

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 ефективності використання систем точного землеробства при внесенні мінеральних добрив»

Виконав:

(підпис)

Михайло ХАНДОГА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

_____ **СТЗ 2402-1М** _____

Науковий керівник:

(підпис)

Владислав ЗУБКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Хандога Михайло Сергійович

Дослідження ефективності використання систем точного землеробства при внесенні 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 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 8 таблиць, 4 рисунки, додатків 2, 25 літературних джерел.

Мета цього дослідження полягала в оцінці факторів форми поля за допомогою однозмінного та багатофакторного регресійного аналізу для прогнозування перекриття за допомогою ручного керування секціями (MSC) і двох систем автоматичного керування секціями (ASC).

Розуміння того, як форма та розмір поля можуть вплинути на помилки перекриття під час обприскування, дасть виробникам кращу інформацію про те, як покращити польову роботу та скоротити витрати.

Для аналізу використовувалися самохідні сільськогосподарські обприскувачі з шириною штанги 24,8 м. Результати статистичних аналізів показали, що існує значний зв'язок між помилкою надмірного застосування та кількома факторами форми поля.

Результати проведеного дослідження свідчать про наявність взаємозв'язку між розрахованими величинами перекриття при використанні систем MSC та ASC та різними параметрами форми поля. Моделі багатофакторної регресії не показали суттєвого підвищення точності порівняно з однозмінною моделлю, що базується на показнику P/A. Значення перекриття для п'ятисекційної MSC системи демонструвало прямий зв'язок із

величиною P/A ($R^2 = 0,569$), що відповідає подібним результатам для ASC систем із сімома та дев'ятьма секціями ($R^2 = 0,647$ та $0,593$ відповідно).

Статистичний аналіз підтвердив значущість взаємозв'язку між площею перекриття та показником P/A ($p < 0,05$) для всіх трьох розглянутих систем управління. Перекриття збільшувалося швидше у систем MSC, що вказує на те, що у разі зростання складності поля — наприклад, через наявність трав'яних водних каналів, ставків або лісових масивів — ASC може забезпечити додаткові можливості для зменшення перекриття.

Як передбачалося, у системі ASC із дев'ятьма секціями спостерігалось менше накладень у порівнянні з сімсекційною версією, що пов'язано зі збільшенням P/A. Подальший аналіз моделей для ASC систем із різною кількістю секцій показав, що додавання двох додаткових контрольних секцій не призводить до значного скорочення перекриття на полях із низькими значеннями P/A.

Ключові слова: обприскування, якість, норма внесення, рідкі добрива, технологія змінних норм.

ABSTRACT

Khandoga Mykhailo Serhiyovych

Study on the effectiveness of using precision farming systems when applying mineral fertilizers.

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

The final qualification work is presented on 44 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 8 tables, 4 figures, 2 appendices, 25 references.

The purpose of this study was to evaluate field shape factors using univariate and multivariate regression analysis to predict overlap using manual section control (MSC) and two automatic section control (ASC) systems.

Understanding how field shape and size can affect overlap errors during spraying will give producers better information on how to improve field work and reduce costs.

The analysis used self-propelled agricultural sprayers with a boom width of 24.8 m. The results of statistical analyses showed that there is a significant relationship between the overapplication error and several field shape factors.

The results of the study indicate that there is a relationship between the calculated overlap values when using the MSC and ASC systems and various field shape parameters. The multivariate regression models did not show a significant increase in accuracy compared to the univariate model based on the P/A indicator. The overlap value for the five-section MSC system demonstrated a direct relationship with the P/A value ($R^2 = 0.569$), which is consistent with similar results for the seven- and nine-section ASC systems ($R^2 = 0.647$ and 0.593 , respectively).

Statistical analysis confirmed the significance of the relationship between overlap area and P/A ($p < 0.05$) for all three management systems considered. Overlap increased more rapidly in MSC systems, indicating that as field complexity increased—for example, due to the presence of grassy water channels, ponds, or woodland—ASC may provide additional opportunities to reduce overlap.

As predicted, the nine-section ASC system showed less overlap compared to the seven-section version, which was associated with an increase in P/A. Further analysis of the models for ASC systems with different numbers of sections showed that adding two additional control sections did not significantly reduce overlap in fields with low P/A values.

Keywords: spraying, quality, application rate, liquid fertilizers, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування	11
1.2 Агротехнічні вимоги до роботи обприскувачів	19
1.3 Дослідження застосування систем автоматичного керування на обприскувачах.....	20
Розділ 2. Обладнання та методи досліджень	25
2.1 Налаштування обприскувача та збір даних	25
2.2 Аналіз даних	26
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	29
3.1 Одиничний регресійний аналіз	29
3.2 Множинний регресійний аналіз	35
3.3 Аналіз обробки контрольної ділянки.....	38
Висновки.....	40
Список використаних джерел.....	42

ВСТУП

1. Актуальність теми

Система автоматичного керування секціями обприскувача є однією з найбільш ефективних технологій для оптимізації внесення рідких мінеральних добрив і зменшення небажаного перекриття. Особливої актуальності це набуває на полях складної конфігурації, де збільшується ймовірність помилок ручного керування. Тому визначення взаємозв'язку між параметрами поля та величиною перекриття при роботі різних систем керування секціями є важливим завданням як з наукової, так і з практичної точки зору.

В умовах необхідності підвищення ефективності виробництва, оптимізації витрат і забезпечення сталого розвитку аграрної галузі дослідження ефективності систем точного землеробства при внесенні мінеральних добрив є вкрай важливим та своєчасним.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питання якісного виконання операцій обприскування та внесення рідких добрив активно досліджується вітчизняними й зарубіжними науковцями. У науковій літературі представлено значну кількість досліджень, присвячених впливу технічних параметрів обприскувачів, особливостей конструкції штанги, режимів роботи, погодних умов та технологічних налаштувань на рівномірність внесення. Окрему увагу приділено вивченню ефективності систем автоматичного керування, що дозволяють зменшити перекриття та нерівномірність технологічного процесу.

Разом з тим, попри наявність численних досліджень щодо роботи ASC-систем, наукова спільнота все ще має обмежену кількість робіт, у яких би розглядалася залежність величини перекриття від параметрів форми поля, співвідношення його площі та периметра, а також від структури секцій обприскувача. Недостатньо опрацьованими залишаються питання порівняння ефективності ручного та автоматичного керування секціями в умовах різної

складності поля, що створює наукову нішу для комплексних досліджень у цьому напрямі.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка ефективності систем ручного та автоматичного керування секціями обприскувача при внесенні мінеральних добрив шляхом встановлення зв'язків між величиною перекриття та параметрами форми поля за допомогою однозмінного та багатofакторного регресійного аналізу.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес внесення мінеральних добрив самохідними штанговими обприскувачами.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є величина перекриття та рівномірність внесення рідких мінеральних добрив при використанні систем ручного і автоматичного керування секціями, а також вплив параметрів форми поля на точність виконання технологічної операції.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати теоретичні та технічні аспекти роботи обприскувачів і сучасних ASC-систем.
2. Дослідити фактори, що впливають на якість внесення рідких добрив і величину перекриття.
3. Провести експериментальні вимірювання та зібрати дані щодо роботи MSC та ASC систем на полях різної конфігурації.
4. Виконати однозмінний та багатofакторний регресійний аналіз для визначення зв'язків між параметрами форми поля та величиною перекриття.
5. Порівняти ефективність системи ручного керування секціями з автоматичними системами різної конфігурації.

7. Методи дослідження

У роботі застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження, зокрема: аналіз літературних джерел, експериментальні методи вимірювання параметрів роботи обприскувача, математична статистика, однозмінний та множинний регресійний аналіз, методи порівняння та узагальнення результатів.

8. Структура та обсяг роботи

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Робота викладена на 44 сторінках машинописного тексту, містить 8 таблиць, 4 рисунки та 25 найменувань літературних джерел.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Фактори, що впливають на якість обприскування

Обприскування сільськогосподарських культур є одним із ключових агротехнічних прийомів, що забезпечує захист рослин від шкідливих комах, патогенних захворювань та бур'янів, а також дозволяє ефективно вносити рідкі мінеральні добрива. Результативність цього процесу значною мірою визначається правильністю його виконання. Ігнорування факторів, які впливають на ефективність обприскування, може спричинити зниження врожайності, збільшення витрат на агрохімікати та негативний вплив на довкілля.

Технічний стан обладнання є одним із вирішальних чинників для досягнення високої якості обробки. Підбір конкретного типу обприскувача залежить від виду культури, масштабу оброблюваної площі та специфіки виконуваних робіт. Основні вимоги до техніки включають рівномірне розпилення робочої рідини, можливість корекції норми витрати та забезпечення дрібнодисперсного покриття. Справність форсунок, однорідність їх роботи, відсутність протікань і зношування деталей безпосередньо впливають на результат обробки. Засмічені або пошкоджені форсунки призводять до нерівномірного нанесення препаратів, що зменшує ефективність захисних заходів.

Хімічний склад і концентрація робочого розчину повинні суворо відповідати інструкціям виробника препаратів. Невірне дозування компонентів може викликати надмірне застосування засобів захисту або, навпаки, недостатній вплив на шкідників і хвороби. Важливе значення має також якість води для приготування суміші. Жорстка, забруднена або хлорована вода здатна змінювати фізико-хімічні властивості препаратів, зменшуючи їхню діючу ефективність.

Кліматичні умови під час обприскування відіграють визначальну роль. Найбільш критичними параметрами є:

- Вітер. Потужні пориви здатні зносити краплі, що призводить до нерівномірного розподілу хімічного засобу та випадкового забруднення прилеглих ділянок. Рекомендована швидкість повітря під час обприскування – не більше 3 м/с.

- Температура та вологість. За високих температур дрібні краплі можуть інтенсивно випаровуватися, що значно зменшує ефективність внесення препарату на рослини. Найбільш придатний температурний діапазон для обробки – від +10 до +25 °С.

- Опади. Використовувати обприскування під час дощу або при його ймовірності не варто, адже вода здатна змити препарат з листя та стебел, знижуючи його дію.

Розмір крапель робочого розчину визначає, наскільки рівномірно покриваються рослини, а також можливість доставки препарату у місця концентрації шкідників. Дрібні краплі забезпечують більш тонкий розподіл речовини, проте вони піддаються сильнішому впливу вітру та швидше випаровуються. Великі краплі менш вразливі до знесення, однак здатні стікати з листя, що зменшує ефективність обробки.

Оптимальна величина крапель залежить від виду застосовуваного препарату та цілей обприскування. Наприклад, для гербіцидів переважно використовують дрібні краплі, тоді як для фунгіцидів та інсектицидів доцільніше застосовувати середні або великі.

Якість обприскування є ключовим фактором для отримання високого врожаю та продукції належної якості. В цьому процесі вирішальне значення має саме розмір крапель, оскільки він впливає на рівномірність покриття, здатність препарату проникати у важкодоступні зони та мінімізацію втрат робочої рідини під час внесення.

Діаметр крапель вимірюють у мікрометрах (мкм). Залежно від розміру їх класифікують на дрібні (менше 150 мкм), середні (150–250 мкм) та великі (понад 250 мкм). Кожна категорія має специфічні властивості, що визначають ефективність обробки.

Дрібні краплі створюють щільне покриття, оскільки їх кількість на одиницю площі висока. Це особливо важливо для боротьби з дрібними шкідниками та хворобами, які охоплюють великі ділянки рослини. Водночас вони мають невелику масу, через що їх легко зносить вітер, і вони швидко випаровуються, що може призвести до нерівномірного розподілу та втрат робочого розчину.

Середні краплі вважаються найбільш універсальними. Вони створюють компроміс між рівномірністю покриття та зниженням знесення вітром. Саме тому їх застосовують для внесення гербіцидів, інсектицидів та фунгіцидів у більшості випадків.

Великі краплі мають значну масу, що допомагає їм проникати крізь листя та осідати на нижніх частинах рослин. Це ефективно для обробки густих посівів або високорослих культур. Проте вони можуть формувати нерівномірне покриття, залишаючи прогалини на листках, що знижує дію препарату.

Розмір крапель визначається численними технічними та природними чинниками, серед яких:

- ~ Тип розпилювальних форсунок. Форсунки з великими отворами формують краплі більшого розміру, тоді як моделі з дрібними отворами генерують тонкий розпил. Існують також спеціалізовані форсунки, які дозволяють регулювати спектр крапель для досягнення певних технологічних завдань.
- ~ Тиск у системі. При збільшенні тиску швидкість виходу рідини з форсунки підвищується, що сприяє формуванню дрібніших крапель. Водночас занадто високий тиск може стати причиною знесення хімікату на сусідні ділянки.
- ~ В'язкість та поверхневий натяг робочого розчину. Введення спеціальних ад'ювантів, які змінюють ці властивості, дає

можливість контролювати розмір і форму крапель, що підвищує ефективність обприскування.

~ **Погодні умови.** Вітер, температура та вологість повітря безпосередньо впливають на рух крапель після їх появи. Наприклад, у сильний вітер дрібні краплі здатні переноситися на великі відстані, а в жарку погоду вони швидше випаровуються.

Під час підготовки обприскування слід враховувати такі фактори:

Вибір відповідного розміру крапель. Для внесення гербіцидів широкого спектра дії доцільно застосовувати краплі середнього або великого розміру, у той час як для точкової обробки інсектицидами ефективніше використовувати дрібні краплі.

Адаптація до погодних умов. Якщо очікується сильний вітер, рекомендується застосовувати крупніші краплі, щоб мінімізувати знесення препарату.

Калібрування обприскувачів. Регулярне технічне налаштування обладнання гарантує підтримання стабільного розміру крапель та рівномірний розподіл робочої рідини по оброблюваній площі.

Розмір крапель виступає ключовим показником, що визначає якість та ефективність процесу обприскування. Підбір найбільш придатного діаметра крапель залежить від виду культури, характеристик застосовуваного препарату та зовнішніх умов. Раціональне використання цих знань допомагає зменшити втрати хімічних засобів, мінімізувати негативний вплив на екосистему та підвищити продуктивність рослин. Усвідомлення того, як розмір крапель впливає на рівномірність і результативність обприскування, є невід'ємною складовою сучасного сільського господарства, яке прагне до максимальної продуктивності при сталому використанні ресурсів.

Ефективність обприскування сільськогосподарських рослин визначається багатьма чинниками, серед яких особливо важливими є швидкість пересування техніки та характеристики розпилювальної системи.

Рух обприскувача безпосередньо впливає на однорідність нанесення робочого розчину. Надто швидкий рух може спричинити нерівномірне покриття, тоді як занадто повільний — призводить до перевитрати засобів захисту. Оптимальна швидкість визначається типом техніки та умовами обробки, і, як правило, становить приблизно 6–8 км/год.

Рівномірність покриття поверхні, точність дозування та правильний розподіл робочого розчину значною мірою залежать від швидкості руху. Ці показники мають вирішальне значення для досягнення максимальної ефективності засобів захисту рослин і внесення добрив, а також для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

При збільшенні швидкості пересування обприскувача змінюється не тільки кількість робочого розчину на одиницю площі, але й його рівномірність. Основною проблемою є те, що при високій швидкості зменшується час контакту крапель з оброблюваною поверхнею. Це може призводити до появи прогалин у покритті та погіршувати проникнення рідини в листя або ґрунт.

Дослідження свідчать, що оптимальна швидкість пересування залежить від виду форсунок, розміру крапель, висоти розташування штанги, погодних умов та фізико-хімічних властивостей препарату. Наприклад, при надмірно високій швидкості дрібні краплі можуть не досягати цільової поверхні через вплив вітру або виникнення турбулентності. У той самий час, занадто низька швидкість призводить до надлишкового внесення робочого розчину, що збільшує витрати ЗЗР та створює ризик забруднення ґрунту і водойм.

Рівномірність обприскування визначається тим, наскільки однорідно краплі розподіляються на поверхні. Велика швидкість пересування обприскувача може викликати нерівномірний розподіл через відхилення траєкторії крапель під впливом зустрічного повітряного потоку. Крім того, при надмірно швидкому русі тиск у системі часто зростає, що зменшує діаметр крапель. Дрібні частинки більш чутливі до знесення вітром, особливо у

несприятливих погодних умовах, таких як сильні вітри або висока температура повітря.

Висока ефективність обприскування забезпечується тоді, коли швидкість пересування обприскувальної техніки відповідає технічним характеристикам форсунок. Наприклад, при застосуванні звичайних щілинних форсунок рекомендована швидкість зазвичай коливається в межах від 5 до 8 км/год, тоді як для форсунок з низьким дрейфом допустимий діапазон може бути трохи ширшим.

Правильно підібрана швидкість руху сприяє зменшенню витрат робочих розчинів та знижує втрати речовин через випаровування чи перенесення вітром. У випадку, якщо обприскувач рухається занадто повільно, відбувається надмірне накопичення препарату на листках і стеблах, що підвищує ризик токсичного впливу на культуру. Навпаки, при надто великій швидкості речовини не встигають потрапити на оброблювану поверхню в потрібній кількості, що зменшує їхню ефективність.

Крім того, слід враховувати, що перевищення рекомендованої швидкості може призводити до нерівномірного покриття рослин, а отже, знижувати біологічну дію обробки. Наприклад, під час боротьби зі шкідниками неповне покриття може залишити частину популяції неушкодженою, що в подальшому призведе до повторного розмноження комах.

Висота розташування штанги обприскувача повинна підбиратися так, щоб забезпечувати максимально рівномірне покриття культури. Зазвичай оптимальна відстань між штангою і рослинами складає 40–60 см.

Досягнення бажаного результату обприскування можливо лише при правильному налаштуванні техніки та дотриманні технологічних параметрів:

- Регулювання робочого тиску в системі, що визначає розмір крапель.
- Встановлення необхідної ширини захвату штанги.
- Контроль перекриття зон обробки, щоб уникнути пропусків або надлишкового нанесення розчину.

Кваліфікація людини, що керує обприскувачем, має ключове значення для ефективності операцій. Оператор повинен мати ґрунтовні знання щодо налаштувань агрегату, норм витрати хімічних препаратів та суворо дотримуватися правил безпеки під час роботи із засобами захисту рослин.

Обприскування рекомендується виконувати з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Використання сучасних технологій, таких як системи GPS-навігації або диференційоване внесення хімікатів, дає змогу зменшити шкідливий ефект на екосистему.

Форма поля значною мірою визначає якість нанесення препаратів, оскільки впливає на маршрути пересування техніки, рівномірність покриття площі та тривалість виконання завдання. Важливим фактором є траєкторія руху обприскувача. Поля з правильними прямокутними або квадратними контурами дозволяють більш раціонально планувати шляхи руху, що дає змогу рухатися без частих поворотів, зменшуючи перекриття або пропуски під час обробки.

Для ділянок неправильної форми, наприклад, трапецієподібних, округлих або зі складними межами, траєкторії обробки стають більш складними. Часті маневри техніки можуть призводити до нерівномірного нанесення хімічних засобів, а також до непродуктивних пробігів, що знижує ефективність усієї операції.

Поля з чіткими геометричними контурами забезпечують більш точне покриття всієї площі, уникаючи надмірного чи недостатнього внесення препаратів. У випадку складних конфігурацій, особливо вузьких ділянок або кутів, обприскувач може залишати “мертві зони” або застосовувати хімікати з перекриттям. Це потребує додаткового витрачання часу, палива та матеріалів, одночасно підвищуючи екологічні ризики через перевитрати хімічних засобів.

Форма ділянки безпосередньо впливає на продуктивність агрегату та економічну ефективність робіт. Прямокутні поля дозволяють оптимально використовувати ширину штанги обприскувача, мінімізуючи непродуктивні

зони. Нерівні території вимагають частіших зупинок, корекцій маршруту та зміни режимів роботи, що підвищує витрати пального та знижує загальну продуктивність.

Не менш важливим є час, необхідний для підготовки техніки та складання маршрутів на складних ділянках. Затягування виконання операцій зменшує ефективність агротехнічних заходів і може впливати на своєчасність обробки рослин.

Нерівномірне внесення препаратів на ділянках неправильної форми може спричиняти як недостатній захист, так і локальну надмірну концентрацію хімікатів, що негативно впливає на ґрунт, воду та біорізноманіття. Наприклад, перекриття оброблених зон шкодить корисним організмам, тоді як пропуски створюють сприятливі умови для розмноження шкідників або бур'янів. Раціональна геометрія поля допомагає зменшити ці ризики та забезпечити точне дотримання дозування хімічних речовин.

Автоматизоване управління обприскувачами значно знижує вплив нерівної форми ділянки на якість обробки. Системи секційного контролю дозволяють автоматично відключати подачу розчину на вже оброблених зонах, мінімізуючи перекриття навіть на складних територіях. Однак впровадження таких технологій вимагає значних фінансових вкладень, що може бути проблематичним для невеликих фермерських господарств.

Форма поля є одним із ключових чинників, що визначає рівномірність обприскування. Ділянки правильної геометрії забезпечують ефективне використання техніки, точне нанесення препаратів та економію ресурсів. Поля зі складними контурами потребують ретельнішого планування маршрутів, застосування сучасних технологій та обліку екологічних ризиків. Досягнення високої ефективності обробки можливо через інноваційні підходи та комплексний аналіз особливостей конкретного господарства.

Якість обприскування залежить від багатьох чинників, включно з технічним станом обладнання, погодними умовами, параметрами робочих розчинів, технологією виконання операцій та професійністю оператора.

Дотримання рекомендацій технології та оперативне усунення проблем дозволяють підвищити ефективність захисту рослин і забезпечити стабільно високі врожаї.

1.2 Агротехнічні вимоги до роботи обприскувачів

Обприскувачі належать до ключових видів техніки в сучасному сільському господарстві. Їх головне призначення полягає у внесенні рідких добрив, пестицидів, гербіцидів та інших засобів захисту рослин, що забезпечує надійний контроль бур'янів, шкідників і хвороб культурних рослин. Для досягнення високої ефективності застосування такої техніки необхідно дотримуватися певних агротехнічних норм, які визначають точність і якість виконання технологічних операцій.

Одним із найважливіших аспектів роботи обприскувачів є рівномірне розподілення робочого розчину по всій площі обробки. Це досягається завдяки використанню форсунок із однаковою продуктивністю, правильному налаштуванню тиску у системі та оптимальній висоті розташування штанги. Нерівномірне внесення препаратів може призвести як до зниження врожайності через недостатню обробку окремих ділянок, так і до пошкодження рослин при надмірному насиченні активними речовинами.

Розмір крапель робочої рідини слід підбирати відповідно до типу обробки. Великі краплі зменшують ймовірність знесення вітром, але вони не завжди ефективні для повного покриття листя невисоких рослин. Дрібні краплі забезпечують кращий контакт із поверхнею листя, проте більш чутливі до вітрових потоків. Для зниження негативного впливу вітру та випаровування застосовують форсунки з регульованим розміром крапель або антидрейфові розпилювачі.

Швидкість пересування обприскувача має узгоджуватися із видом культури, характеристиками препаратів та умовами роботи. Надто швидкий рух призводить до нестабільного тиску та нерівномірного нанесення розчину,

тоді як повільний рух збільшує витрати пального і часу. Оптимальна швидкість зазвичай коливається в межах 6 – 12 км/год.

Робочий тиск у системі безпосередньо впливає на якість розпилення. Занадто низький тиск формує великі краплі, які погано покривають поверхню рослин, а надмірно високий — дрібні краплі, що швидко випаровуються або зносяться вітром. Для різних технологічних операцій зазвичай застосовують тиск у діапазоні 2–5 бар.

Погодні умови грають значну роль у ефективності обприскування. Роботи рекомендується проводити за слабкого вітру (не більше 3 – 4 м/с), щоб уникнути знесення розчину. Оптимальна температура для роботи техніки становить 15 – 25°C. Висока температура прискорює випаровування рідини, тоді як низькі значення можуть знижувати активність хімічних препаратів.

Перед початком обробки важливо виконати ретельне калібрування обприскувача, що включає перевірку рівномірності роботи форсунок, налаштування тиску, визначення витрати рідини та оптимальної висоти штанги. Зазвичай штанга встановлюється на висоті 40 – 60 см над рослинами, що забезпечує максимальне покриття листя.

Норма внесення робочого розчину залежить від виду культури, фази розвитку та характеристик препаратів. Для польових рослин застосовують 100 – 300 літрів на гектар, тоді як у садах і виноградниках обсяг може сягати 800 – 1500 літрів на гектар.

Для стабільної роботи обприскувача необхідно регулярно очищати всі елементи системи: резервуар, фільтри, форсунки та шланги. Забруднення може призводити до нерівномірного внесення розчину та зниження ефективності обробки.

1.3 Дослідження застосування систем автоматичного керування на обприскувачах

Сільське господарство належить до ключових секторів економіки, активно інтегруючи сучасні технології для підвищення продуктивності та ефективності виробничих процесів. Одним із напрямів, який особливо інтенсивно розвивається останнім часом, є застосування автоматизованих систем керування на обприскувачах. Такі технології забезпечують високу точність виконання агротехнічних операцій, дозволяють економити ресурси та зменшують шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Сучасні автоматизовані системи оснащуються GPS- та RTK-технологіями, що дають змогу точно визначати положення обприскувача на полі. Це відкриває можливість для надзвичайно точного внесення агрохімікатів навіть на нерівних або фрагментованих ділянках. Завдяки цьому досягається рівномірне покриття рослин засобами захисту або добривами, що безпосередньо впливає на підвищення врожайності.

Ще однією перевагою таких систем є запобігання повторному обробленню одних і тих самих ділянок, що часто трапляється при ручному керуванні технікою. Відсутність перекриттів і пропусків дозволяє економити ресурси та знижує ризик хімічного стресу для культур, який може негативно впливати на їхній ріст і розвиток.

Витрати на добрива, засоби захисту рослин і воду складають значну частину виробничих коштів у аграрному секторі. Автоматичні системи керування допомагають оптимізувати їх використання. Завдяки точному дозуванню та контролю за нормами внесення аграрії можуть помітно зменшити обсяги застосованих матеріалів без шкоди для врожайності.

Крім того, ці технології знижують ймовірність людських помилок. Наприклад, оператор може випадково встановити невірну норму внесення, що призведе до перевитрат або недостатньої обробки. Автоматизовані системи усувають цей ризик, забезпечуючи стабільну роботу навіть у складних умовах, таких як погана видимість або важкий рельєф поля.

Неправильне чи надмірне застосування агрохімікатів може спричинити забруднення ґрунтів, води та повітря. Використання автоматичних систем

керування на обприскувачах сприяє підвищенню екологічної безпеки завдяки точному дозуванню і мінімізації втрат препаратів поза зоною обробки.

Більшість сучасних автоматизованих обприскувачів оснащені сенсорами, що відстежують стан рослин і ґрунту в реальному часі. Це дозволяє застосовувати лише оптимальні кількості засобів у конкретних умовах, скорочуючи надмірне навантаження на екосистему.

Системи автоматичного керування значно полегшують роботу операторів, дозволяючи їм концентруватися на контролі за станом машини та процесом обробки, не відволікаючись на точність руху. Завдяки цьому працівники можуть ефективніше виконувати роботу протягом тривалого часу, що особливо актуально під час сезонних пікових навантажень.

Також, автоматизовані обприскувачі здатні функціонувати навіть у складних умовах, таких як нічний час або обмежена видимість. Це збільшує тривалість робочого дня та забезпечує швидше виконання необхідних агротехнічних завдань.

Загальна оптимізація використання ресурсів, підвищення рівня врожайності та зменшення витрат на захисні засоби і робочу силу сприяють підвищенню ефективності і рентабельності аграрного виробництва. Хоча впровадження автоматизованих систем управління потребує значних стартових інвестицій, вони швидко окупаються завдяки економії ресурсів та збільшенню продуктивності.

Використання автоматичних систем контролю на обприскувачах є важливим інноваційним кроком у розвитку сучасного сільського господарства. Такі технології забезпечують високу точність і ефективність обробки посівів, сприяють раціональному витрачання ресурсів, зменшують негативний вплив на навколишнє середовище та підвищують продуктивність праці. У довгостроковій перспективі ці системи стають ключовим інструментом для підвищення конкурентоспроможності агропідприємств та гарантування продовольчої безпеки.

Багато фермерів вже впровадили або розглядають можливість застосування систем автоматичного контролю секцій (ASC), заснованих на картографічних даних, для обприскувачів з метою зменшення помилок перекриття під час внесення добрив і засобів захисту рослин. Раніше проведені дослідження показали, що такі технології можуть забезпечити суттєву економію для виробників, автоматично відключаючи секції штанг, коли вони проходять над вже обробленими ділянками або за межами поля.

Зменшення площі перекриття до 17% було зафіксовано під час порівняння 30-секційної ASC із одною секцією штанги на трьох полях неправильної форми. В іншому експерименті встановлено, що ASC із семи секцій забезпечило середнє зниження витрат на 6,2% на 21 полі порівняно з ручним контролем п'ятисекційних систем (MSC). Дані про вплив розміру та форми полів на потенційну економію можуть бути корисними для виробників, які розглядають придбання такої технології. Інтуїтивно зрозуміло, що прямокутні поля мають менший потенціал економії порівняно з ділянками неправильної конфігурації; проте кількісне визначення цих відмінностей є бажаним [4,7].

У минулих дослідженнях коефіцієнти форми полів аналізувалися з метою прогнозування їх продуктивності. Зокрема, автори [5] показали, що площа і конфігурація ділянок впливають на ефективну продуктивність, особливо на малих полях з крутими схилами. Інші дослідження [6] виявили сильну кореляцію між врожайністю та площею поля, тоді як індекси, отримані з інших параметрів форми, мали слабший зв'язок. У роботі [8] відзначено, що операційна ефективність була вищою на великих прямокутних полях. Вказано, що ефективність обробки знижується на ділянках неправильної форми через додатковий час, витрачений на розвороти.

У більш пізніх дослідженнях [8,13] показано сильний зв'язок між середнім кутом розвороту техніки під час посіву та збирання врожаю і продуктивністю поля. Зі збільшенням середнього кута повороту знижується

ефективність операцій. Хоча оптимізація траєкторії та скорочення часу проходження полів підвищує продуктивність, ще одним важливим аспектом є мінімізація часткового витрачання ресурсів. Зокрема, розглядається усунення перекриттів між проходами та оптимізація обробки на поворотах, наприклад, на пунктирних рядах.

Дослідники [10] створили обчислювальний підхід для оцінювання застосування перекриття в зонах поворотів та визначення довжини траєкторії, необхідної для покриття всіх проходів у межах поля. Результати показали, що найкоротший доступний маршрут для забезпечення повного охоплення ділянки не завжди забезпечує мінімальне перекриття у зоні розворотів. Аналіз гіпотетичних форм полів, проведений у [11], виявив, що такі елементи, як зарослі травою водні канали, присутні всередині поля, здатні збільшити площу перекриття штанг обприскувача.

Автори [13] провели стислий аналіз відмінностей у перекритті між системами MSC і ASC і зазначили тенденцію до збільшення площі перекриття при зростанні складності меж поля. У той же час у [14] було припущено, що надмірне використання рідини може бути подібним для різних систем керування штангами на полях більш правильної форми, хоча обмеження методології не дозволили підтвердити цю гіпотезу.

До цього часу не було представлено жодних публікацій, що здійснювали багатовимірний аналіз для визначення впливу форми полів на помилки перекриття у сільськогосподарських обприскувачів. Вимагаються додаткові дослідження, щоб з'ясувати, чи можна використати характеристики форми полів для прогнозування похибок внесення на самохідних обприскувачах. На основі таких даних виробники потенційно зможуть оцінити, чи призведе додавання контрольних секцій до істотної економії ресурсів у конкретних операціях.

Мета цього дослідження полягала у проведенні більш детального аналізу впливу розмірів і форм полів на площі перекриття для однієї системи

MSC та двох ASC. Конкретними завданнями були: (1) оцінити та представити будь-які значущі однофакторні або багатофакторні моделі для визначення величини перекриття трьома системами контролю секцій на основі вибраних параметрів форми поля та (2) з'ясувати, чи існує порогове значення площі перекриття, що обґрунтує перехід між системами керування з семи та дев'яти секцій.

РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Налаштування обприскувача та збір даних

Дане дослідження виконано на основі даних, отриманих від агровиробників, які здійснюють господарську діяльність на територіях, розташованих у північній та північно-східній частинах України. Протягом сезону 2024–2025 років для внесення добрив виробник застосовував самохідний обприскувач *Apache AS710 (Equipment Technologies, Mooresville, Індіана)* зі штангою довжиною 24,8 м, обладнаною 65 форсунками, встановленими з кроком 38,1 см.

Обприскувач був укомплектований польовим комп'ютером *Envizio Plus (Raven Industries, Sioux Falls, S.D.)*, який дозволяв записувати полігони покриття, що відображали оброблені ділянки поля. Керування нормою розпилення здійснювалося оператором за допомогою перемикачів контролера *SCS 4400 (Raven Industries, Sioux Falls, S.D.)* для п'яти секцій штанги або шляхом об'єднання всіх секцій у єдину. Система MSC мала п'ять секцій шириною зліва направо 3,05; 6,09; 6,48; 6,09 та 3,05 м відповідно.

Протягом 2024 року шейп-файли ділянок, оброблених добривами, були зафіксовані польовим комп'ютером для MSC на 41 полі, що охоплювало обробки до та після сходів, всього 74 заходи. У сезоні 2025 року до описаного обприскувача було додано систему ASC через вузол керування *AssuBoom (Raven Industries)*, яка забезпечувала дві додаткові секції штанги, розділивши попередні секції навпіл, у результаті чого система мала сім секцій керування.

У 2025 році польовий комп'ютер реєстрував покриття для семисекційної системи ASC на 46 полях, включаючи внесення до та після сходів, усього 50 обробок. Для збору даних у цьому сезоні застосовувався також третій варіант системи керування. Виробник використовував самохідний обприскувач *Apache AS715 (Equipment Technologies, Mooresville, Індіана)* зі штангою

24,8 м, оснащеною 65 соплами з кроком 38,1 см, та ідентичними системами автоматичного керування та DGPS, як було описано раніше.

Обприскувач мав польовий комп'ютер *Envizio Pro* (*Raven Industries, Sioux Falls, S.D.*) і вузол *ASC* (*AccuBoom, Raven Industries, Sioux Falls, S.D.*). Штанга мала центральну секцію шириною 6,48 м і чотири однакові секції по 2,29 м зліва та справа. Покриття дев'ятисекційної системи *ASC* було зафіксоване на 39 полях, де виконували 50 обробок після сходів.

Усі три обприскувачі були обладнані аналогічними системами автоматичного керування *SmarTrax* (*Raven Industries, Sioux Falls, S.D.*), налаштованими на забезпечення 15 см перекриття між паралельними проходами. Для навігації використовувався приймач *DGPS Phoenix 200* (*Raven Industries, Sioux Falls, S.D.*), що надавав субметрові GPS-дані через поправки *WAAS* для систем автоматичного керування та польових комп'ютерів. Відсоток вимкнення для систем *ASC* встановлювався на 100%, що гарантувало повне покриття під час внесення добрив.

Всі оператори починали роботу з першого обходу поля. Межі полів зазвичай наносилися на карту під час цього первинного проходу, тобто жодні контури не завантажувалися заздалегідь. Завдяки цьому межі були специфічними для кожної обробки, а помилки перекриття обмежувалися ділянками всередині окремих меж поля.

2.2 Аналіз даних

Файли зон покриття оброблялися із застосуванням програмного забезпечення *ArcMap* (версія *ArcGIS 9.3, ESRI, Redlands, Каліфорнія*) для кожного поля, інформація про яке була зібрана за допомогою польового комп'ютера. Дані покриття конкретних полів конвертувалися з формату десяткових градусів *WGS 1984* у систему координат *NAD 1983 State Plane Kentucky FIPS 1600* м.

Загальна площа покриття обчислювалася в *ArcMap* шляхом сумування площ окремих полігонів покриття, значення яких зберігалися у таблицях атрибутів кожного шейп-файлу, створеного польовим комп'ютером. Межі полів оцифровувалися в *ArcMap* за допомогою полігонів покриття, що дозволяло визначити зовнішні контури полів, а також наявні внутрішні перешкоди, і результати зберігалися у форматі шейп-файлів.

Розмір перекриття (у відсотках від площі всього поля) визначався шляхом віднімання площі полігону поля від площі покриття, а отримана різниця ділилася на площу поля для отримання відносного значення. У межах цього дослідження величина перекриття враховувала як повторення проходів агрегатів, так і перекриття зон розвороту, наприклад, у вигляді точкових рядів.

Для аналізу було визначено шість характеристик форми полів, які розраховувалися за допомогою *ArcMap* та *MS Excel*, і використовувалися як незалежні змінні в моделях оцінки величини перекриття. Інструмент «розрахунок геометрії» *ArcMap* застосовувався для обчислення площі кожного поля ($A, \text{м}^2$), загальної площі з урахуванням виключення внутрішніх перешкод, а також периметра ділянки ($P, \text{м}$). До периметра включалися контури внутрішніх перешкод або інших зон, які не піддавалися обприскуванню, що знаходилися в межах полів.

Найдовший паралельний прохід для покриття поля ($L, \text{м}$) визначався за допомогою інструменту «вимірювання» в *ArcMap* на основі перевірки шейп-файлів покриття, що дозволяло встановити фактичну довжину робочих проходів для обробки кожного поля.

Були розраховані наступні додаткові коефіцієнти форми поля: відношення периметра до площі ($P/A, \text{м}^{-1}$) і округлість (C), яку було розраховано за рівнянням 1:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}, \quad (1)$$

Індекс квадратного периметра (SPI) порівнював поле з периметром P квадрата з такою ж площею, що й досліджуване поле, і розраховувався за допомогою рівняння 2:

$$SPI = \frac{4\sqrt{A}}{P}, \quad (2)$$

Для виконання регресійного аналізу застосовували SAS (версія 9.2) з метою виявлення взаємозв'язків між помилкою перекриття та усіма можливими комбінаціями факторів, що характеризують форму поля. Процедура *proc reg* (SAS, 2009) використовувалася для оцінювання помилки надмірного застосування відносно факторів форми поля, які були визначені як значущі ($p < 0,05$) для кожної конкретної системи керування штангою.

Результати, отримані за допомогою множинної регресії, порівнювали з одиничними регресійними моделями для кожного фактора форми, щоб встановити, чи додавання додаткових змінних сприяє покращенню точності моделі. Крім того, у SAS виконували t-тести для перевірки того, чи вплив додавання двох контрольних секцій (перехід від ASC з семи до дев'яти секцій) призводив до статистично значимого зменшення частки перекриття на досліджуваних полях.

У t-тестах застосовували двосторонній LSD-тест, при цьому відмінності визнавалися значущими за $\alpha = 0,05$. Дані також відображалися на графіках для візуалізації взаємозв'язків між помилкою надмірного внесення від трьох систем керування та факторами форми поля, які виявилися значущими. Для кожного набору даних були побудовані трендові лінії, а також розраховані 95% довірчі інтервали разом зі стандартною помилкою моделі (SE).

За допомогою SAS проводили t-тести для порівняння коефіцієнтів регресії між MSC та ASC системами з сімома і дев'ятьма секціями, щоб оцінити статистичну значущість нахилів трендових ліній. Різниця між коефіцієнтами вважалася суттєвою при $p < 0,05$.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Одиничний регресійний аналіз

Результати проведеного єдиного регресійного аналізу для кожного типу системи керування обприскувачем продемонстрували схожі закономірності, які представлені в таблиці 1. Значна кількість факторів форми виявилася статистично значущою ($p < 0,05$) при прогнозуванні залежної змінної — перекриття — на окремих елементах. Розмір перекриття показав прямий зв'язок із величиною P/A у всіх трьох системах керування, водночас аналіз відобразив обернену залежність між відсотком перекриття та іншими характеристиками форми поля.

Таблиця 1 - Підсумок окремих регресійних аналізів для величини перекриття, що виникає для різних систем керування обприскувачем

Система контролю	Змінна	R ²	SE(%)
П'ятисекційна MSC	A	0.265	6.46
	P	0.252	6.52
	L	0.306	6.28
	P/A	0.569	4.95
	C	0.067	7.28
	SPI	0.058	7.31
Семисекційна ASC	A	0.239	2.12
	P	0.226	2.14
	L	0.326	2.00
	P/A	0.647	1.45
	C	0.001	2.43
	SPI	0.002	2.43
Дев'ятисекційна ASC	A	0.236	1.10
	P	0.126	1.26
	L	0.177	1.15
	P/A	0.593	0.81
	C	0.248	1.10
	SPI*	0.231	1.11

У кожному випадку єдина регресійна модель, що включає P/A, показала найвище значення коефіцієнта детермінації R² (тобто вважається

найефективнішою) разом із найменшою стандартною похибкою моделі. Тому для подальшого аналізу було обрано саме P/A , а не інші змінні, що досліджувалися. На рисунку 1 представлені межі шести полів, щоб наочно показати, як P/A може варіюватися між різними ділянками. Великі поля зазвичай характеризуються нижчими значеннями P/A , тоді як для менших ділянок спостерігається зворотна тенденція через обернену залежність між площею A та співвідношенням P/A . Втім, деякі поля із схожими площами (37,8 та 44,5 га) мають різні значення P/A (0,0119 та 0,0075 відповідно), що пояснюється відмінною конфігурацією периметрів ділянок (рис. 1).



Рис. 1 – Вибрані межі поля з дослідження з відповідними значеннями площі A та співвідношення P/A

Рисунок 2 створено для додаткової демонстрації взаємозв'язку між площею A та співвідношенням P/A для всіх полів, що були задіяні у дослідженні. Як уже зазначалося, величина P/A помітно зменшувалася зі зростанням площі досліджуваних ділянок. Проте на рис. 2 також видно варіацію P/A навіть для полів із подібними значеннями площі, що видно по

розташуванню окремих точок. Для наочності на рисунку відображено залежність P/A від A для ідеально круглого поля, що дозволяє продемонструвати, як розмір ділянки впливає на співвідношення P/A . Зі збільшенням складності межі поля величина P/A підвищується у порівнянні з круглою ділянкою.

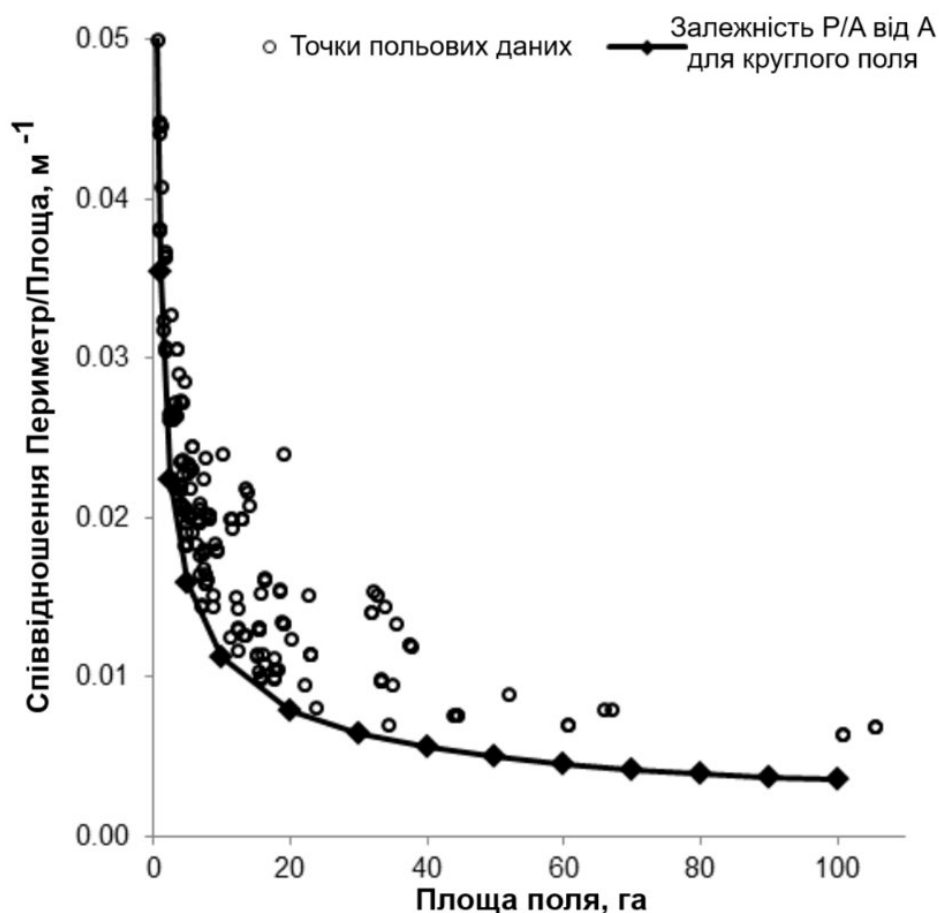


Рис. 2 - Зв'язок між P/A та A для всіх полів (точок даних) у цьому дослідженні, включаючи P/A проти A для круглого поля

Співвідношення між відсотком перекриття та P/A для системи MSC показане на рисунку 3. Площа розглянутих полів коливалася від 0,7 до 101,0 га, зі значеннями P/A у діапазоні 0,006 – 0,050 м⁻¹. Величина перекриття (% від площі поля) складала від 2,1% до 38,9%; при цьому зі збільшенням P/A нахил трендової лінії становив 5,97, а перетин із віссю – 0,024 у межах досліджуваних полів. Значення R^2 для моделі дорівнювало 0,569, а стандартна похибка SE – 4,95% (рис. 3).

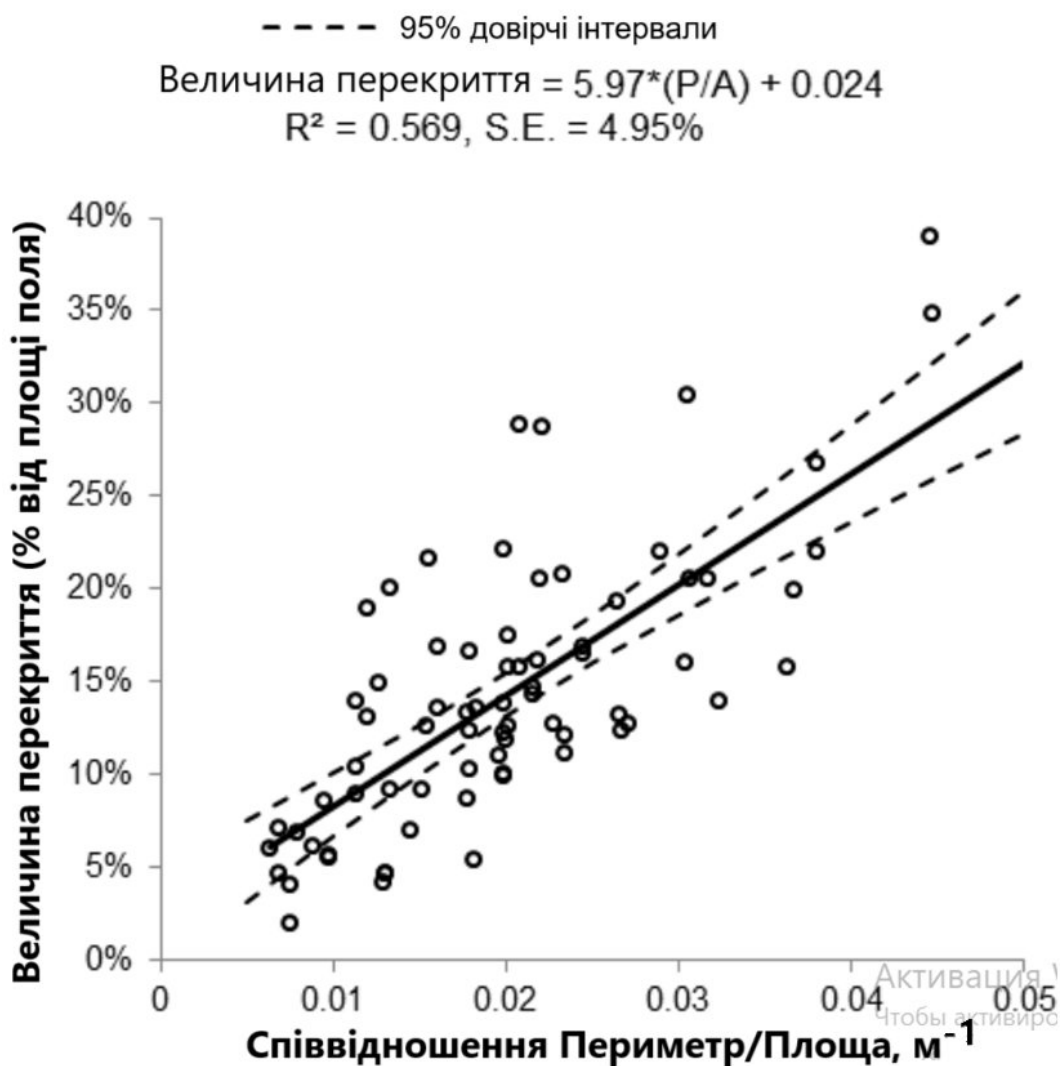


Рис. 3 - Величина перекриття порівняно з P/A для системи MSC з п'ятьма секціями

Спостерігалися певні відхилення в отриманих даних, про що свідчить модель SE зі значенням 4,95% для цього набору вимірювань. Значна частина варіацій, ймовірно, була пов'язана з діями оператора, який міг керувати до п'яти секцій вручну або об'єднувати всю штангу в одну керовану секцію.

За результатами спілкування з виробником з'ясувалося, що під час входу та виходу з розвороту штанга часто працювала як єдина секція через високі швидкості (>19 км/год), характерні для цих маневрів. Відокремити випадки ручного керування окремими секціями від керування всією штангою не було можливості, оскільки обидва підходи часто застосовувалися в межах одного проходу поля. Нахил регресії для помилки перекриття відносно P/A був схожим на попереднє значення (6,38), визначене для п'ятисекційної системи

MSC. Втім, попереднє дослідження проводилося на обмеженій кількості польових обробок (21), тоді як у поточному дослідженні використовували 74 проходи. Це дозволяє отримати більш надійні прогнози помилки перекриття.

Величина перекриття відносно P/A для семисекційної системи ASC показана на рис. 4. Розміри досліджуваних полів коливалися від 0,8 до 101,0 га, а значення P/A для цієї системи становили від 0,006 до 0,050 м¹. Частка перекриття варіювала від 1,3% до 13,9%; із підвищенням P/A нахил трендової лінії дорівнював 2,04 із перетином 0,0185 для досліджуваних ділянок. Значення R² для побудованої моделі становило 0,647, а модель SE мала показник 1,45% (рис. 4).

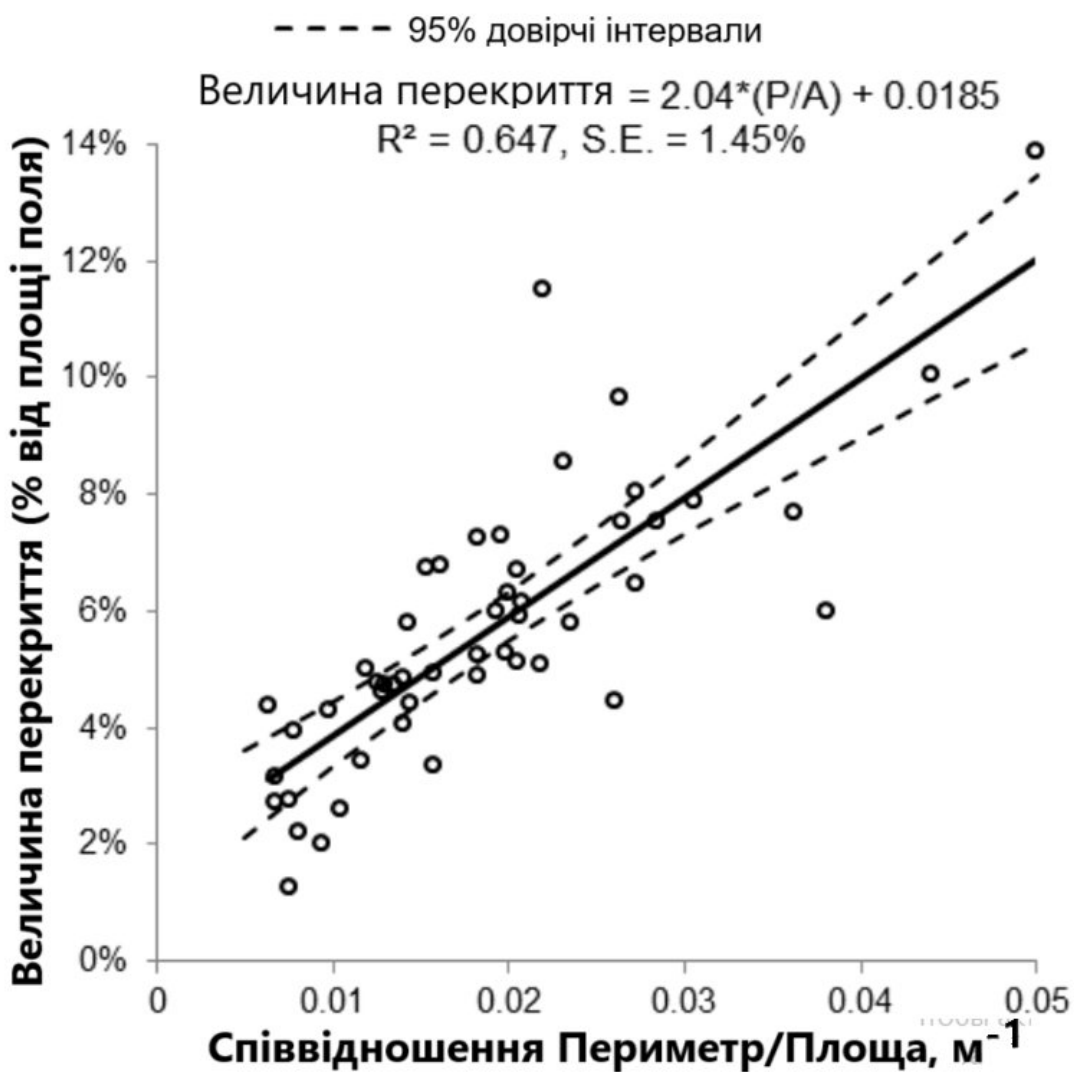


Рис. 4 - Величина перекриття залежно від P/A для семисекційної системи ASC

Нахил трендової лінії був приблизно в три рази меншим, ніж для п'ятисекційної MSC, що свідчить про те, що частка перекриття зростала повільніше зі збільшенням складності конфігурації поля. Регресія для величини перекриття відносно P/A показала менший нахил, ніж раніше запропоноване значення (2,28) для семисекційної ASC. Модель SE у цьому випадку була нижчою, ніж у системи MSC, що означає більш точне прогнозування реальних значень. Це закономірно, оскільки ASC використовувалася послідовно під час всіх польових проходів.

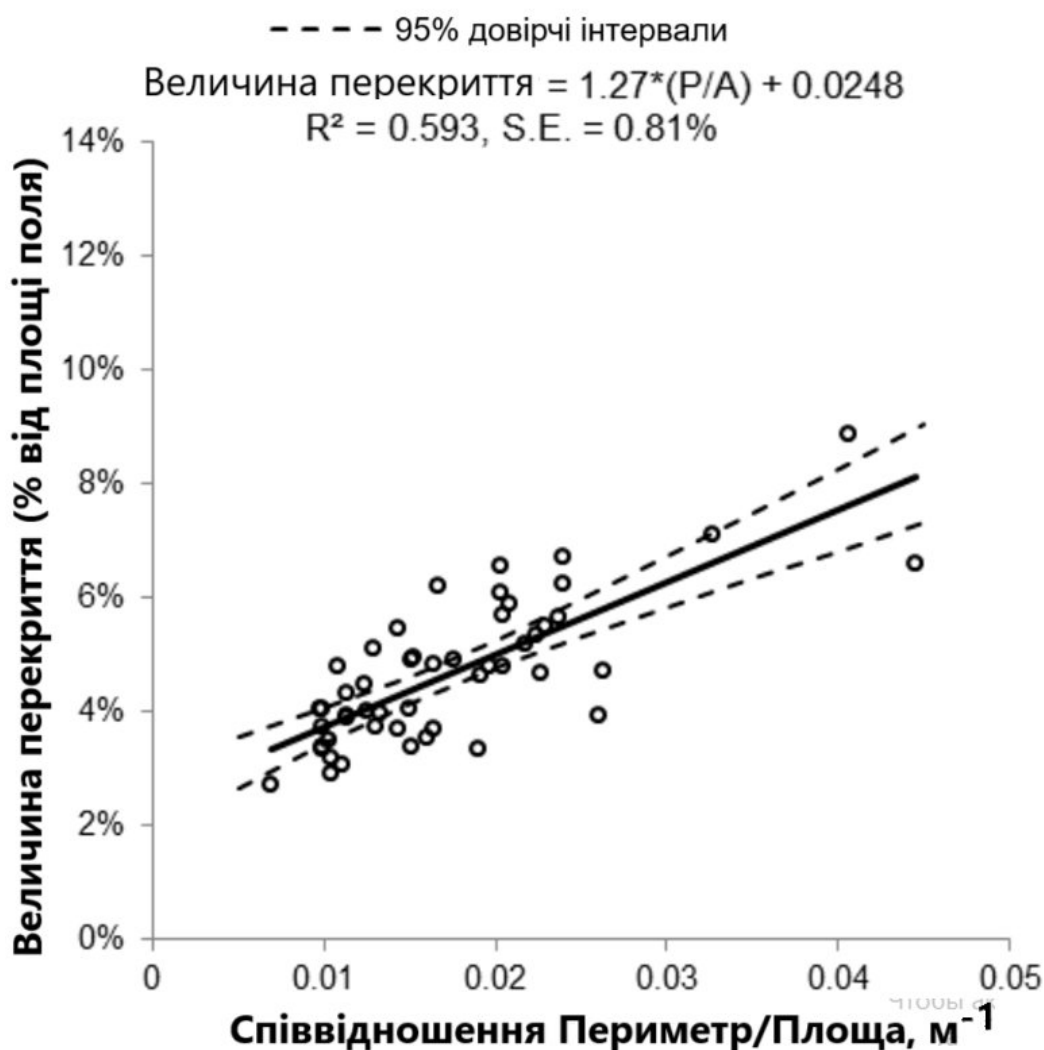


Рис. 5 - Величина перекриття порівняно з P/A для дев'ятисекційної системи ASC

На рис. 5 наведено залежність величини перекриття від P/A для дев'ятисекційної системи ASC. Площі полів, оброблених цією системою,

знаходилися в межах від 1,2 до 35,6 га, тоді як P/A змінювалося від 0,007 до 0,044 м1. Частка повторного нанесення становила від 2,7% до 8,9%.

Нахил регресії між величиною перекриття та P/A дорівнював 1,27 із перетином 0,0248. Для дев'ятисекційної системи нахил трендової лінії становив майже дві третини від аналогічного показника семисекційної ASC. Це вказує на те, що з ростом складності форми поля дев'ятисекційна система змогла утримувати менший рівень перекриття, що відповідало очікуванням. Модель SE склала 0,81% (найнижчий показник серед усіх контрольних систем) із $R^2 = 0,593$, що підтверджує задовільну відповідність між даними та прогнозом.

3.2 Множинний регресійний аналіз

Декілька проведених аналізів лінійної регресії надали скориговані значення R^2 разом із стандартною помилкою (SE), де вихідні дані представлені як квадратний корінь MSE у SAS, для кожної комбінації факторів, що описують форму поля і використовуються для прогнозування величини перекриття. У Таблиці 2 наведено оптимальні моделі (визначені на основі скоригованого R^2) із кожної категорії комбінацій змінних, що включають від двох до шести факторів, призначених для системи MSC.

Таблиця 2. Підсумок множинного регресійного аналізу для величини перекриття при використанні MSC

Змінні, включені в модель	Скориговане R^2	Стандартна помилка (%)
A, P, L, P/A, C, SPI	0.573	4.89
A, P, L, P/A, C	0.577	4.87
P, L, P/A, SPI	0.582	4.84
P, L, P/A	0.581	4.85
P/A, SPI	0.571	4.90

Відповідно до інформації, наведеної в таблиці 2, додавання додаткових змінних у модель дійсно сприяло покращенню її підгонки, що проявилось у незначному зниженні стандартної помилки (SE). Це покращення спостерігалось по мірі включення змінних, поки в аналіз не були додані чотири фактори. У цьому випадку було досягнуто найвищого скоригованого коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,582$) разом із мінімальним значенням SE (4,84%). Водночас, лише показник P/A залишався статистично значущим ($p < 0,05$) у всіх побудованих моделях, за винятком випадку з трьома змінними, де L не мав значущості.

Отже, жодна з моделей множинної регресії не продемонструвала комбінацій, у яких усі включені змінні були б значущими. Це свідчить про те, що додавання зазначених факторів у модель не обов'язково підвищує її придатність у порівнянні з менш складними варіантами.

Таблиця 3 - Підсумок множинного регресійного аналізу для величини перекриття системи ASC із семи секцій

Змінні, включені в модель	Скориговане R^2	Стандартна помилка (%)
A, P, L, P/A, C, SPI	0.573	1.40
A, P, P/A, C, SPI	0.670	1.38
A, P/A, C, SPI	0.675	1.37
P/A, C, SPI	0.679	1.37
P/A, C	0.668	1.39

Таблиця 3 демонструє найкращі моделі, оцінені для системи, що складається з семи секцій, за показником скоригованого R^2 . Найвищий скоригований R^2 (0,679) при одночасно найменшому стандартному відхиленні (SE = 1,37%) був отриманий у моделі з трьома змінними (P/A, C і SPI). При цьому єдиною статистично значущою змінною в цій конфігурації виявився P/A ($p < 0,05$). Для моделі, яка включала лише дві змінні (див. таблицю 3), як P/A, так і C мали значущий вплив, хоча зміни у скоригованому R^2 були незначні (0,668), а SE трохи збільшився до 1,39% у порівнянні з тризмінною моделлю. Варто також підкреслити, що двозмінна модель з P/A та

SPI дала схожі результати (скоригований $R^2 = 0,663$, $SE = 1,40\%$), причому обидві змінні залишалися статистично значущими. Як уже зазначалося, P/A постійно демонстрував значущість у всіх випробуваних моделях.

Таблиця 4 відображає результати регресійного аналізу для системи ASC із дев'ятьма секціями. Найвищий скоригований R^2 (0,658) спостерігався у моделі, що включала три змінні, і вона також забезпечила мінімальне значення SE (0,75%). У цьому випадку як P/A, так і SPI виявилися значущими ($p < 0,05$). Водночас підвищення продуктивності моделі порівняно з двозмінною конфігурацією було незначним: для моделі з двома змінними (P/A та SPI) скоригований R^2 складав 0,631, а SE дорівнював 0,76%.

Таблиця 4 - Зведення множинного регресійного аналізу для величини перекриття дев'ятисекційної системи ASC

Змінні, включені в модель	Скориговане R^2	Стандартна помилка (%)
A, P, L, P/A, C, SPI	0.612	0.78
P, L, P/A, C, SPI	0.620	0.77
A, L, P/A, SPI	0.629	0.76
L, P/A, SPI	0.658	0.75
P/A, SPI	0.631	0.76

Слід відзначити, що двозмінна модель, яка включала P/A та C, продемонструвала такі ж показники (скоригований $R^2 = 0,630$, $SE = 0,76\%$), як і інша двозмінна модель із P/A та SPI, де обидва фактори виявилися статистично значущими. Як було зазначено раніше, аналогічний результат спостерігався для системи з семи секцій, причому співвідношення P/A залишалось значущим у всіх розглянутих моделях.

Зрештою, слід зіставити переваги включення додаткових змінних до регресійної моделі із простотою однозмінних підходів. Параметри P/A, C і SPI обчислювалися на основі значень A і P, визначених поза межами фізичного поля, що, ймовірно, призводило до певної надлишковості серед моделей. Множинні регресійні моделі не забезпечили значного покращення

відповідності або SE у порівнянні з однозмінною моделлю, заснованою на перекритті з P/A, для трьох систем управління обприскувачем.

Якби вдалося досягти суттєвого покращення, це могло б виправдати подальший аналіз мультиколінеарності серед незалежних змінних. Однак, виходячи з отриманих результатів, це питання виходить за рамки поточного дослідження. У випадку представлених даних виявилось, що модель з однією змінною демонструє задовільну ефективність порівняно з перевіреними багатозмінними підходами.

3.3 Аналіз обробки контрольної ділянки

На рисунку 6 представлені трендові криві величини перекриття у залежності від співвідношення P/A для трьох аналізованих систем керування, що дозволяє наочно показати відмінності між цими моделями. З рисунку 6 також видно, що при ускладненні форми поля або зменшенні його розмірів величина перекриття підвищується у всіх трьох системах.

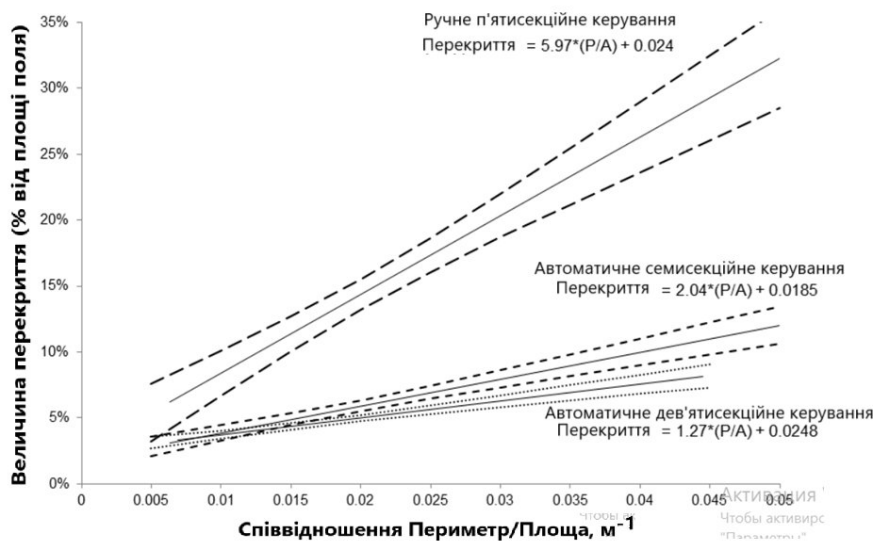


Рис. 6 - Лінії тренду для величини внесення з перекриттям залежно від P/A з 95% довірчими інтервалами для всіх трьох систем керування обприскувачем

Результати t-тестів свідчать про те, що нахили регресій істотно відрізнялися ($p < 0,05$) серед трьох контрольних систем у всіх проаналізованих полях. Це свідчить про те, що використання ASC призвело

до помітного зменшення помилки перекриття порівняно з MSC, тоді як ASC із дев'ятьма секціями продемонструвала значно менший рівень перекриття у порівнянні з версією з семи секцій. Ще однією відмінністю між двома конфігураціями ASC є те, що для P/A близько 0,0175 (рис. 6) 95% довірчі інтервали починають частково накладатися. Це може означати, що при збільшенні площі полів або спрощенні їх форми додавання додаткових контрольних секцій до ASC не завжди дає суттєве скорочення перекриття.

Для перевірки цієї гіпотези дані щодо помилок перекриття були розділені на дві групи залежно від значень P/A ($<$ або $>$ 0,0175) для обох версій ASC. Для проведення t-тестів обрано два варіанти обприскування — системи із сімома та дев'ятьма секціями. Аналіз показав, що при P/A менше 0,0175 (24 та 29 полів відповідно для систем із семи та дев'яти секцій) істотних відмінностей у величині перекриття не виявлено. У той же час, для полів із P/A більше 0,0175 система з дев'ятьма секціями показала значно меншу величину перекриття порівняно з версією з семи секцій. Ці результати підтверджують, що зі збільшенням площі або спрощенням форми полів ефективність додаткових секцій ASC може зменшуватися.

Варто зазначити, що ширина контрольних секцій може мати таку ж важливу роль у зниженні перекриття, як і загальна кількість секцій. У випадках перекриття поворотної смуги (наприклад, точкових рядів) ширші секції штанги забезпечують більшу площу накладання порівняно з вузькими контрольними сегментами. Наприклад, дев'ятисекційна ASC мала велику центральну секцію шириною 6,48 м та чотири рівновіддалені бокові секції по 2,29 м. У семисекційній конфігурації центральна секція становила 6,47 м, а бокові — одна 6,09 м і дві по 1,53 м з обох сторін. Якби контрольні сегменти були розподілені рівномірніше (наприклад, секції 6,09 м мали б меншу ширину), це могло б дати додаткове зменшення перекриття для системи з семи секцій. Також слід підкреслити, що у цьому дослідженні помилки перекриття між проходами були подібними для обох ASC, оскільки на обох

обприскувачах використовувалися однакові автоматичні системи керування.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження свідчать про наявність взаємозв'язку між розрахованими величинами перекриття при використанні систем MSC та ASC та різними параметрами форми поля. Моделі багатофакторної регресії не показали суттєвого підвищення точності порівняно з однозмінною моделлю, що базується на показнику P/A. Значення перекриття для п'ятисекційної MSC системи демонструвало прямий зв'язок із величиною P/A ($R^2 = 0,569$), що відповідає подібним результатам для ASC систем із сімома та дев'ятьма секціями ($R^2 = 0,647$ та $0,593$ відповідно).

Статистичний аналіз підтвердив значущість взаємозв'язку між площею перекриття та показником P/A ($p < 0,05$) для всіх трьох розглянутих систем управління. Перекриття збільшувалося швидше у систем MSC, що вказує на те, що у разі зростання складності поля — наприклад, через наявність трав'яних водних каналів, ставків або лісових масивів — ASC може забезпечити додаткові можливості для зменшення перекриття.

Як передбачалося, у системі ASC із дев'ятьма секціями спостерігалось менше накладень у порівнянні з сімсекційною версією, що пов'язано зі збільшенням P/A. Подальший аналіз моделей для ASC систем із різною кількістю секцій показав, що додавання двох додаткових контрольних секцій не призводить до значного скорочення перекриття на полях із низькими значеннями P/A.

Інші переваги ASC, зокрема зручність оператора, оцінити важче. Подібно до систем автонаведення, не всі позитивні ефекти ASC легко піддаються кількісному вимірюванню. Можливо, необхідні додаткові дослідження для з'ясування того, чи впливають невивчені тут аспекти форми поля на покращення оцінки перекриття за різних сценаріїв керування штангами.

Крім того, слід окремо проаналізувати вплив систем автоматичного рульового керування на ASC, щоб оцінити їх індивідуальний внесок у зміну площ перекриття. Майбутні дослідження систем із підвищеною роздільною здатністю контролю секцій можуть дати більш повне розуміння компромісу між збільшенням капітальних витрат на розширений контроль і потенційним додатковим зменшенням перекриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/ (accessed on 13 November 2022).
2. Virk, S.; Meena, R. Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers. University of Georgia Cooperative Extension, Athens, GA. Circular 1277; 2022; pp. 1–8. Available online: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277> (accessed on 14 February 2023).
3. Carroll, J. The Effects of Sprayer Speed and Droplet Size on Herbicide Burndown Efficacy. Master's Thesis, University of Arkansas, Fayetteville, AK, USA, 2017. Available online: <https://scholarworks.uark.edu/etd/2435> (accessed on 11 November 2022).
4. ASABE S572.3; Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
5. ASABE S592.1; Best Management Practices for Boom Spraying. American Society of Agricultural Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2020.
6. Virk, S.; Prostko, E.; Kemerait, R.; Abney, M.; Rains, G.; Powell, C.; Carlson, D.; Jacobs, J.; Tyson, W. On-Farm Evaluation of Nozzle Types for Peanut Pest Management Using Commercial Sprayers. *Peanut Sci.* 2021, 48, 87–96.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkievicz, A.; Pecyna, A.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.

9. Amankulova K., Farmonov N., Mucsi L. Time-series analysis of Sentinel-2 satellite images for sunflower yield estimation, *Smart Agricultural Technology*, Vol. 3, 2023 DOI:10.1016/j.atech.2022.100098.
10. Grella, M.; Gioelli, F.; Marucco, P.; Zwertvaegher, I.; Mozzanini, E.; Mylonas, N.; Nuyttens, D.; Balsari, P. Field Assessment of a Pulse Width Modulation (PWM) Spray System Applying Different Spray Volumes: Duty Cycle and Forward Speed Effects on Vines Spray Coverage. *Precis. Agric.* 2022, 23, 219–252.
11. Kang, J.; Liu, G.; Guo, G. Image Preprocessing and Droplet Parameter Measurement Of-Sensitive Paper Based on ImagePy. *Sci. Technol. Eng.* 2021, 21, 10.
12. Процеси, машини таобладнання АПВ [Текст] : навч. посіб. / М. О. Свірень, В. П. Смірнов, І. М. Осипов та ін. - Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2018. - 296 с.
13. Ru Y, Liu Y Y, Qu R J, Patel M K. Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6): 1–6.
14. Appah, S., Jia, W., Ou, M., Wang, P., Gong, C. (2019b). Investigation of optimum applied voltage, liquid flow pressure, and spraying height for pesticide application by induction charging. *Appl. Eng. Agric.* 355, 795–804. doi: 10.13031/aea.13358.
15. Appah, S., Wang, P., Ou, M. X., Gong, C., Jia, W. D. (2019a). Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 122, 1–9. doi: 10.25165/j.ijabe.20191202.4673.
16. Ru, Y., Liu, Y. Y., Qu, R. J., Patel, M. K. (2020). Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 136, 1–6. doi: 10.25165/j.ijabe.20201306.5511
17. Wang, S., Li, X., Zeng, A., Song, J., Xu, T., Lv, X., et al. (2022). Effects of adjuvants on spraying characteristics and control efficacy in unmanned

aerial application. *Agriculture* 12, 138. doi: 10.3390/agriculture12020138

18. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.

19. Jupp L. (2018). *Precision Farming From Above*. Writing Matters Publishing, 113 p.

20. Toraman, M.C. Effects of Leaf Surface Energy on Pesticidal Performance. *Tarim Bilim. Derg.* 2019, 25, 174–180.

21. Colaço, A., Bramley, R., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *F. Crop. Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.

22. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.

23. Shan, C.; Wang, G.; Wang, H.; Xie, Y.; Wang, H.; Wang, S.; Chen, S.; Lan, Y. Effects of Droplet Size and Spray Volume Parameters on Droplet Deposition of Wheat Herbicide Application by Using Uav. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021, 14, 74–81.

24. Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2019. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agric.* 163, 104863. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863>.

25. Mendes, W.R., Araújo, F.M.U., Dutta, R., Heeren, D.M., 2019. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Syst. Appl.* 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

Додатки