

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 факторів, що впливають на показники якості внесення гербіцидів зі змінними нормами»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Капустян М. А.

(Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2302-2м

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Зубко В.М.

(Прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 39 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 8 таблиць, 12 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

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

Було проведено дослідження, щоб оцінити реакцію системи в режимі реального часу для керування відхиленнями витрати форсунок для типового обприскувача з використанням ASC. 18,3-метровий обприскувач був оснащений наявними в продажу індивідуальними форсунками та керуванням секцій штанги.

Були проведені випробування для імітації виходу обприскувача з рядів у зону без розпилення, а потім повернення в зону обприскування шляхом вибору рядів з кутами  $20^\circ$  і  $70^\circ$ . Десять високочастотних датчиків тиску були довільно встановлені на штанзі для вимірювання тиску в соплах. Тиск у форсунці було перетворено в потік у форсунці, використовуючи залежність тиску виробника від потоку, щоб обчислити час затримки швидкості потоку в форсунці, час налаштування, відсоток відхилення (відсоткова різниця між фактичною та цільовою швидкістю потоку в форсунці) та рівномірність потоку в форсунці (CV). Сценарії автоматичного керування штангою проводилися з компенсацією потоку та без нього, тоді як сценарії автоматичного керування пофорсуночно проводилися без компенсації потоку.

## Зміст

Вступ.....	6
1 Стан питання і задачі досліджень.....	7
2 Технічне забезпечення та методика досліджень .....	12
3 Результати досліджень та їх аналіз .....	22
3.1 Автоматичне керування штангою біля рядів під кутом $70^\circ$ .....	22
3.2 Автоматична керування секцією для кута рядків $20^\circ$ .....	29
3.3 Пофорсуночне керування для кутів рядів $20^\circ$ і $70^\circ$ – без компенсації потоку.....	31
Висновки.....	35
Список використаних джерел.....	37

## ВСТУП

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

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

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

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

## 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Гербициди та поживні речовини неминуче потрібні для ефективного та економічного виробництва сільськогосподарських культур. Зростання цін на вхідні матеріали та 11,5 мільярдів доларів щорічних витрат на агрохімікати у 2019 році [1] у поєднанні з постійно зростаючим тиском на користувачів пестицидів і добрив щодо мінімізації ненормованого внесення спонукали зацікавлені сторони вдосконалювати обладнання для розпилення для підвищення точності внесення. Урожайність і якість значною мірою залежать від правильного внесення пестицидів по всьому полю. Надмірне внесення може призвести до збільшення витрат на виробництво, а також потенційної шкоди посівам і навколишньому середовищу, тоді як недостатнє внесення може призвести до неефективного контролю шкідників, що потенційно призведе до втрати врожаю.

Розробка систем контролю норми підвищила точність внесення сировини на поле. Контролери норми для обприскувачів зазвичай класифікуються як системи керування на основі тиску або витрати. Системи керування на основі тиску зазвичай забезпечують необхідну швидкість потоку шляхом регулювання тиску в системі залежно від розміру отвору форсунки, тоді як системи на основі потоку використовують зворотний зв'язок із витратоміром для забезпечення точного застосування.

Більшість контролерів обприскувачів, які сьогодні використовуються на самохідних обприскувачах, є системами на основі керування потоком. Контролер норми глобально відстежує та регулює норми внесення на основі швидкості машини в реальному часі та ширини внесення, тоді як оператор зосереджується на нагляді за роботою в цілому. Інтерфейс користувача пропонує оператору гнучкість для моніторингу та зміни параметрів керування додатками на ходу. Системи керування обприскуванням на основі тиску тестувалися ще з 90-х років і досягали похибки менше 5% при швидкості руху від 3,2 до 9,7 км/год. Виявили,

що використання регулятора норми розпилення порівняно з наземною системою зменшило помилки внесення з 18% і 5% до 7% і 1%. Було спроектовано та сконструйовано польовий обприскувач із прямим впорскуванням через форсунку зі змінною швидкістю і зафіксовано, що системі знадобилося 3,8 с, щоб перейти від 10% до 90% крокового введення. Періодичне перемикання між УВИМКНЕННЯМ і ВИМКНЕННЯМ форсунок з одного боку розпилювача може підвищити робочий тиск з іншого боку, потенційно призводячи до помилок внесення, пов'язаних з різницею тиску та швидкості потоку [2-5].

Фогель та ін. оцінили обприскувач зі змінною нормою і виявили, що зміни норми зазвичай складаються з плавного збільшення або зменшення норми гербіциду, за винятком різкого підвищення норми внесення, коли встановлена норма змінюється з ВИМК. на УВИМК. Використання швидкого регулюючого клапана спричинило стрибки витрати, які досягали 450 л/га між старою (ВИМК.) і новою (300 л/га) цільовою нормою [6].

Використання технології автоматичного контролю секції (ASC) в Алабамі допомогло зменшити надмірне внесення пестицидів і добрив на 1–12% за один прохід через поля, а також покращити захист навколишнього середовища, перешкоджаючи розповсюдженню на нецільових зонах, включаючи рослинні фільтрувальні смуги та трав'яні водні шляхи [7]. Технологія ASC закриває електромагнітні клапани штанги/форсунки щоразу, коли обприскувач охоплює площу, яку вже обприскали, або якщо зони без розпилення в пунктирних рядах (рис. 1).

Контролери норми використовують глобальну систему позиціонування (GPS) для визначення просторового розташування та контролю запланованого потоку до кожної секції штанги або насадки. Таким чином, виробник ніколи не застосовує більше одного разу вже обприскані ділянки поля, усуваючи перекриття, покращуючи ефективність, заощаджуючи час і ресурси фірми та зберігаючи природні ресурси.

Використання технології ASC потенційно призводить до зменшення площі обприскування на 15,2–17,5% завдяки ефективному управлінню секціями штанги. Виробники можуть потенційно зменшити площу надмірного внесення з 12,4% до 6,2%, використовуючи ASC замість ручного керування УВИМКНЕННЯМ/ВИМКНЕННЯМ секції штанги.

Незважаючи на всі ці позитивні переваги, ASC повільно стає частиною пакету систем керування обприскувачем завдяки простоті використання та визнанню аграріями відчутних переваг, зокрема економії. Ефективне просторове застосування за допомогою ASC залежить від здатності контролера витрати точно контролювати витрату системи, таким чином підтримуючи правильні норми внесення під час активації ASC. Дія УВИМКНЕННЯ/ВИМКНЕННЯ вимагає швидкого часу реакції між апаратними компонентами для підтримки ефективності програми.

Однак контролери додатків мають властиві обмеження на швидкість реакції. Помилки внесення для систем прямого вприскування можуть досягати 40% для неправильно оброблених ділянок поля, а інколи концентрація хімікатів у віддалених форсунках може змінюватися після 80-метрового шляху після бажаного кроку зміни місця введення команди на контролер [8]. Час затримки для системи контролю норми для забезпечення точних норм внесення в заданих межах бажаної норми може становити від 15 до 55 с. Час реакції системи керування у відповідь на прийом приймача DGPS може досягати 2,2 с із збереженням горизонтальної точності 1 м [9].

Окрім систем керування та часових затримок GPS, бокове розташування форсунок уздовж штанги також може впливати на величину та часову появу помилок норми внесення. Дослідження підкреслили, що затримки часу відгуку та помилки додатків невід’ємно пов’язані з використанням систем контролю швидкості та часто регулюються можливостями алгоритму керування апаратним забезпеченням для керування відповіддю системи [5, 9].

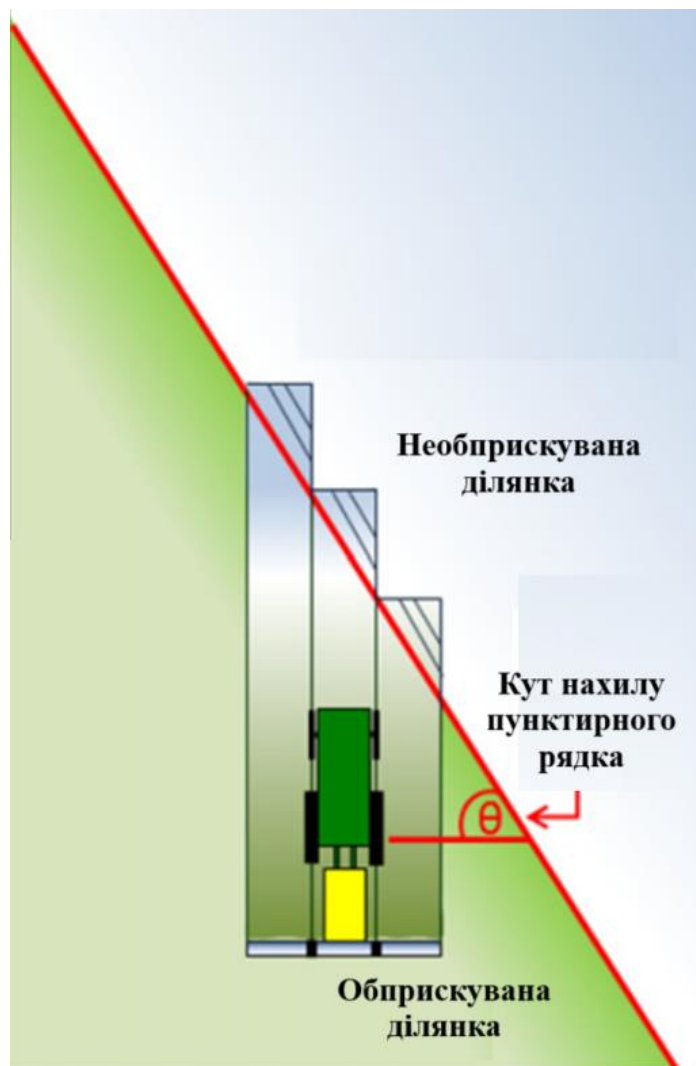


Рис. 1 - Ілюстрація ASC для трисекційної штанги обприскувача, що рухається із зони розпилення в зону відсутності розпилення під кутом. У цьому прикладі показано роботу розпилювача в пунктирних рядках

Повний потенціал технологій точного землеробства (РА) може бути досягнутий лише за умови точної експлуатації. На сучасних фермах існує екологічна стурбованість щодо надмірного застосування пестицидів і добрив, що може збільшити ризик впливу на навколишнє середовище, наприклад, стікання у водойми, прилеглі до полів. Відповідно до стандарту ISO 5682–3 і стандарту ASABE S386.2 (ASABE, 2009), коефіцієнт варіації (CV) є параметром, який повідомляє про рівномірність бічного розподілу бризок по штанзі обприскувача. Ці стандарти також описують методологію випробувань для оцінки

продуктивності обприскувача, але в контрольований спосіб. Хоча було зроблено багато спроб повідомити про апаратні затримки, жодне дослідження не задокументувало стабільність динамічного потоку сопла під час впровадження ASC.

Таким чином, завдання цього дослідження полягали в тому, щоб (1) оцінити вплив кута пунктирного ряду на реакцію потоку через штангу та витрату сопел при використанні ASC, і (2) визначити та порівняти реакцію витрати рідини сопла під час автоматичного контролю секцій штанги та автоконтролю форсунок.

## 2 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Це дослідження було проведено з використанням 18,3-метрового обприскувача, встановленого на три точки навіски (Schaben Industries). Обприскувач був розкладений і працював у статичному положенні для всіх випробувань з використанням води, як зазначено в стандарті ISO 5682-3. Як джерело гідравлічної енергії для обприскувача використовувався трактор John Deere 6420 (Deere and Company, Moline, IL, USA); відцентровий насос (номер моделі FMC-150-HYD-206, ACE Pumps Corp., Мемфіс, Теннесі, США).

Система розподілу рідини обприскувача включала в себе штангу (рис. 2), що складалася з трьох секцій: лівої (1), середньої (2) і правої (3). Штанга була обладнана 37 форсуноками на відстані 0,51 м. Секції 1 і 3 штанги мали ширину 6,1 м і мали по 12 форсунок кожна, тоді як секція 2 була шириною 6,6 м і містила 13 форсунок (рис. 3).



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

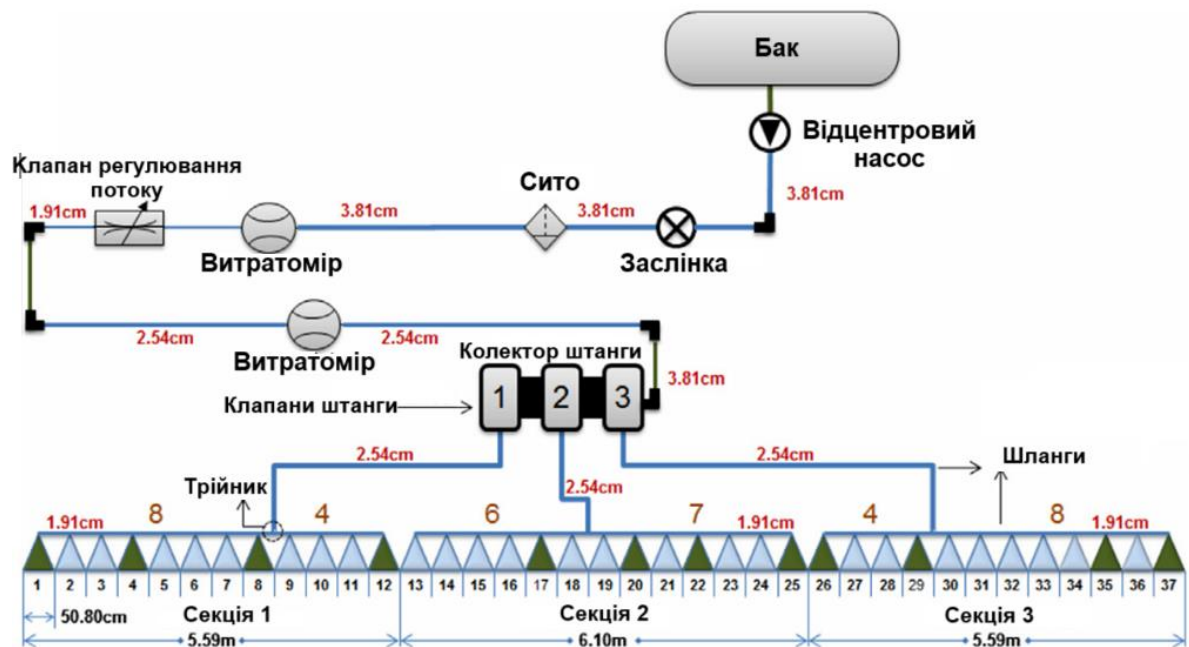


Рис. 3 – Конфігурація водопроводу обприскувача, що ілюструє розміщення клапана регулювання потоку, клапани штанги, ширину секцій штанги 1–3, відстань між форсунками, розміри шлангів і розподіл форсунок. Форсунки були пронумеровані зліва направо (ID від 1 до 37). Форсунки, оснащені датчиками тиску, показані чорним кольором

Розміри шлангів включені з використанням внутрішнього діаметра 2,54 см між клапанами стріли та Т-подібним фітингом на кожній із трьох секцій штанги. Потім використовувався шланг з внутрішнім діаметром 1,91 см для підключення кожного корпусу насадки (рис. 3). Довжина шланга від клапанів штанги до кожної секції штанги становила 7,62 м для секцій 1 і 3 і лише 2,44 м для секції 2. Використовувалися плоскі розпилювачі TeeJet 11003 (TeeJet Technologies, Wheaton).

Кожен корпус форсунки був оснащений електромагнітним клапаном на 12 В постійного струму (рис. 2; Capstan Ag Systems Inc.), щоб забезпечити індивідуальне керування ВКМ і ВИМКНЕННЯМ форсунки. Обприскувач був налаштований на розпилення 140,5 л/га зі швидкістю руху 9,7 км/год. Було

використано наявний у продажу контролер системи розпилення Raven Viper-II. У цій системі використовувався поліметричний витратомір турбінного типу діаметром 3,81 см (модель RFM-15, Raven industries) і полірегуляторний клапан діаметром 2,54 см (батерфляй) для регулювання загальної швидкості потоку системи.

Номер калібрування клапана регулювання потоку (VCN) було встановлено на 2123 у контролері розпилення для всіх тестів, як рекомендовано виробником. Чотири цифри VCN (таблиця 1) використовуються для керування відповіддю системи. Таким чином, номер 2123 VCN налаштовує контролер на надсилання відносно короткого імпульсу, відносно швидкого відгуку на клапан, створюючи таким чином 20% точку розриву та 3% зону нечутливості.

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 забезпечував компенсацію потоку, коли встановлено режим автоматичного керування, і відсутність компенсації в ручному режимі. Тиск на соплах вимірювали тонкоплівковими перетворювачами тиску (модель 1502 B81 EZ 100 PSI G; рис. 2а; PCB Piezotronics Inc., Depew, NY, USA) і з

частотою дискретизації 50 Гц. Таким чином, датчики тиску були ретельно розташовані для вимірювання тиску форсунок у різних положеннях у секціях штанги.

Розташування вимірювача продуктивності сопла відповідало стандарту ISO 5682–3 (ISO, 1997). Інший датчик тиску був встановлений на колекторі клапана штанги для контролю загального тиску в системі. Це розташування датчика збігалось з існуючим аналоговим манометром, на який дивиться оператор під час роботи. Контролер National Instruments CompactRIO™ cRIO-9014, шасі cRIO-9103 з двома аналоговими модулями серії NI 9221 С використовувалися для вимірювання тиску та вхідних сигналів штанги.

Загальну швидкість потоку системи вимірювали за допомогою вбудованого витратоміра, підключеного до цифрового модуля введення/виведення серії NI 9403 С. Два модулі цифрового виведення серії NI 9475 С на одному шасі використовувалися для автоматичного вмикання або вимикання трьох клапанів штанги або 37 соленоїдів форсунок. Реле або модулі вводу/виводу (модель 70G-ODC15, Grayhill Inc., La Grange, IL, США) використовувалися як проміжний механізм керування для вмикання та вимикання електромагнітних клапанів секцій штанги або форсунок. Щоб оцінити в режимі реального часу нестандартне внесення та рівномірність випуску сопла (CV) по штанзі за допомогою ASC під час типових польових сценаріїв, для проведення випробувань було вибрано два рядки, що мають пересічні кути 20° та 70°. Різноманітні нерегулярні межі поля (рис. 4) були вивчені в ArcGIS, і таким чином для тестування на пунктирних рядках були обрані типові найвищі (70°) і найнижчі (20°) кути між рядами рослин.

Сценарії автоматичного контролю штанги проводилися з компенсацією потоку контролера та без компенсації, тоді як сценарії автоматичного контролю форсунок проводилися без компенсації. Контролер швидкості не вдалося налаштувати в режимі компенсації потоку для сценаріїв з пофорсуночним

керуванням. Контролер норми був запрограмований на імітацію швидкості руху 9,7 км/год, норми внесення 140,3 л/га та ширини керування штангою або форсункою (рис. 3). Теоретичний час, необхідний для закриття та відкриття кожної секції штанги/форсунки під час обприскування рядів точок, було розраховано на основі швидкості руху (9,7 км/год) та відстані штанги/форсунки (рис. 3). Результуючий час перемикання для рядів із кутами  $20^\circ$  і  $70^\circ$  наведено в таблиці 2. Секції послідовно вимикалися, коли робприскувач виходив із ряду, і знову вмикалися, коли розпилювач повертався ДО необприсканого рядка.



Рис. 4 – Приклад меж поля

Характер цього дослідження з точки зору випробувальної установки (системи керування) та контрольних параметрів (швидкість руху та норма внесення) дещо відрізнявся від тих, що визначені стандартом ISO 5682-3 (ISO, 1997). Стандарт ISO дотримувався якомога точніше під час цього дослідження, але швидкість руху, норма внесення та перемикання секцій штанги відрізнялися,

щоб імітувати звичайні польові умови роботи. LABVIEW-8.6 використовувався для розробки програми для автоматичного вмикання та вимикання всіх запірних електромагнітних клапанів штанг або сопел із використанням заздалегідь визначеного часу (табл. 2), таким чином імітуючи роботу обприскувача на пунктирних рядах під різними кутами. У симуляцію було введено відповідні часові затримки, щоб дозволити системі стабілізуватися, коли обприскувач виходив із рядків і знову входив у 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 тести (Таблиця 3) повторювали три рази, що склало 18 тестів. Сценарії штанги та форсунки були обрані, щоб оцінити, чи існують відмінності між автоматичним керуванням секціями штанги та автоматичним керуванням форсунками. Основна відмінність між цими сценаріями полягає в тому, що потік вмикається та вимикається на окремих форсунках, а не на клапані штанги, який зазвичай розташований перед форсунками (рис. 3). Кожен набір даних для тестування керування штангою був розділений на шість частин: 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 рядка	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 унікально відрізнялися один від одного тим, що під час експерименту була ввімкнена інша комбінація секцій штанги. Дані, відсортовані для цих шести сценаріїв, що включають випробування автоматичного керування штангою, були проаналізовані окремо. Для випробувань автоматичного керування пофорсуночно дані, що стосуються виходу з ряду та повторного входу, аналізувалися окремо. Програма LabVIEW (LabVIEW, 2009) реєструвала дані датчика тиску та вхідного сигналу штанги з частотою 50 Гц разом із міткою часу для аналізу даних.

Тиск у форсунці було перетворено у швидкість потоку через форсунку (рис. 5), використовуючи заявлене виробником співвідношення тиск/потік. Цільова швидкість потоку форсунки була розрахована з використанням норми внесення, швидкості руху та кількості увімкнених секцій. Кількість секцій штанги, які увімкнені в будь-який час під час випробування, визначалася за допомогою виміряного сигналу керування для кожного клапана штанги. Подібним чином MATLAB використовувався для реєстрації спрацьовування одного сопла. Знову MATLAB використовувався для обчислення середніх значень початкової швидкості потоку через сопло (IFR), кінцевої швидкості потоку через сопло (FR), середньої витрати через сопло (OR), часу затримки (DT) і часу встановлення (ST), тоді як Microsoft Excel був використовується для розрахунку коефіцієнта варіації

(CV) для кожного сопла (табл. 4). Рівномірність сопла (CVs) розраховували відповідно до ISO 5682–3 і стандарту ASABE S386.2.

Відсоткова різниця між фактичною та цільовою витратою сопла була розрахована, щоб повідомити про відхилення. Швидкість відхилення параметра була розрахована з використанням аналогічних змінних, що й для визначення середнього відхилення «D», зазначеного в стандарті ISO 5682-2.

Тим не менш, був використаний термін відхилення, оскільки він відображає відхилення фактичної витрати сопла від цільової. Ці випробування проводилися в контрольованих умовах (стаціонарна та горизонтальна штанга обприскувача) та зона нечутливості  $\pm 3\%$ . Швидкість потоку через форсунки понад  $\pm 5\%$  вважалася заниженою. Для часу встановлення було обрано діапазон  $\pm 2\%$ , оскільки це значення зазвичай використовується для розуміння реакції системи керування. Було створено графіки, щоб показати, як змінювалися відхилення та CV під час виходу та повторного входу в рядки під кутами. Суцільна чорна лінія на графіках служить для візуального відокремлення виходу (ліва сторона лінії) від відповіді на повторний вхід (права сторона лінії).

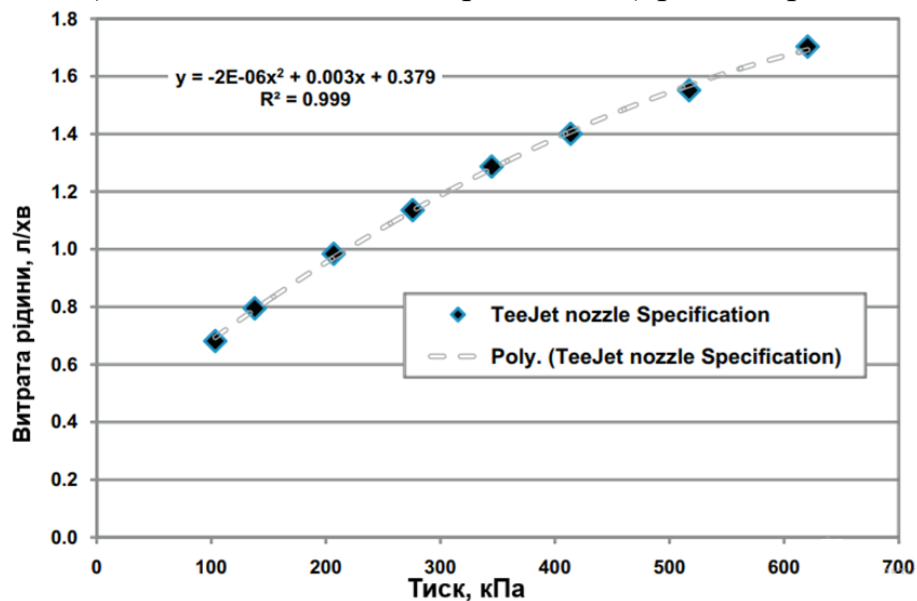


Рис. 5 – Крива залежності швидкості потоку розпилювача від тиску та поліноміальна підгонка (TeeJet)

Крім того, пунктирні чорні лінії включені як індикація того, коли штанги або форсунки були УВІМКНЕНІ або ВИМКНЕНІ.

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 проводився за допомогою процедури узагальненої лінійної моделі (GLM) у SAS, аналізуючи час осідання сопла та швидкість відхилення. Багаторазові порівняння між тестами проводилися за допомогою процедури Тьюкі–Крамера з 95% довірчим інтервалом, щоб побачити, чи існують відмінності між виходом і повторним входом у рядок точок із компенсацією та без компенсації.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

#### 3.1 Автоматичне керування штангою біля рядів під кутом 70°

Реакція потоку сопла під час випробувань АВС з компенсацією потоку представлена на рис. 6. Швидкість потоку сопла мала час затримки 0,7 с, а час встановлення між 0,4 і 1,3 с (табл. 5). Час затримки та час встановлення у відповідь на вхідний сигнал до секції штанги 1 під час виходу з ряду 70 точок показано на рис. 7. Під час повторного входу час затримки становив від 0,1 до 0,3 с, а швидкість потоку встановилася між 3,9 та 14,4 с (табл. 6). Час затримки під час виходу та входу можна в основному пояснити часом, протягом якого клапан стріли закривається або відкривається після надсилання вхідного сигналу.

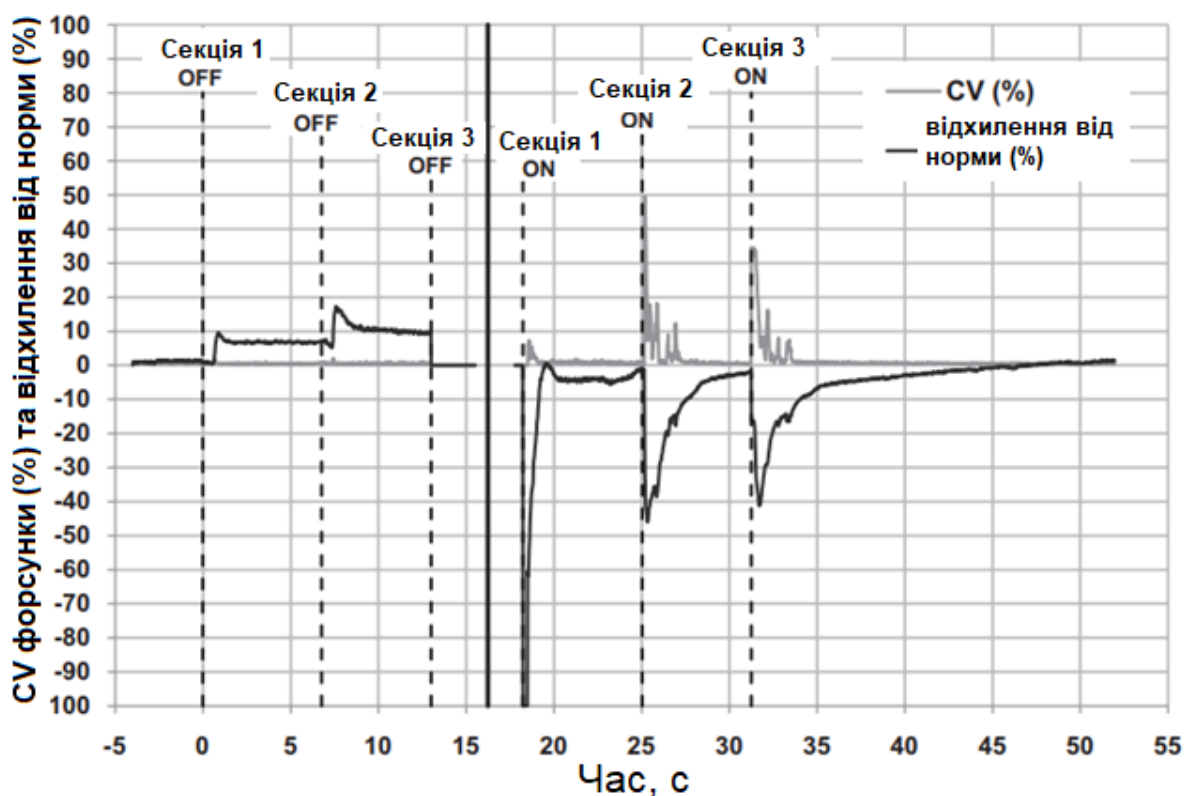


Рис. 6 – CV форсунки та відхилення для сценарію з ASC із кутом 70° до ряду

Цей результат був зроблений, оскільки потік сопла в секціях ВИМКНЕНО був еквівалентним швидкості в секціях УВИМКНЕНО під час виходу, а швидкість потоку залишалася нульовою після того, як секції стріли знову ввійшли в ряди

точок протягом цього часу затримки. Різниця в часі затримки при виході та повторному вході може бути пов'язана з різним імпульсом рідини на клапанах стріли (закриття та відкриття), оскільки теоретично час відкриття або закриття клапанів стріли був однаковим.

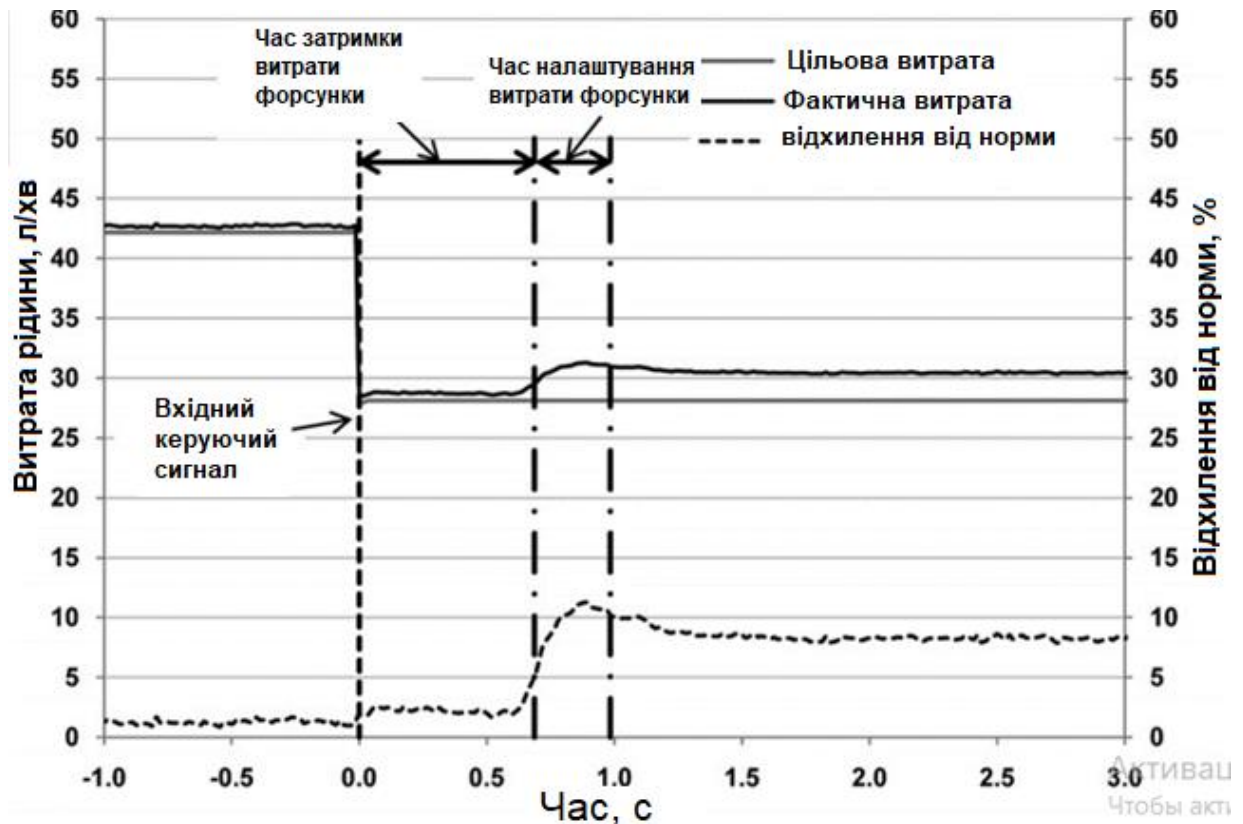


Рис. 7 – Затримка витрати через сопло, час налаштування і реакції на відхилення від вхідного сигналу до клапана секції 1 при виході з рядів з кутом  $70^\circ$

У цьому дослідженні відповідність шлангів не перевірялася, однак на імпульс рідини також може вплинути зміна енергії в шлангах. Швидкість потоку швидко встановилася під час виходу, але займала до 14,4 с під час повторного входу, що було очікувано, оскільки потрібен час для створення тиску на соплі та, отже, швидкості потоку. Швидкість відхилення норми була позитивною під час виходу, що призводило до надмірного внесення, тоді як повторне входження обприскувача сприяло негативному відхиленню або недостатньому внесенню. Очікувалося, що компенсація потоку контролером підтримуватиме швидкість

відхилення від норми в межах  $\pm 5\%$ , оскільки контролер був налаштований на зону нечутливості 3%. Однак отримана середня швидкість відхилення під час випробувань компенсації потоку становила від +6,6% до +10,7% (таблиця 5) при виході з рядів, тоді як під час повторного входу розпилювача швидкість відхилення коливалася від 36,3% до 15,6% (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  $70^\circ$  під час випробувань секції без компенсації (поток)

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)

Зрозуміло, що, незважаючи на те, що швидкість відхилення була більше  $\pm 5\%$  від цільової швидкості сопла під час виходу, швидкість відхилення була в межах діапазону  $\pm 5\%$  лише під час повторного входу (рис. 6). Час відключення сопла вказує на те, що надмірне нанесення відбувалося протягом 6,1–6,2 с при виході (рис. 6), але недостатнє внесення тривало від 3,6 до 5,1 с під час повторного входу (рис. 8).

Рівномірність потоку через сопло (CV) була менше 1,0% протягом усього часу при виході з рядів точок. Цей результат низьких і незмінних CV був очікуваним. І навпаки, рівномірність потоку через сопло змінювалася до 50,0% (рис. 6) протягом короткого періоду під час повторного входу, але середнє CV знову було менше 1,0%.

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 сопла змінювалася в основному, коли секції штанги 2 і 3 були знову ввімкнені. Можливим поясненням цього висновку був протитиск, що супроводжувався складною динамікою в секціях, що відбувалося в результаті компенсації потоку та перерозподілу енергії рідини, таким чином створюючи коливання тиску вздовж бона. Цікаво, що недостатньо демпфована реакція мала місце під час виходу з рядів, тоді як повторне входження викликало надмірну або критично демпфовану реакцію на соплах.

Під час випробувань без компенсації автоматичної штанги швидкість потоку сопла мала час затримки 0,6 с при виході та від 0,2 до 0,3 с при повторному вході (табл. 6). Час затримки без компенсації був порівняним з часом затримки з компенсацією потоку, що вказує на затримку часу відгуку обладнання (клапани штанги). Швидкість потоку встановилася майже миттєво на виході, тоді як час встановлення коливався від 0,2 до 2,0 с під час входу. Нижчий час встановлення був через відсутність компенсації, але призводив до відхилення від швидкості під час виходу та під час повторного входу. Порушення норми або надмірне внесення під час виходу (12,5–21,3%) і повторного входу секцій штанги 1 і 2 (8,6–14,7%)

без компенсації, очевидно, було результатом збільшення потоку та приводу системи штанги до рівноваги через максимальну швидкість потоку сопла.

Ці помилки відхилення від швидкості призвели до часу відключення сопла від 6,1 до 6,2 с під час виходу та 6,2–6,8 с при повторному вході в ряди точок. Коли 3-тя секція стріли знову увійшла до рядів, швидкість відхилення сопла (22,9%) відбулася протягом 0,9 с перед стабілізацією в межах  $\pm 5\%$ .

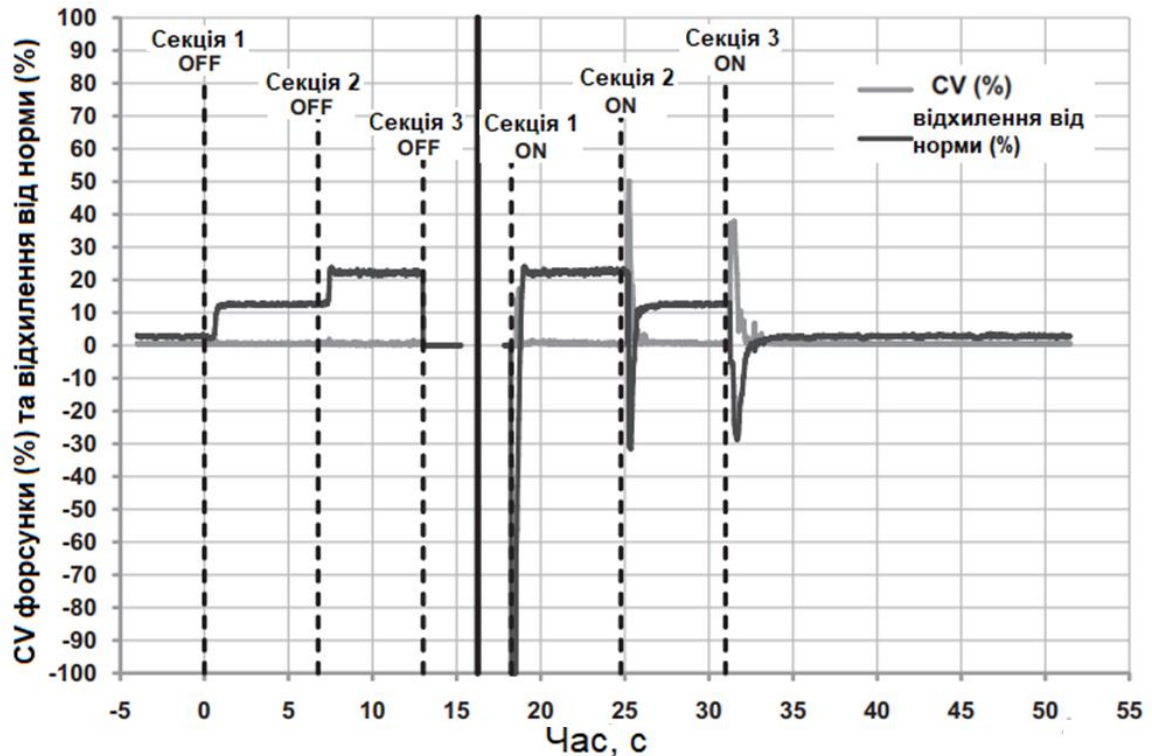


Рис. 8 – CV сопла та швидкість відхилення від норми для руху з автоматичним контролем із кутом рядків  $70^\circ$  без компенсації

Коефіцієнти варіації сопла були високими лише протягом короткого періоду для повторного входу, особливо після того, як секція штанги 3 увімкнена, але в іншому випадку в межах  $1,0\%$  (рис. 8). Варіації CV форсунки були подібні до компенсації потоку (рис. 6), але мали тенденцію бути короточасними через відсутність компенсації (рис. 8), коли секції штанги 2 і 3 знову вмикалися. Поза курсом на рис. 6 і 8 помітно відрізняються, що передбачає швидшу стабілізацію потоку сопла без компенсації.

Однак відсутність компенсації призвела до надмірного застосування протягом усього періоду, коли було задіяно ASC. Єдина відмінність між компенсаційними та безкомпенсаційними випробуваннями полягала в здатності регулюючих клапанів налаштовуватися на цільовий потік під час компенсаційних випробувань. Збій швидкості та час встановлення під час виходу та повторного входу для компенсованих випробувань можуть бути результатом реакції клапана регулювання потоку під час 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		

Результати статистичного аналізу для випробувань автоматичних штанг з компенсацією потоку та без нього для кута рядків 70° представлені в таблицях 7 і 8. Результати дисперсійного аналізу свідчать про те, що існують докази того, що середні значення часу налаштування, величини відхилення від норми та часу відхилення відрізняються. Численні порівняння свідчать про те, що час налаштування, величини відхилення від норми та часу відхилення для обприскувача з компенсацією при виході з рядів відрізняються від даних під час повторного входу ( $p > 0,0001$ ). Крім того, середній час встановлення та швидкість вимкнення для компенсаційних тестів значно відрізнялися від тестів без

компенсації для кута  $70^\circ$ , за винятком швидкості вимкнення, коли секція 1 була ВИМКНЕНА для виходу, а 3 знову вмикалася при повторному вході (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

Очікувалося, що компенсаційні та безкомпенсаційні випробування для  $70^\circ$ -х рядів матимуть різну швидкість відхилення форсунки від норми, оскільки регулюючий клапан не компенсував швидкість потоку. Незважаючи на те, що час виходу з ряду значно відрізнявся для повторного входу, загальний час виходу з ряду був приблизно однаковим як під час компенсації, так і без компенсації.

Нарешті, подовжений час налаштування вказує на те, що для поздовжнього напрямку руху відхилення швидкості може відбуватися під час роботи протягом набагато більшого періоду часу, ніж очікувалося. Механізм керування потоком і зворотного зв'язку потребує подальшого вивчення, щоб зменшити відхилення від норми при використанні технології автоматичного керування секціями.

### 3.2 Автоматична керування секцією для кута рядків 20°

Для випробувань з кутом рядків 20° витрата рідини не стабілізувалася під час виходу та повторного входу в ряди як під час компенсації (рис. 9), так і без компенсації (рис. 10), за винятком випадків, коли 3-я секція штанги знову входила в ряди. Був час затримки 0,7 с після виходу секції 1 і 0,3 с, коли вона знову входила в ряди. Час налаштування витрати форсунки (13,6 с), коли 3-я секція знову входила в ряди під кутом 20°, був порівнянним з таким для 70°-х рядів (14,4 с).

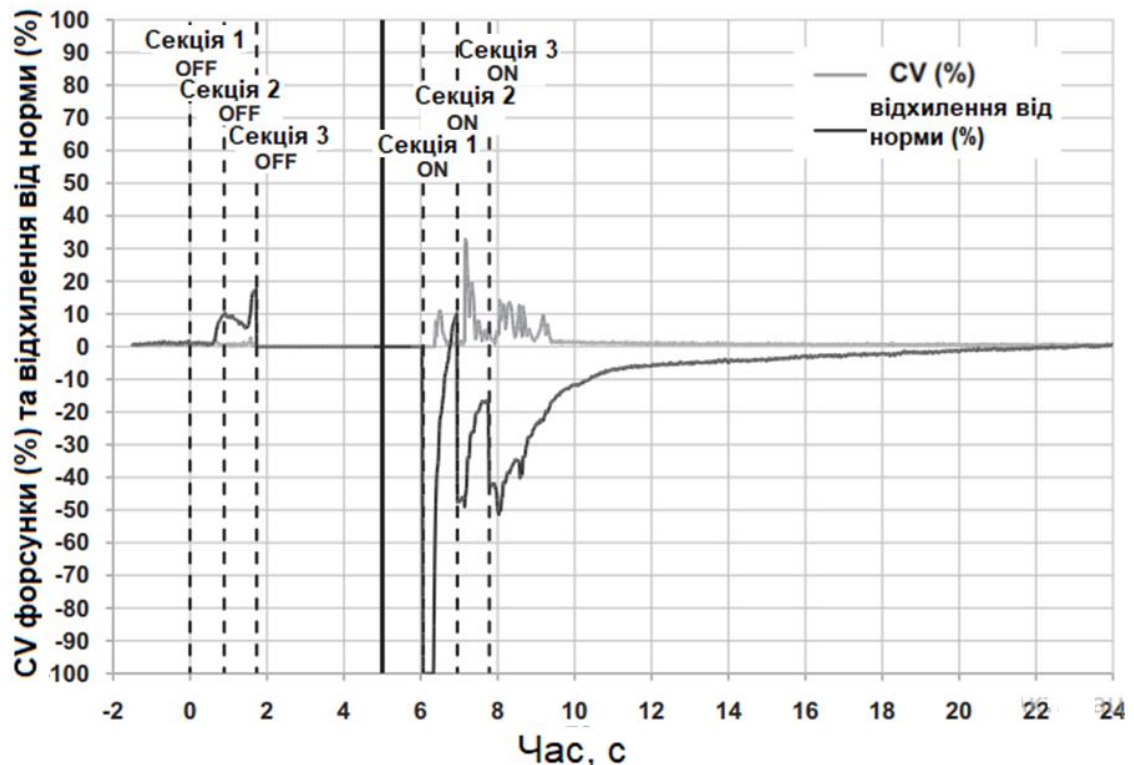


Рис. 9 – CV форсунки та величина відхилення витрати для 20° ряду при автоматичному керуванні з компенсацією потоку

Випробування на 70 точок показали, що системі керування потрібно більше 1,0 с, щоб відреагувати та керувати швидкістю потоку сопла під час активації ASC під час виходу та кілька секунд під час повторного входу. Час для вимкнення та увімкнення секції штанги становив менше секунди для всіх 20 тестів (Таблиця 2). Таким чином, 20 результатів показали, що активація ASC була надто

швидкою, щоб контролер міг швидко відреагувати. Швидкість відхилення також залишалася за межами  $\pm 5\%$  і встановилася лише після того, як 3-й розділ знову ввійшов у рядок точок. CV форсунок становив менше 0,6%, за винятком випадків, коли секції 2 і 3 штанги поверталися до ряду точок, коли CV форсунок становили до 30,0% протягом короткого часу.

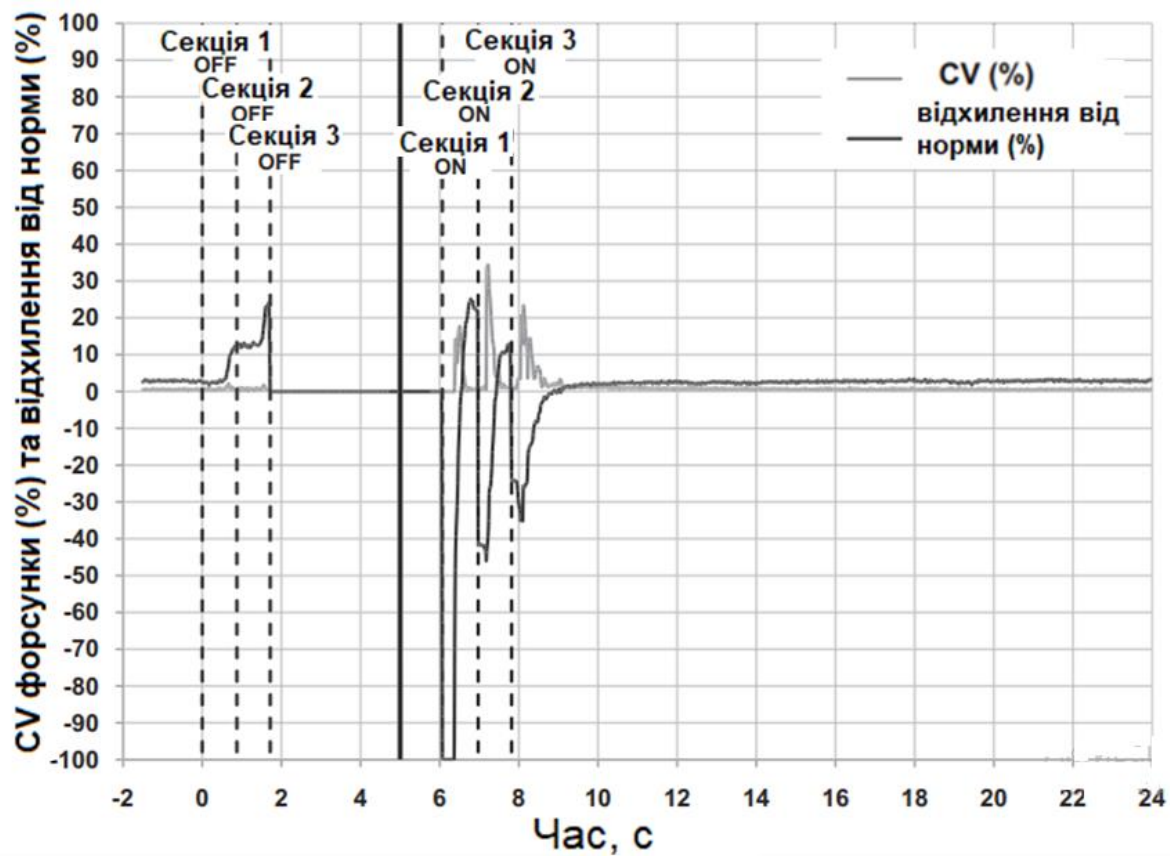


Рис. 10 - CV форсунок та величина відхилення від норми для 20° рядів при автоматичному керуванні без компенсації

Порівняння результатів компенсації потоку та результатів без компенсації (рис. 9 і 10) показало, що система зі зворотним зв'язком дійсно намагалася керувати потоком через форсунки, але контролер отримував нову ціль, перш ніж міг змінити витрату рідини. Таким чином, щодо швидкості потоку, часу налаштування та величини відхилення, можна зробити висновок, що відгук під час активації для 20° ряду при автоматичному керуванні буде порівняним незалежно від того, використовується компенсація потоку чи ні.

Для менших кутів рядків (20) контролер швидкості повинен реагувати швидше, протягом субсекундного інтервалу, оскільки активація ASC відбувається на цьому рівні. Цей проміжок часу може не надати регулятору швидкості достатньо часу для реакції на активацію ASC. У цій ситуації необхідна нова швидкість потоку через те, що секція вимикається або вмикається до того, як контролер встиг пристосуватися до поточної витрати від попередньої активації секції.

Таким чином, для менших кутів рядків, можливо, було б доцільно дивитися вперед і налаштуватися на кінцеві робочі умови, коли всі секції увімкнено, а не намагатися забезпечити регулювання потоку в реальному часі під час активації ASC. Ці випробування можуть бути пов'язані з реакцією системи керування при повороті на смузі розвороту та свідчать про те, що керування потоком через форсунки дійсно досягне за певних умов експлуатації.

Слід розуміти, що для того, щоб точно отримати очікувану відповідь для будь-яких робочих умов, що вимагають швидкої реакції (менше секунди), для системи керування швидкістю розпилення знадобиться наступне; (1) точний і швидкий (мілісекунди) зворотний зв'язок від витратоміра, (2) швидка реакція контролю норми разом із швидкими можливостями обробки та (3) швидка реакція регулюючого клапана. Хоча в цьому дослідженні використовувався лише один контролер норми та налаштування обприскувача, результати підкреслюють для будь-якого контролера швидкості необхідність належним чином керувати потоком через сопло під час зміни швидкості, щоб мінімізувати відхилення від норми.

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

Для рядів з 20° і 70° інтервал часу надсилання вхідного сигналу на соленоїд окремої форсунки був набагато коротшим порівняно зі сценарієм з автоматичним

керуванням секціями штанги (табл. 2). Загальний час виходу з рядків 20° і 70° становив 2,5 і 18,7 с. Витрата рідини форсунки лінійно падала і зростала на 17,7 л/хв/с для 20° (рис. 11) і на 2,3 л/хв/с для 70° (рис. 12) під час виходу та повторного входу. Коефіцієнт відхилення зріс з +3,7% до 28,7% для тестів на 20° і 70° під час виходу та знизився під час повторного входу. Оскільки контрольна точка була на корпусі кожної форсунки, ефект відключення кожного соленоїда а був майже миттєвим.

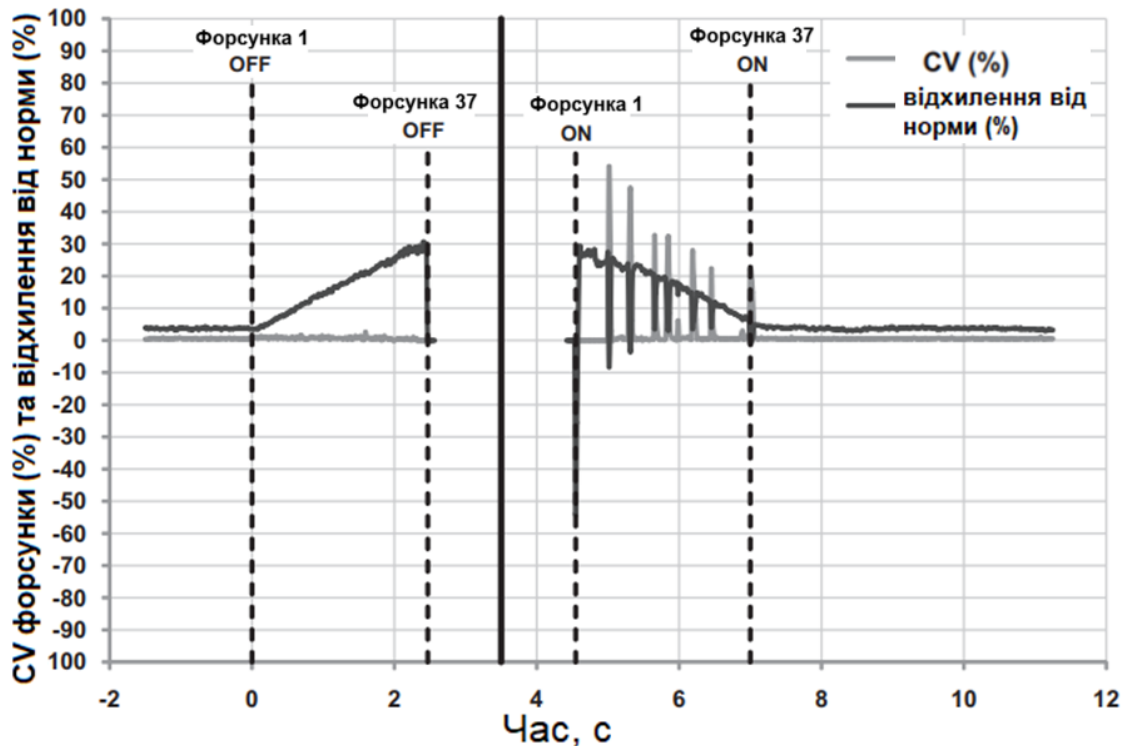


Рис. 11 – CV сопла та швидкість відхилення (пунктирні лінії показують, коли сопло 1 і 37 увімкнено або вимкнено) для 20-точкового ряду ANC без компенсації

Рівномірність форсунки мала короткі стрибки до 65,0% під час повторного входу в ряди та була меншою за тривалістю порівняно з ASC. Ці високі CV були пов'язані з часом активації соленоїда форсунки (<100 мс) для стабілізації під час повторного входу. Насправді таких спалахів було б 37, якби на всіх 37 форсунках був датчик тиску. Високі CV форсунки відсутні під час виходу, тому що як тільки секція форсунки була ВИМКНЕНА, ця секція була виключена з аналізу, а

швидкість потоку форсунки в секціях, що залишилися увімкненими миттєво зросла. Поведінка системи була подібна до випробувань з автоматичної штанги без компенсації (рис. 8 і 12), хоча лінійне зростання та падіння витрати рідини через сопло за допомогою пофорсуночного керування може призвести до більшого надмірного внесення як під час виходу, так і під час повторного входу в ряди.

Цей результат був очікуваним, оскільки для кожного ВИМКНЕННЯ соленоїда була пов'язана невелика об'ємна зміна (1,14 л/хв) у швидкості потоку системи. Цей об'єм частково сприяв збільшенню витрати форсунки, поки швидкість потоку не досягла максимальної потужності.

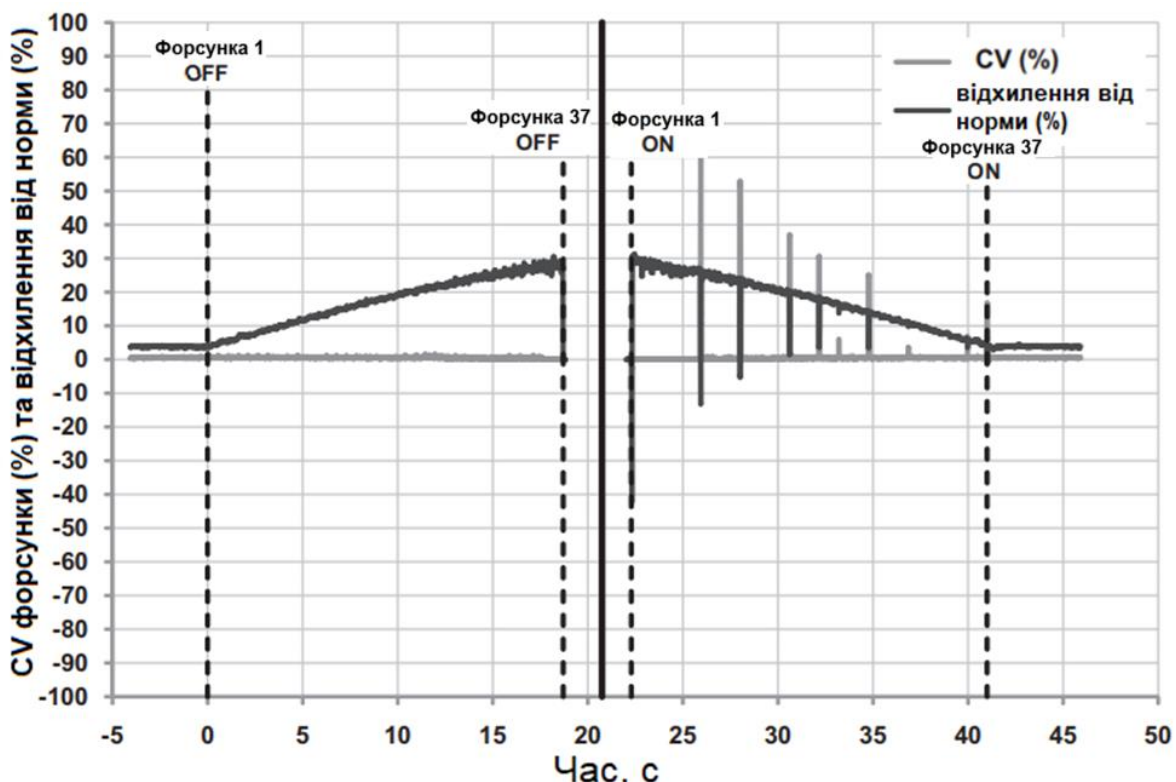


Рис. 12 – CV сопла та зміна витрати (пунктирні лінії показують, коли сопло 1 і 37 увімкнено або вимкнено) для 70° ряду без компенсації

Це дослідження підкреслило реакцію системи керування та ступінь відхилення витрати форсунки при використанні ASC. Час реакції системи керування для керування потоком через форсунку (час налаштування) був

вищим, ніж очіувалося, особливо під час повторного входу 3-ї секції штанги. Крім того, для кута ряду  $20^\circ$  система керування не реагувала достатньо швидко, щоб правильно керувати потоком форсунок, коли секції штанги вмикалися та вимикалися. Під час тестування автоматичних форсунок помилка відхилення форсунки збільшувалася для кожного під час виходу та повторного входу в ряди.

Оскільки відстань між форсунками на цьому обприскувачі становила 0,51 м, окремі форсунки виходили з рядів і входили в них швидше, ніж при керуванні секціями штанги з шириною 6,2 м. Реакція на відхилення витрати форсунки в результаті випробувань автоматичних форсунок свідчить про те, що зі зростаючим попитом на зменшення роздільної здатності програми, для мінімізації помилок, про які повідомляється в цьому дослідженні, потрібні системи керування з часом відгуку, швидшим за час вимкнення/увімкнення секцій. Одним із найважливіших результатів є те, що зі зменшенням кута ряду зменшується вимога до системи керування реагувати швидше, як і очіувалося. Проте в якийсь момент запит на реакцію стає занадто великим або нереальним для системи керування, оскільки вона не може реагувати достатньо швидко.

Ми припускаємо, що для системи керування краще дивитися на свою кінцеву контрольну точку під час активації ASC, а не намагатися забезпечити коригування потоку в реальному часі. З іншого боку, якщо під час цих робочих умов потрібне керування в режимі реального часу, тоді для підтримки цільового значення знадобиться швидкодіючий регулюючий клапан, витратомір із високою та точною роздільною здатністю для забезпечення швидкого зворотного зв'язку, а також швидка обробка контролером. під час необхідних змін курсу. Ми усвідомлюємо, що польова робота представлятиме зовсім інші сценарії та вимоги до технології керування обприскувачем. Однак у цьому дослідженні висвітлюються обмеження, які необхідно враховувати для керування обприскувачем і проектування технології, щоб остаточно мінімізувати помилки, пов'язані з обприскуванням.

## ВИСНОВКИ

У результаті цього дослідження було зроблено наступні висновки:

Для випробувань автоматичного керування штангою з компенсацією потоку час налаштування витрати через форсунку змінювався від 0,4 до 14,4 с для рядів із кутом  $70^\circ$ . Для  $20^\circ$ -х рядків час перемикання секцій штанги ВІМК/УВІМК стався надто раптово, щоб система керування могла вчасно відреагувати. Однак, був випадок, коли потік через сопло налаштувався протягом 13,0 с при увімкненні всіх трьох секцій штанги на рядках  $20^\circ$ . Подовжений час встановлення потоку через сопло вказує на те, що подовжні відхилення від норми можуть виникати протягом неочікувано більшого періоду часу, ніж очікувалося.

Ступінь зростання відхилення витрати форсунки варіювалася від 36,6% до 10,7% для  $70^\circ$ -х рядів на випробуваннях з автоматичною штангою з компенсацією потоку як при виході із рядів так і повторному вході. Динаміка системи була різною між виходом і повторним входом в ряди для всіх тестів. Надмірне застосування відбулося протягом приблизно 12,0 с під час виходу, тоді як недостатнє застосування призвело до 13,0 с під час повторного входу для системи ASC.

Випробування без компенсації показали, що потік через форсунки швидко налаштувався (0,1-2,0 с), але це призвело до надмірного внесення до 21,3% для випробувань з автоматичним керуванням штангою та 28,7% для випробувань з керування пофорсуночно. Тому реакція системи керування з компенсацією чітко відрізнялася від реакції без компенсації.

Рівномірність витрати форсунки (CV) була в межах 1,0%, однак стрибки в CV понад +50% мали місце протягом короткого періоду часу (<1,0 с) під час повторного входу в ряди як для випробувань з автоматичною компенсацією, так і без компенсації, а також для випробувань з автоматичним контролем форсунки.

Як і в інших технологіях обприскування, контролери норми обмежені загальним часом реакції на необхідні коригування норми, які відбуваються під час активації ASC. Систему керування можна модифікувати, щоб забезпечити рівень покращеної реакції на такі ситуації, як рядки з кутом  $20^\circ$ , шляхом розгортання функції прогнозування для керування кінцевою цільовою точкою під час активації ASC, щоб мінімізувати помилки відхилення від швидкості.

## 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.; Kraszkievicz, A.; Pecyna, A.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# Додатки