

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 систем точного землеробства на якість внесення мінеральних добрив»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Микола ВОЛЬВАЧ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2402-1м

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Михайло ШУЛЯК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

**Вольвач Микола Миколайович**

Дослідження впливу систем точного землеробства на якість внесення мінеральних добрив

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

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 43 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 7 таблиць, 10 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Це дослідження було зосереджено на оцінці точності виконання обприскування за умов варіювання швидкості руху трактора. Для досягнення поставленої мети було проведено серію польових експериментів, що дозволили отримати фактичні дані про роботу системи в реальних умовах, а також здійснено ґрунтовний аналітичний огляд отриманих показників. У ході дослідження застосовувався сучасний польовий обприскувач, оснащений штангою, крила якої поділялися на окремі ліву та праву секції. Подача робочої рідини до кожної секції реалізовувалася автономно, а регулювання швидкості її потоку здійснювалося пропорційними клапанами. Ці клапани мали час повного відкриття та закриття, який становив 3 секунди, що забезпечувало можливість оперативного реагування на зміну швидкості руху машини відповідно до сигналів, отриманих від системи моніторингу.

У дослідженні застосовано замкнуту систему автоматичного керування, компоненти якої включали витратомір, пропорційний клапан та електронний блок керування, що координував їх взаємодію. Завдяки такій конструкції система могла працювати в режимі реального часу, постійно перевіряючи відповідність фактичної норми внесення заданому цільовому значенню. Внутрішні алгоритми

керування дозволяли клапанам оперативно реагувати навіть на незначні зміни швидкості руху, забезпечуючи плавне коригування витрати робочої рідини.

Проведені спостереження та аналіз результатів показали, що зі збільшенням швидкості руху трактора до певного критичного рівня система здатна утримувати норму внесення на значеннях, максимально близьких до встановлених параметрів. Це свідчить про високу чутливість системи до зміни режимів роботи та її можливість компенсувати негативний вплив динамічних факторів польових умов. Крім того, під час усіх етапів проведення випробувань система зберігала стабільність функціонування та демонструвала достатній запас точності і надійності, що підкреслює її ефективність у забезпеченні рівномірності обприскування навіть за постійних змін швидкості руху агрегату.

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

## **ABSTRACT**

### **Volvach Mykola Mykolayovych**

Study of the influence of precision farming systems on the quality of mineral fertilizer application.

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 43 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 7 tables, 10 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

This study was focused on assessing the accuracy of spraying under conditions of varying tractor speed. To achieve the set goal, a series of field experiments were conducted, which allowed obtaining actual data on the operation of the system in real

conditions, and a thorough analytical review of the obtained indicators was also carried out. The study used a modern field sprayer equipped with a boom, the wings of which were divided into separate left and right sections. The supply of working fluid to each section was implemented autonomously, and its flow rate was regulated by proportional valves. These valves had a full opening and closing time of 3 seconds, which provided the ability to respond promptly to changes in the machine's speed according to the signals received from the monitoring system.

The study used a closed automatic control system, the components of which included a flow meter, a proportional valve and an electronic control unit that coordinated their interaction. Thanks to this design, the system could operate in real time, constantly checking the compliance of the actual application rate with the set target value. Internal control algorithms allowed the valves to respond promptly even to minor changes in the speed of movement, ensuring smooth adjustment of the working fluid flow rate.

The observations and analysis of the results showed that with an increase in the tractor speed to a certain critical level, the system is able to maintain the application rate at values as close as possible to the set parameters. This indicates a high sensitivity of the system to changes in operating modes and its ability to compensate for the negative impact of dynamic factors of field conditions. In addition, during all stages of testing, the system maintained stable operation and demonstrated a sufficient margin of accuracy and reliability, which emphasizes its effectiveness in ensuring uniform spraying even with constant changes in the speed of the unit.

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

## Зміст

Вступ.....	8
Розділ 1 Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Агротехнічні вимоги до внесення рідких добрив обприскуванням.....	11
1.2 Фактори, що впливають на показники якості обприскування .....	14
1.3 Аналіз досліджень систем керування обприскуванням .....	21
Розділ 2 Методика досліджень.....	24
Розділ 3 Результати досліджень та їх аналіз .....	30
Висновки.....	40
Список використаних джерел.....	41

## **ВСТУП**

### **1. Актуальність теми**

У сучасних умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва особливої ваги набуває забезпечення раціонального та точного внесення мінеральних добрив. Ефективність добрив залишається одним із ключових чинників продуктивності культур, а їх нерівномірне або неточне внесення призводить до суттєвих економічних втрат, погіршення родючості ґрунтів та негативного впливу на довкілля. У зв'язку з цим технології точного землеробства, що передбачають автоматизоване регулювання норм внесення та адаптацію роботи техніки до змінних умов поля, стають важливою складовою модернізації аграрної галузі.

Системи контролю та автоматичного коригування витрати добрив відіграють вирішальну роль у забезпеченні рівномірності внесення, особливо за умов зміни швидкості руху агрегатів. Їх застосування підвищує точність технологічних операцій, сприяє оптимізації ресурсів та зменшенню негативного впливу антропогенних факторів на навколишнє середовище. Таким чином, дослідження функціонування таких систем в реальних умовах та встановлення закономірностей їх впливу на якість внесення мінеральних добрив є актуальним як у науковому, так і у практичному аспектах.

### **2. Аналіз стану наукової розробки проблеми**

Питанням точності внесення мінеральних добрив присвячено значну кількість досліджень вітчизняних та зарубіжних учених, які розглядають конструктивні особливості технічних засобів, системи контролю витрати та вплив динамічних режимів роботи на рівномірність внесення. У наукових джерелах детально описані принципи роботи регуляторів норми, PWM-систем, автоматичних клапанів та електронних блоків керування. Разом із тим, попри наявні напрацювання, недостатньо дослідженим залишається питання

збереження точності внесення в умовах постійної зміни швидкості руху агрегатів, що особливо актуально для сучасних машин з автономними секційними системами.

Існуючі праці не завжди враховують реальні польові умови, що характеризуються складною динамікою навантаження, та не містять порівняльного аналізу роботи різних типів систем керування при варіюванні швидкісних режимів. Це зумовлює потребу у проведенні додаткових експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку функціонування систем точного внесення добрив та визначення їх здатності підтримувати задані технологічні параметри.

### **3. Мета дослідження**

Метою дослідження є оцінка впливу систем точного землеробства на точність і якість внесення мінеральних добрив за умов зміни швидкості руху сільськогосподарського агрегату.

### **4. Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є процес внесення мінеральних добрив за допомогою технічних засобів точного землеробства.

### **5. Предмет дослідження**

Предметом дослідження є показники точності, рівномірності та стабільності внесення добрив, що забезпечуються системами автоматичного контролю та регулювання витрати робочого середовища.

### **6. Завдання дослідження**

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні технічні рішення та принципи роботи систем точного внесення мінеральних добрив.
2. Провести польові експериментальні дослідження із варіюванням швидкості руху сільськогосподарського агрегату.

3. Визначити вплив зміни швидкості руху на точність та стабільність роботи системи автоматичного регулювання.
4. Виконати обробку та аналіз отриманих експериментальних даних.
5. Оцінити ефективність застосованої системи точного внесення добрив та сформулювати практичні рекомендації.

### **7. Методи дослідження**

У роботі застосовано комплекс методів, що включає експериментальні польові випробування, інструментальні методи вимірювання витрати робочої рідини, математичну обробку статистичних даних, порівняльний аналіз, графічну інтерпретацію результатів, а також методи системного підходу для оцінки функціонування систем точного землеробства.

### **8. Структура та обсяг роботи**

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 45 сторінках машинописного тексту, містить 7 таблиць, 10 рисунків, 2 додатки та 25 джерел літератури. Структура роботи логічно відображає процес дослідження — від теоретичних положень до практичних експериментальних результатів та узагальнюючих висновків.

# 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Агротехнічні вимоги до внесення рідких добрив обприскуванням

Внесення рідких добрив шляхом обприскування є однією з ключових агротехнічних операцій, що забезпечує раціональне та своєчасне надходження поживних елементів до рослин. Результативність цього процесу визначається правильною організацією технологічного циклу, суворим дотриманням агрономічних і технічних вимог, а також застосуванням сучасних машин і приладів, призначених для точного дозування та розподілу розчину.

Рідкі добрива, які використовуються для обприскування, повинні відповідати встановленим вимогам якості та стабільності. До основних критеріїв належать:

- Однорідність робочого розчину. Суміш має бути цілком гомогенною, без осаду, згустків або механічних домішок, що можуть спричинити засмічення форсунок і порушити рівномірність розпилення.

- Правильна концентрація діючих речовин. Для кожної культури, а також для певного етапу її розвитку, необхідно дотримуватись рекомендованих норм і пропорцій. Порушення концентрації може спричинити опіки листової поверхні або знизити ефективність живлення.

- Хімічна стабільність розчинів. Добрива не повинні втрачати свої властивості під час зберігання, транспортування чи приготування робочої суміші. Перед початком робіт слід контролювати склад та якість компонентів, аби уникнути небажаних реакцій.

Терміни та умови внесення рідких добрив є вирішальним чинником для ефективного засвоєння поживних речовин. Важливо враховувати такі аспекти:

- Фаза росту рослин. Найбільш позитивний ефект спостерігається при

застосуванні розчинів у критичні періоди розвитку культури, коли її потреба в поживних елементах є максимальною.

- **Погодні фактори.** Оптимальні умови для проведення обприскування — це слабкий або відсутній вітер (до 3–4 м/с), помірنا вологість повітря, температура не вище 25 °С. Найкраще здійснювати внесення у ранковий або вечірній час, щоб уникнути інтенсивного випаровування та фототоксичних реакцій.
- **Відсутність опадів.** Для забезпечення ефективного поглинання елементів живлення після обприскування необхідно, щоб не було дощу протягом 4–6 годин.

Технічні засоби для внесення рідких добрив повинні відповідати певним експлуатаційним та технологічним параметрам, які гарантують високу якість виконання робіт:

- **Справність обладнання.** Усі вузли — форсунки, фільтри, насоси, шланги — мають бути в належному стані, що забезпечує рівномірне нанесення розчину на поверхню ґрунту або листовий апарат.
- **Тип форсунок.** Для розпилення рідких добрив зазвичай застосовують інжекторні або щілинні форсунки, які створюють краплі більшого розміру та знижують ризик зносу робочого розчину вітром.
- **Робочий тиск.** Тиск у системі повинен підтримуватись на рівні, який забезпечує однорідне розпилення, уникаючи надто дрібних крапель, схильних до швидкого випаровування.
- **Швидкість руху агрегатів.** Під час роботи агрегати повинні рухатися з оптимальною швидкістю, зазвичай у межах 6–8 км/год, що гарантує рівномірність нанесення добрив по всій площі поля.
- **Точність дотримання норми внесення.** Сучасні обприскувачі оснащені автоматизованими системами контролю витрати розчину, що дозволяє підтримувати стабільну норму подачі незалежно від зміни швидкості чи рельєфу поля.

Таким чином, успішне застосування рідких добрив методом обприскування базується на поєднанні якісних хімічних препаратів, відповідного технічного оснащення та дотримання технологічних регламентів, що у сукупності забезпечує високу ефективність живлення та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур.

Для досягнення максимальної ефективності та безпечного застосування рідких мінеральних добрив необхідно суворо дотримуватись агрономічних рекомендацій, що стосуються дозування та умов внесення. Особливу увагу варто приділити таким аспектам:

- **Точний розрахунок кількості добрив.** Визначення норми внесення повинно базуватись на потребах конкретної культури, складі ґрунту, а також на фазі росту й розвитку рослин. Такий підхід забезпечує раціональне використання ресурсів і запобігає негативному впливу на довкілля.

- **Захист персоналу.** Працівники, що здійснюють обприскування, мають бути забезпечені належними засобами індивідуального захисту — спеціальним одягом, рукавицями, респіраторами та захисними окулярами. Це знижує ризик контакту з агрохімікатами та гарантує безпечні умови праці.

- **Дотримання санітарно-екологічних вимог.** Категорично забороняється проводити обприскування поблизу водойм, житлових районів, пасік і зон відпочинку. Потрібно враховувати мінімальні санітарно-захисні відстані, які визначаються типом використовуваних добрив, їх концентрацією та параметрами розпилювального обладнання.

Після завершення робіт із внесення рідких добрив необхідно здійснити оцінку ефективності проведеної операції з метою перевірки її результативності. До основних показників відносяться:

- **Візуальний моніторинг стану посівів.** Зовнішній вигляд рослин дозволяє виявити симптоми нестачі чи надлишку поживних речовин, що свідчить про потребу коригування норми внесення.

- **Агрономічний контроль.** Проводиться шляхом відбору зразків листя або ґрунту для лабораторного аналізу засвоєння елементів живлення, що дає об'єктивну оцінку ефективності живлення.

- **Оцінка врожайності.** Порівняння отриманих результатів із контрольними ділянками дає змогу визначити економічну доцільність використання рідких добрив та їхній вплив на кінцеву продуктивність культури.

Суворе дотримання технологічних вимог до внесення рідких добрив методом обприскування є основою ефективного живлення рослин, підвищення продуктивності агроценозів і раціонального використання мінеральних ресурсів. Висока якість препаратів, правильний вибір часу обробки, оптимальна технологія розпилення та технічна справність обладнання — це ключові чинники успішного проведення робіт.

Комплексний підхід до процесу внесення рідких добрив сприяє стабільному зростанню урожайності, забезпеченню екологічної безпеки, підвищенню ефективності виробництва та зниженню витрат на агротехнологічні операції.

## **1.2 Фактори, що впливають на показники якості обприскування**

Фактори, які визначають якість процесу обприскування, мають вирішальне значення для досягнення високої ефективності під час внесення пестицидів, рідких мінеральних добрив та інших агрохімічних препаратів у сучасному землеробстві. Від досконалості проведення цього процесу залежить не лише результативність дії робочих розчинів, але й рівень економічної доцільності, скорочення небажаного впливу на екосистему та збереження безпеки працівників аграрної сфери. Саме тому розуміння ключових чинників, які формують показники якості обприскування, а також дотримання технологічних вимог, є надзвичайно важливими передумовами ефективного виробництва.

Передусім суттєве значення має правильний добір обприскувальної техніки та підтримання її у справному технічному стані. Сучасні моделі обприскувачів мають різні конструкційні рішення, що забезпечують точне, рівномірне та стабільне розподілення робочої рідини по рослинній поверхні. Особливу увагу слід приділяти стану форсунок, адже їх зношування, часткове засмічення або неправильне встановлення часто стають причиною нерівномірного нанесення препарату та погіршення формування крапельного спектра. Геометрична форма, розмір отвору та тип розпилювача безпосередньо впливають на діаметр крапель, від якого залежить ступінь покриття листової поверхні. Наприклад, дрібнодисперсні краплі створюють щільніше покриття, однак вони легше підхоплюються вітром і можуть втрачатися під час розпилення, тоді як великі краплі менше зносяться, але схильні стікати з рослин у ґрунт, знижуючи ефективність внесення.

Одним із визначальних етапів забезпечення ефективної роботи обприскувальної системи є її коректне калібрування. Процедура калібрування полягає у встановленні оптимальної швидкості руху агрегату, налаштуванні тиску в системі подачі рідини та визначенні витрати робочого розчину на одиницю площі. Порушення цих параметрів призводить до нерівномірного нанесення препарату, появи необроблених ділянок або перевитрати матеріалів, що негативно впливає на рентабельність і якість обробітку.

Точна калібровка сприяє стабільному розподілу розчину по всій поверхні культур, підвищуючи біологічну ефективність засобів захисту рослин. Рівномірне покриття створює оптимальні умови для росту та розвитку культур, що позитивно відображається на продуктивності посівів. У разі неточного налаштування форсунок або тиску виникають суттєві відмінності у розмірі крапель, через що частина розчину стікає або потрапляє у ґрунт, знижуючи результативність дії препаратів. Великі краплі часто не утримуються на

листковій поверхні, а втрачені робочі матеріали означають зайві фінансові витрати.

Таким чином, якість обприскування безпосередньо залежить від точності виконання калібрувальних операцій. Дотримання технічних параметрів та регламентів дозволяє максимально ефективно використовувати агрохімікати, зменшувати негативний екологічний вплив і водночас підвищувати продуктивність технологічного процесу обробітку рослин.

Не менш важливим є дотримання оптимального робочого тиску у системі розпилення. Саме від рівня тиску залежить швидкість виходу робочої рідини через форсунки, а також діаметр утворюваних крапель. Надмірно високий тиск спричиняє формування надто дрібних крапель, які швидко випаровуються та легко переносяться вітром на сусідні поля, що може спричинити втрату препарату та забруднення навколишнього середовища. Занадто низький тиск, навпаки, формує великі краплі, які не здатні рівномірно покривати листову поверхню. Тому підбір оптимального тиску має здійснюватися з урахуванням типу обприскувача, конструкції форсунок, властивостей робочої рідини та конкретних погодних умов під час проведення польових робіт.

Важливим чинником, що визначає якість проведення обприскування, є швидкість пересування машини під час виконання технологічного процесу. Рух агрегату має залишатися стабільним і рівномірним, адже будь-які зміни швидкості відображаються на однорідності розподілу робочого розчину. Надмірно висока швидкість призводить до зменшення кількості препарату, який потрапляє на певну площу, тоді як занадто низька швидкість може викликати перевищення норми внесення і, як наслідок, перенасичення культур пестицидами. Забезпечення стабільної якості обприскування потребує точного калібрування обладнання та дотримання встановлених параметрів руху.

Питання впливу швидкості руху на ефективність розпилення розчину є одним із ключових у сучасних технологіях рослинництва. Рівень якості

обприскування безпосередньо визначає успішність захисту культур від шкідників і хвороб, раціональність використання агрохімікатів, а також економічну ефективність польових робіт. Процес нанесення робочих рідин на рослинну поверхню передбачає високий ступінь точності, контроль параметрів подачі та стабільність дії агрегату. Саме швидкість пересування обприскувача відіграє провідну роль серед усіх цих факторів.

Рух машини з певною швидкістю визначає рівномірність покриття листової поверхні робочим розчином. Зі збільшенням темпу руху зменшується час контакту дрібнодисперсної рідини з цільовою поверхнею, що може викликати нерівномірність розподілу препарату по площі. Такі відхилення призводять до перевитрат засобів захисту або, навпаки, до їх недостатнього внесення на окремі ділянки поля, що негативно позначається на результативності боротьби з хворобами та шкідниками. Вибір оптимальної швидкості має першорядне значення для досягнення повного і рівномірного покриття, особливо при роботі з густими посівами.

Наукові дослідження підтверджують, що зі зростанням швидкості руху агрегату краплі робочого розчину стають більшими за розміром, а їх загальна кількість на одиниці площі — меншою. Це пояснюється зміною гідродинамічних характеристик розпилення: збільшується тиск у системі, посилюється турбулентність потоку, і розпилювальна факела стає нерівномірною. Зменшення частки дрібних крапель, які краще утримуються на листовій поверхні, спричиняє додаткові втрати препарату через стікання, випаровування або знесення вітром. Отже, необхідно коректно підбирати швидкість руху, враховуючи тип форсунок, робочий тиск і погодні умови під час обприскування.

Крім того, зміна швидкості руху агрегату прямо впливає на точність дотримання норми внесення добрив або засобів захисту. При надмірному прискоренні обприскувач недовносить препарат, що знижує результативність обробки і потребує повторного проходу. Навпаки, занадто повільний рух часто

призводить до перевищення дози, що підвищує витрати хімікатів, створює ризик фітотоксичності культур і може завдати шкоди навколишньому середовищу. Лише оптимальне співвідношення швидкості, робочого тиску та параметрів розпилення забезпечує точне дотримання встановлених норм і стабільну якість покриття рослин.

Варто також зазначити, що швидкість руху істотно впливає на втрати робочої рідини внаслідок знесення її крапель потоками повітря. Зі збільшенням швидкості утворюються інтенсивні турбулентні завихрення, які піднімають дрібні частинки вгору та розсіюють їх на значні відстані. Це особливо небезпечно за вітряної погоди або на ділянках зі складним рельєфом, коли втрати препарату можуть бути значними. Щоб мінімізувати такі негативні явища, необхідно обирати швидкість руху з урахуванням погодних умов і застосовувати спеціальні типи форсунок, що знижують утворення дрібнодисперсних крапель.

Окрім цього, на показники якості процесу обприскування суттєво впливають конструкційні особливості обприскувача, його технічна справність та рівень автоматизації системи керування. Сучасні моделі, обладнані датчиками контролю швидкості руху та автоматичними регуляторами тиску, дають змогу підтримувати стабільну якість розпилення навіть при коливаннях швидкості агрегату на різних ділянках поля. Водночас важливо, щоб оператор дотримувався рекомендованих режимів роботи, враховуючи поточні метеорологічні та технологічні умови.

Велике значення для ефективності процесу має також вид вирощуваної культури та стадія її розвитку. У фазу інтенсивного росту, коли площа листової поверхні досягає максимуму, необхідно забезпечити найвищу можливу рівномірність покриття рослин робочим розчином. У таких умовах навіть незначне збільшення швидкості руху може помітно знизити якість нанесення препарату. Тому для густих посівів або культур із щільною листовою масою

доцільно застосовувати меншу швидкість руху агрегату та форсунки, які створюють дрібнодисперсний факел розпилення.

Отже, швидкість переміщення обприскувача виступає одним із головних параметрів, що визначає результативність обприскування. Для досягнення найкращого ефекту необхідно враховувати взаємозалежність між швидкістю руху, тиском у системі, типом форсунок, погодними умовами й біологічними особливостями культур. Дотримання оптимальних параметрів роботи техніки сприяє більш ефективному використанню робочого розчину, зниженню його втрат і зменшенню негативного впливу на довкілля. Застосування інноваційних технологій автоматичного регулювання швидкості та параметрів розпилення стає ключовим чинником підвищення продуктивності й якості сільськогосподарських операцій.

Погодні фактори також мають вагомe значення для кінцевої якості обробки. Насамперед вітер є головною причиною знесення крапель, що призводить до втрати ефективності препарату та потенційного забруднення навколишніх територій. Оптимальна швидкість вітру під час обприскування не повинна перевищувати 3–5 м/с. Температура й відносна вологість повітря впливають на швидкість випаровування рідини: за високих температур дрібні краплі швидко висихають, що значно знижує результативність обробки. Найсприятливішими умовами для проведення таких робіт вважаються ранкові або вечірні години, коли повітря прохолодніше, а вологість вища.

Не менш важливим чинником є якість робочого розчину, від якої безпосередньо залежить успішність обприскування. Надзвичайно важливо правильно готувати суміш, суворо дотримуючись норм концентрації препарату та використовуючи чисту воду. Забруднення води або порушення технології змішування компонентів можуть призвести до зниження активності засобу захисту чи навіть викликати його токсичний вплив на рослини. Додавання

ад'ювантів і прилипачів сприяє кращому утриманню розчину на листовій поверхні та зменшує стікання крапель.

До технічних аспектів процесу належить також підтримання сталої висоти розташування штанги обприскувача над оброблюваною поверхнею. Саме цей параметр визначає рівномірність розподілу крапель по площі. Надмірно високе положення штанги збільшує ризик знесення робочого розчину вітром, тоді як занадто низьке може призвести до нерівномірного покриття через утворення тіней рослинами або перешкоджання розпиленню.

Важливим аспектом під час проведення обприскування є правильне визначення оптимальної робочої норми внесення препарату. Кількість засобу, необхідна для обробки певної площі, залежить від типу культури, її фази росту, властивостей препарату та конкретної мети застосування. Якщо об'єм препарату буде недостатнім, ефективність захисту значно зменшиться, тоді як надмірне внесення може призвести до фітотоксичності або забруднення довкілля, що створює додаткові екологічні ризики.

Вода виступає головною складовою робочих розчинів, що використовуються для обприскування сільськогосподарських культур. Її якість істотно впливає на результативність дії пестицидів, гербіцидів, фунгіцидів та інших засобів захисту рослин. Порушення хімічного складу води або наявність у ній небажаних домішок може знизити активність препаратів. Найбільш критичними параметрами є рівень жорсткості, кислотно-лужна реакція (рН) та вміст мінеральних часток.

Жорстка вода з підвищеним вмістом солей кальцію та магнію часто створює проблеми під час приготування робочих розчинів. Реакція між цими солями та діючими речовинами препаратів може призвести до утворення нерозчинних сполук, які блокують дію пестицидів і різко знижують їх ефективність. Наприклад, гербіцид гліфосат у жорсткій воді втрачає значну частину своїх властивостей, що робить його використання малоефективним.

Не менш важливим показником є реакція середовища за рівнем рН. Лужна вода негативно впливає на стабільність деяких інсектицидів і фунгіцидів, скорочуючи термін їх активності. Для більшості препаратів оптимальним вважається рН у межах 4,5–6,5. Якщо показник відхиляється від норми, рекомендується застосовувати спеціальні добавки — коректори кислотності, які допомагають відновити потрібне середовище. Крім того, на ефективність засобів можуть впливати домішки органічних речовин, сполуки заліза, сірки та інші елементи, що іноді потрапляють у воду через старі системи водопостачання. Такі домішки знижують активність розчинів і можуть ускладнювати дію препаратів.

Отже, якість води є ключовим чинником, що визначає ефективність процесу обприскування. Використання води з невідповідними характеристиками значно зменшує результативність захисту культур, провокуючи зниження урожайності та фінансові втрати господарства. Для запобігання таким наслідкам доцільно здійснювати регулярний аналіз води, оцінювати її склад і при потребі проводити корекцію параметрів перед приготуванням робочих розчинів.

Досягнення стабільно високої якості обприскування потребує системного підходу, який враховує усі перелічені чинники. Правильно підібрана обприскувальна техніка, суворе дотримання рекомендацій щодо умов проведення робіт, калібрування обладнання, контроль концентрації розчину та якості води — усе це забезпечує ефективне, безпечне й екологічно збалансоване застосування засобів захисту рослин. Узгоджені дії операторів, точність технічних налаштувань і дотримання агротехнічних вимог сприяють підвищенню результативності обприскування та мінімізації шкідливого впливу на довкілля.

### **1.3 Аналіз досліджень систем керування обприскуванням**

Постійне вдосконалення технологічних процесів у сфері застосування пестицидів зумовило появу широкого спектра препаратів, що відіграють ключову

роль у задоволенні потреб сучасного сільського господарства та гарантуванні стабільного виробництва продовольства. Водночас, попри їхню ефективність у захисті культур і стимулюванні росту рослин, такі засоби несуть певні екологічні загрози та можуть становити небезпеку для здоров'я живих організмів, включно з людиною [1–4].

Для раціонального та безпечного використання пестицидів за допомогою польових обприскувачів надзвичайно важливо забезпечити рівномірну норму внесення на кожен одиницю площі. Будь-яке відхилення у розподілі робочої рідини призводить до зниження результативності обробки та сприяє накопиченню небажаних залишків хімічних речовин у навколишньому середовищі [5].

Помилки під час обприскування можуть стати причиною наявності залишків пестицидів у повсякденних продуктах споживання — від питної води, готових страв, фруктових соків і вин до кормів для тварин [6]. На ефективність і якість покриття значно впливають чинники, пов'язані з конструкцією обладнання та технологією його застосування. Зокрема, параметри руху, такі як швидкість пересування агрегату та тип або розмір сопла, безпосередньо визначають якість розпилення, рівномірність нанесення й ризик знесення крапель вітром. Науково доведено, що збільшення швидкості агрегату спричиняє формування дрібніших крапель, які легше переносяться повітряними потоками, що підвищує небезпеку дрейфу робочої рідини.

Результати численних досліджень підтвердили, що зростання швидкості руху обприскувальної техніки супроводжується посиленням знесення пестицидів та зменшенням рівня покриття рослин [6–11]. Окрім того, надмірне або неправильне використання препаратів може призвести до формування резистентності у шкідників, що ускладнює подальший захист посівів. Для забезпечення максимальної ефективності хімічного захисту необхідно застосовувати точно відкалібровані обприскувачі, якими повинні керувати

кваліфіковані оператори [10]. Проте неправильне калібрування обладнання часто зумовлює суттєві втрати — як у кількості використаних пестицидів, так і у фінансовому еквіваленті, що вимірюється мільярдами доларів [12–15].

Показовим є дослідження, проведене в Північній Дакоті (США), де виявлено значну варіацію фактичних норм внесення: близько 60% операторів перевищували або занижували заплановану дозу більш ніж на 10%, а в окремих випадках відхилення сягали понад 30% [15]. Такі невідповідності дослідники пояснюють рядом причин — зношеними або забрудненими соплами, неправильно відкаліброваними приладами, а також неспроможністю операторів утримувати стабільну швидкість потоку під час роботи у полі [15-17].

Забезпечення стабільного контролю за нормою розпилення є одним із головних чинників точного внесення пестицидів. Традиційні обприскувачі, що працюють на основі тиску без автоматизованих систем керування, змушують оператора постійно регулювати швидкість руху машини та тиск у системі, щоб підтримувати задану дозу препарату.

Коливання швидкості руху тракторів, які часто виникають у процесі роботи, разом із помилками під час експлуатації техніки значно ускладнюють стабільне підтримання необхідної швидкості руху. Проте досягнення встановленої норми внесення робочої рідини має ключове значення для забезпечення рівномірного покриття поверхні, підвищення ефективності технологічного процесу [18] та збереження економічної доцільності виконання операцій.

Норма розподілу рідини (л/га) визначається комбінацією витрати робочого розчину (л/хв) і швидкісного режиму трактора (км/год). Відтак, точність сигналів, які надходять із датчиків витрати та швидкості, разом із коректністю роботи клапанів, що регулюють потік рідини, відіграє вирішальну роль у зменшенні похибок під час внесення препаратів.

Для визначення витрати рідини у напірній магістралі обприскувальної системи застосовуються різні типи витратомірів, серед яких найпоширенішими є турбінні, вихрові, електромагнітні та ультразвукові прилади. Порівняльні дослідження різних методів вимірювання свідчать, що саме ультразвукові витратоміри отримали широке розповсюдження завдяки своїй високій чутливості та стабільності показників [19].

З часом системи автоматичного регулювання подачі рідини були інтегровані у конструкцію сільськогосподарських обприскувачів, що дало змогу ефективно контролювати норму внесення навіть за змінної швидкості агрегату під час роботи в полі. Нині поширеними є такі підходи до керування процесом обприскування, як PID-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференційне), керування на основі нейронних мереж, а також інтелектуальні системи автоматичного контролю [21]. Ці системи зазвичай функціонують за допомогою пропорційних клапанів, що забезпечують регулювання потоку в напірній лінії.

Разом з тим, тривалий час відкриття або закриття таких клапанів, який може сягати до 15 секунд, виявляється недостатньо динамічним для швидкозмінних умов роботи. Під час прискорення чи сповільнення руху обприскувального агрегату обмеження у функціонуванні регулятора подачі та системи в цілому стають більш помітними, що нерідко призводить до перевищення або зниження необхідної норми внесення [22]. Проведене дослідження має на меті вдосконалення контролю витрати робочої рідини у польових обприскувачах шляхом використання швидкодіючих пропорційних клапанів, здатних оперативно реагувати на зміну швидкості руху, тим самим мінімізуючи похибки при внесенні препаратів.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Полеві дослідження здійснювали на рівнинній території загальною площею 1,5 гектара. У складі обприскувальної системи, що застосовувалася під час експерименту, знаходилися поршнево-мембранний насос із продуктивністю 71 літр за хвилину та максимальною робочою напругою 50 бар, резервуар для робочої рідини об'ємом 400 літрів, а також штанга довжиною 10 метрів.

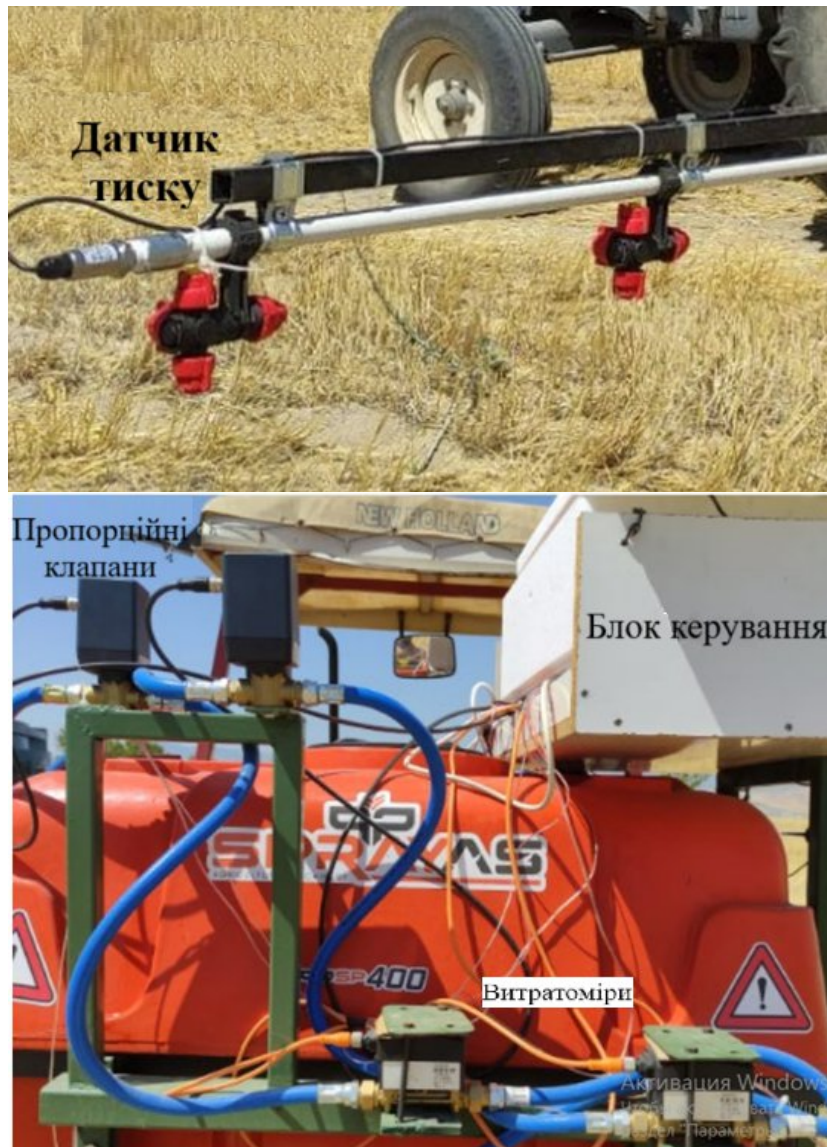


Рисунок 1 - Система обприскувача з регулятором норми внесення. Секції стріли та датчики тиску; (b) з'єднання пропорційного клапана та витратоміра.

Швидкість руху трактора визначалася за допомогою сенсора наближення, змонтованого на передньому колесі (див. рис. 2).

Для фіксації швидкості до колеса рівномірно прикріпили 32 металеві елементи через однакові проміжки. Значення імпульсів, що реєстрував сенсор наближення, перетворювалися у залежності від відстані, яку колесо проходило за один оберт, і передавалися на високошвидкісний лічильник (ВШЛ). Після обробки цих даних за допомогою математичних алгоритмів у програмному забезпеченні ВШЛ визначалася швидкість руху трактора в км/год.



Рис. 2 - Вимірювання швидкості трактора

Робоча штанга поділялася на дві незалежні секції – ліву та праву, які управлялися окремо. На ній було встановлено 20 форсунок із плоским вентиляторним розпилем (Agroer Co) з кроком 0,5 м. Кольорове маркування та робочі витрати форсунок мали такі значення: жовті 0,65–1,03 л/хв, сині 0,97–1,53 л/хв, червоні 1,29–2,09 л/хв.

Для кожного тесту тип форсунки підбирався відповідно до даних, наведених у каталозі виробника. Апаратура, що забезпечувала управління витратою, включала програмований логічний контролер (ПЛК) S7 – 1200 (6ES7214 – 1AG40 – 0XB0) із 14 цифровими входами, 10 цифровими виходами

та 2 аналоговими входами, аналоговий модуль SM 1234 (4 аналогових входи, 2 аналогових виходи), витратоміри (Christian Bürkert GmbH & Co, діапазон 0,5–50 л/хв), пропорційні клапани (Christian Bürkert GmbH & Co 3280, Німеччина) із часом повного відкриття 3 с та вхідним сигналом 4–20 мА, а також датчики тиску (Dwyer Instr., США, 0–10 бар для лівої та правої секцій штанги і 0–100 бар для виходу регулятора). Пропорційні клапани та витратоміри монтувалися між виходом регулятора і секціями штанги (див. рис. 1). Живлення ПЛК, сенсорів, модему та клапанів здійснювалося від акумулятора трактора. Через різний робочий рівень напруги застосовувалося два перетворювальні пристрої: інвертор 12–220 В та конвертер 220–24 В.

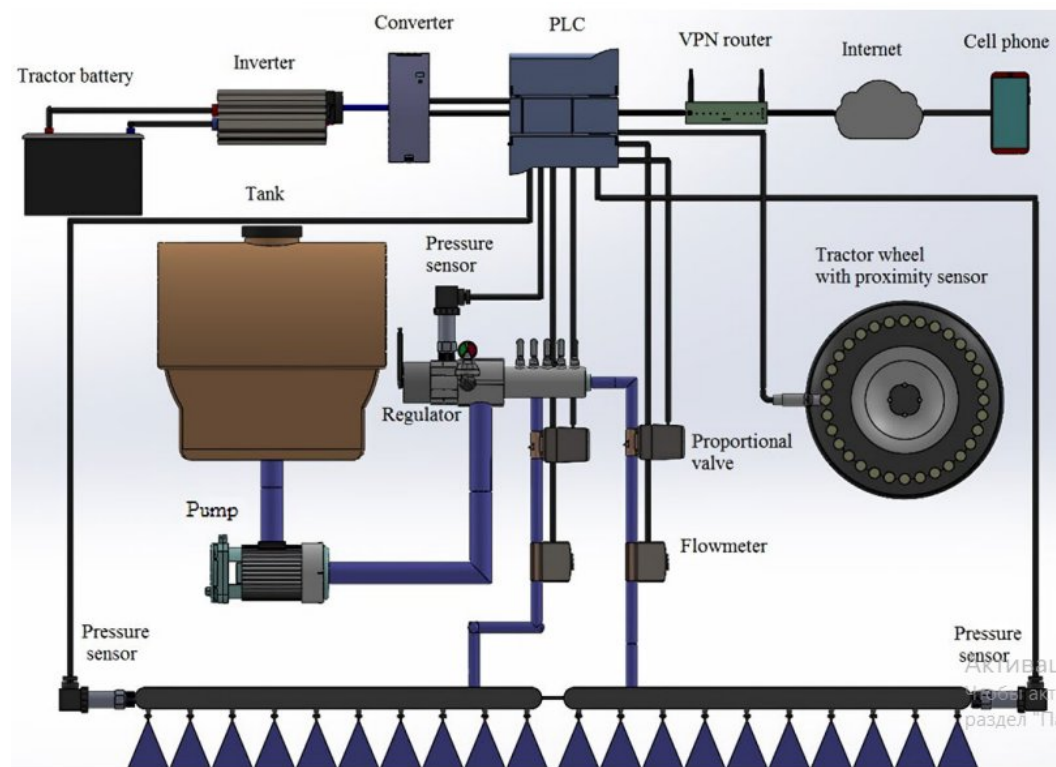


Рис. 3 - Загальна схема системи

Вихідні сигнали витратоміра (4 – 20 мА), а також датчиків тиску секції штанги (4–20 мА) і регулятора (0–10 В) подавалися послідовно на аналогові вхідні клеми модуля ПЛК (AI0, AI1, AI2, AI3 і AI4). Для управління пропорційними клапанами використовувалися блоки контролера PID

(Proportional Integral Derivative), які є стандартними в програмуванні ПЛК. Цільову норму внесення визначали, враховуючи швидкість руху трактора, потік рідини та ширину стріли для кожної секції, після чого розраховане значення подавалося на відповідні вхідні клеми. Керуючий сигнал (4–20 мА), сформований регулятором на основі цих параметрів, надходив на пропорційні клапани через аналогові вихідні клеми AQ0 і AQ1. Схема загальної структури системи наведена на рис. 3.

Було виконано п'ять варіантів випробувань цільової норми внесення (100, 150, 200, 250 і 300 л/га), кожен з трьома повтореннями, що забезпечило 15 різних польових тестів на різних швидкостях трактора в межах 5–10 км/год. Послідовність дій під час кожного експерименту включала: (1) заповнення бака обприскувача водою, (2) визначення цільової норми внесення, (3) подачу імпульсного сигналу на відповідний вхід контролера для фіксації даних, (4) запуск ВВП, (5) виконання програми в полі на різних швидкостях протягом приблизно 10 хвилин, та (6) передачу збережених у ПЛК даних на комп'ютер у форматі «csv». При обчисленні похибки внесення оцінювали відхилення фактичної норми від цільової у відсотках, як зазначено у рівнянні 1.

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

Записані дані охоплювали швидкість трактора, швидкість потоку правої секції штанги (ШППС), швидкість потоку лівої секції штанги (ШПЛС), ступінь відкриття клапана правої секції штанги (СВКПС), ступінь відкриття клапана лівої секції штанги (СВКЛС), норма внесення правої секції штанги (НВПС), норма внесення лівої секції штанги (НВЛС), тиск регулятора (ТР), тиск правої секції штанги (ТПС) і лівої секції штанги (ТЛС). Реєстрація даних відбувалася щосекунди за допомогою блоку реєстратора даних у програмі ПЛК, який містив такі п'ять інструкцій: (1) «DataLogCreate» для створення файлу журналу даних, (2) «DataLogOpen» для доступу до існуючого файлу журналу даних, (3) «DataLogWrite» для запису запису даних, (4) «DataLogClose» для завершення відкритого журналу даних і (5) «DataLogNewFile» для створити новий журнал даних із властивостями, подібними до існуючого файлу, але з новою назвою.

Аналіз отриманих даних показав, що раптові коливання сигналів від датчиків у режимі реального часу здатні значно порушувати вихідні параметри блоків, що відповідають за регулювання пропорційної швидкості відкриття клапанів. Для зменшення такого впливу показники, що надходять від датчиків, були оброблені за допомогою блоку «Moving Average». Цей блок виконує обчислення ковзного середнього значення на основі визначеної ширини вікна, причому параметр ширини вікна задає максимально допустиму кількість останніх зчитаних значень, встановлену на рівні 100. Коли накопичується максимальна кількість значень, спрацьовує сигнал «WindowSizeReached», і кожне наступне отримане значення замінює найстаріше збережене за принципом FIFO (First Input First Output).

Програмне забезпечення веб-сервера (TIA Portal V.15) було реалізоване для відстеження даних у режимі реального часу через Інтернет із застосуванням мобільного маршрутизатора 4G VPN (Robustel). Для візуалізації показників датчиків безпосередньо через веб-сервер PLC (PWS) був створений файл

index.htm. Цей файл демонстрував вихідні дані датчиків, призначені відповідним змінним, у реальному часі через інтерфейс веб-сервера. Перед проведенням основних випробувань було виконано попереднє налаштування системи, встановивши цільову норму внесення на рівні 100 л/га, щоб визначити оптимальні коефіцієнти PID-регулятора, враховуючи зміни швидкості потоку при різних швидкостях руху трактора (5–10 км/год).

Для досягнення бажаної динамічної відповіді системи, зменшення похибок і підвищення стабільності керування застосовувалося точне налаштування PID-регулятора. Компонент P реагує на поточну різницю між бажаним заданим значенням і фактичним параметром процесу. Компонент I враховує суму минулих помилок протягом певного часу, що дозволяє усунути залишкові відхилення у стаціонарному стані та вивести систему до потрібного рівня. Компонент D передбачає подальшу тенденцію зміни помилки на основі поточної швидкості її коливання, що допомагає зменшити осциляції та уникнути перевищень.

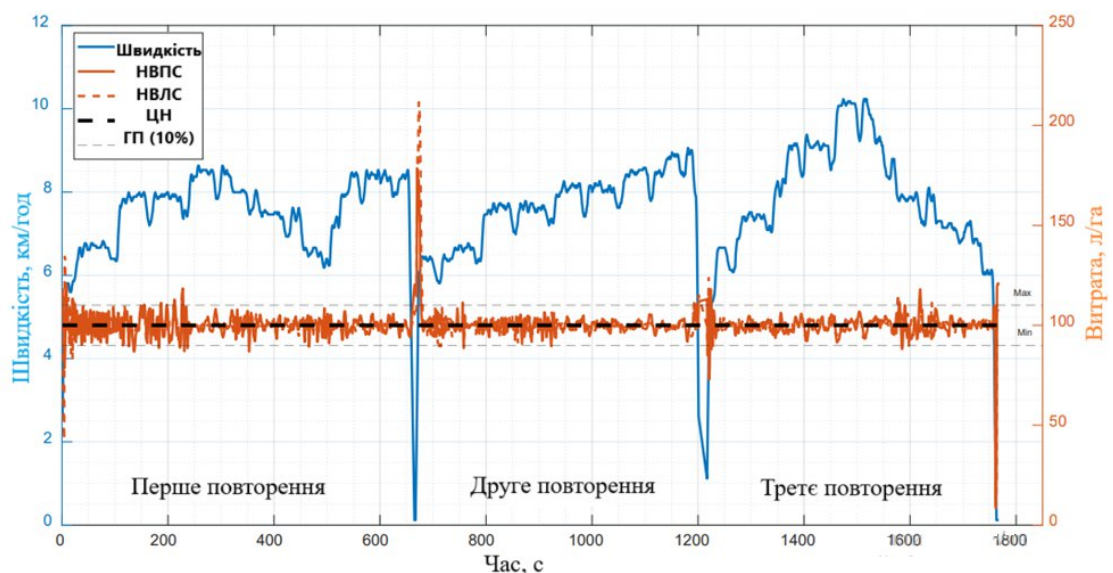
Випробування включало поступове змінення швидкості руху трактора в межах заданого діапазону. Після приблизно 20 хвилин тонкого регулювання були отримані оптимальні коефіцієнти PID, наведені у таблиці 1, що забезпечували бажану стабільну роботу системи.

Таблиця 1 - Визначені коефіцієнти ПІД під час тонкого налаштування

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

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На рисунку 4 наведено норму внесення правої секції штанги (НВПС), норму внесення лівої секції штанги (НВЛС), цільове значення норми внесення (ЦН) та величину граничної похибки (ГП) для тестового обсягу 100 л/га. Протягом цього етапу випробувань швидкість руху змінювалася в інтервалі від 5,10 до 10,23 км/год. З усього часу проведення тесту, який тривав 1726 с, фактична норма внесення перевищувала допустимі межі похибки протягом 49 с, що відповідало абсолютному середньому значенню помилки 2,81%. Слід зауважити, що на початку випробування спостерігалася значніша зміна швидкості порівняно з подальшими коливаннями, що призвело до затримки роботи контролера у досягненні заданого значення для цільової норми. Повне закриття пропорційного клапана на старті руху спричинило тимчасову відсутність проходження рідини через витратомір, навіть при русі трактора. Для усунення цього явища на вихід витратоміра подавався короткий сигнал тривоги протягом 3 с, коли швидкість агрегату досягала 1 км/год. У результаті клапан відкрився частково, що дозволило рідині проходити через витратомір та



забезпечити коректне відслідковування норми внесення.

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

На рис. 5 наведено залежність фактичної норми внесення від різних значень швидкості руху за умови цільової норми 150 л/га. Під час проведення випробувань швидкість коливалася в межах від 4,64 до 9,91 км/год. Загальна тривалість цього етапу випробувань становила 1810 секунд, при цьому фактична норма внесення виходила за допустимі межі похибки лише протягом 46 секунд, що відповідає абсолютному середньому показнику похибки внесення 2,68%.

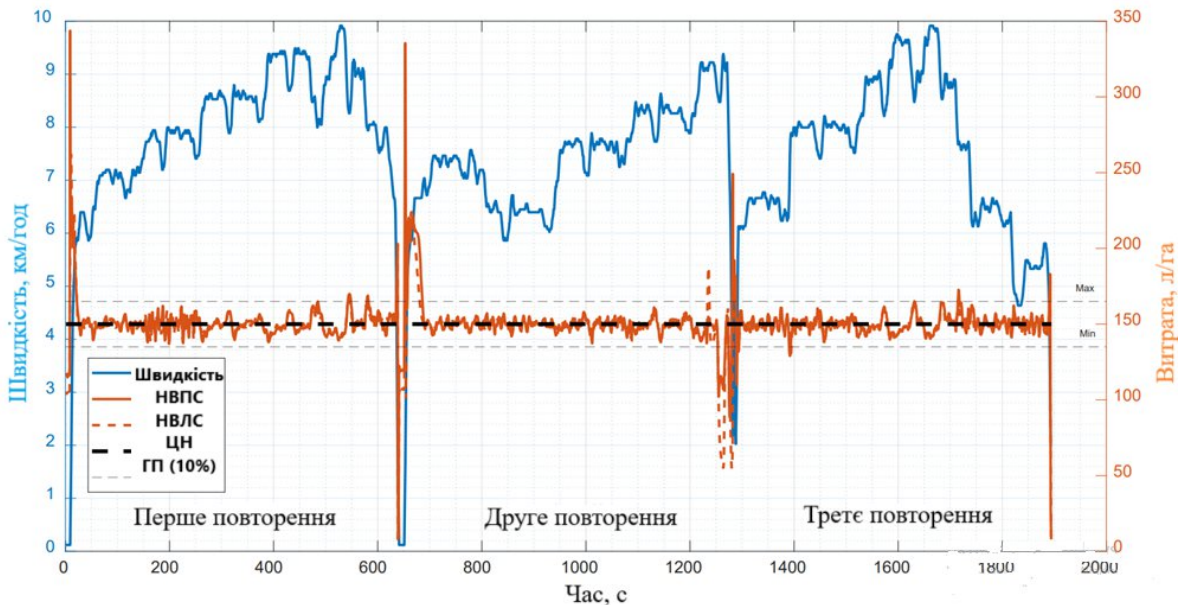


Рис. 5 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (150 л/га)

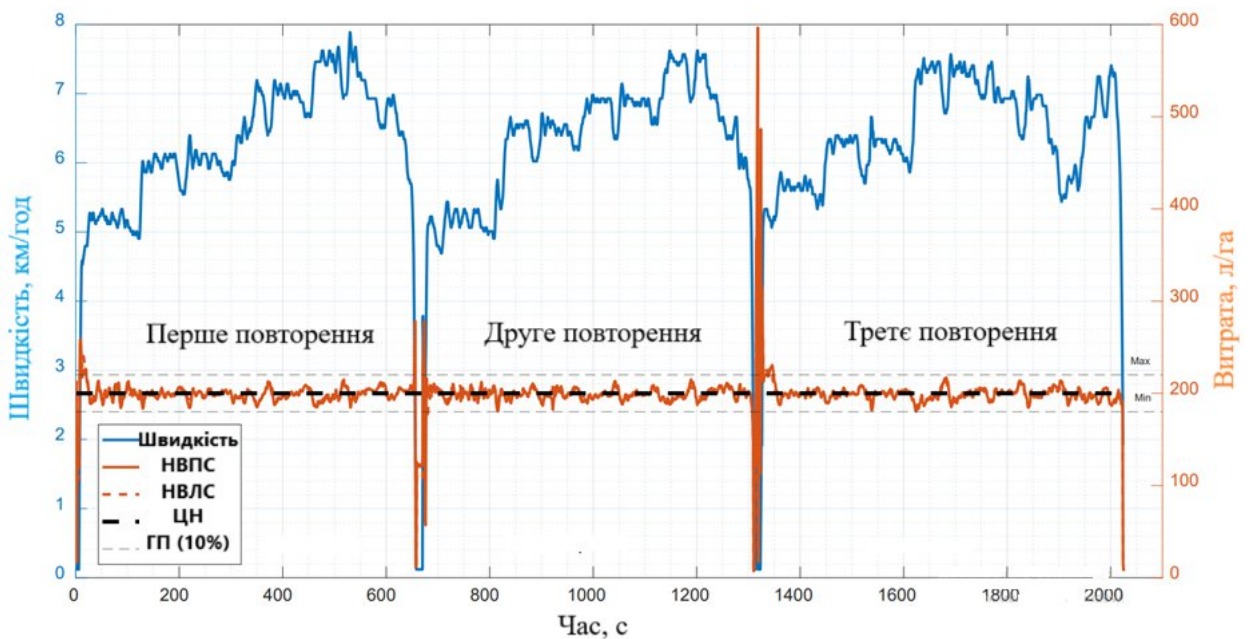


Рис. 6 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (200 л/га)

На рисунку 6 представлено графічне відображення фактичної норми внесення, що відповідає варіаціям швидкості для цільової норми 200 л/га. Протягом цього випробувального інтервалу швидкість руху змінювалася в межах від 3,68 до 7,89 км/год. З урахуванням тривалості тесту у 1973 секунди, фактична норма внесення виходила за межі допустимої похибки лише 21 секунду, демонструючи, що середнє абсолютне відхилення становило 2,28%. Завдяки більш плавним коливанням швидкості на протязі всього періоду фактична норма залишалася в межах прийнятнього рівня.

На рисунку 7 наведено графік фактичної норми внесення для цільової величини 250 л/га із змінними швидкостями. Протягом тестового інтервалу швидкість коливалася від 4,80 до 8,21 км/год. З 1848 секунд випробувань фактична норма перевищувала допустимі межі 40 секунд, при цьому абсолютне середнє відхилення виявилось на рівні 2,14%. Під час другого та третього повторень спостерігалось, що при різкому збільшенні або зменшенні швидкості приблизно на 1 км/год, значення норми внесення тимчасово виходило за межі допустимих похибок на кілька секунд.

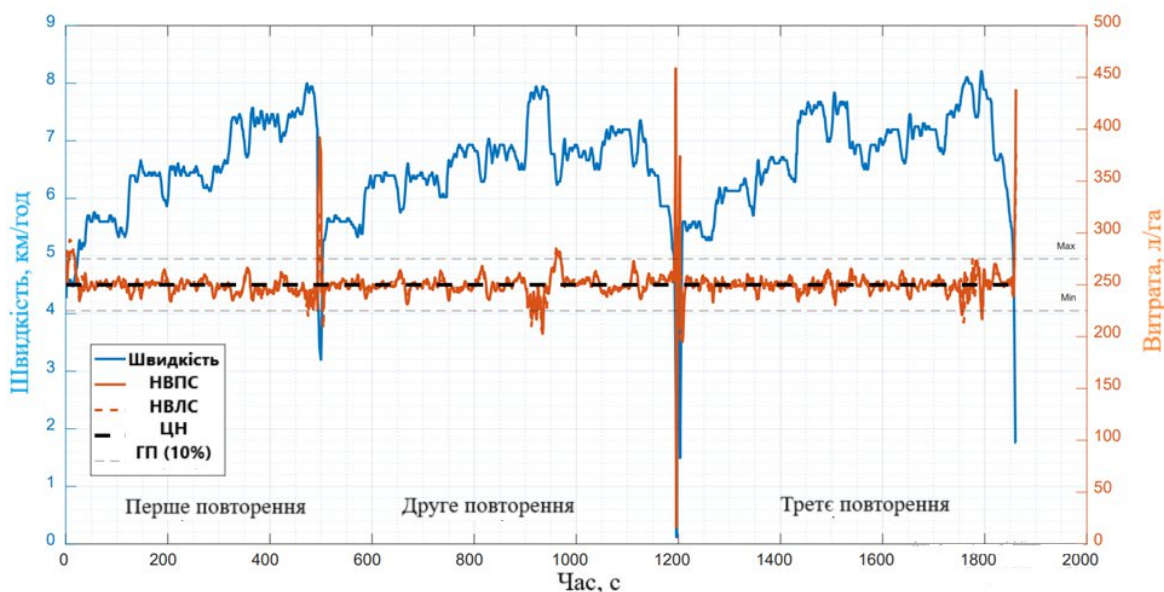


Рис. 7 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (250 л/га)

На рисунку 8 представлено графічне відображення фактичної норми внесення, яка відповідає змінним показникам швидкості при цільовій нормі 300 л/год. Протягом цього етапу випробувань швидкість руху змінювалася в межах від 4,90 до 8,69 км/год. Загальна тривалість даного періоду становила 2168 с, при цьому фактична норма внесення виходила за межі допустимої похибки протягом 53 с. Аналіз показав, що абсолютне середнє значення відхилення внесення становило 2,51%.

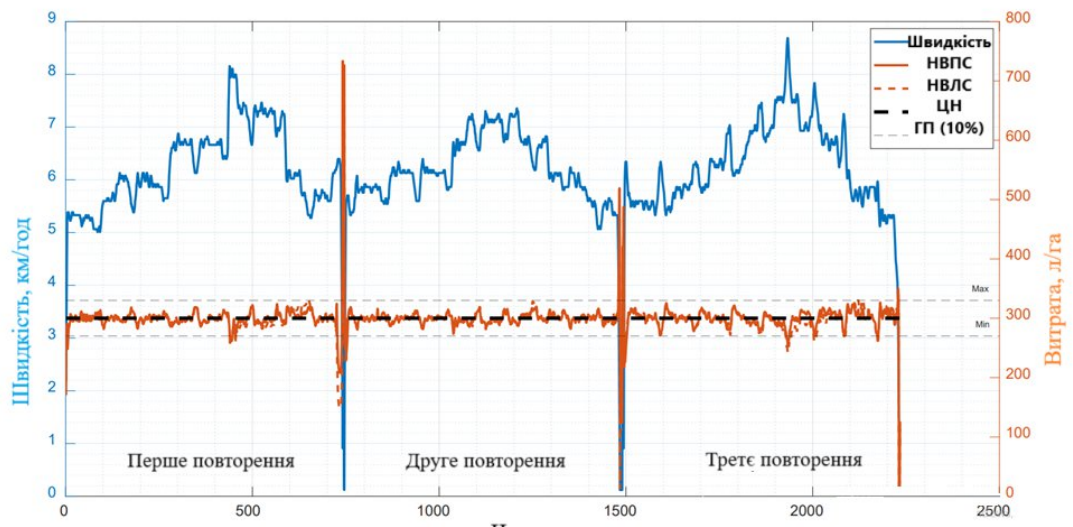
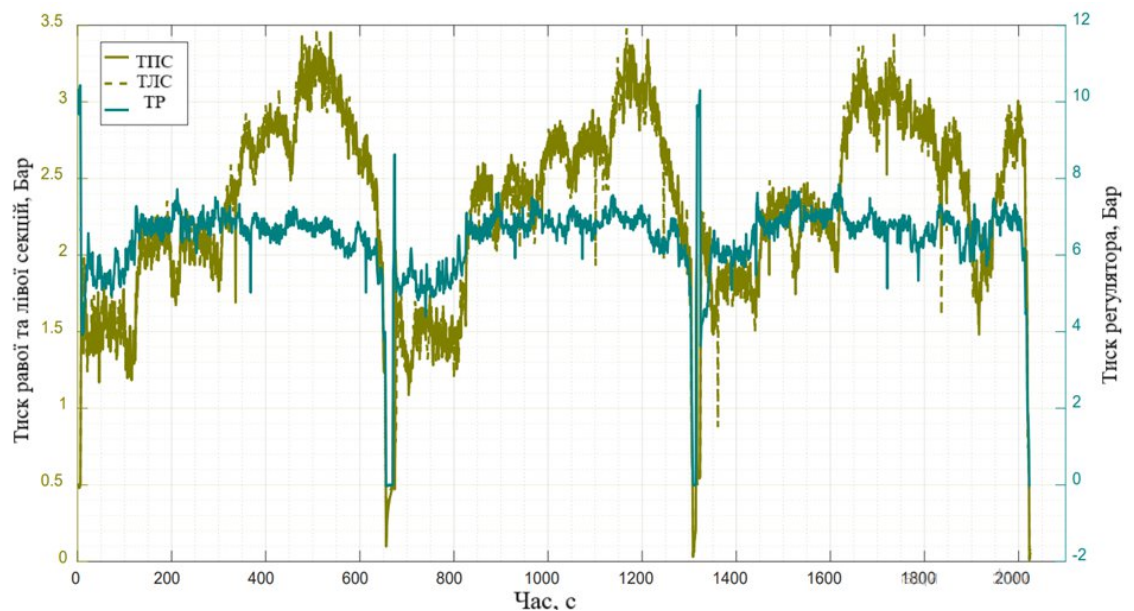


Рис. 8 - Швидкість порівняно з фактичною нормою внесення (300 л/га)

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

На рисунку 9 показано показники тиску регулятора, тиску в правій секції штанги (ТПС) та тиску в лівій секції штанги (ТЛС) для встановленої норми внесення 200 л/га. Протягом всього процесу роботи тиск регулятора (ТР) залишався відносно стабільним у межах приблизно 6 – 7 бар, тоді як тиск у секціях штанги демонстрував коливання від 1,5 до 3,5 бар залежно від змін швидкості руху та, відповідно, обсягу витрати рідини. Слід зазначити, що точне регулювання тиску рідини на виході з насоса перед її подачею на пропорційні



клапани суттєво підвищувало загальну стабільність роботи системи.

На рисунку 10 представлено залежність між швидкістю відкриття пропорційних клапанів (ШВПКПС та ШВПКЛС) і показниками швидкості та витрати рідини в правій і лівій частинах штанги (ВПС і ВЛС). Ліва вісь ординат ілюструє швидкість пересування трактора та швидкість потоку рідини в секціях штанги, тоді як права вісь відображає темп відкриття клапанів секцій штанги. Аналіз отриманих даних свідчить про те, що пропорційні клапани ефективно регулюють потік рідини, оперативно реагуючи на коливання швидкості.

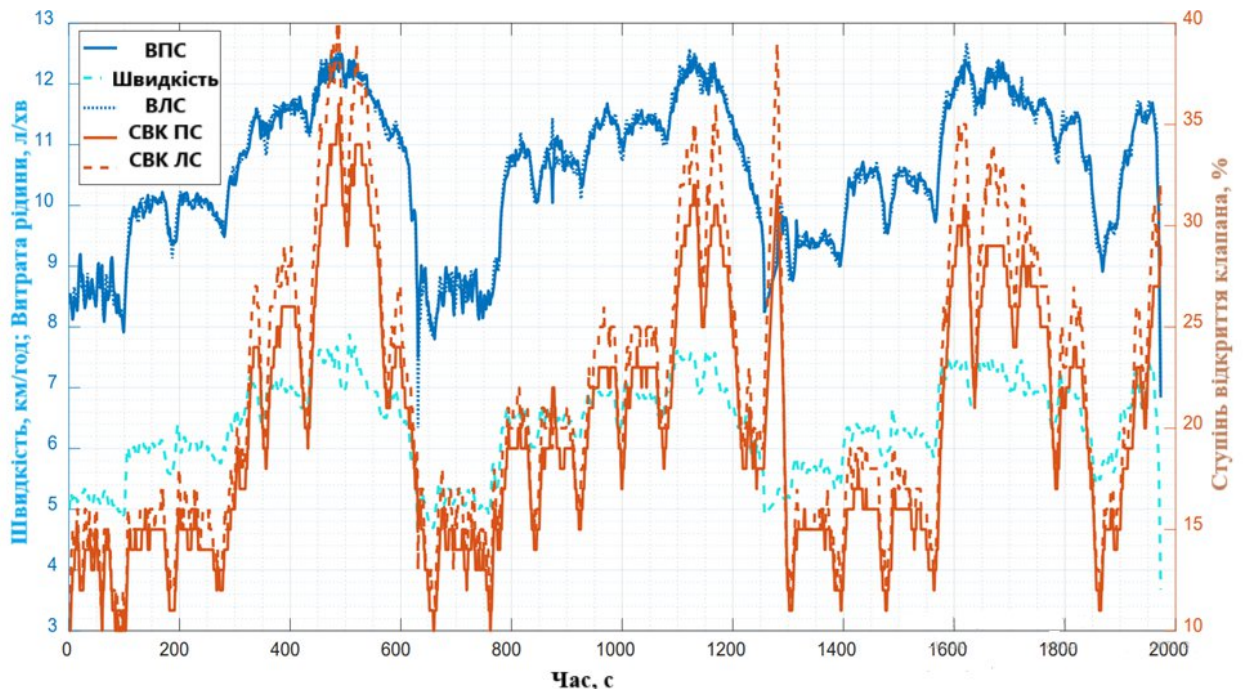


Рисунок 10 - Витрата рідини і швидкість відкриття пропорційного клапана (200 л/га)

Кореляційний аналіз, виконаний для різних цільових норм внесення (100, 150, 200, 250 та 300 л/га), надає важливу інформацію про взаємозв'язки між параметрами як у правій, так і в лівій частинах штанги. Спостережувана швидкість демонструє стійкі позитивні кореляції зі ступенем відкриття клапанів, величиною потоку та тиском, що свідчить про одночасне збільшення цих показників при зростанні норми внесення. Такі взаємозв'язки стають особливо чіткими при високих значеннях норми. Позитивні кореляції між швидкістю та обсягом потоку підкреслюють їх взаємозалежність, що вказує на те, що фактичні

параметри програми залишаються стабільними протягом усього періоду випробувань. Ступінь відкриття клапанів також показує позитивний зв'язок із величиною потоку та тиском, причому ця кореляція стає більш стабільною та вираженою при застосуванні вищих норм внесення.

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

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

Взаємозв'язок між швидкістю руху та величиною відкриття клапанів, а також залежність швидкості від інтенсивності потоку демонструють виражену взаємодію факторів у системі. Контрольна система регулює подачу рідини до сопел таким чином, щоб забезпечити рівномірне розпилення, потенційно пом'якшуючи коливання, які виникають через зміну швидкості або коефіцієнта відбиття. Аналогічно, тиск має позитивний зв'язок із швидкістю, ступенем відкриття клапанів і швидкістю потоку, що проявляється особливо при збільшенні норм внесення. Отримані дані свідчать про скоординовану поведінку всіх змінних, зокрема в умовах підвищеної інтенсивності внесення (табл. 2–6).

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

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

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

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

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

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

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

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

Відповідно до проведеного дисперсійного аналізу на основі рандомізованого повного блокового дизайну, результати для факторів, таких як секції штанги та норма внесення, демонструють суттєвий вплив на змінну швидкості. Це свідчить про те, що варіації у нормі внесення безпосередньо відображаються на

швидкісних показниках. Що стосується змінної СВК, аналіз дисперсії, який оцінював взаємодію між секціями штанги та різними нормами внесення щодо СВК, показав значущі коливання цієї змінної. Такий результат підкреслює, що СВК може значно відрізнятися залежно від конкретних секцій штанги та встановлених норм внесення. Для змінної швидкості потоку дисперсійне дослідження факторів секцій штанги та норм внесення також виявило виразний вплив на швидкість руху потоку. Це свідчить про помітну залежність швидкісних показників від внесеної норми. Подібно до спостережень щодо змінної величини тиску, аналіз дисперсії, проведений для секцій штанги та коефіцієнтів норми внесення, демонструє істотні коливання тиску. Це підкреслює, що зміни у нормі внесення мають значний вплив на величину тиску (Табл. 7).

Таблиця 7 – Дисперсійний аналіз для змінних

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

Результати, отримані за допомогою дисперсійного аналізу, дозволяють надати більш глибоке та деталізоване пояснення взаємозв'язків, виявлених під

час кореляційного дослідження. Наприклад, при вивченні взаємодії швидкості з реальною нормою внесення та параметрами секцій штанги було встановлено, що ці чинники суттєво впливають на швидкість руху. Аналогічним чином спостерігається, що вплив СВК, швидкості потоку та тиску пов'язаний як із параметрами перерізу штанги, так і з фактичним рівнем внесення.

Відсутність статистично значущого ефекту для секцій штанги та одночасно великий вплив фактичної норми внесення ( $F$  – статистика: 2224,353,  $p$  – значення: 0,000) свідчить про те, що саме зміни в нормі внесення мають виражений вплив на СВК, тоді як окремі секції штанги не демонструють суттєвого ефекту на ці взаємозв'язки. Дисперсійний аналіз додатково показав, що фактична норма внесення помітно впливає на швидкість потоку ( $F$  – статистика: 16 613,497,  $p$  – значення: 0,000), що підкреслює значимість контролю змін фактичної норми для регулювання швидкісних характеристик потоку. При цьому не було виявлено, що секції штанги істотно впливають на це співвідношення.

У польових умовах під час внесення пестицидів допустимий коефіцієнт помилок (відхилення фактичної норми внесення від цільової) не повинен перевищувати 10 % [15,18]. В рамках сучасних комерційних систем контролю норми внесення відзначено, що пропорційний клапан, який відповідає за регулювання швидкості потоку, має обмежену здатність точно реагувати на керуючі сигнали.

У представленому дослідженні, якщо ігнорувати початкові помилки системи, що наближалися до заданого значення на старті кожного тесту (коли відхилення становило менше 10 %), час застосування для всіх експериментів та тривалість перевищення допустимої межі помилки ( $\pm 10$  %) під час внесення становили відповідно: 1726  $\times$  49, 1810  $\times$  46, 1973  $\times$  21, 1848  $\times$  40 та 2168  $\times$

53 секунд. Діапазон змін швидкості в межах цього часу відповідно становив 5,10 – 10,23, 4,64 – 9,91, 3,68 – 7,89, 4,80 – 8,21 та 4,90 – 8,69 км/год.

Незважаючи на приблизно двократну різницю швидкостей у всіх тестах, абсолютний середній відсоток помилок внесення становив 2,81, 2,68, 2,28, 2,14 та 2,51 відповідно. У іншому дослідженні [19], проведеному за допомогою комерційної системи контролю норми внесення, відсоткові зміни фактичної норми внесення у порівнянні з цільовими значеннями були такими: 17 – 24,5, 4,9 – 13,9, 9,2 – 13,9, 3,5 – 6,6 та 5,8 – 7,9. Це дозволяє зробити висновок, що пропорційні клапани, що регулюють потік та ефективно реагують на керуючі сигнали, підтримують фактичну норму внесення близько до заданої величини навіть при її зміні.

## ВИСНОВКИ

Помилки під час обприскування стають більш помітними, коли пропорційні клапани, які відповідають за регулювання потоку рідини в обприскувачах, не здатні миттєво реагувати на команди керування. У цьому дослідженні була впроваджена замкнута система контролю, що включає витратоміри та пропорційні клапани, з метою мінімізації подібних відхилень при внесенні пестицидів польовими обприскувачами.

Штанга обприскувача була поділена на дві автономні секції — праву та ліву — кожна з яких працювала незалежно. Спостереження показали, що різниця між цими секціями була статистично незначущою, що відповідало очікуванням. Ці дані демонструють ефективність швидкодіючих пропорційних клапанів у підвищенні продуктивності та гнучкості роботи обприскувальних систем у сільському господарстві.

Зі збільшенням швидкості трактора швидкість відкриття клапанів також підвищується, що наближає фактичний рівень внесення до запланованого. Коли швидкість транспортного засобу досягає певного значення, система успішно підтримує контроль над фактичною нормою внесення. Раптові зміни швидкості, як збільшення, так і зменшення, тимчасово можуть виводити норму внесення за допустимі межі; проте встановлено, що показники швидко повертаються до прийнятних значень. Незважаючи на штучно створені коливання швидкості у всіх проведених тестах, враховуючи, що у звичайних умовах швидкість руху змінюється більш плавно, система демонструє здатність підтримувати відхилення від норми у допустимих межах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: [https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide\\_to\\_NASS\\_Surveys/Chemical\\_Use/](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.
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>.