

**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 факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення засобів захисту рослин»

Виконав:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Юрій ЛАЗЬКО  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

\_\_\_\_\_ СТЗ 2402-2М

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Михайло ШУЛЯК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_ (підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

## АНОТАЦІЯ

**Лазько Юрій Олегович**

Дослідження факторів, що впливають на показники якості диференційованого внесення засобів захисту рослин.

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 46 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 5 таблиць, 5 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Було проведено ґрунтовне дослідження, метою якого стало порівняння та поглиблена оцінка ефективності й продуктивності двох різних систем керування потоком робочої рідини: традиційного регулятора норми (РН) та системи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Порівняння здійснювали на обприскувачі під час моделювання різноманітних сценаріїв застосування, що дозволило відтворити умови, максимально наближені до реальних польових ситуацій. Для цього була спеціально розроблена та налаштована система збору, контролю й реєстрації даних, яка забезпечувала безперервний моніторинг потоку форсунок і тиску в магістралі штанги обприскувача в режимі реального часу, що суттєво підвищило точність та інформативність експерименту.

У межах першого експериментального етапу проводили вимірювання часу відгуку систем на досягнення різних заданих значень норми внесення у режимах однодозових станів (вмикання/вимикання). Тести виконували за різних імітованих швидкостей руху агрегату, що дозволило оцінити роботу систем у динамічних режимах. Другий експериментальний етап був спрямований на дослідження часу відгуку системи за умов зміни норм внесення у сценаріях диференційованого (змінного) застосування. У цьому випадку системи тестували при переходах між різними попередньо

визначеними величинами цільових норм під час роботи на різних змодельованих швидкостях руху.

За результатами всіх досліджуваних сценаріїв було встановлено, що система ШІМ стабільно демонструє значно кращі показники, ніж система РН, з точки зору швидкості відгуку та здатності підтримувати задану норму внесення. Зокрема, у режимах сталих норм внесення система ШІМ забезпечувала суттєво менший середній час досягнення та стабілізації заданої норми порівняно з традиційною системою РН. Аналогічна картина спостерігалася і в режимах зі змінними нормами: система ШІМ послідовно показувала коротший час переходу між нормами, а також швидше стабілізувала внесення після зміни налаштувань, ніж система РН. Це свідчить про її вищу точність, оперативність та потенційну ефективність для сучасних технологій точного землеробства.

**Ключові слова:** обприскування, якість, норма внесення, пестициди, технологія змінних норм.

## ABSTRACT

**Lazko Yuriy Olehovych**

Study of factors affecting the quality indicators of differentiated application of plant protection products.

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

The final qualification work is presented on 46 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 5 tables, 5 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

A thorough study was conducted, the purpose of which was to compare and in-depth assess the efficiency and productivity of two different working fluid flow control systems: a traditional rate controller (RN) and a pulse-width modulation (PWM) system. The comparison was carried out on a sprayer during the simulation

of various application scenarios, which allowed to recreate conditions that are as close as possible to real field situations. For this purpose, a data collection, control and recording system was specially developed and configured, which provided continuous monitoring of the nozzle flow and pressure in the sprayer boom line in real time, which significantly increased the accuracy and informativeness of the experiment.

Within the first experimental stage, the response time of the systems was measured to achieve different set values of the application rate in single-dose modes (on/off). The tests were performed at different simulated speeds of the unit, which allowed evaluating the operation of the systems in dynamic modes. The second experimental stage was aimed at studying the response time of the system under conditions of changing application rates in scenarios of differentiated (variable) application. In this case, the systems were tested when switching between different predefined target rates while operating at different simulated speeds.

According to the results of all the scenarios studied, it was found that the PWM system consistently demonstrates significantly better performance than the RN system in terms of response speed and ability to maintain the set application rate. In particular, in constant rate modes, the PWM system provided a significantly shorter average time to reach and stabilize the set rate compared to the traditional RN system. A similar pattern was observed in modes with variable rates: the PWM system consistently showed a shorter transition time between rates, and also stabilized the application faster after changing the settings than the RN system. This indicates its higher accuracy, efficiency and potential effectiveness for modern precision agriculture technologies.

**Keywords:** spraying, quality, application rate, pesticides, variable rate technology.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	10
1.1 Фактори, що впливають на показники якості обприскування .....	10
1.2 Застосування змінних норм внесення при обприскуванні.....	14
1.3 Аналіз досліджень систем керування обприскуванням.....	16
Розділ 2. Обладнання та методика дослідження .....	22
2.1 Обладнання для обприскування .....	22
2.2 Прилади та збір даних .....	24
2.3 Дизайн дослідження та збір даних.....	24
2.4 Аналіз даних.....	28
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз.....	30
3.1 Тести з сталою нормою внесення (СТВ) .....	30
3.2 Тестування обприскування зі змінними нормами внесення (ЗНВ)...	34
3.3 Рекомендації за результатами дослідження.....	39
Висновки.....	42
Список використаних джерел.....	44

## **ВСТУП**

### **1. Актуальність теми**

Підвищення точності технологічних операцій є ключовою умовою розвитку сучасного агровиробництва. Внесення засобів захисту рослин вимагає високої стабільності норми та мінімальних втрат робочої рідини, особливо в умовах інтеграції технологій точного землеробства. Диференційоване внесення (ЗНВ) дозволяє адаптувати норму до просторової неоднорідності поля, проте його ефективність значною мірою залежить від роботи систем керування потоком. Порівняння можливостей традиційних регуляторів норми та сучасних систем широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) є актуальним завданням, оскільки від їхньої швидкодії та точності залежить якість обприскування та економічність технології.

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

Наукові дослідження підтверджують істотний вплив технічних і агротехнічних факторів на якість обприскування, рівномірність розподілу робочої рідини та стабільність дотримання норми. Сучасні праці присвячені можливостям ЗНВ та особливостям застосування електронних систем керування, зокрема ШІМ. Водночас недостатньо вивчено поведінку таких систем у сценаріях швидких змін норм внесення, їх час відгуку та здатність до стабілізації потоку в динамічних умовах. Це визначає потребу в додаткових експериментальних дослідженнях.

### **3. Мета дослідження**

Метою дослідження є визначення факторів, що впливають на якість диференційованого внесення засобів захисту рослин, та порівняння ефективності традиційного регулятора норми і системи ШІМ.

### **4. Об'єкт дослідження**

Процес внесення засобів захисту рослин обприскувальними агрегатами.

### **5. Предмет дослідження**

Показники роботи систем керування потоком робочої рідини за різних режимів внесення та чинники, що впливають на їх точність і швидкодію.

#### **6. Завдання дослідження**

- дослідити фактори, що визначають якість обприскування та можливості ЗНВ;
- охарактеризувати роботу систем РН і ШІМ;
- провести експериментальні тести у режимах сталих і змінних норм внесення;
- виконати аналіз отриманих даних та порівняти ефективність систем;
- сформулювати практичні рекомендації щодо застосування систем керування обприскуванням.

#### **7. Методи дослідження**

Використано аналіз літературних джерел, інструментальні вимірювання тиску та витрати, експериментальні тести, статистичні методи обробки даних та графічну інтерпретацію результатів.

#### **8. Структура та обсяг роботи**

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку джерел та додатків. Загальний обсяг — 46 сторінок, містить 5 таблиць, 5 рисунків, 2 додатки та 25 джерел.

# 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Фактори, що впливають на показники якості обприскування

Обприскування виступає однією з ключових агротехнічних операцій, оскільки значною мірою визначає результативність системи захисту посівів і раціональність застосування хімічних препаратів. Рівень якості цього процесу формується під впливом широкого спектра чинників, які зазвичай класифікують як технічні, агрономічні, метеорологічні та організаційні. Для повного розуміння їх ролі доцільно проаналізувати кожен групу окремо.

Тип застосовуваного обприскувача разом із його справністю відіграють першорядну роль. Конструктивні відмінності різних видів машин відображаються на ступені подрібнення робочої рідини, рівномірності розподілу крапель і можливості точного регулювання витрат. Будь-які технічні дефекти, наприклад, забруднення отворів форсунок або нестабільність тиску в системі, призводять до суттєвого погіршення кінцевого результату.

Розмір утворюваних крапель та рівномірність покриття напряму залежать від характеристик обраних форсунок. Насадки, що утворюють дрібнодисперсну аерозоль, забезпечують більш ретельне та тонке нанесення рідини на поверхню рослин, проте водночас сильно підвищують ймовірність знесення обприскуваного розчину під дією вітру. Параметри краплеутворення є одним із найважливіших елементів технології внесення рідких препаратів, оскільки саме вони визначають рівень контакту активної речовини з рослинним покривом, ступінь проникнення у листові тканини, а також величину втрат через випаровування або механічний знос.

Краплі великого діаметра мають більшу масу, завдяки чому менше підхоплюються потоками повітря і осідають переважно на заплановані ділянки обробки. Це допомагає скорочувати обсяги речовин, що розсіюються у навколишнє середовище. Утім, збільшення розміру може призводити до неоднорідного покриття, особливо на культурах зі складною будовою листової поверхні, де рідина не здатна повністю проникнути в усі

важкодоступні місця. Разом з тим, масивні краплі повільніше випаровуються, що набуває особливого значення при високих температурах та низькій вологості повітря.

Дрібні краплі, навпаки, утворюють значно рівномірнішу плівку на оброблюваних рослинах, що критично важливо для ефективного пригнічення розвитку хвороб і шкідників, які часто локалізуються у частинах рослин, недоступних великим часткам розчину. Однак легкість дрібних крапель робить їх дуже чутливими до вітрових потоків, що може призвести до знесення на інші території та відповідного падіння продуктивності обробки. Окрім того, прискорене випаровування спричиняє менший відсоток активних компонентів, які фактично потрапляють на поверхню рослин.

Оптимальні параметри краплеутворення визначаються сукупністю чинників: властивостями використовуваного препарату, біологічними особливостями вирощуваної культури, умовами навколишнього середовища та характеристиками машини для внесення засобів захисту рослин. Наприклад, для системних засобів, що поглинаються листовою поверхнею та транспортуються по рослинних тканинах, зазвичай надають перевагу меншим за розміром краплям. Натомість контактні препарати, які залишаються на зовнішній частині рослинного організму та проявляють ефективність саме при якісному покритті листка, частіше потребують формування середніх або більших крапель для отримання належного результату.

Кліматичні чинники, такі як пориви вітру, температурний режим та рівень вологості повітря, суттєво впливають на ухвалення рішення щодо оптимального спектра крапель. У ситуаціях зі значною швидкістю руху повітря доцільніше застосовувати крупні краплі, які мають менший ризик знесення на сусідні поля або поза межі ділянки. У спекотну пору, навпаки, потрібно звертати увагу на ймовірність прискореного випаровування надто дрібних краплин, що може зменшити кількість діючої речовини, яка дійде до цільового об'єкта. Не менш важливі технічні параметри обприскувального обладнання, зокрема конструкція розпилювачів, калібр форсунок та режим

роботи системи, адже саме вони визначають кінцеві характеристики крапельного потоку.

Глибоке розуміння ролі розміру крапель у технології внесення засобів захисту рослин дає можливість агровиробникам оптимально налаштовувати техніку, підбираючи режими роботи, що забезпечують найвищу продуктивність і точність обробки. Застосування інноваційних технічних рішень, таких як системи контролю спектра крапель або інтелектуальні автоматизовані розпилювачі, дозволяє підвищити рівномірність покриття, зменшити витрати препаратів, а також мінімізувати ризики небажаного впливу на довкілля, людей і корисну фауну.

Надмірно високі значення робочого тиску призводять до формування надто малих частинок рідини, які легко підхоплюються потоками повітря, а надто низькі параметри можуть спричиняти нерівномірність внесення та зниження ефективності обробки. Крім того, швидкість руху обприскувача визначає рівномірність і повноту покриття рослин: надто швидкий проїзд може викликати небажані пропуски, тоді як надмірне уповільнення веде до збільшення витрат робочого розчину та підвищення ризику його стікання з листової поверхні.

Також потрібно враховувати вид культури та її фазу розвитку. Різні рослинні угруповання формують неоднакову конфігурацію листя, тому відмінності в густоті стояння, висоті та будові рослин визначають умови проникнення препарату у внутрішні яруси. Наприклад, щільні посіви культур із розвиненим листовим апаратом потребують збільшених норм витрати робочої рідини для досягнення достатнього покриття прихованих частин рослини.

Густі та надмірно розвинені посіви вимагають значно точнішого регулювання параметрів обприскувача, щоб забезпечити максимально рівномірне нанесення робочого розчину на всю листову поверхню. Під час вибору засобу захисту рослин, його концентрації та кількості рідини для

внесення необхідно враховувати специфіку культур, шкідливих об'єктів та конкретні умови проведення технологічної операції.

Сильні пориви вітру можуть спричиняти перенесення крапель препарату далеко за межі оброблюваного поля. Це різко знижує результативність роботи і створює небезпеку неконтрольованого забруднення навколишніх територій та чутливих екосистем. Додатково високі температури повітря в поєднанні з низькою відносною вологістю сприяють швидкому випаровуванню дрібнодисперсних краплин ще до їх контакту з поверхнею культур. У більшості випадків найкращі температурні умови для внесення препаратів знаходяться в межах 15–25 °С. Якщо ж обробка здійснюється під час дощу або незабаром після опадів, захисна речовина легко змивається і її ефективність різко падає.

Найбільш доцільно проводити обприскування у ранні ранкові години або ввечері, коли надворі прохолодніше, а рівень вологості вищий. Це допомагає мінімізувати втрати рідини через випаровування та підвищує ймовірність її швидкого поглинання рослинами. Надзвичайно важливо заздалегідь планувати таку роботу: аналізувати метеорологічні прогнози, враховувати фазу росту культури, рівномірність розвитку посівів та можливі ризики. Регулярні перевірки технічного стану агрегатів, а також постійний контроль результатів внесення препаратів є необхідною умовою отримання стабільно високої якості обробки.

Не менш важливим аспектом є властивості робочої рідини. Використання занадто жорсткої або забрудненої домішками води здатне істотно послабити дію хімічних засобів. Під час приготування бакових сумішей потрібно враховувати їхню хімічну сумісність, щоб запобігти утворенню небажаних осадів, спіненню чи зниженню біологічної активності компонентів.

Результативність обприскування формується під впливом широкого комплексу чинників, тісно взаємопов'язаних між собою. Тільки системний підхід — вибір сучасного обладнання, урахування агротехнічних та погодних

умов, належна організація робіт і контроль правильності виконання — здатен забезпечити максимально ефективно використання засобів захисту, підвищити врожайність та водночас зменшити витрати на препарати.

## **1.2 Застосування змінних норм внесення при обприскуванні**

Використання технології варіативного внесення препаратів під час обприскування сьогодні належить до інноваційних і водночас стратегічно важливих підходів у сучасному землеробстві. Такий метод дає можливість значно раціональніше застосовувати агроресурси, забезпечуючи водночас економію засобів захисту рослин, добрив та інших матеріалів, а також сприяючи стабільному підвищенню продуктивності культур. У центрі цього підходу закладено принцип адаптації кількості внесених речовин до конкретних агрономічних потреб окремих зон поля. Завдяки цьому вдається помітно знизити можливий негативний вплив агрохімікатів на довкілля та здоров'я екосистем.

Основою концепції змінних норм внесення є використання високоточних систем агромоніторингу: супутникової навігації GPS, різних типів сенсорів, безпілотних літальних апаратів та інших інструментів контролю стану агроценозів. Інформація про розвиток рослин, доступність вологи, щільність бур'янів, фізико-хімічні властивості ґрунтів та низку інших показників збирається автоматизованими засобами, після чого проходить глибоку аналітичну обробку спеціальними програмними модулями. На основі цих обчислень формуються електронні карти-завдання, які пізніше використовуються для управління обприскувальними агрегатами або іншими машинами під час виконання технологічних операцій.

Однією з ключових переваг означеної технології вважається вагоме скорочення витрат на хімічні препарати для захисту посівів. Завдяки максимально точній подачі речовини робочий розчин переноситься виключно на проблемні ділянки, і саме в тій кількості, яка є необхідною для досягнення бажаного ефекту. Така практика має надзвичайне значення у період зростання

вартості агрохімії. Додатково коректне дозування допомагає зменшити ризик появи стійких рас шкідників чи патогенів, оскільки обмеження надмірного застосування препаратів сприяє збереженню їхньої довготривалої ефективності.

Не менш важливим аргументом на користь варіативного внесення є екологічна відповідальність. Зменшення неконтрольованого надлишку хімічних засобів сприяє збереженню природного різноманіття, а також знижує рівень забруднення води, повітря та ґрунтів. Такий підхід гармонійно відображає цілі сталого розвитку, які все активніше інтегруються у світову аграрну практику та нормативне регулювання.

Крім того, сучасні системи внесення дозволяють значно підвищити точність виконання агротехнічних процесів. Обприскувачі нового покоління, оснащені автоматичними засобами керування, здатні працювати з точністю до декількох сантиметрів, уникаючи небажаних накладень або пропусків. Подібна точність істотно підвищує якість обробки та загальну результативність виробництва.

Водночас впровадження подібних рішень супроводжується певними труднощами. Однією з найбільших є досить висока ціна обладнання та ПЗ, необхідного для повноцінної роботи системи. Також важливою умовою успіху є наявність фахівців, які володіють цифровими компетенціями й уміють працювати із сучасними інформаційними платформами. Проте з розвитком технологій, розширенням ринку та поступовим здешевленням обладнання ці бар'єри стають менш суттєвими й поступово долаються.

Отже, варіювання норми внесення препаратів при обприскуванні можна розглядати як один із найперспективніших напрямів розвитку цифрового і точного землеробства. Воно допомагає оптимізувати витрати, зменшити екологічні ризики, підвищити результативність агровиробництва та ефективність використання ресурсів. Враховуючи посилення вимог суспільства до екологічності і сталого розвитку, ця технологія має всі

передумови для того, щоб стати невід'ємним елементом сучасної системи ведення агробізнесу.

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

У теперішніх умовах аграрна галузь значною мірою спирається на використання хімічних засобів захисту рослин, адже вони дозволяють отримувати більші врожаї та забезпечити продовольством і сировиною постійно зростаючу кількість населення планети. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), у 2022 році в сільському господарстві світу було витрачено приблизно 3,7 млн тонн активних компонентів пестицидів, причому лише Сполучені Штати використали близько 1,89 млн тонн цих речовин [1]. Хоча все більше фермерських господарств протягом останніх десятиліть переходять на технології природозберігаючого землеробства, що забезпечують зниження ерозії ґрунтів, підтримання високої родючості та зменшення їх ущільнення [2], кількість обробок у таких системах, особливо при застосуванні технології прямого посіву (no-till), суттєво зростає. Це, своєю чергою, підвищує ризик помилок під час внесення пестицидів і збільшує можливість їх нецільового потрапляння [3,4]. Відомо, що понад 45% агрохімічних препаратів не потрапляють у призначену зону дії, а осідають у навколишньому середовищі або ж проникають у водойми й підземні водоносні горизонти, що несе додаткові загрози екосистемам [5–7].

За оцінками експертів, фінансові втрати та витрати, пов'язані з впливом пестицидів у США, щорічно сягають майже 2 млрд доларів. Постійне зростання масштабів їх використання і, як результат, часті випадки помилкового обприскування формують серйозну стурбованість суспільства щодо негативних наслідків для здоров'я людей і довкілля [8]. Протягом останніх десяти років наукові дослідження були спрямовані на вдосконалення технологій внесення агрохімікатів з метою обмеження їх шкідливої дії. Це охоплює ширше впровадження методів і технічних рішень точного

землеробства, що дозволяють підвищити точність обприскування та скоротити перевитрати препаратів. Зокрема, на сучасних обприскувачах застосовують автоматичні системи керування секціями (ASC), обладнання для стабільного дотримання норми внесення, автоматичні механізми регулювання висоти штанги, технології індивідуального контролю розпилувачів, а також широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), які суттєво покращують результативність застосування засобів захисту рослин [3,8–11].

Сьогодні аграрна галузь дедалі активніше впроваджує інноваційні технологічні рішення, спрямовані на підвищення продуктивності та забезпечення високої точності під час виконання технологічних операцій у рослинництві. Серед численних процесів, що здійснюються в полі, одне з провідних місць займає внесення засобів захисту рослин і добрив шляхом обприскування посівів. Використання сучасних систем керування цим процесом стало важливим етапом удосконалення технологій обробки культур і раціонального використання агрохімікатів.

Такі системи забезпечують автоматизацію та контроль над роботою обприскувачів, що сприяє рівномірному нанесенню робочого розчину, скороченню витрат препаратів, а також зменшенню негативного впливу на екосистему. Функціонування подібних комплексів базується на алгоритмах, які враховують велику кількість змінних: швидкість руху агрегату, показники тиску в системі, фактичну витрату робочої рідини, а також поточні умови навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідну точність внесення, що є ключовою передумовою стабільної врожайності.

Однією з базових і широко поширених можливостей є керування окремими секціями штанги. Завдяки цьому механізму відбувається автоматичне відключення частин обприскувача, коли вони проходять через уже оброблені зони поля. Це сприяє економії засобів, одночасно мінімізуючи ризик надмірного внесення, яке здатне викликати стрес у рослин або інші небажані наслідки.

Не менш важливим елементом вважається технологія диференційованого внесення. Вона використовує просторові дані, отримані з геоінформаційних систем, супутникових платформ або безпілотних літальних апаратів, що дає змогу визначити ділянки, які потребують різного рівня обробки. У результаті кожен фрагмент поля отримує саме ту кількість препарату, яка відповідає його поточному стану та потребам культур.

Крім того, інтеграція систем керування з GPS-навігацією гарантує точне відстеження маршруту техніки. Це відіграє особливо важливу роль у темний період доби або в умовах слабкої видимості, коли оператору важко контролювати роботу візуально. Автоматизовані рішення зменшують вплив людського фактора та значно скорочують ймовірність виникнення помилок під час виконання польових робіт.

Помітним є і позитивний економічний результат використання таких систем. Зниження витрат на пестициди та добрива, без втрати їх ефективності, дозволяє зменшити собівартість вирощування продукції. Оптимізоване управління технікою також скорочує витрати пального та зносу обладнання, оскільки робочі операції виконуються з більшою точністю й ефективністю.

Додатковою перевагою є покращення екологічних показників виробництва. Обмеження надмірного використання хімічних речовин сприяє збереженню природних ресурсів, знижує ризики забруднення води та ґрунтів, а також відповідає вимогам сталого розвитку аграрної сфери при дотриманні екологічних норм і стандартів.

Таким чином, упровадження автоматизованих систем контролю обприскування сприяє підвищенню точності, економічності та результативності виконання агротехнічних операцій, зберігаючи водночас природне середовище та забезпечуючи сталий розвиток сільськогосподарського виробництва.

Серед сучасних технологій обприскування, зокрема секційного керування (ASC) та управління окремими форсунками, все більшої популярності набувають системи, які дозволяють суттєво зменшити кількість

пропусків і перекриттів під час внесення препаратів. Контролери дози разом із ШІМ-регуляторами забезпечують стабільну норму внесення навіть за умови змін швидкості руху залежно від характеристик ділянки [11–14]. Актуальні моделі обприскувачів, обладнані індивідуальним управлінням соплами та технологією широтно-імпульсної модуляції, реалізують можливість точного дозування згідно зі заздалегідь створеними картами-завданнями [12,15]. Оскільки передові рішення у сфері розпилення стають типовими для більшості сучасної техніки, що використовується для внесення пестицидів, а інтерес до технологій локального й диференційованого внесення (VR) постійно зростає, наукові дослідження нині все частіше спрямовані на аналіз їх ефективності під час роботи в реальних польових умовах [6,17].

Ряд науковців займалися аналізом результативності використання систем регулювання подачі робочої рідини на польових обприскувачах [5,14,18]. Опоряджені відповідними механізмами керування потоком машини, наприклад регуляторами норми внесення, змушені змінювати тиск у комунікаціях для компенсації варіацій швидкості пересування агрегату; втім, такі коливання тиску здатні провокувати нерівномірність формування факела розпилення та зміну розподілу розмірів крапель [18]. Попередні експерименти довели, що відхилення фактичної норми від заданого показника на величину понад  $\pm 10\%$  може спостерігатися більш ніж на половині площі обробки при роботі великих самохідних обприскувачів, оснащених регуляторами витрати [17,20].

На противагу цьому, системи, що функціонують на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), досягають потрібної норми внесення не за рахунок зміни тиску, а шляхом регулювання тривалості імпульсу — робочого циклу [20]. Під робочим циклом слід розуміти період, протягом якого електромагнітний клапан перебуває у відкритому стані, а форсунка подає рідину безперервним потоком. Важливою перевагою ШІМ є стабільність параметрів якості розпилення, зокрема спектра діаметрів крапель [9,16], у широкому інтервалі робочого циклу — приблизно від 40% до 100% [5,17].

Крім того, дана технологія має ще одну корисну функцію — компенсацію на поворотах, що надає помітну перевагу у порівнянні з традиційними потоковими системами при обробці ділянок зі значною кількістю криволінійних маршрутів [13]. Хоча і ШІМ-системи можуть демонструвати певну затримку у досягненні необхідної норми внесення [5], у систем на основі контролю тиску ця затримка, як правило, істотно більша через значні перепади тиску при змінюванні швидкості руху машини. Додатково, на якість роботи технологій управління подачею впливають калібрування контролера, допустимі швидкісні режими, тип застосованих розпилювачів, а також умови рельєфу та конфігурація поля [5,20].

З огляду на постійне зростання вартості засобів захисту рослин і посилення вимог щодо запобігання їх неконтрольованому переносу, усе актуальнішим стає впровадження методів, спрямованих на підвищення точності та економічності хімічного захисту культур. Аналогічно до досвіду керування внесенням добрив, технології змінної норми (VR) для живлення культур уже давно визнані ефективними в точному землеробстві завдяки можливості оптимізованого розподілу ресурсів із врахуванням просторової неоднорідності поля [6,17,22].

Суттєвий прогрес у сфері цифрових рішень для аграрного виробництва та розвитку систем керування інформацією значно спростив створення карт диференційованого внесення за ділянками. Високопродуктивні наземні та повітряні сенсорні платформи докорінно змінили процес швидкого отримання просторово-часових даних із високою деталізацією та подальшим доступом до них для оцінювання стану посівів, їх продуктивного потенціалу або фітосанітарних ризиків [15,23,25]. Використовуючи інструменти аналітики даних і алгоритми машинного навчання, ці масиви інформації застосовуються для оперативного формування карт-завдань внесення засобів для рослин на конкретних ділянках.

Попри значні інновації у сфері технологій захисту рослин, застосування пестицидів із суцільною подачею все ще є доволі поширеним у сільському

господарстві. Однак ситуація поступово змінюється завдяки появі й комерціалізації рішень типу See & Spray від компанії J. Deere [23], що забезпечують адресне або вибіркоче обприскування. Науковці й промисловість виявляють дедалі більше зацікавлення технологіями локалізованого захисту культур, який також називають точковим або VR-застосуванням пестицидів [15]. Враховуючи стрімке поширення практик внесення, орієнтованих на особливості ділянок, вкрай важливо ретельно оцінювати можливості сучасних технологій під час реальних польових робіт.

Саме тому головним завданням проведеного дослідження стало вимірювання та зіставлення ефективності обприскування між стандартною системою регулювання подачі, що базується на контролі потоку, і новітньою ШІМ-технологією, враховуючи динаміку реакції на зміну норми внесення та часові показники адаптації системи під час польових операцій.

## 2 ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Обладнання для обприскування

У ході проведення експериментальної частини роботи було застосовано штанговий обприскувач Mule 550 виробництва Kawasaki Motors Corp (див. рис. 1). Конструкція обладнання включала штангу загальною довжиною 5,94 м, на якій було встановлено 13 форсунок. Усі сопла були розташовані з рівномірним кроком — відстань між сусідніми складала приблизно 0,46 м, що забезпечувало рівномірний розподіл робочої рідини по поверхні обробки.

Штанга була умовно поділена на три функціональні частини: ліву (LB) — вона містила п'ять форсунок; центральну (CB), де було встановлено три сопла; та праву секцію (RB) із п'ятьма аналогічними елементами. Для зручності подальших вимірювань і аналізу всі розпилювальні елементи були пронумеровані від 1 до 13 у напрямку від лівого краю до правого, що також відображено на рисунку 1.



Рис. 1 - Налаштування обприскувача та різні компоненти, що використовуються для тестування ефективності розпилення. ЛС, ЦС та ПС позначають ліву, центральну та праву секції штанги відповідно, тоді як форсунки пронумеровані від N1 до N13, починаючи зліва від штанги обприскувача.

Для створення необхідного робочого тиску в системі у конструкції обприскувача був застосований відцентровий насос (HYPRO, модель 1537), що отримував привід від бензинового двигуна Honda потужністю 3,6 кВт

(GX160, Honda Engines Group, Альфаретта, штат Джорджія, США). Робота системи контролювалася за допомогою регулятора швидкості IC35 у поєднанні з ШІМ-модулем DynaJet 7140. Додатково в комплектацію входили турбінний витратомір (модель 802) для відстеження об'ємної витрати, датчик тиску (16-05015), а також спеціальний регулювальний клапан (344BR-3F-06 CAB), що забезпечував стабільність параметрів розпилення і дозволяв точно вимірювати параметри потоку та тиск робочої рідини в магістралі системи (відповідно до зображень на рисунках 2a та 2b).

У склад ШІМ-системи додатково входили електромагнітні клапани типу 115880 e-ChemSaver, закріплені на кожному корпусі форсунок уздовж усієї робочої штанги обприскувача. Для налаштування параметрів обробки та управління процесом розпилення як у режимі регулювання норми внесення, так і під час функціонування ШІМ-модуля, застосовувався дисплей із вбудованим бортовим комп'ютером EROS 9040. Якщо спеціально не вказано інше, усі згадані вище складові частини системи є серійними комерційними продуктами компанії TeeJet® Technologies.

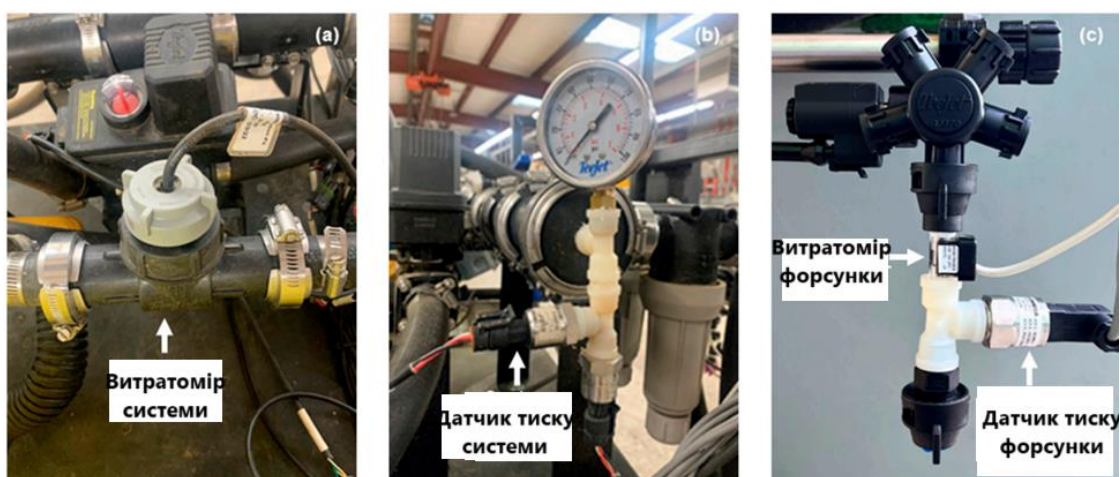


Рис. 2 - Розміщення витратоміра та датчиків тиску на системі

обприскувача. (a) Витратомір був встановлений на лінії для вимірювання швидкості потоку штанги. (b) На колекторі встановлено датчик тиску для вимірювання тиску в штанзі. (c) Витратомір високої роздільної здатності та датчик тиску були встановлені на вибраних форсунках для вимірювання швидкості потоку та тиску відповідно

## **2.2 Прилади та збір даних**

Для контролю параметрів потоку рідини та тиску під час проведення експериментів у динаміці на вибрані розпилювачі були змонтовані компактні вимірювальні пристрої: турбінний витратомір моделі BV2000TRN050B і тискомір PX119-100AI [Omega Eng. Inc., USA]. Дані прилади встановлювалися на п'яти форсунках — N2, N4, N7, N10 та N12 — у кожному з трьох відділів штанги обприскувача: лівому, центральному й правому. Витратомір забезпечував коректні вимірювання в межах 0,98–2,46 л/хв, тоді як сенсор тиску був розрахований на діапазон від 0 до 689,47 кПа. Обидва елементи вимірювальної системи монтувалися безпосередньо на трубопроводі між корпусом розпилювача та його наконечником, що наочно продемонстровано на рис. 2с.

Для запису миттєвих величин тиску в форсунках і швидкості подачі робочої рідини у реальному часі на тих самих форсунках (N2, N4, N7, N10 і N12), а також для контролю системного тиску застосовували блок збору даних NI USB-6210 DAQ, який функціонував разом із спеціально розробленим програмним забезпеченням LabView (National Instruments, США). Просторова прив'язка всіх отриманих даних здійснювалася за допомогою вбудованого приймача GPS/GNSS Reach RS+ (EMLID, Угорщина), встановленого безпосередньо на обприскувачі. Під час усіх випробувань інформація фіксувалася з частотою 10 Гц та зберігалася у форматі .xlsx для подальшої обробки і детального аналізу.

## **2.3 Дизайн дослідження та збір даних**

У даній роботі основну увагу приділено аналізу ефективності двох різних систем контролю внесення робочої рідини: механізму регулювання подачі за нормою (РН) та системи, що працює на основі широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Метою було визначення їхньої точності при досягненні встановлених значень подачі на різних імітованих швидкостях руху

обприскувача. Оцінювання проводили роздільно для кожної технології, щоб виключити взаємний вплив систем під час досліду.

У ході тестування контролера швидкості ШІМ-модуль переводили в неактивний стан (вручну встановлювали 100% робочого циклу), завдяки чому отримували оцінку виключно регулятора швидкості потоку. В аналогічний спосіб під час перевірки характеристик ШІМ-регулювання клапан контролю подачі залишали у повністю відкритому положенні, що дозволяло ШІМ-системі самостійно визначати витрату шляхом зміни заповнення імпульсу.

Оцінка точності обох систем керування здійснювалася з урахуванням двох типів ситуацій, характерних для польового внесення: (1) режим **сталої норми внесення** (СНВ), коли секції штанги вимикаються або активуються відповідно до єдиного заданого значення норми, (2) режим **змінної норми внесення** (ЗНВ), коли система повинна забезпечити різні значення витрати згідно з картою-завданням (Rx).

У першому випадку використовували факторний план досліду, що включав три варіанти цільових норм (93,5; 116,1 та 140,3 л/га) і три моделювання швидкості руху (12,9; 16,1 і 19,3 км/год).

Кожне випробування передбачало фіксацію часу, необхідного системі для досягнення та підтримання потрібної норми при вибраній швидкості руху. Комбінацію «норма + швидкість» повторювали по три рази, що сформувало загалом 27 експериментів. Кожна тестова серія тривала 60 секунд, протягом яких штанга була заповнена, а форсунки послідовно: вимкнені 15 с, увімкнені 30 с та знову вимкнені 15 с. Попередні перевірки засвідчили, що 30 секунд роботи достатньо для стабілізації параметрів у всіх досліджуваних режимах.

Для варіанту ЗНВ реалізували схему оцінювання поведінки систем при переході між трьома заданими нормами внесення (93,5; 116,1 і 140,3 л/га) за різних імітованих швидкостей (12,9; 16,1; 19,3 км/год). Було сформовано шість комбінацій переходів між нормами: 93,4→116,11→140,23; 93,45→140,3→116,21; 116,1→93,45→140,3; 116,31→140,23→93,35;

140,23→93,25→116,1; 140,23→116,21→93,25 л/га. Кожну послідовність повторювали тричі на всіх швидкостях, що дало 18 тестів.

Усі перевірки режиму змінної норми проводили протягом 121 секунд із заправленою системою: на початку 16 с форсунки вимкнені, далі 92 с поділяли на три інтервали по 32 с для кожної швидкості, після чого 15 с обприскування знову припиняли. Як і у випадку СНВ, обприскувач залишався нерухомим, а встановлення змодельованих швидкостей та цільових значень витрати здійснювалося через контролер/дисплей TeeJet® EROS.

Таблиця 1 - Інформація про різні типи форсунок, що використовуються, і тиск у системі та робочий цикл, досягнутий системами керування потоком при різних комбінаціях швидкості та швидкості під час тестування SRSS

Керуюча система	Швидкість, км/год	Цільва норма, л/га	Форсунка	Тиск, кПа	Робочий цикл, %
КН	12.9	93,5	ХРН110025	255,1	-
		116,1	ХРН11003	262-1	-
		140,3	ХРН11004	234,4	-
	16.1	93,5	ХРН11003	262,1	-
		116,1	ХРН11004	248,2	-
		140,3	ХРН11005	234,4	-
	19.3	93,5	ХРН11004	227,5	-
		116,1	ХРН11005	227-5	-
		140-3	ХРН11006	262,1	-
ШМ	12.9	93,5	ХРН11004	268,8	55
		116,1	ХРН11004	268-8	70
		140,3	ХРН11004	268,8	84
	16.1	93,5	ХРН11005	282,7	56
		116,1	ХРН11005	282,7	72
		140,3	ХРН11005	282,7	86
	19.3	93,5	АРТJ11008	365,4	58
		116,1	АРТJ11008	365,4	75
		140,3	АРТJ11008	365,4	85

Перед кожною серією дослідів система налаштовувалася на робочий тиск 413,7 кПа, що було визначено з урахуванням здатності досягнення максимальної норми внесення у 140,3 л/га та додаткового запасу у 68,9 кПа для забезпечення стабільної роботи всіх компонентів системи.

Активація процесу накопичення даних здійснювалася через переведення головного перемикача обприскувального агрегата у стан “Увімкнено (ON)”, а завершення фіксації інформації — шляхом повернення його в режим “Вимкнено (OFF)”. У цей проміжок часу система регулювання подачі робочої рідини виходила на задану цільову швидкість внесення препарату або ж виконувала перехід між різними встановленими нормами.

Для експериментальних випробувань були використані розпилювачі з кутом розпилення 110°, підібрані відповідно до технічних інструкцій і порад виробника — компанії TeeJet® Technologies.

Таблиця 2 - Інформація про різні типи сопел, тиск і робочі цикли для систем контролера швидкості (РН) і широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) під час тестування ЗНВ

Керуюча система	Швидкість, км/год	Цільова норма, л/га	Форсунка	Тиск, кпа	Робочий цикл, %
КН	12.9	93,5	ХРН110025	172,4	-
		116,1	ХРН11003	262,1	-
		140,3	ХРН11004	365,4	-
	16.1	93,5	ХРН11003	158,6	-
		116,1	ХРН11004	248,2	-
		140,3	ХРН11005	351,6	-
	19.3	93,5	ХРН11004	151,6	-
		116,1	ХРН11005	234,4	-
		140,3	ХРН11006	337,8	-
ШІМ	12.9	93,5	ХРН11004	268,9	55
		116,1	ХРН11004	268,9	70
		140,3	ХРН11004	268,9	84
	16.1	93,5	ХРН11005	282,7	56
		116,1	ХРН11005	282,7	72
		140,3	ХРН11005	282,7	86
	19.3	93,5	АРТJ11008	365,4	58
		116,1	АРТJ11008	365,4	75
		140,3	АРТJ11008	365,4	85

Детальні відомості щодо типорозмірів отворів форсунок, які застосовувалися під час оцінювання режимів зі змінною нормою внесення (ЗНВ) та сталою нормою внесення (СНВ), наведено у табл. 1 та табл. 2

відповідно, що дозволяє чітко порівняти їх характеристики в контексті проведених досліджень.

#### 2.4 Аналіз даних

З огляду на порівняно компактну довжину штанги обприскувача (0,91–1,82 м) та мінімальні втрати тиску уздовж її конструкції, результати кожного окремого випробувального проходу були агреговані для всіх трьох секцій штанги з метою подальшого статистичного аналізу. Аналогічний характер відгуку окремих частин штанги добре простежується і на графічних залежностях, наведених на рисунку 3, що підтверджує правильність такого об'єднання даних.

Для здійснення зіставлення та оцінки ефективності двох різних систем регулювання під час дослідження режиму **сталі норми внесення (СНВ)** визначали проміжок часу, необхідний форсункам для виходу на встановлену швидкість і подальшого досягнення стабільного робочого режиму (допустима похибка становила  $\pm 5\%$ ). У випробуваннях **змінної норми внесення (ЗНВ)** основну увагу акцентували на періоді, який потрібен обладнанню для переходу між заданими рівнями подачі робочого розчину (із тією ж похибкою  $\pm 5\%$ ), а також для швидкої стабілізації нової цільової норми. У подальшому ці часові параметри позначаються як **середній час стабілізації (СЧС)** для режиму СНВ і **середній час переходу та стабілізації (СЧПС)** для умов ЗНВ.

Отримані експериментальні показники були опрацьовані статистично за методом **двохфакторного дисперсійного аналізу** з використанням програмного середовища *JMPPro 16.2.0* (SAS, США). Для встановлення вірогідної різниці між середніми значеннями застосовували **t-критерій Стьюдента** з прийнятим рівнем статистичної значущості  $\alpha = 0,05$ , що дозволило провести коректне розділення варіантів дослідження.

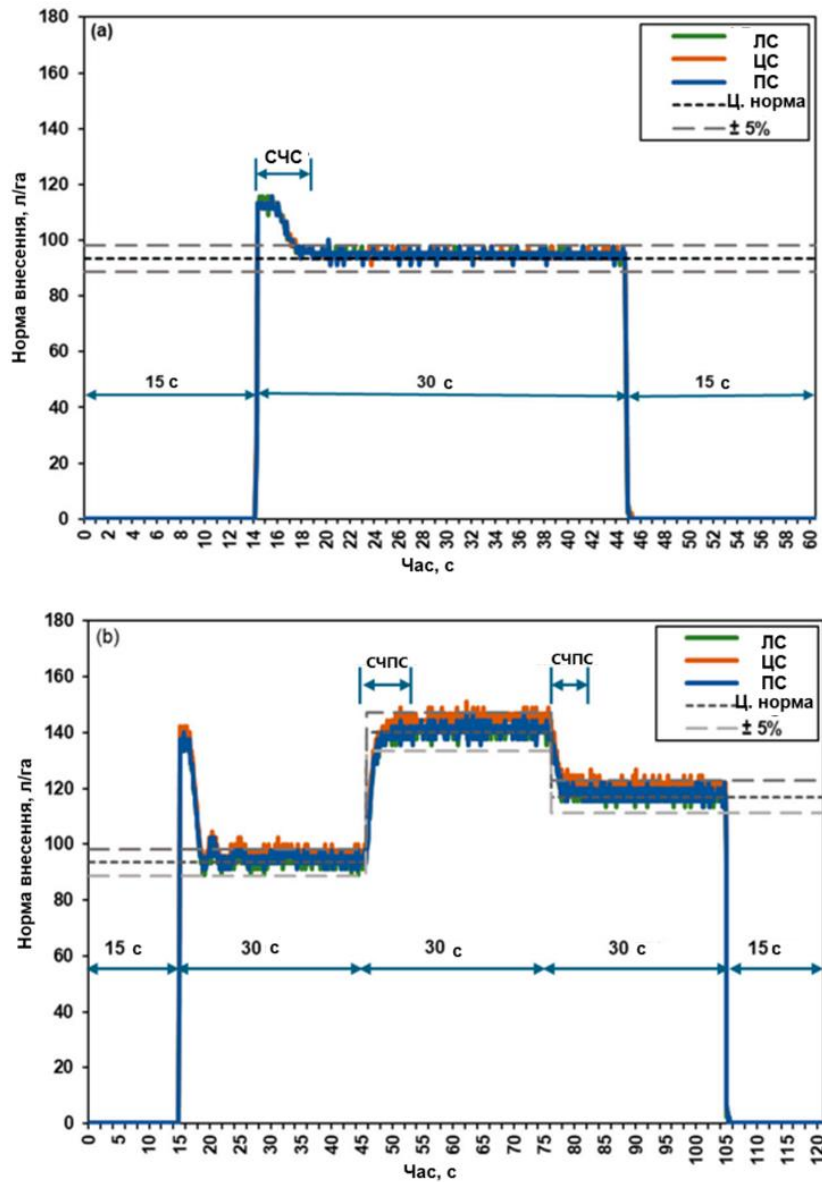


Рис. 3 - Графіки, що показують фактичну норму внесення для всіх трьох секцій штанги в порівнянні з цільовою нормою внесення для (а) випробувань на ділянці сталюю нормою внесення (СНВ) і (б) змінної норми внесення (ЗНВ)

Виміряні показники витрати рідини через сопла, виражені в літрах за хвилину, були перераховані у значення норм внесення в літрах на гектар. Отримані параметри подачі робочого розчину для кожного окремого сегмента штанги піддавалися детальному опрацюванню з метою встановлення проміжку часу, потрібного певній системі регулювання подачі (традиційне керування тиском або технологія ШІМ) для виходу на необхідну, заздалегідь задану норму внесення.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

#### 3.1 Тести з сталою нормою внесення (СТВ)

На рисунку 4 наведено графічні залежності, які демонструють порівняння фактично поданої норми внесення із заданою (цільовою) величиною для обох варіантів систем управління. Вони представлені для вибраних комбінацій встановлених норм подачі матеріалу та швидкості руху агрегату. У свою чергу, у таблиці 3 подано узагальнені статистичні показники щодо середнього проміжку часу, який потрібен кожній системі контролю для виходу на встановлене значення норми внесення та забезпечення її стабільного підтримання. Порівняння здійснювалося для декількох змодельованих швидкостей пересування, зокрема 12,7; 16,0 та 19,2 км/год.

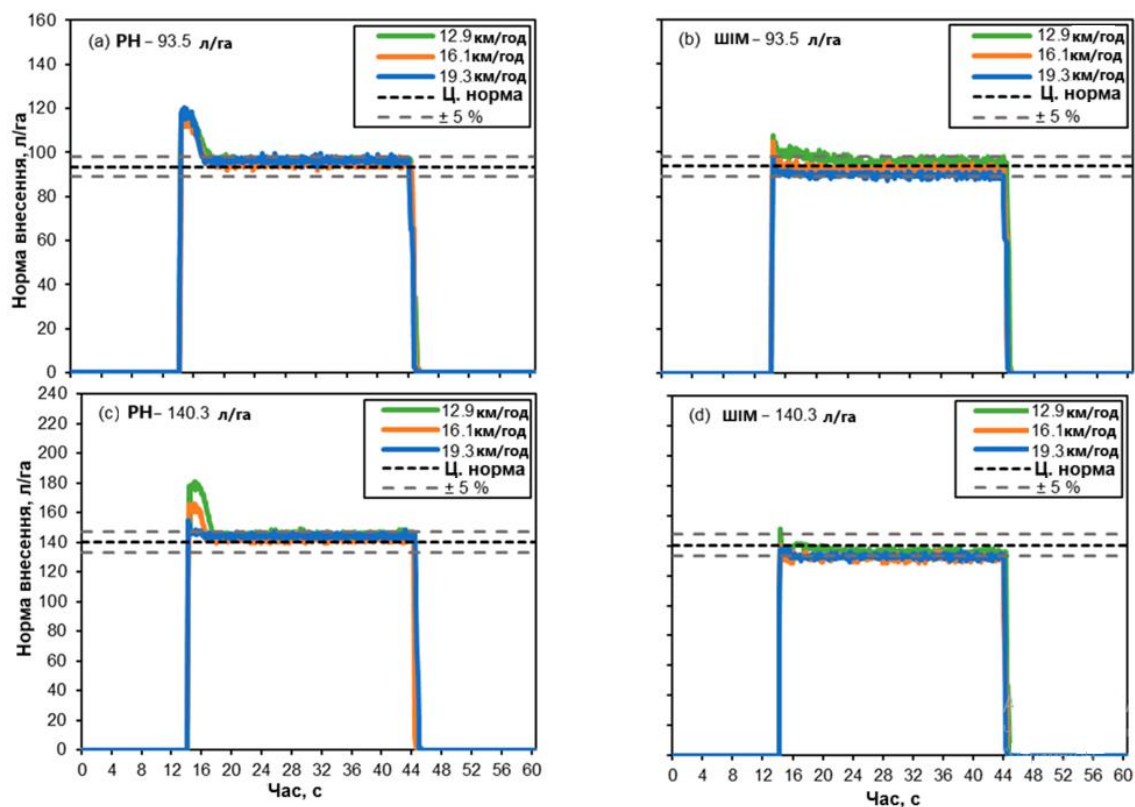


Рис. 4 - Графічне представлення фактичної норми (темні суцільні лінії) порівняно з цільовою нормою внесення (чорна пунктирна лінія) 93,5 та 140,3 л/га при різних змодельованих швидкостях для регулятора норми (РН) [(а, с) , відповідно] та системи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [(b, d, відповідно] під час тестування з сталою нормою

Відповідно до результатів, наведених у таблиці 3 та на рис. 4, можна простежити чітко виражену загальну закономірність: середній час стабілізації (СЧС), необхідний для виходу на заданий режим у системі з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), який становив приблизно 110–1350 мс, був значно коротшим порівняно з тривалістю стабілізації у системі регулювання тиском (РН), де цей показник досягав 1133–4033 мс. Така різниця демонструє значно оперативнішу реакцію системи ШІМ у процесі досягнення необхідних параметрів у всіх поєднаннях швидкостей руху та норм внесення. Сповільнення реагування, притаманне системі РН, добре помітне також за характером кривих на рис. 4а,с. Подібна поведінка є очікуваною, оскільки для досягнення встановленої норми розпилення регулятор тиску повинен змінювати значення тиску шляхом коригування позиції запірно-регулюючого обладнання [18]. Час переміщення такого клапану безпосередньо впливає на тривалість виходу системи на необхідну норму.

На противагу цьому, ШІМ-технологія базується на варіації робочого циклу, завдяки чому регулювання витрати відбувається швидше та забезпечує нижчі значення СЧС порівняно з підходом, що використовує зміну тиску [21,25,27].

Поглиблений аналіз функціонування систем, що працюють за принципами РН та ШІМ, за різних швидкісних режимів і встановлених норм, відкриває додаткові характерні риси щодо зміни середнього часу стабілізації норми. Виявлено суттєву взаємодію між факторами «тип контролю × швидкість × цільова норма» ( $p = 0,0089$ ), що подано в Таблиці 3. У випадку регулятора тиску простежувалося, що зі збільшенням швидкості руху та підвищенням норми внесення СЧС зменшувався. Особливо помітно, що час стабілізації для рівнів 93,5 і 116,1 л/га залишався подібним на кожній із швидкостей, однак для норми 140,3 л/га він виявився набагато коротшим незалежно від швидкості, що підкреслює швидше досягнення стабільності системою РН при внесенні більших обсягів робочої рідини.

Такі результати безпосередньо пояснюються необхідною величиною зміни тиску: чим меншого коригування тиску потребувала система для відповідності цільовому значенню, тим швидше вона входила у робочий режим, і навпаки. Додатково слід зазначити, що під час кожного досліду секції штанги налаштовували на тиск 413,7 кПа, тому масштаб корекції мав значення для швидкості стабілізації.

Таблиця 3 - Описова статистика для часу, необхідного системам РН і ШІМ для досягнення та стабілізації цільових норм внесення при різних змодельованих швидкостях під час тестування СНВ

Система керування	Швидкість, км/год	Цільова норма, л/га	Час, мс			
			Сер.	Min.	Max.	Ст. похибка
РН	12,9	93,5	4033	4000	4100	58
		116,1	3567	3500	3600	58
		140,3	3400	3100	3800	361
	16,1	93,5	3300	3100	3400	173
		116,1	3333	2800	4400	924
		140,3	2233	2200	2300	58
19,3	93,5	2967	2900	3100	115	
	116,1	2967	2800	3200	208	
	140,3	1133	300	2400	1115	
ШІМ	12,9	93,5	1350	1300	1400	50
		116,1	667	500	1000	289
		140,3	300	200	400	100
	16,1	93,5	467	400	500	58
		116,1	333	300	400	58
		140,3	200	200	200	0
	19,3	93,5	200	200	200	0
		116,1	167	100	200	58
		140,3	100	100	100	0

Щодо системи ШІМ, то вона демонструвала значне зниження СЧС при зростанні цільової норми з 93,5 до 140,3 л/га під час моделювання швидкості 12,9 км/год. Аналогічний тренд був помічений і на швидкостях 16,1 та 19,3 км/год, проте в цих випадках різниця не мала статистичної підтверженості ( $p > 0,05$ ), що вказує на як правило стабільні показники швидкодії при

регулюванні трьох норм внесення на цих рівнях швидкості. Натомість для РН вплив норми на СЧС виявився різним залежно від її величини: при 93,5 л/га максимальне значення СЧС зафіксовано на швидкості 12,9 км/год, тоді як на 16,1 і 19,3 км/год цей показник зменшувався й залишався близьким за величинами (табл. 3).

Варто відзначити, що при встановленій цільовій нормі внесення 116,1 л/га значення середньоквадратичного відхилення (СЧС) практично не змінювалося для всіх змодельованих робочих швидкостей. Натомість, у разі переходу до норми 140,3 л/га спостерігалось суттєве зниження цього показника зі зростанням швидкості руху з 12,9 до 19,3 км/год. Такий характер реакції системи регулювання норми (РН) чітко демонструється на рис. 4с.

Цікавим є те, що саме поєднання подачі 140,3 л/га зі швидкістю 19,3 км/год забезпечило найменше значення СЧС серед усіх досліджуваних варіантів режимів роботи системи РН. На противагу цьому, у випадку роботи системи з модуляцією ширини імпульсу (ШІМ) СЧС залишався на однаковому рівні при швидкостях 16,1 та 19,3 км/год у всьому діапазоні трьох заданих норм внесення, що ще раз свідчить про ефективний та оперативний відгук цієї системи за таких умов. Додатково можна зазначити, що при нормі 140,3 л/га система ШІМ забезпечила ідентичні значення СЧС на всіх досліджених швидкостях руху.

За цільової норми 93,5 л/га система з імпульсною модуляцією демонструвала подібний характер залежності, як і РН: найбільша величина СЧС була зафіксована при 12,9 км/год, тоді як при швидкостях 16,1 та 19,3 км/год рівні варіативності залишалися співставними (рис. 4b). Аналогічно до системи РН, і ШІМ-регулювання за комбінації норми 140,3 л/га та швидкості 19,3 км/год виявило найменший СЧС серед усіх дослідів, що підтверджується графіком на рис. 4d.

### 3.2 Тестування обприскування зі змінними нормами внесення (ЗНВ)

Під час випробування системи СНВ основна увага приділялася визначенню проміжку часу, необхідного кожному типу керування для встановлення необхідної норми внесення при стартовому запуску секції обприскувача, тобто при переході від стану повного вимкнення або нульової подачі до встановленого рівня витрати. Натомість тестування ЗНВ передбачало аналіз часу, потрібного для зміни вже встановленої цільової норми на іншу, коли робота штангового обприскувача вже триває та секції залишаються увімкненими. Отже, під час експериментів із ЗНВ розраховували середній період переходу та подальшої стабілізації норми внесення, названий СЧПС, який характеризує здатність системи оперативно змінювати та стабільно підтримувати нову цільову витрату робочої рідини.

Отримані результати наведені в таблиці 4 для двох видів регулювання — РН та ШІМ — за трьома попередньо змодельованими швидкостями руху обприскувача. Додатково на рисунку 5 ілюструються реальні частотні характеристики вибраних випробувань обох систем керування для кращого розуміння їхньої динамічної поведінки під час зміни норми внесення. Проведений аналіз демонструє чітко виражену закономірність: у всіх протестованих режимах руху та варіантах зміни норми значення СЧПС для технології ШІМ (у діапазоні приблизно 150–1600 мс) було істотно меншим порівняно з традиційною системою РН (приблизно 593–3211 мс), що вказує на значно швидшу реакцію та ефективніше регулювання подачі робочої рідини в системах з імпульсною модуляцією.

Аналіз результатів, отриманих для технологій регулювання норми (РН) та широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), продемонстрував виражені закономірності зміни їх ефективності залежно від варіації норми внесення. Як і під час експериментів із системою СНВ, зафіксовано статистично достовірну взаємодію між типом системи, заданою нормою та робочою швидкістю ( $p < 0,0001$ ), що суттєво впливала на час виходу на цільову витрату і підтримання її стабільного рівня в ході досліджень змінної норми внесення (ЗНВ).

Таблиця 4 - Описова статистика для часу, необхідного системам РН і ШПМ для переходу від початкової норми та стабілізації наступної цільової норми внесення на різних змодельованих швидкостях під час тестування ЗНВ

Система керування	Швидкість, км/год	Зміна норми, л/га	Час, мс			
			Сер.	Min.	Max.	Ст. похибка
РН	12,9	-46,8	3211	2600	4800	694
		-23,4	1117	600	1900	405
		23,4	650	300	1000	192
		46,8	2600	2200	3000	352
	16,1	-46,8	1678	1400	1800	130
		-23,4	967	500	2500	535
		23,4	661	500	1000	124
		46,8	1433	1300	1600	151
	19,3	-46,8	1500	600	1800	354
		-23,4	600	400	800	133
		23,4	593	400	900	142
		46,8	1417	1200	1800	264
ШПМ	12,9	-46,8	833	200	1300	387
		-23,4	2781	100	700	173
		23,4	478	100	1400	366
		46,8	1367	1200	1500	121
	16,1	-46,8	2441	100	600	181
		-23,4	2471	100	700	187
		23,4	1227	800	1700	322
		46,8	1600	1500	1700	100
	19,3	-46,8	1501	100	200	58
		-23,4	2221	100	600	126
		23,4	1891	100	400	96
		46,8	1022	600	1700	421

Для зручності подальшого викладу під час аналізу таких випробувань інтервали переходу від 140,3 до 116,1 л/га та від 116,1 до 93,5 л/га узагальнено позначають як зниження норми на 23,4 л/га, а перехід від 140,3 до 93,5 л/га – як зменшення на 46,8 л/га. Аналогічно, збільшення норми з 93,5 до 116,1 л/га і з 116,1 до 140,3 л/га визначається приростом на 23,4 л/га, тоді як зміна від 93,5 до 140,3 л/га характеризується зростанням на 46,8 л/га.

Загальна закономірність, виявлена під час аналізу роботи системи РН, свідчила, що середній час перехідного процесу зменшувався у випадках, коли величина декременту норми була меншою. Іншими словами, за невеликої зміни норми внесення система РН реагувала помітно швидше, що пов'язано з типовими особливостями її функціонування: регулюючому клапану необхідно значно менше часу для виконання невеликих коригувань, тоді як більші зміни вимагають довшого інтервалу стабілізації параметрів.

На противагу цьому, система ШІМ демонструвала відносно сталі та нижчі значення середнього часу перехідного процесу під час зменшення норми внесення на 23,4 і 46,8 л/га практично за всіх змодельованих швидкостей руху.

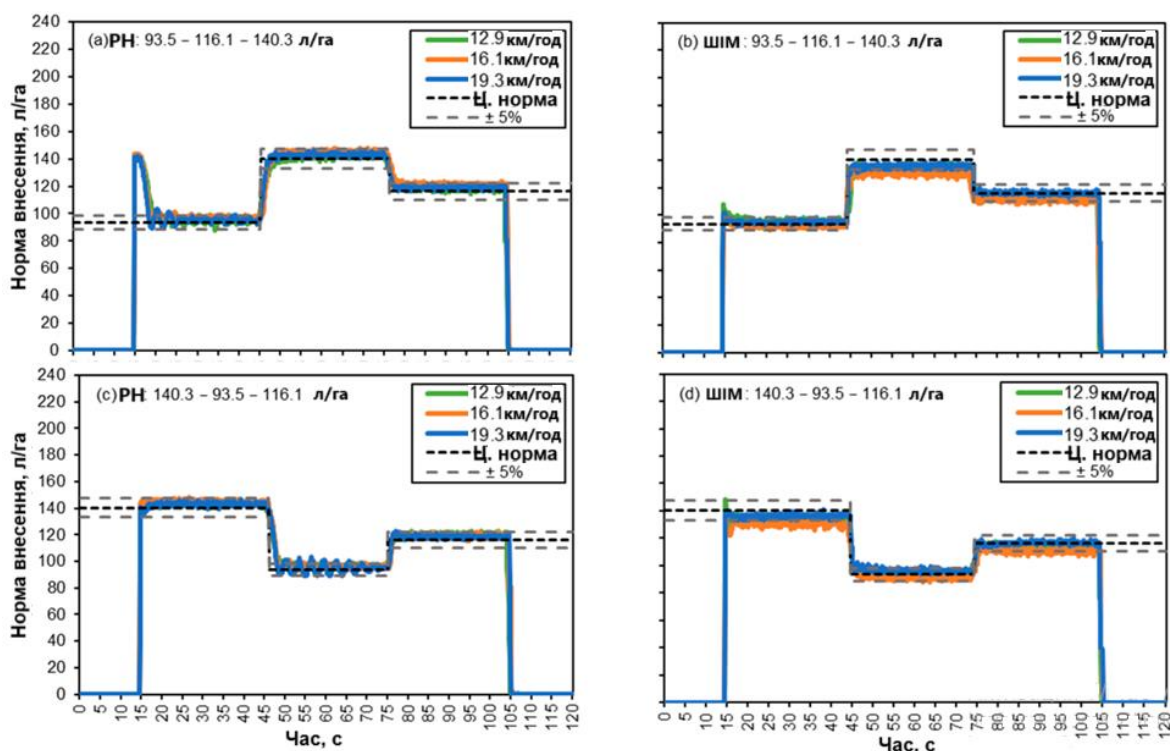


Рис. 5 - Графічне представлення реакції для змін норми 93,5–116,1–140,3 та 140,3–93,5–116,1 л/га при різних змодельованих швидкостях для регулятора норми (РН) [(а, с) відповідно] та системи ШІМ [(b, d) відповідно] під час тестування ЗНВ

Проте було зафіксовано один специфічний випадок: при моделюванні на швидкості 12,9 км/год показник СЧПС для зміни норми на 23,4 л/га становив 278 мс і виявився суттєво меншим, ніж для декременту на 46,8 л/га, де час

досягав приблизно 833 мс, що стало помітним відхиленням від загальної тенденції.

Під час аналізу переходів на збільшення норми внесення встановлено, що система РН демонструвала швидший час реагування при зміні на 23,4 л/га порівняно з 46,8 л/га на всіх змодельованих швидкостях руху. Як зазначалося раніше, така поведінка пояснюється тривалішим часом, необхідним регулювальному клапану для великих коригувань подачі робочого розчину. Варто відзначити, що система ШІМ проявила подібну закономірність для підвищення витрати на 23,4 л/га, але водночас характеризувалася швидшим відгуком (478–189 мс), ніж РН (650–593 мс) при швидкостях 12,9 і 19,3 км/год. Також СЧПС для ШІМ-системи при збільшенні норми на 46,8 л/га був більшим на кожній змодельованій швидкості порівняно з іншими змінами. Для системи ШІМ регулювання потоку здійснюється шляхом зміни робочого циклу електронно керованих соленоїдних клапанів, тоді як тиск у всій системі орієнтовно залишається незмінним по довжині штанги обприскувача [23]. У ситуації зі збільшенням дози на 46,8 л/га виявлено, що цей механізм підійшов до максимальної межі робочого циклу (табл. 2), встановленого на рівні 90% через дисплей/контролер TeeJet® EROS. Дослідники [21] проаналізували вплив величини робочого циклу на продуктивність ШІМ з точки зору рівномірності подачі рідини та показників фактичного витратоміра, зазначивши, що оптимальна стабільність забезпечується в інтервалі 40–80%. Аналогічно й у нашій роботі система ШІМ демонструвала менш стабільну динаміку та збільшений час стабілізації, коли робочий цикл наближався до свого верхнього значення.

Вплив швидкості руху на РН і ШІМ відрізнявся залежно від величини зміни норми внесення, що спричиняло різні закономірності формування СЧПС (Таблиця 4). У системі РН при переходах на зниження дози (-23,4 та -46,8 л/га) спостерігалось істотне зменшення СЧПС зі збільшенням швидкості агрегату. Водночас при збільшенні дози (23,4 і 46,8 л/га) СЧПС виявився статистично тотожним для всіх режимів руху (рис. 5а,с). На противагу цьому, система ШІМ

демонструвала суттєве скорочення СЧПС зі зростанням швидкості саме при збільшенні норми внесення, тоді як при переходах на зменшення (23,4 та 46,8 л/га) різниця між швидкостями була статистично незначущою (рис. 5b,d).

Загальна поведінка досліджуваних систем у прикладних сценаріях показала, що обидві технології (ШІМ і РН) працюють стабільніше, коли необхідно підняти програмовану норму внесення. Для РН це пояснюється тим, що вищі задані показники краще узгоджуються з номінальним тиском 413,7 кПа, який застосовувався у всіх випробуваннях. Аналогічно, у випадку з ШІМ-обладнанням на підвищених швидкостях цільовий тиск також був ближчим до базового (Таблиця 2). У цілому обидві системи показали високу результативність при різних комбінаціях норм і швидкісних режимів у тестах СНВ та ЗНВ.

Дослідження СНВ виявило, що РН забезпечувала менші значення СЧС на вищих цільових нормах у порівнянні з нижчими параметрами при всіх змодельованих швидкостях. Система ШІМ також демонструвала аналогічний характер реагування: із зростанням швидкості обидві системи мали тенденцію до зниження СЧС. Значущі відмінності фіксувалися переважно в РН при максимальній нормі (рис. 4c,d). При нижчих дозах РН-система характеризувалася зростанням СЧС, що свідчить про можливе погіршення точності застосування у варіативних картах завдань для точкового внесення. Зростання швидкості або підвищення норми внесення, відповідно до Таблиці 3, позитивно впливали на продуктивність обох систем.

ШІМ вирізнялася коротшим часом стабілізації за всіх умов моделювання, що підкреслює її здатність оперативно досягати потрібних параметрів роботи. У випробуваннях ЗНВ обидві системи показали, що більший стрибок норми потребує збільшення СЧПС. У роботі [28] проаналізували поведінку ШІМ на обприскувачах і дійшли висновку про її дієздатність підтримувати форму факела та розмір крапель під час коригування швидкості потоку, але при високих швидкостях і низьких робочих циклах відзначили погіршення рівномірності розподілу. Узгоджуючись із

результатами нашої роботи, автори також підтвердили, що при невеликих змінах норми час затримки був коротшим, що є перевагою у внесенні гербіцидів, особливо за низьких швидкостей руху. У нашому дослідженні система РН загалом мала вищий СЧПС при зменшенні норми, ніж при її підвищенні на більшості швидкостей.

Натомість ШІМ стабільно демонструвала здатність швидше реагувати на необхідність зниження норми внесення, що проявлялося у нижчих показниках СЧПС та кращих характеристиках динамічної адаптації. Менші значення цього показника вказують не лише на швидкість реагування, а й на високу ефективність системи при роботі за технологіями точного землеробства із змінною нормою внесення ЗЗР. Завдяки мінімальним часовим затримкам при переходах між параметрами ШІМ розглядається як більш перспективна система керування подачею для сучасних обприскувачів. Незважаючи на вибір конкретної технології, важливим залишається точне налаштування й калібрування обладнання, аби знизити вплив додаткових факторів, що виникають у реальних польових умовах.

### **3.3 Рекомендації за результатами дослідження**

Під час просторово-диференційованого внесення пестицидів надзвичайно важливо враховувати дистанцію, яку має подолати система управління подачею робочої рідини, щоб стабілізувати свою роботу й точно забезпечити необхідну цільову дозу. Якщо ця умова не дотримується, дуже ймовірно, що в деяких сегментах поля буде спостерігатися перевищення норми внесення, тоді як в інших зонах речовина надходитиме в недостатньому обсязі. У цьому дослідженні отримано статичні дані, де умови руху моделювалися, проте час реакції системи можна застосовувати для обрахунку мінімальної дистанції, потрібної обприскувачам із керуванням за тиском (РН) та із системою ШІМ, за умови відсутності додаткових експлуатаційних впливів.

Відповідно до показників установаження стабілізації витрати рідини (СЧС та СЧПС), отриманих під час експериментів для ділянок зі сталою нормою (СНВ) і зі змінною (ЗНВ), у таблиці 5 наведено розрахункові значення цих відстаней для декількох рівнів дозування. При цьому вважається, що обприскування здійснюється зі сталою швидкістю 12,9 км/год у випадку обох систем подачі. Важливо усвідомлювати, що зі збільшенням швидкості руху відповідні відстані також зростатимуть і, навпаки, зниження швидкості їх зменшуватиме. Окрім того, певні корективи можуть спричиняти інші робочі показники та характеристики машини.

Аналіз таблиці 5 засвідчує, що для обприскувача з контролем норми за тиском мінімальна дистанція для досягнення цільового внесення у межах від 93,5 до 140,3 л/га варіює у межах приблизно 12,2–14,4 м на ділянках із уніфікованою нормою. Це означає, що сегменти карти-завдання не повинні бути коротшими за вказані величини, а подовження таких зон має становити щонайменше утричі або навіть учетверо більше (за умови, що їхня ширина не менша за довжину штанги), щоб подача засобу стабілізувалася і обприскувач зміг ефективно виконати встановлене завдання.

Якщо ж межі зон на карті-завданні будуть меншими за рекомендовані значення, у полі з'являться досить великі площі з істотними відхиленнями від заданої норми. Крім того, збільшення швидкості агрегату або ж різкіші коливання норми внесення здатні підсилити масштаб таких помилок, що підвищить ризик недостатньо якісної обробки рослин. На противагу цьому, система ШІМ демонструє істотно вищу оперативність: для неї мінімальна дистанція становить приблизно від 1,1 до 4,8 м при СНВ та від 0,8 до 3,0 м при ЗНВ. Відповідно, у полі з обприскувачем, оснащеним ШІМ-технологією, довжина зон може бути всього близько 0,8–1,1 м (при достатній ширині зони), і при цьому можливе точне дотримання встановленої норми. Це ще раз наголошує на перевазі ШІМ у швидкому переході між різними зонами і на її здатності забезпечувати високу точність навіть у дуже невеликих технологічних сегментах.

Водночас слід врахувати, що наведені умови випробувань передбачають правильне налаштування обох типів систем, включаючи оптимальні параметри часу реакції клапанів або пауз очікування, які можуть сприяти максимізації ефективності внесення.

У цілому, результати експерименту свідчать про значну технологічну користь застосування ШІМ в умовах практичного виробництва. Така система забезпечує суттєво точніше просторово-варіативне внесення пестицидів порівняно з традиційним регулюванням тиском, особливо при необхідності працювати із багатьма зонами малого розміру всередині поля. До того ж менші значення часу встановлення стабілізованої та постійної подачі вказують на кращу адаптивність ШІМ до змін рельєфу, швидкості руху трактора та інших чинників, що здатні змінювати потребу у дозуванні засобу захисту рослин.

Таблиця 5 - Інформація про мінімальну відстань, необхідну для досягнення різних цільових норм на основі виміряного часу для систем РН і

ШІМ під час тестування СНВ і ЗНВ

Тест	Система	Норма внесення, л/га	Швидкість, км/год	Середній час, мс	Відстань, м
СНВ	РН	93,5	12,9	4033	14,4
		116,1	12,9	3567	12,8
		140,3	12,9	3400	12,2
	ШІМ	93,5	12,9	1350	4,8
		116,1	12,9	667	2,4
		140,3	12,9	300	1,1
ЗНВ	РН	23,4	12,9	1456	5,2
		46,8	12,9	3211	11,5
		23,4	12,9	222	0,8
	ШІМ	46,8	12,9	833	3,0

## ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено оцінювання та співставлення ефективності функціонування традиційного регулятора норми внесення, який працює на основі контролю потоку (РН), із системою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), встановлених на обприскувачі. Аналіз здійснений з погляду швидкості реагування систем та їхніх можливостей оперативної корекції норми під час внесення засобів захисту рослин.

На основі отриманих експериментальних результатів сформульовано такі висновки:

Режим обприскування зі сталою нормою:

Система ШІМ показала стабільно нижчі середні показники часу стабілізації витрати робочої рідини під час виходу на задані рівні внесення для всіх змодельованих значень швидкості руху обприскувача, перевершуючи регулятор потоку.

Традиційний РН характеризувався більшим середнім часом виходу на належну норму внесення при роботі на менших швидкостях.

Зі зростанням цільової норми чи за умови більш високих швидкостей руху обидві системи демонстрували покращення роботи, тобто скорочення часу стабілізації параметрів подачі.

Режим внесення зі змінною нормою:

Використання ШІМ забезпечувало швидшу зміну норми як у бік збільшення, так і у напрямку зменшення, незалежно від моделюваної швидкості агрегату.

РН визначався більш тривалим переходом під час зниження витрати, тоді як за підвищення показував кращу динаміку порівняно із власними результатами на зменшення.

Підвищення швидкості руху сприяло покращенню як часу реакції, так і стабільності норми для обох технологій регулювання.

Однак варто зауважити, що дослідження розглядало лише окремий аспект застосування пестицидів — а саме реактивність системи контролювання норми. На точність та результативність у реальних умовах впливають й інші чинники. Одним із ключових обмежень проведеної роботи є використання виключно моделювання сценаріїв внесення (різні поєднання норми та швидкості) під час статичних тестів обприскувача. Є підстави вважати, що різні польові умови та фактори середовища можуть суттєво коригувати поведінку систем, якщо застосовувати ті самі режими під час фактичного обприскування. Тому додаткові дослідження з детальним аналізом впливу цих параметрів сприятимуть точнішому визначенню реальної ефективності обладнання та вдосконаленню практик управління для оптимального використання сучасних технологій внесення ЗЗР.

У подальшій науковій роботі доцільно розширити обсяг експериментів з урахуванням впливу змін швидкісного режиму та характеристик затримки відгуку на функціонування РН і ШІМ у справжніх польових умовах. Коливання швидкості можуть суттєво змінювати динаміку контролю подачі, тому ретельний аналіз їхнього впливу на точність нормування є необхідним. Крім того, доцільним є дослідження ролі прогнозованого часу відгуку або здатності обладнання передбачати зміни умов роботи, що допоможе підвищити стабільність та результативність внесення. Проведення випробувань на реальних сільськогосподарських ділянках з урахуванням різної довжини оброблюваних зон, діапазону необхідних норм та інших агротехнічних параметрів дозволить отримати глибше уявлення про роботу систем у практичних умовах застосування.

## 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. (2020). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.

19. Jupp L. (2020). *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>.

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>.