

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри

Михайло ШУЛЯК

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження впливу елементів точного землеробства на показники якості посіву просапних культур»

Виконав:

(підпис)

Ярослав КАСЬЯН

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2401-2м

Науковий керівник:

(підпис)

Михайло ШУЛЯК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Касьян Ярослав Сергійович

Дослідження впливу елементів точного землеробства на показники якості посіву просапних культур.

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 47 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 5 таблиць, 15 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Метою даної роботи є всебічна оцінка здатності системи дозування насіння забезпечувати якісне розділення насінин у різних типовими робочих сценаріях. Це включає виконання двох ключових завдань: по-перше, кількісне визначення точності роботи електричної системи дозування за допомогою високошвидкісної технології зображення; по-друге, встановлення й аналіз робочих режимів та станів машини, які можуть впливати на кінцеву точність висіву. Особлива увага приділялася визначенню того, як зміна швидкості руху, тип траєкторії чи норма висіву позначаються на появі пропусків або двійників.

Для реалізації поставлених цілей сівалці Horsch Maestro 24.30 надсилали команди для виконання посіву на фіксованих швидкостях 7,2; 9,7 та 12,0 км/год, а також у режимах прискорення та уповільнення з динамікою 2,4 і 4,8 км/с. Такі режими забезпечували розгін машини від повної зупинки до робочої швидкості та подальше гальмування назад до нульової. Це дозволило детально дослідити поведінку дозувального апарата у ситуаціях, коли швидкість змінюється у часі, що є поширеним під час реальних польових умов.

Крім того, сівалці надсилалися команди для здійснення посіву вздовж контурів різного радіуса — 20, 40, 80 та 150 метрів. Для кожного радіуса використовували різні швидкості руху, зокрема 0; 2,4; 4,8; 6,4; 7,2; 9,7; 12,1;

12,9; 14,5 та 16,1 км/год. Моделювання процесу висіву проводили при двох нормах — 44 550 та 89 110 насінин на гектар, що дозволило простежити вплив густоти висіву на стабільність роботи дозувальної системи та неперервність подачі насіння.

Для вимірювання точності висіву була розроблена високошвидкісна система візуалізації на основі програмного середовища LabVIEW. Вона забезпечувала реєстрацію процесу сингуляції насіння в режимі реального часу зі швидкістю 300 кадрів за секунду. Система об'єднувала інформацію про стан роботи сівалки, дані з датчика насіннєпроводу та результати оптичних вимірювань насіння. Така інтеграція дозволила виключно точно оцінити кількість висіяних насінин, частоту виникнення пропусків, а також частоту формування двійників під час роботи на різних швидкостях і режимах руху.

Ключові слова: точність висіву, електричні вимірювачі висіву, високошвидкісна візуалізація, сингуляція, контроль норми.

ABSTRACT

Kasyan Yaroslav Serhiyovych

Study of the influence of precision farming elements on the quality indicators of row crop sowing.

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

The final qualification work is presented on 47 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 5 tables, 15 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

The purpose of this work is a comprehensive assessment of the ability of the seed dosing system to provide high-quality separation of seeds in various typical operating scenarios. This includes the implementation of two key tasks: first, quantitative determination of the accuracy of the operation of the electric dosing

system using high-speed imaging technology; secondly, the establishment and analysis of the operating modes and states of the machine that can affect the final accuracy of sowing. Particular attention was paid to determining how a change in speed, type of trajectory or seed rate affects the appearance of gaps or doubles.

To achieve the set goals, Horsch Maestro 24.30 seeders sent commands to perform sowing at fixed speeds of 7.2; 9.7 and 12.0 km/h, as well as in acceleration and deceleration modes with dynamics of 2.4 and 4.8 km/s. Such modes provided acceleration of the machine from a complete stop to operating speed and subsequent braking back to zero. This allowed a detailed study of the behavior of the metering device in situations where the speed changes over time, which is common in real field conditions.

In addition, the seeders were sent commands to sow along contours of different radii — 20, 40, 80 and 150 meters. For each radius, different speeds were used, in particular, 0; 2.4; 4.8; 6.4; 7.2; 9.7; 12.1; 12.9; 14.5 and 16.1 km/h. The seeding process was simulated at two rates — 44,550 and 89,110 seeds per hectare, which made it possible to trace the influence of seeding density on the stability of the dosing system and the continuity of seed supply. To measure seeding accuracy, a high-speed visualization system based on the LabVIEW software environment was developed. It provided registration of the seed singulation process in real time at a speed of 300 frames per second. The system combined information about the working condition of the seeder, data from the seed tube sensor and the results of optical seed measurements. Such integration allowed to estimate with exceptional accuracy the number of sown seeds, the frequency of omissions, as well as the frequency of formation of doubles during operation at different speeds and driving modes.

Keywords: sowing accuracy, electric seed meters, high-speed visualization, singulation, rate control.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Аналіз досліджень по темі роботи	10
Розділ 2. Методика досліджень	16
2.1 Конфігурація сівалки.....	16
2.2 Система вимірювання та керування.....	18
2.3 Експериментальний план посіву.....	20
2.4 Налаштування високошвидкісної системи обробки зображень (HSIS).....	22
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	31
Висновки.....	42
Список використаних джерел.....	44

ВСТУП

1. Актуальність теми

Існування пропусків або двійників безпосередньо впливає на формування врожаю, тому аналіз цих процесів у поєднанні з сучасними системами візуального контролю є надзвичайно важливим.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на оцінку роботи систем електричного дозування у динамічних польових умовах із застосуванням високошвидкісних технологій реєстрації, мають як наукову, так і значну практичну цінність для підвищення ефективності функціонування сівалок нового покоління.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Проблематика забезпечення високої точності висіву просапних культур є предметом значної кількості наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. У роботах вітчизняних та зарубіжних учених розглянуто питання конструктивних особливостей висівних апаратів, впливу параметрів руху агрегату на рівномірність висіву, особливості формування пропусків і двійників, а також можливості використання електричних систем дозування.

Недостатньо вивченими залишаються питання адекватного функціонування електричних дозувальних систем у складних сценаріях руху, зокрема на криволінійних траєкторіях різного радіуса або при різкій зміні швидкості. Також актуальним є вивчення точності висіву за допомогою високошвидкісної візуалізації, що дозволяє отримувати найбільш достовірні дані щодо сингуляції насіння.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є оцінка здатності системи електричного дозування насіння забезпечувати якісну сингуляцію та розміщення насінин у різних типових робочих сценаріях, включаючи зміни швидкості та геометрії руху.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес висіву насіння просапних культур із використанням електричних систем дозування.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є точність сингуляції та рівномірність висіву, а також параметри роботи дозувального апарата за різних режимів руху сівалки та різної густоти висіву.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до забезпечення точності висіву та визначити основні фактори, що впливають на формування пропусків і двійників.
2. Розробити та реалізувати експериментальний план досліджень для різних швидкісних і траєкторних режимів руху.
3. Проаналізувати отримані дані та визначити закономірності впливу параметрів руху на якість формування насінневого потоку.

7. Методи дослідження

У роботі використано комплекс методів, серед яких:

- експериментальні методи дослідження технологічного процесу висіву;
- високошвидкісна відеозйомка (HSIS) з подальшою обробкою даних у середовищі LabVIEW;
- методи математичного та статистичного аналізу результатів;
- методи планування експерименту для оцінки впливу різних режимів руху;
- системний аналіз для оцінювання інтегрованої роботи електричних дозувальних систем.

8. Структура та обсяг роботи

Випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст подано на 47 сторінках, містить 5 таблиць, 15 рисунків і 2 додатки. Список використаних джерел налічує 25 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ТЕМІ РОБОТИ

У сучасних умовах значна частина виробників у сільському господарстві переходить від традиційних способів висіву до передових технологічних рішень, здатних працювати на підвищених робочих швидкостях. Це дозволяє збільшити продуктивність операцій та мінімізувати період перебування техніки в полі під час виконання посівних робіт. Прискорення темпів висіву сприяє ефективнішому виконанню робіт у господарствах великого масштабу, які мають у своєму розпорядженні значні площі ріллі та обмежені часові рамки для завершення посівної кампанії відповідно до агротехнологічних строків.

Зростання продуктивності дає змогу аграріям засівати ту саму площу за менший проміжок часу, що позитивно впливає на витрати, пов'язані з експлуатацією машинно-тракторного парку, його технічним обслуговуванням і залученням персоналу. Окрім цього, застосування інтелектуальних систем керування забезпечує високоточний контроль просторового розподілу насіння та потрібних норм висіву, що сприяє кращому використанню потенціалу ґрунтів і підвищує врожайність площ.

Сучасні методи регулювання параметрів посіву та раціонального використання ресурсів рослинництва не лише підтримують збільшення обсягів виробництва, а й сприяють більш відповідальному ставленню до природного середовища. Історично перші механізовані системи висіву з'явилися наприкінці XIX століття: висівні механізми точного посіву отримували рух від приводних коліс, що котяться по поверхні ґрунту. Такі механічні сівалки й нині залишаються дієвими, оскільки забезпечують синхронізацію швидкості висівного апарата зі зміною швидкості руху агрегату по полю.

Посівний механізм має можливість регулювати два ключові параметри: кількість насінин на одиницю площі (густоту стояння рослин) та швидкість руху обладнання. Результати численних досліджень підкреслюють

надзвичайне значення рівномірного розташування насіння та правильно встановленої глибини, адже саме це забезпечує оптимальне використання посівного матеріалу й ефективніше поглинання сонячної енергії рослинами для формування високих урожаїв.

За інформацією Pr. Planting Inc., навіть зменшення рівня якості висіву лише на 1% призводить до втрати приблизно 150 кг/га потенційної врожайності. Оцінювання якості виконання посівних операцій передбачає співвідношення фактичної густоти посіву з теоретично встановленими інтервалами між насінинами, що виражається у відсотковому показнику точності дозування.

У проведених порівняльних дослідженнях (див. [5]) наведено трактування термінів «висівна секція» й «висівний апарат» згідно зі стандартом ASABE S506 у поєднанні з положеннями ISO 7256/1, що регламентують визначення пропусків і повторного висіву (подвійного або потрійного). Незважаючи на те, що механічні сівалки з приводом від опорних коліс забезпечують стабільні результати на звичайних швидкостях, при збільшенні темпу руху зростає вплив проковзування приводу та коливань у ланцюгових передачах, що може негативно позначатися на точності висіву та рівномірності розміщення насіння в рядку.

На додачу до цього, опорно-ходові колеса зазвичай забезпечують привід для окремих висівних механізмів або, частіше, одразу для більшості чи навіть усіх секцій на рамі сівалки. У результаті швидкість висівання кожного робочого вузла лишається сталою по всій ширині машини або приводної частини агрегату, що фактично не дає змоги брати до уваги різницю в кутових швидкостях по довжині рами під час роботи на загнутому, нерівному чи звивистому маршруті сівби. Через це виникає порушення встановлених інтервалів між насінинами при виконанні посіву по криволінійній траєкторії: внутрішня сторона агрегату укорочується, а зовнішня — отримує завищений крок розміщення насіння порівняно з рекомендованим. Доведено, що похибки розподілу насіння, включаючи надто щільний або, навпаки, недостатній його

висів, стають відчутнішими із ростом ширини агрегату та збільшенням робочої швидкості.

Крім того, з розширенням габаритів сучасних сівалок та підвищенням темпів їх руху поля неправильної, складної форми посилюють ризики появи повторних проходів, пропусків або перекриттів між суміжними рядами. Такі невідповідності технології та вимушені відхилення від оптимальної схеми посіву зрештою зумовлюють підвищення витрат підприємства й погіршення ефективності використання насіння.

Конфігурація полів зі значною кількістю вигинів і обмежень створює потребу в системах автоматичного керування окремими секціями (ASC), що здатні оперативно подавати команди на відключення чи регулювання конкретних висівних блоків. Завдяки такому підходу забезпечується підтримання нормативних доз внесення насіння, запобігання зайвим перекриттям, контроль висіву у зонах поворотів, на розворотних смугах, у місцях, де рядки вже засіяні, а також на ділянках з перешкодами — терасах чи підтопленій території.

Для реалізації точного індивідуального керування висівними апаратами відповідно до особливостей конкретної локальної ділянки та для задоволення зростаючої потреби в збільшенні швидкості посіву провідні компанії перейшли до застосування електроприводних систем дозування. Такі системи ефективно нівелюють ті конструкційні й кінематичні обмеження, що властиві традиційному опорному приводу, як було зазначено вище. Електричний привід звільняє від залежності від механічних вузлів, які потребують тертя для контролю висіву, і дає змогу точно регулювати частоту обертання дозаторів відповідно до зміни швидкості руху машини, забезпечуючи більшу точність і стабільність норми висіву.

Електрична система керування дозуванням насіння на кожному окремому висівному модулі має цілу низку істотних переваг перед традиційними технологіями: модульний принцип побудови, простота технічного обслуговування, мінімальна кількість рухомих елементів,

схильних до зношування, а також можливість працювати незалежно з кожним агрегатом висіву.

Автоматизовані індивідуальні висівні блоки відкривають застосування різних технологій точного землеробства без потреби встановлення додаткових механізмів, включаючи посів по контуру поля, регулювання рядкових режимів та варіювання норми висіву відповідно до заданих агрономічних параметрів. Системи ASC базуються на електронних засобах вимірювання та контролю подачі насіння, що дозволяє працювати на окреслених ділянках поля зі встановленими нормами висіву, компенсуючи вплив зміни швидкості руху агрегату. У цілому впровадження електронних автоматизованих засобів керування забезпечило рівень роботизації, який перевищує фізичні та когнітивні можливості оператора підтримувати стабільну точність вручну.

Встановлено, що системи автоматичного керування посівними секціями (ASC) забезпечують окупність інвестицій менш як за два роки. Це досягається шляхом скорочення витрат на основні ресурси приблизно на 1–12% по всій площі поля, а середня економія становить близько 4,3–7,0% від вартості посівного матеріалу. До того ж наявні наукові дані підтверджують, що ділянки з надлишковим внесенням насіння або повторним засіванням можуть складати від 0,1% до 15,5% залежно від конфігурації поля, його розмірів та геометрії меж. Упровадження цієї технологічної системи в окремих випадках забезпечує додаткове зниження витрат у діапазоні 4–26 доларів США з одного гектара.

Застосування електричних приводів дозувальних механізмів у поєднанні з автоматичним контролем руху аграрних машин створює змогу забезпечувати стабільне дотримання інтервалів між проходами техніки, розширювати робочу зону покриття, підвищувати швидкість виконання операцій та використовувати агрегати значно більшого розміру. Раніше подібні можливості були недосяжними за умов традиційного керування оператором. Оскільки на сучасному етапі виробники прагнуть підвищити точність дозування насіння та мінімізувати витрати на агровиробництво, увага

розробників устаткування спрямована на вдосконалення рівномірності просторового розташування насіння у ґрунті.

Нерівномірне розміщення рослин у рядку провокує їх конкуренцію за світлові ресурси, поживні елементи та запаси вологи, внаслідок чого зменшується продуктивність кожної окремої рослини та підсумкова урожайність. Доведено, що чим точніше витримані проміжки між посіяним насінням, тим вищий потенціал формування врожаю, особливо при високих густотах стояння рослин, де будь-яке збільшення відхилень у відстанях між ними спричинює втрати продуктивності. Наукові результати підтверджують, що варіація інтервалів між рослинами може визначати до 25% коливань у кінцевій урожайності, а інші дослідження засвідчують: навіть вдосконалення рівномірності між лініями посіву сприяє зростанню потенційного збору зерна [8].

Проведені експерименти були зосереджені на тому, щоб оцінити залежність продуктивності культур від параметрів точності висіву, які визначаються конструкцією робочого органу, висотою падіння насіння до дна борозни та впливом прикладеної притискної сили на формування посівної канавки [12]. У межах таких досліджень аналізувалися фактичні відстані між насінинами, траєкторії руху насінневого матеріалу, його швидкість, а також місце виходу з насіннепроводу та кут падіння у борозну. Паралельно встановлювали, що якість роботи механізмів закривання посівної щілини прямо впливає на розвиток рослин і подальшу урожайність агрокультур [14].

Інші наукові роботи [18] акцентують, що формування високої точності одиничного дозування насіння значною мірою залежить від типу та інженерних характеристик насінневих лічильників, форми входу в насіннепровід та його геометричних параметрів. Зокрема, стирання внутрішніх поверхонь трубок або їх технічні несправності призводять до зниження рівня точності висіву, спричиняючи хаотичні відхилення просторового положення насіння.

Для поглибленого аналізу цих процесів застосовують високошвидкісні системи візуального спостереження. Оптичні сенсори дозволяють оцінювати параметри розподілу насінневого матеріалу у стрічкових подаючих системах, визначати інтервали між насінинами, ступінь коливання під час надходження і виходу з насінневої трубки. Такі впливи підсилюються зі збільшенням швидкості пересування техніки, прямо відображаючись на подальшій рівномірності розташування борозен.

Попри інтенсивний розвиток досліджень у сфері візуалізації та оцінювання ефективності дозаторів, досі бракує комплексних наукових робіт щодо того, як саме різні режими роботи сівалки — зміни швидкості руху, прискорення, уповільнення, зміна встановленої норми висіву — позначаються на точності внесення насіння. Оскільки кінцевий результат значною мірою визначається характеристиками висівного механізму, критично важливо з'ясувати реакцію електропривідних дозувальних систем на трансформації режимів роботи машини. Це дасть змогу досягнути вищих робочих швидкостей та задовольнити зростаючі вимоги агровиробників щодо продуктивності.

У зв'язку з цим метою дослідження було поєднати електронну систему контролю висіву з високошвидкісними камерами для ретельного аналізу точності внесення насіння та оцінити вплив різних експлуатаційних умов сівалки — зокрема зміни робочої швидкості, динамічного прискорення або уповільнення та варіювання норми висіву — на показники точності дозування насінневого матеріалу.

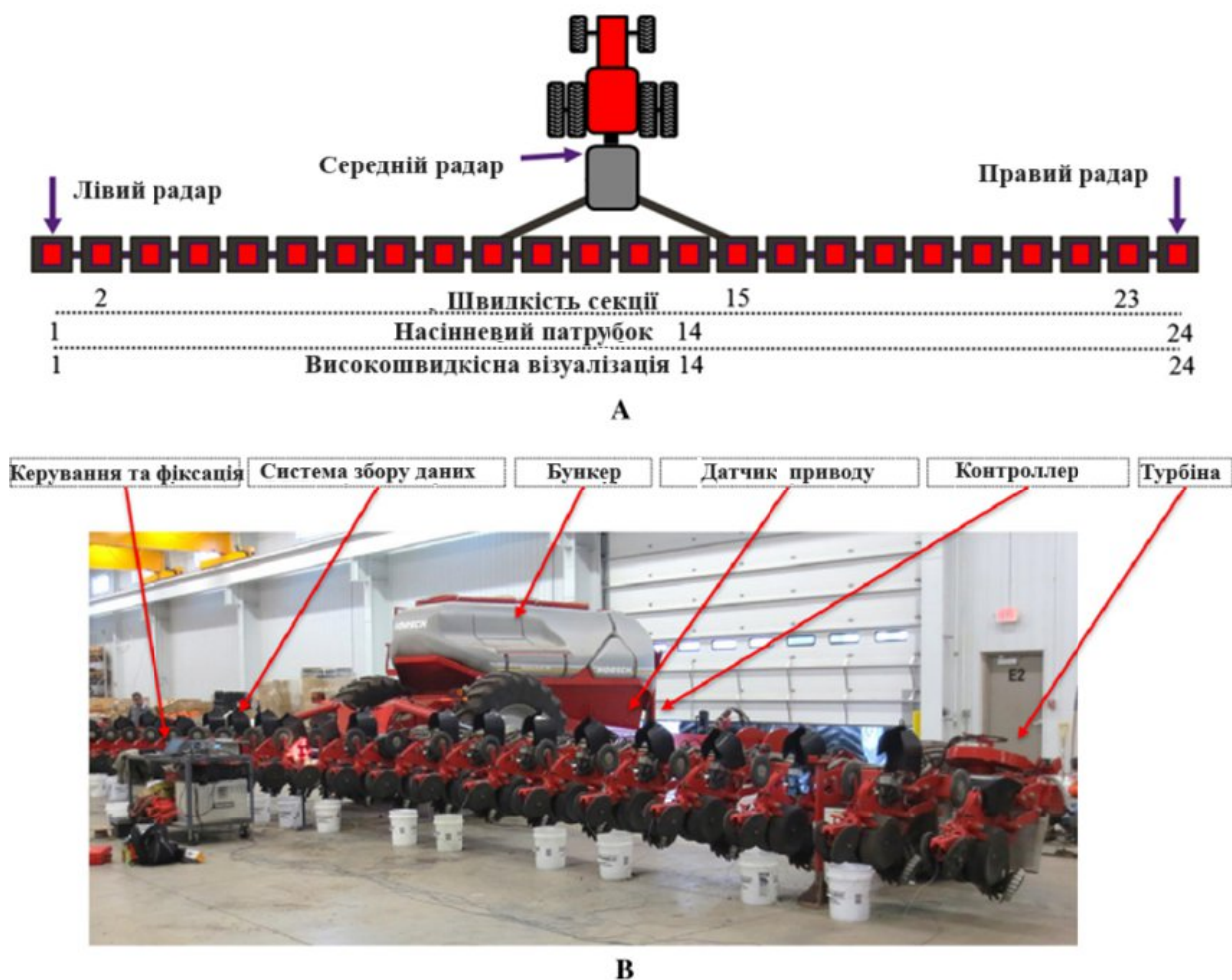
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Конфігурація сівалки

Для проведення випробувань було відібрано сівалку, оснащену електричними системами приводу та контролю висіву. Агрегат з Horsch Maestro 24.30 SW (конфігурація на 24 рядки з відстанню між ними 70 см) застосовували для імітації різних технічних і експлуатаційних сценаріїв роботи машини, які детально описано в наступному розділі. У висівному механізмі цієї моделі передбачено індивідуальні електроприводи, що взаємодіють із окремими висівними дисками, підібраними відповідно до конкретного типорозміру насіння певної культури. Такий підхід дає змогу керувати роботою кожного висівного апарата окремо, використовуючи інформацію про швидкість руху, яку надає контролер комплексу під час сівби.

Дисплей Terminal ME (Horsch) забезпечував управління окремими секціями висіву з частотою опитування 10 Гц відповідно до швидкості руху агрегату. Контролер, встановлений у системі керування Terminal ME Horsch, виконував регулювання частоти обертання висівного механізму, спираючись на сигнали про швидкість, що надходили від трьох радарів типу Radar III. Вони були розміщені на рамі сівалки зліва, по центру та праворуч (рис. 1А). Порівнюючи показники від цих сенсорів, електронний блок обчислював параметр відхилення швидкостей, необхідний для коректної синхронізації роботи приводу.

У разі, коли різниця між показниками середнього та лівого радарів не перевищувала 0,5 км/год, контролер підтримував режим прямолінійного руху



машини та стабільної роботи висіву. Потрібні умови для функціонування гідравлічної системи повітродувки, вакуумного обладнання й електроживлення створював трактор Challenger MT 875C (AGCO, Джорджія). Вакуум, необхідний для утримання насіння у висівних отворах, підтримувався на рівні 7,46 кПа відповідно до специфікацій заводу-виробника.

Рис. 1 - Конфігурація сівалки для збору даних насінневої трубки, швидкості висівного двигуна та високошвидкісного зображення (А).

Конфігурація сівалки для керування системою висіву та фіксації даних за допомогою основних компонентів приводу сівалки (В).

Полеві дослідження проводили із застосуванням насінневого матеріалу кукурудзи бренду Monsanto DEKLAB DKC48-12RIB, що поєднує такі генетичні властивості, як Genuity45, Smart та RIB34. Секції сівалки були

доукомплектовані висівними пластинами, призначеними для висіву середнього за розміром круглого насіння; кожен такий диск має 21 комірку, завдяки чому за один повний оберт подається 21 насінина у рядок.

2.2 Система вимірювання та керування

Для керування системою використовувався портативний ноутбук Dell Latitude 3540, обладнаний процесором Intel i7-4600 з тактовою частотою 2,10 ГГц, 8 ГБ оперативної пам'яті та 64-бітною операційною системою. У ролі платформи збору та обробки інформації застосовували контролер CompactRIO (cRIO 9204), який виконував функції DAS, забезпечуючи моделювання керуючих імпульсів сівалки, реєстрацію реакції приводів двигунів висівних механізмів і фіксацію показників насіннепроводів (див. рис. 1В). Для кожного окремого експериментального режиму формувався текстовий документ, у якому містилася запрограмована послідовність швидкісних сигналів для трьох різних радарів контролю руху.

Файл симуляції був підготовлений таким чином, щоб відтворювати зміну швидкості посіву й передавати її на головний контролер норми висіву Horsch із частотою 10 Гц. Системою DAS створювалися змодельовані сигнали, що надходили до блоку керування сівалки, таким чином імітуючи роботу штатних датчиків швидкості. Відповідно до схеми (рис. 1А), на висівних секціях утримувались заводські сенсори контролю насіння Ну Rate Plus™, встановлені згідно з технічними вимогами виробника. Вони виконували вимірювання кількості зернин у насінневому каналі та часового інтервалу падіння для рядків 1, 14 і 24 (що відповідають лівому, центральному й правому рядам).

Додатково застосовувались енкодери крізного типу (260-N-T-15-S-3000-Q-PP-1-S-FA-2-N) із роздільністю 3000 імпульсів на один оберт та допустимою похибкою $\pm 0,2$ об/хв. для визначення швидкості обертання

електричних двигунів висівних апаратів на рядках 2, 15 і 23. Також велась високошвидкісна відеозйомка роботи рядків 1, 14 і 24 (див. рис. 1 і 2).

Для точнішої фіксації частоти обертів на секціях 2, 15 і 22 насіннепроводи були від'єднані, усуваючи вплив руху насіння. Програмне забезпечення на платформі LabVIEW було спеціально розроблене для покрокового зчитування рядків файлу симуляції з частотою 10 Гц. Отримані дані оброблялись: сигнали швидкості розділялись між трьома уявними радарми. Показники сенсорів насіннепроводу зіставлялися з результатами аналізу високошвидкісного відео, що дозволяло оцінити відповідність і точність визначення параметрів висіву обома підходами.

Для визначення калібрувальної залежності було виконано регресійне наближення швидкості, яку демонстрував контролер Horsch. Вхідна частота прямокутного сигналу використовувалась як змінна для побудови калібрувальної кривої. Генерація прямокутних імпульсів 12 В у діапазоні 26–600 Гц та їх передача на контролер Terminal ME Horsch здійснювалися за допомогою модуля National Instruments серії C 9476, паралельно реєструвалася швидкість, відображена на екрані системи керування. Під час статичних лабораторних тестів для формування даних про швидкість для головного комп'ютера висівного комплексу застосовували залежність швидкості від частоти прямокутної хвилі, тобто оминали інтегровану систему радара сівалки й повністю моделювали її роботу.



А



В

Рис. 2 - Поворотний енкодер і висівний диск (А) і зібраний висівний апарат (В).

Програмне забезпечення LabVIEW формувало обчислену частоту прямокутного сигналу, яку надсилали до центрального комп'ютера через модуль цифрового виходу (9476, National Instr., США). Дані від сенсора у насіннепроводі, що працював у реальному масштабі часу, а також інформація від трьох енкодерів, змонтованих на приводах висівного механізму, зчитувалися за допомогою цифрових модулів введення (9476, National Instr.). Частота дискретизації становила 10 Гц, що забезпечувало безперервний контроль параметрів під час функціонування системи.

2.3 Експериментальний план посіву

Інформацію щодо особливостей висіву, отриману з полів різних агровиробників, було детально проаналізовано з метою визначення типової практики під час польових робіт. На основі дій та звичок оператора формувалися моделі швидкісного режиму висіву в реальних умовах (див. Таблицю 1). Експериментальні дослідження роботи просапної сівалки проводили при двох рівнях густоти розміщення рослин — 44 550 і 89 110 насінин на гектар, що дозволяло відтворити сценарії з підвищеною та зменшеною нормою висіву, які використовуються у сучасному землеробстві.

Таблиця 1 – Сценарії симуляції прямолінійного посіву

Стартова швидкість, км/год	Постійна швидкість, км/год	Прискорення/ сповільнення, км/год	Повторюва ність
0, 7.2, 9.7, 12.0	7.2, 9.7, 12.0	2.4, 4.8	3

Кожен варіант моделювання процесу висіву насіння проводили по три цикли, що гарантувало надійну відтворюваність результатів та підвищену точність отриманих даних. Параметри розгону та гальмування швидкості вибирали, спираючись на практичні показники, зібрані під час численних реальних робіт у фермерських господарствах, що використовують сучасні посівні агрегати. Досліджувалася також поведінка машиніста, коли виникала

потреба змінювати швидкість: під час маневрування на загінці, проходження польових перешкод або руху вздовж полів зі складною геометрією.

Під час подолання об'єктів на полі — зокрема водовідвідних каналів, терас чи локальних заглиблень — типовою була реакція оператора: різко зменшувати швидкість перед перешкодою, повільно її перетинати, а далі знову швидко розганяти машину до початкових параметрів робочого руху. Виходячи з тенденцій, зафіксованих у польових умовах, було визначено два рівні зміни швидкості: повільні перехідні режими з темпом 2,4 км/год•с та швидкі — 4,8 км/год•с. Ці величини надалі згадуються як повільний та швидкий режими прискорення і гальмування сівалки.

Проведений аналіз засвідчив, що частина механізаторів надає перевагу входженню в загінку та поверненню на неї при стандартній швидкості посіву, тоді як інші полюбляють перед початком розгону рухатися на меншій стартовій швидкості, а вже потім досягати робочих параметрів. Тому моделювання різних виробничих ситуацій включало і швидке, і повільне прискорення та сповільнення, а також сценарій раптової зміни швидкості, що відповідає моменту, коли сівалка отримує сигнал вмикання вже під час руху з робочими обертами — наприклад, у фінальній фазі повороту або при запуску індивідуального керування рядками за допомогою системи автоматичного відключення секцій.

Оскільки типовий діапазон швидкостей під час висіву становив 7,2–9,7 км/год, для порівняння ефективності електроприводних висівних апаратів було встановлено ширший інтервал — 7,2–12,0 км/год, що дозволяло оцінити роботу як за звичайних, так і підвищених швидкостей руху агрегату. Під час кожної симуляції посівний комплекс працював на вибраній стартовій швидкості приблизно 20 секунд, після чого здійснював розгін до постійної швидкості з подальшим стабільним рухом протягом ще 20 секунд.

Після етапу стабільної швидкості агрегат переводили в режим гальмування до початкового значення швидкості, утримуючи цей стан протягом 3 секунд перед зупинкою механізму висіву. Таким чином, завдяки

трикратному повторенню випробувань, було забезпечено не менше однієї хвилини робочого часу на кожній із заданих швидкостей, що дало змогу висіяти від 500 до 2000 насінин — фактично удвічі перевищивши вимоги стандарту ISO 7258/1 щодо тривалості тестування.

Для більш точної імітації різних режимів роботи машини (як описано в таблиці 1), посівна машина отримувала команду розпочати висів у стартовому режимі, поступово розганялася до встановленої швидкості, а після цього сповільнювалася до початкової швидкості в момент відключення секції висіву, що продемонстровано на рисунку 3. Окрім прямолінійного руху, враховувалися й складні конфігурації полів, де доводиться проводити висів по контуру довкола перешкод чи меж поля.

Саме тому у роботу включили сценарії висіву по криволінійних траєкторіях із чотирма різними радіусами поворотів (див. таблицю 2). Щоб оцінити вплив різної кутової швидкості, бралися до уваги висівні секції, розташовані на лівій (секція 1), центральній (№ 14) та правій (№ 24) частинах рами сівалки, адже під час руху по колу вони мають різні траєкторії та швидкості переміщення. У той час як середні секції функціонували на визначеній сталій швидкості, крайні досягали кутових швидкостей від 0 до 16,1 км/год, залежно від радіуса контуру.

Розгін і гальмування в умовах контурного посіву здійснювали зі швидкістю 4,8 км/год•с, що забезпечувало досягнення потрібних параметрів руху на кожній конфігурації траєкторії. Всі розроблені сценарії, пов'язані з роботою довкола перешкод різних розмірів і за різних постійних швидкостей руху, представлені на рисунку 4.

2.4 Налаштування високошвидкісної системи обробки зображень (HSIS)

Контрольний портативний комп'ютер слугував інструментом для конфігурації, управління та приймання зображень від високошвидкісної камери Basler acA640-750uc (Німеччина) (рис. 5). Ця камера оснащена

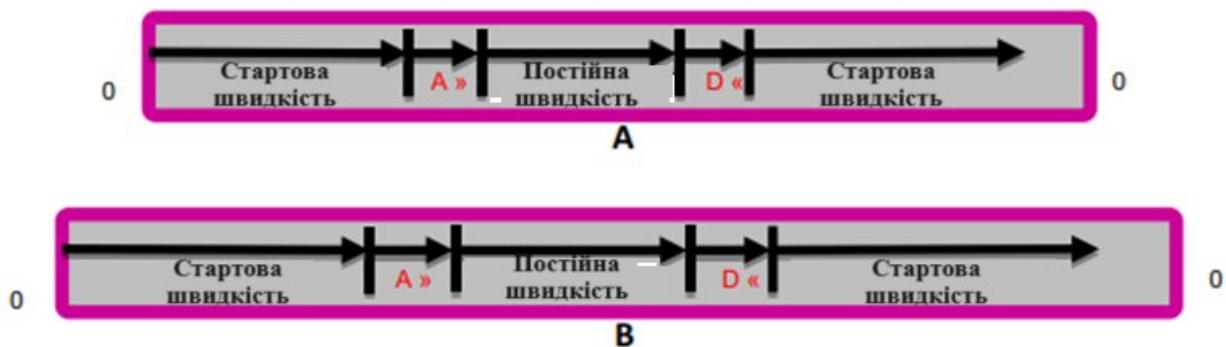
сенсором зі сталою роздільною кількістю 640×480 пікселів і налаштовувалась на формування кольорових зображень у форматі TIFF із використанням стандартної тріади каналів — червоного, зеленого та синього. При визначеній відстані встановлення просторову точність було отримано на рівні приблизно 0,2 мм для одного пікселя. RGB-зображення мали 8-бітову глибину, тобто значення кожного каналу варіювалося в межах 0–255, що забезпечувало підсумковий розмір кадру близько 903 Кб.

Тривалість експозиції була виставлена на рівні 1250 мкс (1). Обсяг оперативного буфера комп'ютера, призначений для приймання відеопослідовності від камери, становив 99,999 кадрів/с. Це дозволяло тимчасово накопичувати інформацію в пам'яті камери, доки файли записуються на ноутбук, усуваючи втрату кадрів під час високошвидкісної передачі даних. Конфігурацію пристрою виконували через програмне забезпечення Pylon Viewer (Німеччина). Камеру запрограмували на роботу зі швидкістю 300 fps та передачею даних 92 МБ/с завдяки використанню стандарту USB 3.0.

Особливу увагу приділили можливому впливу вібрацій під час роботи обладнання. Будь-який відносний рух між камерою та сівалкою спричиняв би дрібні зміщення в межах окремих кадрів, що негативно позначилося б на якості аналізу. Щоб уникнути цього, камеру жорстко закріпили безпосередньо на вузлі висівного апарата, мінімізуючи передачу вібрацій.

Для зниження коливань тримач камери виготовили з кутника товщиною 6 мм. В конструкції врахували можливість поширення вібрацій від вакуумної системи та самого механізму висіву. Попередні випробування підтвердили відсутність розмиття чи тремтіння кадру під час роботи, що свідчило про достатню жорсткість опори. Кріплення забезпечило стабільність поля зору (FOV), необхідну для подальшого створення алгоритмів автоматичного аналізу. Первинна обробка тестових відеозаписів довела, що відтворюване й сталість FOV гарантує достовірність результатів при переході від одного експериментального набору даних до іншого.

Додаткове підсвічування зони спостереження здійснювала світлодіодна стрічка (4NFLS-x2160-24V), яка була необхідною через короткий час експозиції під час зйомки 300 кадрів за секунду (рис. 6). Кожне гніздо на висівному диску позначили індивідуальними номерами для можливості встановлення послідовності руху насінин (рис. 6А). Камеру зорієнтували на



отвір доступу, що дозволяло одночасно бачити насінневий диск, дозатор одиночного висіву та насіннепровід (рис. 7). Додаткові ручні перевірки підтвердили, що вся високошвидкісна відеоінформація успішно зберігалась у внутрішньому буфері оперативної пам'яті камери без пропусків кадрів.

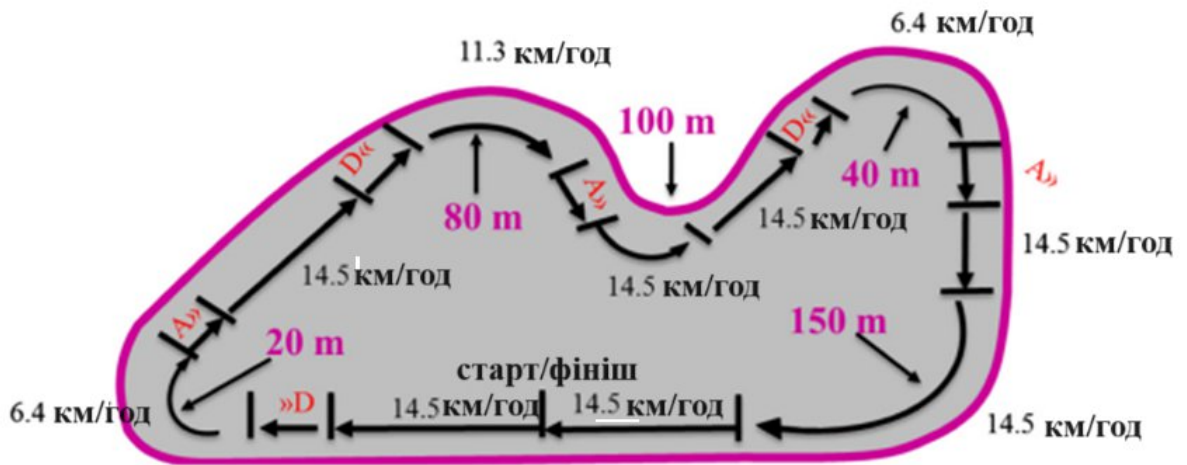
Рис. 3 - Симуляція посіву з прискореннями/уповільненнями під час прямолінійних сценаріїв посіву для повільного (В) і швидкого (А) прискорення та уповільнення. Початкові швидкості – це швидкість, коли сівалка запускається, тоді як постійна швидкість – цільова швидкість висіву. А і D позначають прискорення та уповільнення, що здійснюються під час переходів швидкості; а стрілки вказують напрямок руху сівалки.

Таблиця 2 - Сценарії моделювання контурної посіву

Секція	Постійна швидкість, км/год	Швидкість при поворотах, км/год	Радіуси поворотів, м	Повторюваність
1, 14, 24	6.4, 11.3, 14.5	0, 2.4, 4.8, 6.4, 7.2, 9.7, 12.1, 12.9, 14.5, 16.1	20, 40, 80, 150	3

Для забезпечення високої надійності отриманих результатів було здійснено додаткові ручні перевірки, метою яких було підтвердження коректності роботи спеціально створеного програмного забезпечення для

аналізу зображень, використуваного в межах даного експериментального дослідження. Перша частина цього програмного комплексу була розроблена



з акцентом на фіксацію параметрів процесу висіву в режимі реального часу, що забезпечувалося шляхом застосування високошвидкісної відеозйомки, а також контролем швидкісних характеристик насіннепрвідної трубки й електричного приводу. Друга програма була призначена для подальшого детального оброблення отриманих відеоматеріалів та відповідних показників, дозволяючи здійснювати глибший аналіз зафіксованої інформації та виявляти можливі відхилення або неточності.

Рис. 4 - Моделювання під час контурного посіву зі змінними радіусами.

Рис. 5 - Потік даних від камери та системи DAS до комп'ютера.

Дві складові програмного забезпечення охоплюють такі функції:

Компонент 1. Програма відповідає за формування сигналу керування сівалкою, який використовується для живлення електродвигунів, запуску високошвидкісної відеофіксації камерою та зчитування інформації про рух насіння всередині трубки, а також про обертання електроприводу через систему DAS. Додатково здійснюється імітація роботи радара контролю висіву, що передає дані до головного контролера сівалки, забезпечуючи повну



симуляцію процесу посіву. Після завершення випробування проводиться відключення високошвидкісної камери та архівація всіх зібраних параметрів — частоти обертів приводу висівного механізму, сигналів датчиків насіннепроводу й відзнятих кадрів. Уся інформація переноситься з комп'ютера на жорсткий диск та зберігається для подальшого аналізу.

Компонент 2. На другому етапі здійснюється передача отриманих під час кожного експерименту зображень у спеціальний модуль для їхньої подальшої комп'ютерної обробки, створений у середовищі LabVIEW. Кожний кадр аналізується за допомогою високопродуктивного алгоритму групового оброблення зображень (див. рис. 8). Результати аналізу зіставляються з

показниками електродвигуна, значеннями лічильника насінин та даними датчика насінневої трубки. Порівняння дає змогу визначити особливості зміни швидкості оператора, які провокують пропуски та повторні подачі насіння під час висіву.

Як зазначалося раніше, система розпізнавання зображень застосовувалася для оцінювання наявності або відсутності висівного матеріалу. Під час аналізу насіння локалізували з урахуванням його геометричних параметрів, кольорових характеристик, положення у кадрі та траєкторії руху в просторі. Основним критерієм ідентифікації виступало саме визначення координат насінини на зображенні (рис. 8А), що забезпечувало початковий етап автоматичного розпізнавання.

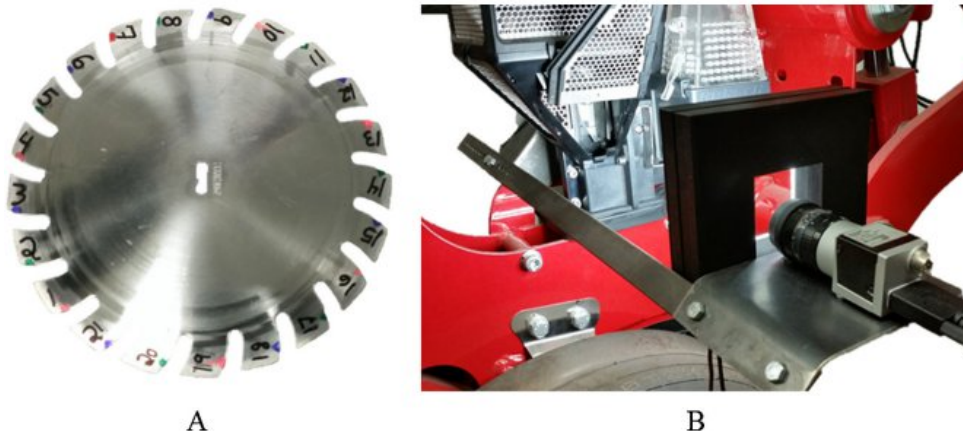


Рис. 6 - Висівний диск для кукурудзи з візуальними індикаторами щілин (А) і високошвидкісною камерою (В).

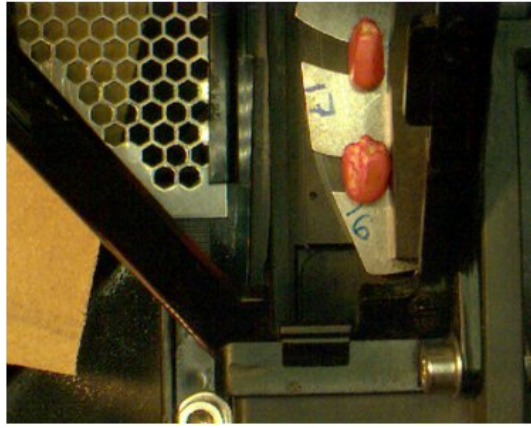


Рис. 7 - Поле огляду камери, що показує висівний диск, місце розташування насіння та візуальні індикатори насінневих отворів через дверцята доступу

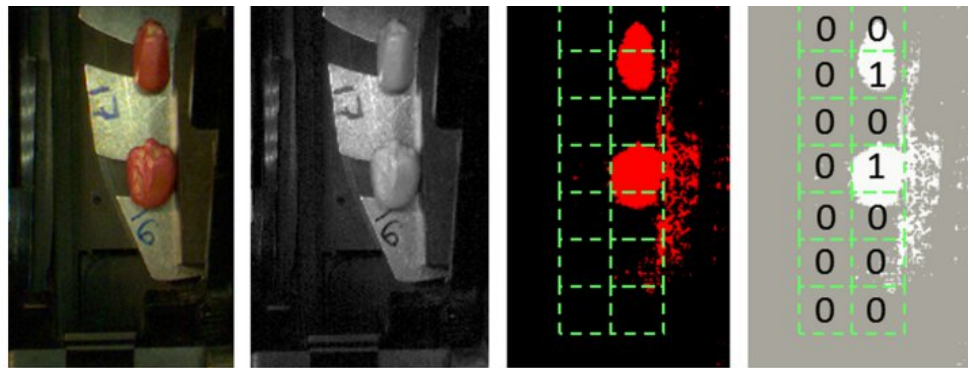


Рис. 8 - Ідентифікація насінневого коду на основі розташування (А), ізоляція на основі кольору (В), двійкова початкова матриця (С) і логіка виявлення насінневого матеріалу з використанням порогових значень на основі користувача (D)

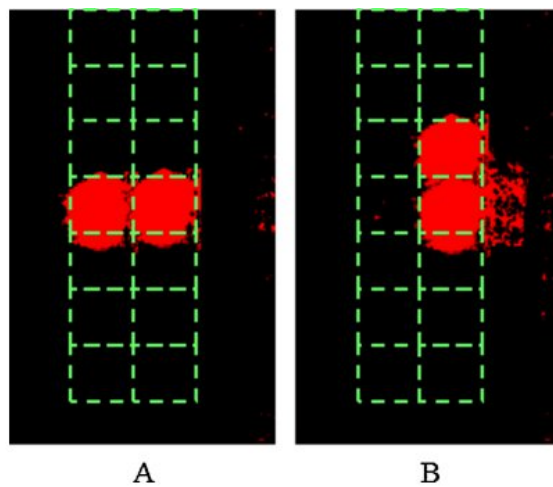


Рис. 9 - Змодельоване зображення радіального (А) та осьового (В) подвійного зерна

Для виділення насіння кукурудзи на зображеннях застосували поєднання кольорових каналів, зокрема червоного, зеленого та синього спектрів, що дало змогу ефективно відокремити посівний матеріал від фону (рис. 8B). Така спеціально підібрана комбінація кольорів усувала зайві деталі заднього плану та залишала тільки області, що відповідали забарвленню зерен. У межах знімка формували області інтересу (ROI), орієнтуючись на траєкторію руху посівної пластини та місця ймовірної появи кожної насінини (рис. 8C).

На додаток до цього, для підвищення точності і мінімізації ризику хибного розпізнавання створили матрицю ідентифікації насіння розміром 2×7 , засновану на принципах двійкової логіки (рис. 8D). Вона забезпечувала визначення факту наявності зернини відповідно до її позиції. Оскільки у реальних умовах форма та габарити кукурудзяного насіння можуть різнитися, навіть у межах однієї партії, виникла потреба у визначенні усереднених геометричних показників.

Для цього було пропущено через високошвидкісну систему зображення (HSIS) 2500 зернин, щоб розрахувати характерні середні розміри й типову форму насіння. Отримані параметри застосували під час розпізнавання кожного об'єкта, що перетинав ROI початкової матриці, співвідносячи його контури з еталонними значеннями. Програмні алгоритми обробки зображень дали змогу мінімізувати вплив поворотів та нестандартної орієнтації зернин, котрі у двовимірному представленні могли б виглядати зменшеними порівняно з реальними розмірами.

Було встановлено поріг фільтрації форми на рівні 66% від розрахованого середнього розміру насіння, що дозволило стабільно розпізнавати зерна кукурудзи незалежно від їх орієнтації, варіацій форми чи дрібних відхилень у розмірах. На наступному етапі зображення перетворювали у бінарний формат: значення «1» відповідало об'єкту, характеристики якого узгоджувалися з насінням, а «0» позначало сегментовану частину фону.

ROI первинної матриці використовували попередньо визначені координати та передбачувану траєкторію руху, щоб оцінити, чи покинула насінина поле зору, і чи відповідає її фактичне місцеположення очікуваному. Для забезпечення стійкої логіки аналізу вручну налаштовували порогові параметри, що виконували роль умовних меж появи насіння. Також визначали нижні та верхні обмеження розміру, адже можливі випадки, коли один і той самий об'єкт короткочасно входив у кілька сусідніх ROI, що призводило б до подвійного рахунку. Тому присутність насінини фіксували лише тоді, коли її форма та розмір відповідали встановленим критеріям у конкретній зоні ROI.

Як уже наголошувалося, для фіксації появи насінини в області інтересу необхідно було, щоб її фактичний розмір перевищував 66% від середнього діаметра зерна. Такий поріг було обрано як оптимальний для уникнення помилкових визначень і зниження ймовірності похибок під час аналізу результатів висіву, що підтверджено як при роботі з програмним забезпеченням, так і під час експериментальних перевірок. Початкову матрицю ROI (рис. 8С) застосовували для розпізнавання одиничного зерна, а також випадків множинного захоплення (подвійні чи потрійні зернини), тоді як додаткова, вторинна матриця ROI була запроваджена з метою виявлення пропусків, тобто відсутності насінини в комірці.

Алгоритм виявлення «слотів» визначав початкову позицію щілини, орієнтуючись на такі параметри, як геометрія, колірні характеристики, просторове розташування та напрям руху елемента. Матриця слотів накладалась безпосередньо на первинну область інтересу, що дозволяло достовірно реєструвати випадки, коли слот присутній, але зернина відсутня — такі ситуації інтерпретувались як промах. Основними критеріями розпізнавання пропусків ставали форма та траєкторія слоту, адже їх розміри були стабільними, а рух — рівномірним між послідовними знімками.

Для визначення частоти обертання висівного диска використовували часові інтервали між зображеннями, оскільки інерційний зсув пластини між кадрами дозволяв встановити момент активації висівного апарата. Частота

захоплення 300 кадрів на секунду забезпечувала точний розрахунок періоду виходу насіння зі слотів і, відповідно, швидкості обертання окремого дозувального механізму. Отримані значення порівнювали з показниками цифрових енкдерів, інтегрованих у привід висівної системи, що забезпечувало валідацію результатів.

Для оцінювання точності висіву використовували алгоритм, який фіксував подвійну подачу в разі, коли в межах ROI для насіння реєстрували наявність двох зерен. Подвійний висів відзначався у випадку скупчення насінин в радіальному або осьовому напрямках відносно обертання диска (рис. 9). Аналогічно, при наявності трьох зерен у зоні інтересу визначався потрібний висів — за аналогічним принципом кластеризації частинок (рис. 10).

У представлених дослідженнях застосовувалась сівалка з багаторазовим елімінатором, сконструйованим для зниження імовірності одночасного захоплення кількох насінин однією коміркою. Показники, зокрема частота обертів привідного двигуна дозатора, додатково звірялися з даними енкдерів, встановлених на висівному механізмі. До того ж модуль HSIS автоматично розраховував відсоток сингуляції для конкретного рядка, а отримані результати підтверджували вручну шляхом детального, уповільненого аналізу відеофреймів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Завдяки комплексному використанню функцій програмного забезпечення HSIS разом із системою DAS та вбудованими сенсорами посівного агрегату, виникає можливість зіставляти похибки під час виділення насіння лічильником з фактичними технічними параметрами й робочими станами сівалки у поточний момент. Такий підхід забезпечує глибше розуміння того, яким чином умови функціонування посівного обладнання впливають на неточності роботи механізму дозування насіння. Для отримання кількісної оцінки цього впливу визначали відсоток фактичного висіву, що розраховувався відповідно до заданого рівняння:

$$\frac{(s-m-d-t)*100}{s} = Y (\%) \quad (1)$$

де: s – кількість щілин висівного диска (21 було використано в цьому дослідженні), m – кількість пропусків, d – кількість двійників, t – кількість трійників, Y – сингуляція.

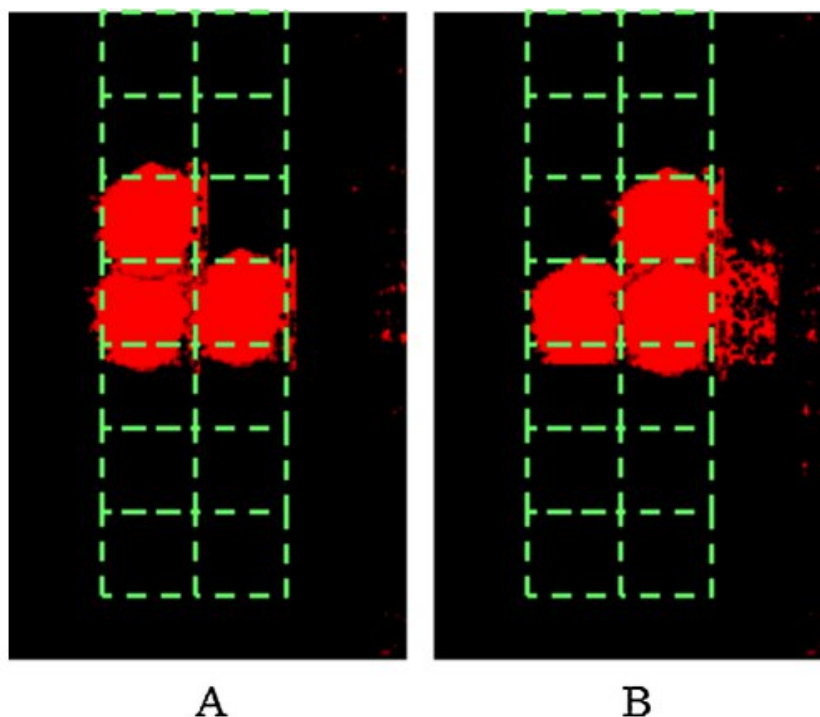


Рис. 10 - Змодельоване зображення радіального (А) та осьового (В) потрійного зерна.

HSIS здійснила детальний аналіз похибок під час висіву, використовуючи дані про поточні режими роботи сівалки в конкретні моменти.

Як приклад, у таблицях 3 та 4 наведено інформацію, отриману в межах одного із досліджень (випробування №13). Отримані значення було також нанесено на одновимірний графік швидкісних параметрів, що дало змогу чітко визначити ділянки виникнення порушень процесу висіву (див. рис. 11). При проведенні комп'ютерного моделювання встановлено, що пропуски насіння з'являлися після початку маневру повороту, на етапах зміни робочої швидкості та більш інтенсивно проявлялися за умов підвищеної швидкості руху агрегату. Незважаючи на те, що наведена візуалізація демонструє досить помітну кількість таких дефектів, показник якості сингуляції підтвердив високий рівень точності: середнє значення становило 99,05% відповідно до даних таблиці 3.

Таблиця 3 - Приклад відповіді вимірювання з тесту 13

Тест	Поч. швидкість	Пост. швидкість, км/год	Популяція	Приск./спов.	Насинини	Пропуски	Двійники	Трійники	Сингуляція
13	0	9.7	89.110	Швидко	1252	10	2	0	99.1%

Таблиця 4 - Приклад станів машини з тесту 13.

Помилка	Зміни стану машини			км/год				
	Start/Stop	Прискорення	Уповільнення	2.4	4.8	7.2	9.7	12.1
Пропуски	1	1	0	0	0	2	6	0
Двійники	0	0	0	0	0	1	1	0
Трійники	0	0	0	0	0	0	0	0

Сучасні системи моніторингу та дисплеї на висівних машинах зазвичай демонструють аграріям лише узагальнений середній показник точності. Однак

проведені випробування переконливо засвідчили необхідність глибшого аналізу та розуміння конкретних умов польового процесу. Зокрема, варто визначати, за яких режимів роботи – різкі або поступові зміни робочої швидкості, її стабільне підтримання, увімкнення чи відключення висівних секцій на розворотних смугах – виникає підвищений ризик відхилень у точності висіву.

Таблиця 5 - Продуктивність системи контролю висіву при прямолінійному русі сівалки.

Тест	Старт. Швидкість, км/год	Пост. Швидкість, км/год	Популяція	Приск./Упов.	Насінин	Пропуски	Двійники	Сингуляція, %
1	0,0	7,2	89,110	шв.	909	7	0	99,2
2	0,0	7,2	44,550	шв.	459	5	2	98,5
3	0,0	7,2	89,110	пов.	986	6	0	99,4
4	0,0	7,2	44,550	пов.	494	1	1	99,6
5	7,2	9,7	89,110	шв.	2076	29	2	98,5
6	7,2	9,7	44,550	шв.	1036	7	0	99,3
7	7,2	9,7	89,110	пов.	2113	39	0	98,2
8	7,2	9,7	44,550	пов.	1063	11	0	99,0
9	7,2	12,1	89,110	шв.	2449	58	0	97,7
10	7,2	12,1	44,550	шв.	1230	8	1	99,3
11	7,2	12,1	89,110	пов.	2599	24	0	99,1
12	7,2	12,1	44,550	пов.	1298	S	0	99,4
13	0,0	9,7	89,110	шв.	1252	6	0	99,5
14	0,0	9,7	44,550	шв.	611	13	0	97,9
15	0,0	9,7	89,110	пов.	1380	18	0	98,7
16	0,0	9,7	44,550	пов.	684	7	0	99,0
17	9,7	12,1	89,110	шв.	2581	42	0	98,4
18	9,7	12,1	44,550	шв.	1297	18	0	98,6
19	9,7	12,1	89,110	пов.	2685	53	0	98,1
20	9,7	12,1	44,550	пов.	1360	4	3	99,5
21	0,0	12,1	89,110	шв.	1540	57	0	96,4
22	0,0	12,1	44,550	шв.	802	5	0	99,4
23	0,0	12,1	89,110	пов.	1807	31	0	98,3
24	0,0	12,1	44,550	пов.	908	2	0	99,8
Сер. сингуляція								98.7

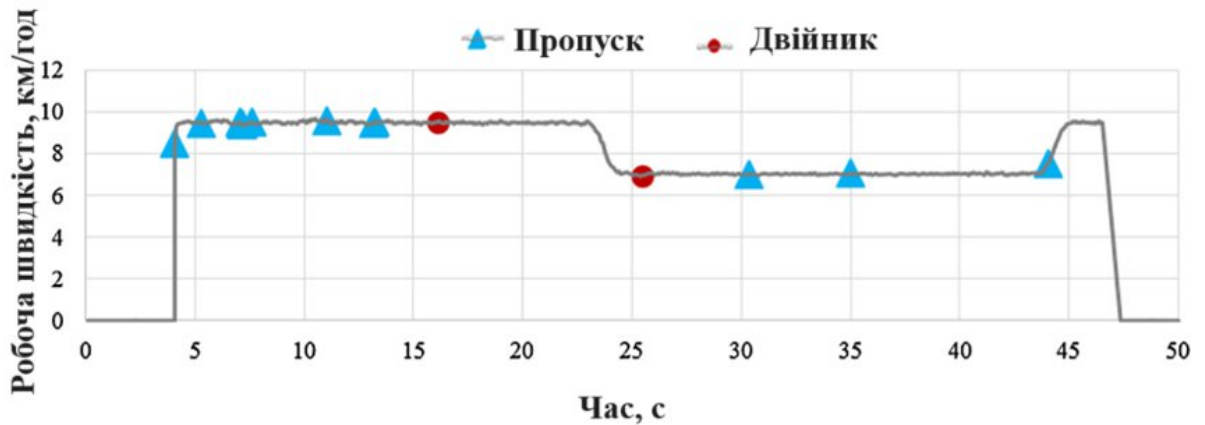


Рис. 11 - Візуальні похибки результатів посіву першого повторення тесту 13 під час імітаційних тестів для 89110 насінин/га. з швидким розгоном і уповільненням (4,8 км/с).

Результати, наведені в таблицях 5 та 6, відображають узагальнені дані окремих трьох повторних досліджень кожного експериментального варіанта висіву: у процесі прямолінійного переміщення сівалки (таблиця 5), а також під час контурного криволінійного руху агрегату (таблиця 6). У середньому сумарна точність виконаних випробувань склала 98,45 %, що підтверджує високий рівень якості роботи системи висіву. В процесі експериментальних досліджень не було зафіксовано випадків утворення потрійних висівів, тому такі показники у підсумкових таблицях відсутні.

Додатково варто зазначити, що частка подвійних насінин становила лише приблизно 0,03 %. Такий низький рівень похибок може бути пояснений застосуванням спеціального розподільного гребінця та конструктивними параметрами висівного диска, що відповідають середньостатистичним геометричним характеристикам насінневого матеріалу. Загальна тенденція свідчить: зростання помилок сингуляції, насамперед кількості пропусків, проявлялося зі збільшенням швидкості руху, змінами прискорення або уповільнення машини та підвищенням встановленої густоти сівби.

Погіршення рівномірності висіву при підвищених швидкостях може бути спричинене недостатнім рівнем вакуумного тиску, а також збільшенням кутової швидкості дозувального механізму при високих обертах приводу.

Наприклад, під час руху зі швидкістю 16,1 км/год і нормою висіву 89110 насінин/га частота обертання електродвигуна досягала близько 84 об/хв, що, у поєднанні з діаметром висівного диска, могло впливати на точність відділення насінин.

Разом з тим у подальших дослідженнях доцільно приділити увагу оцінці параметрів сингуляції при швидкості сівби, що перевищує 12,1 км/год, оскільки такі режими набувають все більшого поширення в сучасній сільськогосподарській практиці. Обчислення кількості насінин, що дозуються за хвилину в кожній серії випробувань, проводили, ґрунтуючись на встановлених нормах висіву відповідно до рівняння 2 для густоти 45550 насінин/га та 89110 насінин/га.

$$V * 1,525^{-4} * s * P = N \quad (2)$$

де: s - кількість щілин посівного диска (для цього дослідження $s = 21$) V - швидкість руху, км/год, N - висів насіння за хвилину, P - популяція, насіння/га.

Таблиця 6 - Продуктивність датчака висіву в режимі криволінійного руху машини.

Тест	Секція	Популяція	Нас.	Пропуски	Двійники	Сингуляція (%)
25	1	89,110	2811	80	1	97,2
26	1	44,550	1454	5	0	99,6
27	15	89,110	2471	97	0	96,2
28	15	44,550	1258	15	1	98,7
29	24	89,110	2594	103	1	96,1
30	24	44,550	1347	11	0	99,2
Сер. сингуляція						97.9

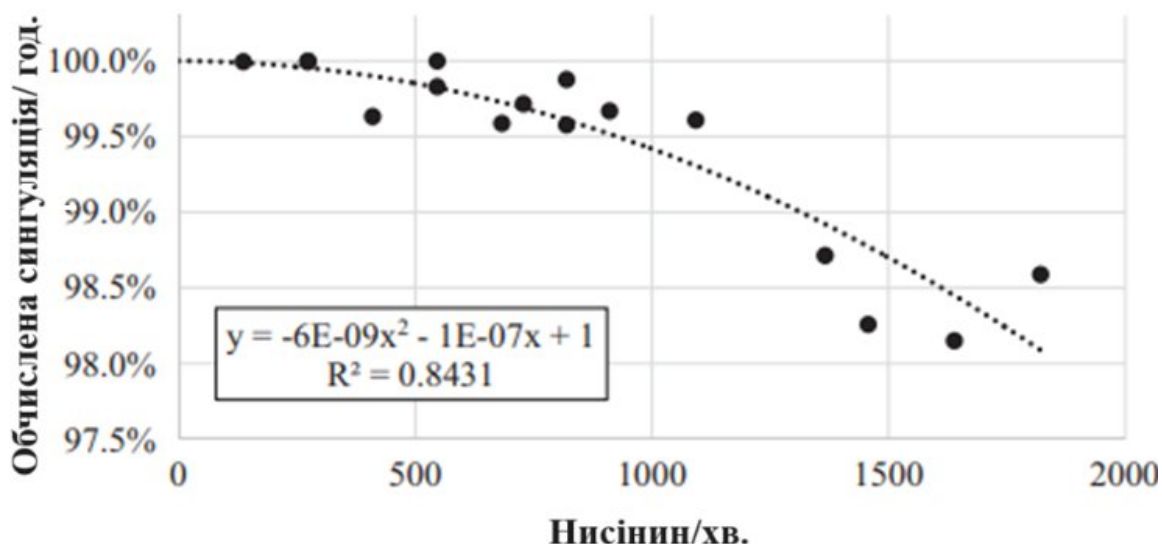


Рис. 12. Відсоток сингуляції в залежності від кількості насінин висіятих за хвилину

Таблиця 7 Пропонована швидкість посіву на основі відсотка сингуляції та норми висіву.

Норма висіву, насінин/га	Робоча швидкість, км/год	
	99,0% сингуляція	99,5% сингуляція
44,550	22,2	14,8
59,410	16,7	11,1
74,260	13,4	8,9
89,110	11,1	7,4

Спираючись на формулу (2) та дані, наведені у таблицях 5 і 6, на рисунку 12 подано залежність між кількістю насінин, що висіваються протягом однієї хвилини, та показником сингуляції. Для цього типу висівного контролера було виявлено закономірність: із підвищенням інтенсивності подачі насінневого матеріалу відбувалося поступове зменшення точності відокремлення одиничних зернин. Наприклад, коли темп висіву перевищував 1250 шт./хв, відмічено падіння рівня сингуляції з приблизно 99,5% до 98,3% (див. рис. 12), що вказує на певне погіршення розподілу.

У спеціальному програмному забезпеченні допустиме значення точності висіву визначається конкретним виробником обладнання. Дані, продемонстровані на рисунку 12, свідчать, що рекомендовану швидкість посіву доцільно встановлювати, враховуючи норму висіву (бажану густоту

рослин) і допустимий рівень рівномірності розподілу насіння, який задається оператором (табл. 7). У відповідному додатку користувач задає прийнятний відсоток сингуляції, після чого система автоматичного керування регулює та підтримує необхідну швидкість роботи висівних секцій для забезпечення цього параметра.

Оскільки дозування насіння прямо залежить від норми висіву та лінійної швидкості агрегату в полі, точність формування рядків може використовуватися як головний критерій для обмеження швидкості руху трактора, аби не допустити надмірного збільшення темпу роботи висівного апарату. Системи DAS і HSIS зафіксували показники функціонування насінневого лічильника під час моделювання реальних польових умов, відтворюючи дії оператора, які зазвичай виконуються при висіві.

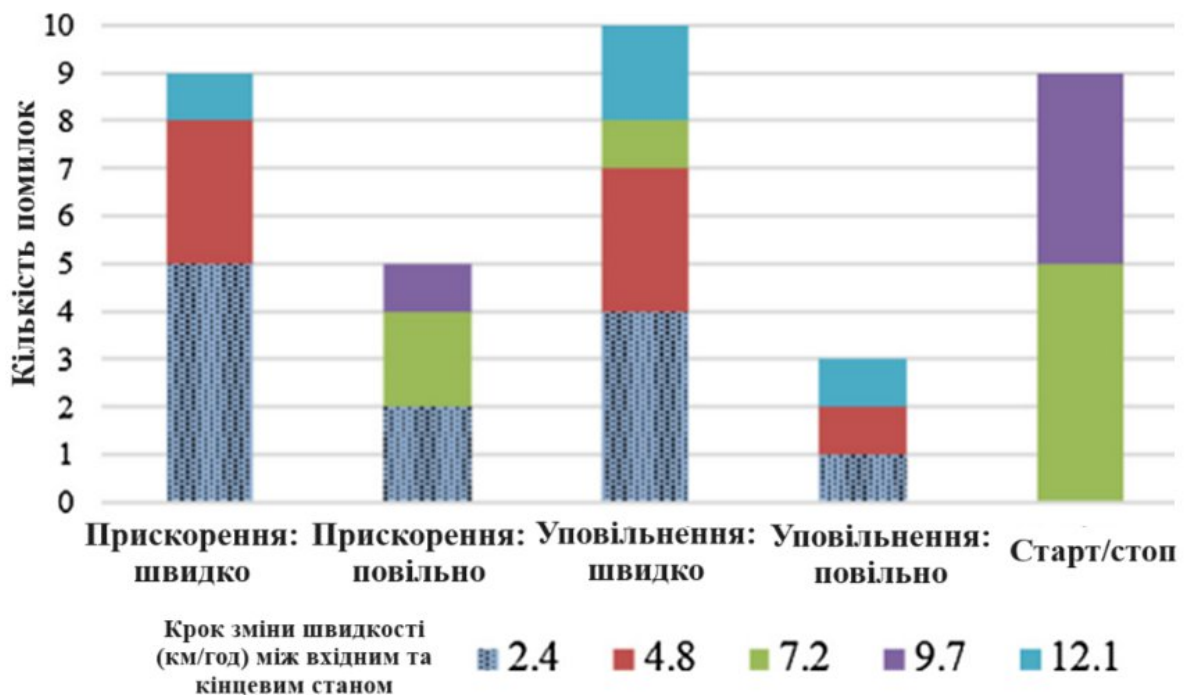


Рис. 13 - Помилки розрізнення старту/зупинки, прискорення та уповільнення між швидким (4,8 км/год/с) і повільним (2,4 км/год/с) прискоренням/уповільненням. Кожна категорія складається з кількості помилок на зміну швидкості.

Таблиця 8 - Ефективність дозування насіння окремо під час сівби в стані машини на розвороті.

Тест	Облік насіння			Облік слотів			Сингуляція, %		
	(HSIS)	(DAS)	Різн.,%	(HSIS)	(DAS)	Різн.,%	(HSIS)	(DAS)	Різн.,%
Test 1	909	918	0.99	916	902	1.53	99.2	98.3	0.99
Test 2	459	461	0.44	464	458	1.29	98.5	99.4	0.87
Test3	986	992	0.61	992	976	1.61	99.4	98.4	1.01
Test 4	494	496	0.40	495	489	1.21	99.6	98.6	1.01
TestS	2076	2104	1.35	2105	2063	2.00	98.5	98.1	0.48
Test 6	1036	1031	0.47	1043	1024	1.82	99.3	99.4	0.06
Test 7	2113	2165	2.46	2152	2131	1.01	98.2	98.4	0.24
Test 8	1063	1071	0.75	1074	1067	0.60	99.0	99.7	0.65
Test 9	2449	2477	1.15	2507	2427	3.21	97.7	98.0	0.27
Test 10	1230	1239	0.76	1238	1244	0.45	99.3	100.0	1.10
Test 11	2599	2635	1.39	2623	2578	1.71	99.1	97.8	1.25
Test 12	1298	1305	0.57	1306	1309	0.22	99.4	100.0	0.90
Test 13	1252	1260	0.64	1258	1235	1.80	99.5	98.1	1.48
Test 14	611	629	2.94	624	620	0.72	97.9	98.5	0.59
Test 15	1380	1401	1.50	1398	1376	1.56	98.7	98.2	0.50
Test 16	684	698	2.11	691	693	0.32	99.0	99.3	0.27
Test 17	2581	2646	2.52	2623	2578	1.72	98.4	97.4	0.96
Test 18	1297	1329	2.49	1315	1313	0.13	98.6	98.8	0.17
Test 19	2685	2742	2.12	2738	2668	2.53	98.1	97.3	0.75
Test 20	1360	1366	0.45	1363	1348	1.12	99.5	98.7	0.78
Test 21	1540	1546	0.38	1597	1521	4.78	96.4	98.4	2.04
Test 22	802	810	0.92	807	798	1.10	99.4	98.6	0.86
Test 23	1807	1842	1.93	1838	1793	2.46	98.3	97.3	0.99
Test 24	908	918	1.13	910	919	0.99	99.8	100.0	0.30
	Сер.		1.27	Сер.		1.50	Сер.		0.77

Проведене дослідження продемонструвало, що дії оператора в окремих робочих ситуаціях під час посіву здатні помітно впливати на якість висіву, зокрема на рівень сингуляції, який може знижуватися в певних умовах (рис. 13). Виходячи з аналізу, було зафіксовано зростання кількості пропусків при роботі сівалки на поворотній смузі. У такі моменти система керування швидко подавала сигнал на миттєве вимкнення та повторне увімкнення висівного механізму, що призводило до підвищення ймовірності появи похибок. При цьому не відзначалося істотних змін встановлених швидкісних режимів 2,4 км/год і 4,8 км/год, які були передбачені для зупинки або старту висівних секцій. Ймовірною причиною виступала реакція електроприводу дозувального механізму на команди щодо швидкісного режиму — для виходу

з нерухомого стану до потрібної частоти обертання рядковим двигунам потрібен певний час.

Також експерименти виявили, що більш інтенсивні коливання сингуляції виникали при різкому наборі швидкості або раптовому уповільненні під час переходу між різними режимами руху. Коли відбувалися стрімкі зміни швидкості (4,8 км/год/с), кількість похибок майже подвоювалася порівняно з плавними змінами (2,4 км/год/с). Для кожного стовпця на рис. 13 було здійснено розподіл помилок за типом зміни швидкісного параметра, що спричинив пропуски або формування двійників. Додатково встановлено: коли апарат одночасно запускався або призупинявся, кількість похибок збільшувалася за умов керування сівалкою на більш високій швидкості руху.

При як швидкій, так і повільній зміні темпу руху кількість похибок залишалася вищою під час прискорення й гальмування в діапазоні від 2,4 до 4,8 км/год порівняно зі змінами на 7,2; 9,7 або 12,1 км/год. Ймовірно, це пояснюється тим, що більшість тестових сценаріїв передбачала саме перехід між нижчими швидкісними режимами. Практична значущість цих результатів полягає в тому, що навіть відносно незначні варіації швидкості здатні викликати суттєві сингуляційні збої.

Незалежно від амплітуди зміни швидкісної характеристики або напряму корекції (прискорення чи уповільнення) на дозувальний механізм впливала зміна станів машини. Це свідчить про необхідність подальших конструкторських рішень для оптимізації висіву з використанням технологій змінної норми. Попри неможливість повного усунення подібних режимів роботи, встановлено, що поступові зміни швидкості дозволяють мінімізувати негативний вплив на точність.

Окремі серії випробувань, отримані за допомогою HSIS, були вручну перевірені, що дало змогу зіставити їх із даними, зібраними автоматизованою системою DAS, для оцінювання коректності обох методів вимірювання. Було проведено порівняння кількості насінин, кількості слотів на диску та розрахованого відсотка сингуляції для кожного повтору тестування (Таблиця

8). За даними співставлення встановлено, що відхилення DAS у вимірюванні кількості насіння, яке реєстрував стандартний сенсор насіннепроводу, перебуває в діапазоні $1,3 \pm 0,3\%$ від аналогічних показників HSIS.

Порівняння кількості щілин, зафіксованих інкрементальним енкодером DAS, виявило розбіжність на рівні $1,5 \pm 0,4\%$ щодо результатів HSIS. Крім того, оцінка сингуляції за допомогою DAS демонструвала точність у межах $0,8 \pm 0,2\%$ порівняно з інформацією, отриманою на основі HSIS. Зіставлення даних свідчить про низький рівень варіативності між повторами тестів і підтверджує стабільність роботи швидкісного сигналу та відповідної реакції висівного вузла на команди увімкнення і вимкнення.

Особливої уваги заслуговує те, що використання даних сенсора насіннепроводу може забезпечити безперервний моніторинг об'єктивного розподілу насіння разом із фактичним станом роботи машини. Такий підхід може бути застосований для створення інтерактивного зворотного зв'язку, який у реальному часі пропонуватиме оператору рекомендації щодо оптимальних умов, що забезпечують найкращий результат посіву.

З позиції виробника подібні дані можуть використовуватися для динамічного коригування технологічних параметрів машини (вакуум, взаємодія насінини з пластиною, елементи скребкового очищення тощо) або запровадження нових технічних рішень, які підвищують точність роботи висівної системи у польових умовах. Інформація про роботу висівного дозатора в поєднанні зі станом посівного процесу формує надзвичайно корисний ресурс для оновлення конструкторських рішень і виявлення критичних зон, що потребують удосконалення.

Порівняння точності у визначенні помилок між розробленими системами DAS та HSIS підтвердило здатність HSIS об'єктивно оцінювати якість посіву з урахуванням режимів функціонування сівалки. Узагальнені результати становлять вагомe інформаційне підґрунтя як для користувачів техніки, так і для її розробників.

Оператори зможуть застосовувати отримані висновки для коригування власної поведінки у полі: уникати різких змін швидкості під час поворотів, підтримувати рекомендовану швидкість, що сприятиме підвищенню рівномірності висіву. Перспективні експерименти можуть бути спрямовані на вивчення впливу збільшених кутових швидкостей приводів на переміщення насінини в трубці та на точність її розташування у рядку. Крім того, виробники можуть надалі використовувати HSIS для оцінювання вдосконалень у конструкції висівних механізмів, рекомендацій щодо оптимальних швидкостей руху та автоматичного регулювання вакууму, що сприятиме зростанню точності та стабільності посіву.

ВИСНОВКИ

Високошвидкісна система візуалізації (HSIS) була об'єднана з інтегрованою системою моніторингу сівалки для аналізу реакції висіву та дослідження станів сівалки, які впливають на точність висіву, наприклад постійні швидкості сівалки, швидкі та повільні зміни швидкості, зміни швидкості під час сигналізації вимірювача висіву про ввімкнення після зупинки (подібно до повороту на поворотній смузі) і з поступовими прискореннями/уповільненнями та норму висіву.

Вимірювання DAS з використанням комерційної насінневої трубки та вимірювання цифрового кодера досягли точності вимірювання в межах $1,3 \pm 0,3\%$ і $1,5 \pm 0,4\%$ вимірювань HSIS відповідно. У результаті відсоткова різниця між точністю вимірювань DAS і HSIS склала $0,8 \pm 0,2\%$. Результати показали збільшення помилок вимірювання одиничного висіву, коли сівалка отримувала сигнал про посів з цільовою швидкістю посіву без поступового прискорення або уповільнення.

Крім того, помилки сингуляції зросли майже вдвічі при швидких змінах швидкості (4,8 км/год/с) порівняно з повільними (2,4 км/год/с). Нарешті, висів зі швидкістю висіву вище 1250 насінин за хвилину призводив до помітного збільшення помилок висіву.

За цими результатами можна було б рекомендувати оператору трактора швидкість висіву на основі норми висіву (популяції) і прийнятної точності розподілу. Наприклад, для сівалки, яку оцінювали в цьому дослідженні, оператор хотів би сіяти зі швидкістю, що відповідає нормі висіву, щоб обмежити одиничний висівний лічильник до 1250 насінин за хвилину з повільними змінами швидкості для максимальної точності та точності сівалки.

У цьому дослідженні стверджується, що ізольована саджальна машина спричинила неточності посіву через поведінку оператора, наприклад повільне прискорення та уповільнення під час поворотів на смузі та сівба на швидкостях, які призводять до вищого рівня відсотка сингуляції. Слід

розглянути майбутні дослідження з використанням розробленої HSIS для подальшого вивчення точності висіву з різними конструкціями висівних дисків дозувальних апаратів, різними культурами та відповідними висівними дисками, а також зрозуміти точність висіву сівалки під час роботи в реальних польових умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Схожість насіння як один із важливих показників [Електронний ресурс] // syngenta.ua. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.syngenta.ua/news/novini-kompaniyi/shozhist-nasinnya-yak-odin-iz-vazhlyvih-pokaznikiv>.
2. Чому необхідно перевіряти схожість насіння перед посівом [Електронний ресурс] // Головне управління Держпродспоживслужби в Черкаській області. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/hromadianam/upravlinnia-fitosanitarnoi-bezpeky/novyny-upravlinnia-fitosanitarnoi-bezpeky/1965-chomu-neobkhidno-pereviriaty-skhozhist-nasinnia-pered-posivom>.
3. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву / Ельчин Бахтияр огли Алієв, Петро Євгенійович Безверхній // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник / Кіровоградський національний технічний університет. - 2022. - Вип. 52. - С. 86 - 98.
4. Y. Ding, L. Yang, X. He, T. Cui, B. Qi, W. Zhang, Ch. Xie, Zh. Du, Y. Li, D. Zhang, Development and performance evaluation of an automatic section control system for corn precision planters, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 206, 2023, 107670, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107670>.
5. W. Wang, W. Shi, C. Liu, Y. Wang, L. Liu, L. Chen. Development of automatic wheat seeding quantity control system based on Doppler radar speed measurement, Artificial Intelligence in Agriculture, Vol. 15, Issue 1, 2025, pp 12-25, <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.12.001>.
6. Полторецький С. П. Оцінка залежності врожайності і показників якості насіння проса залежно від строку та способу сівби / С. П. Полторецький,

Н. М. Полторецька. // ВІСНИК Полтавської державної аграрної академії. – 2019. – №4. – С. 29–31.

7. Радіонов Д. Якість висіву соняшнику 94%, або Темпо F — сівалка, яку потрібно розуміти [Електронний ресурс] / Д. Радіонов // Агробізнес сьогодні. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://agrobusiness.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/11904-yakist-vysivu-soniashnyku-94protsent-abo-tempo-f-sivalka-iaku-potribno-rozumity.html>.

8. Котигора О. Вплив строків та норм висіву на урожайність соняшника [Електронний ресурс] / О. Котигора // СуперАгроном. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://superagronom.com/articles/484-oleksandr-kotigora-vplyv-strokov-ta-norm-visivu-na-urojajnist-sonyashnika>.

9. Сіяти соняшник зі змінною нормою чи ні? Результати дослідження на 50 полях [Електронний ресурс] // Агроном. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.agronom.com.ua/siyaty-sonyashnyk-zi-zminnoyu-normoyu-chy-ni-rezultaty-doslidu-na-50-polyah/>.

10. Посів соняшнику на міжряддя 12,5 см [Електронний ресурс] // Агробізнес сьогодні. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://agrobusiness.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/2355-posiv-soniashnyku-na-mizhriaddia-12-5-sm.html>.

11. Фактори, які впливають на прибуткове вирощування гібридів кукурудзи [Електронний ресурс] // Seed Ukraine. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://seed-ua.com/ua/factory-yaki-vplyvayut-na-prybutkove-vyroshhuvannya-gibrydiv-kukurudzy/>.

12. 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.

13. Налаштування сівалок при проблемах з посівом і глибиною заробки насіння [Електронний ресурс] // Поради від команди DEKALB. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.dekalb.ua/agronomichna-biblioteka/porady-vid-monsanto/nalashtuvannja-sivalok>.

14. Легкодух І. Автоматизовані системи контролю якості сівби для просапних сівалок [Електронний ресурс] / І. Легкодух, Н. Легкодух // Агросеа. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://agrosea.com.ua/UKRNIPVT_POGORILOGO/.

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

16. Як оцінити якість посіву? Plant Counting: Pogostick та дрони [Електронний ресурс] // aggeek. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://aggeek.net/ru-blog/yak-otsiniti-yakist-posivu-plant-counting-pogostick-ta-droni>.

17. Правильний посів: основні фактори, що впливають на врожайність під час сівби польових культур. [Електронний ресурс] // AgroDay. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroday.com.ua/2019/05/14/pravylnyj-posiv-osnovni-factory-shho-vplyvayut-na-vrozhajnist-pid-chas-sivby-polovyh-kultur/>.

18. Морозов І. Фактори ефективності сівалок [Електронний ресурс] / І. Морозов, М. Макаренко // Агробізнес Сьогодні. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1138-factory-efektyvnosti-sivalok.html>.

19. Васильченко В. Фактори, які визначають якість сівби [Електронний ресурс] / В. Васильченко, В. Опалко // Агроном. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.agronom.com.ua/factory-yaki-vyznachayut-yakist-sivby/>.

20. Спосіб оцінки точності висіву [Електронний ресурс] / О.Банний, А. Новицький, С. Карабиньош, Ю. Новицький // Пропозиція, № 5. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://propozitsiya.com/ua/sposib-ocinky-tochnosti-vysivu>.

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

22. Jupp L. (2018). Precision Farming From Above. Writing Matters Publishing, 113 p.
23. Zubko V., Sirenko V., Kuzina T., Onychko V., Sokolik S., Roubik H., Koszelg M., Shchurh T. (2022) Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. Agricultural Engineering, Vol. 26 , No 1 , pp. 25-37 DOI: 10.2478/agriceng-2022-0003.
24. Delta Force [Електронний ресурс] // Precision Planting. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.precisionplanting.com/products/product/deltaforce>.
25. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с

Додатки