інших підходів та технологічних рішень для керування обприскувачем. Проте результати цього дослідження висвітлюють ключові обмеження, які слід враховувати при проектуванні систем керування, щоб максимально зменшити помилки, пов'язані з процесом обприскування.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

Під час випробувань автоматичного керування штангою з компенсацією потоку час налаштування витрати через форсунку коливався в межах від 0,4 до 14,4 с для рядів, розташованих під кутом 70° . Для рядків з кутом 20° перемикання секцій штанги ВІМК/УВІМК відбувалося занадто швидко, через що система керування не встигала адекватно реагувати. Водночас, було зафіксовано випадок, коли потік через сопло встановлювався протягом 13,0 с при увімкненні всіх трьох секцій штанги на рядках 20° . Така подовжена тривалість налаштування потоку свідчить про те, що поздовжні відхилення від нормальної витрати можуть зберігатися довше, ніж очікувалося, що потребує врахування у системі контролю.

Ступінь відхилення витрати через форсунку змінювалася від 36,6% до 10,7% для рядів з кутом 70° під час тестів автоматичної штанги з компенсацією потоку, як при виході з ряду, так і при повторному вході в нього. Динаміка роботи системи відрізнялася між виходом і повторним входом для всіх тестів. Надмірне внесення відбулося протягом приблизно 12,0 с під час виходу, тоді як недостатнє внесення тривало близько 13,0 с при повторному вході, що характерно для роботи системи ASC.

Випробування без використання компенсації показали, що потік через форсунки встановлювався швидко, від 0,1 до 2,0 с, однак це спричиняло надмірне внесення до 21,3% при тестах з автоматичним керуванням штангою та до 28,7% у разі пофорсункового управління. Таким чином, реакція системи керування з компенсацією істотно відрізняється від поведінки без неї.

Рівномірність витрати форсунки (CV) залишалася на рівні близько 1,0%, проте короткочасні стрибки CV понад +50% спостерігалися протягом періоду менше 1,0 с під час повторного входу в ряди. Це спостерігалось як для тестів

з автоматичною компенсацією, так і без неї, а також під час випробувань з автоматичним контролем форсунки.

Як і в інших технологіях обприскування, контролери норми обмежені загальним часом реакції на необхідні корекції витрати, що виникають під час активації ASC. Можна модифікувати систему керування для підвищення швидкості реакції у складних ситуаціях, наприклад, на рядках з кутом 20° , шляхом застосування функції прогнозування для управління кінцевою цільовою точкою. Це дозволяє мінімізувати помилки відхилення витрати та забезпечити більш точне виконання завдання під час роботи ASC.

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