

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: «Підвищення ефективності використання посівних агрегатів
адаптивними рішеннями технології PRECISIONPLANTING»

Виконав:

(підпис)

Ростислав АЛЕЩЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2402-2М

Науковий керівник:

(підпис)

Сергій ХАРЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність **208 Агроінженерія**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
агроінжинірингу
Михайло ШУЛЯК
“06” 11 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу
Ростиславу АЛЕЩЕНКУ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Підвищення ефективності використання посівних агрегатів адаптивними рішеннями технології PRECISIONPLANTING
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Сергій ХАРЧЕНКО, д.т.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «30» січня 2026 року.
4. Вихідні дані до роботи: 1. Науково-технічна література. 2. Літературні джерела інформації та Інтернет ресурси. 3. Монографії, тощо за темою наукового дослідження. 4. Методичні рекомендації до виконання проекту (роботи).
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1 Аналіз ефективності використання посівних агрегатів та методи її підвищення. 2. Удосконалення посіву за технологією PRECISION PLANTING: ефективні методи підвищення якості. 3. Експериментальна частина. 4 Охорона праці. 5. Економічне обґрунтування роботи. Загальні висновки. Список літературних джерел.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи: _____

(підпис)

Сергій ХАРЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Ростислав АЛЕЩЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «06» листопада 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 08.09.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 22.09.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 29.09.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1 Аналіз ефективності використання посівних агрегатів та методи її підвищення»	до 13.10.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2 Удосконалення посіву за технологією PRECISION PLANTING: ефективні методи підвищення якості»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3 Експериментальна частина»	до 03.11.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4 Охорона праці»	до 24.11.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5 Економічне обґрунтування роботи»	до 08.12.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 15.12.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 25.01.2026 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 22.01.2026 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 29.01.2026 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Сергій ХАРЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Ростислав АЛЕЩЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Алещенко Р. О. Підвищення ефективності використання посівних агрегатів адаптивними рішеннями технології PRECISION PLANTING. Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра з спеціальності 208 Агроінженерія за освітньою програмою «Системи точного землеробства». – Сумський національний аграрний університет, Суми.- 2026.

У кваліфікаційній роботі досліджено ефективність використання посівних агрегатів, оснащених адаптивними технологіями Precision Planting, у контексті підвищення якості сівби в умовах просторово неоднорідного ґрунту. Проаналізовано вплив агрофізичних властивостей ґрунту, таких як твердість, вологість та структурна цілісність, на параметри посівного процесу. Особливу увагу приділено функціональним можливостям систем DeltaForce, SmartFirmer, vSet, vDrive та 20|20 SeedSense, які дозволяють в режимі реального часу адаптувати притискне зусилля сошників, контролювати глибину загортання насіння та вібрації посівних секцій.

У роботі досліджено взаємозв'язок між механічними впливами на сошник і рівномірністю розподілу насіння в посівному ложі. Визначено, що підвищена вібрація посівних секцій, спричинена неоднорідністю структури ґрунту, негативно впливає на показник SRI (Seed Release Index) та, як наслідок, знижує потенціал урожайності. Побудовано карти розподілу притискного зусилля, вібрацій і параметрів NDVI, що дозволило локалізувати проблемні ділянки поля - зони ущільнення, солонці, ділянки з надмірною вологістю.

Розроблено практичні рекомендації щодо адаптації технології Precision Planting до конкретних умов господарств. Обґрунтовано доцільність використання карт вібрацій та притискного зусилля як інструментів оперативного прийняття рішень у сільськогосподарському виробництві. Також запропоновано підхід до зонального обробітку ґрунту, який враховує отримані карти строкатості.

Дослідження можуть бути використані в діяльності агропідприємств, що впроваджують елементи точного землеробства, а також у навчальному процесі

закладів вищої освіти аграрного профілю. Результати роботи можуть стати основою для подальшої автоматизації регулювання параметрів посівного процесу, розробки програмного забезпечення агромоніторингу, а також створення рекомендацій з управління просторовою неоднорідністю полів.

Ключові слова: точне землеробство, Precision Planting, притискне зусилля, вібрація сошника, індекс SRI, NDVI, адаптивні технології, строкатість ґрунту, автоматизований посів, якість сівби.

ABSTRACT

Aleshchenko R. O. Improving the Efficiency of Seeding Units through Adaptive Solutions of the Precision Planting Technology.

Master's Qualification Thesis submitted for the degree of Master of Agroengineering, Qualification work for a master's degree in specialty 208 Agroengineering under the educational program "Precision Agriculture Systems". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The qualification work investigates the effectiveness of using sowing units equipped with adaptive Precision Planting technologies in the context of improving the quality of sowing in spatially heterogeneous soil conditions. The influence of soil agrophysical properties, such as hardness, moisture, and structural integrity, on the parameters of the sowing process was analyzed. Particular attention is paid to the functional capabilities of DeltaForce, SmartFirmer, vSet, vDrive and 20|20 SeedSense systems, which allow real-time adaptation of the coulter downforce, control of the seeding depth and vibration of the sowing sections.

The thesis investigates the correlation between mechanical influences on the row unit and seed placement uniformity in the seedbed. It was determined that increased vibration of seeding sections, caused by non-uniform soil structure, adversely affects the Seed Release Index (SRI), ultimately reducing yield potential. Maps of downforce distribution, row unit vibration, and NDVI parameters were constructed, allowing the

identification of problematic field areas such as compacted zones, saline patches, and over-moist zones.

Practical recommendations have been developed for adapting *Precision Planting* technology to the specific needs of individual farms. The study substantiates the feasibility of using vibration and downforce maps as tools for operational decision-making in agricultural production. Additionally, a zonal soil tillage approach is proposed, taking into account the variability maps generated during field operations.

The results of the research can be utilized by agricultural enterprises implementing elements of precision farming, as well as in the educational process of higher agricultural education institutions. The findings may serve as a foundation for further automation of seeding parameter regulation, development of agro-monitoring software, and creation of guidelines for managing spatial field variability.

Keywords: precision agriculture, Precision Planting, downforce, row unit vibration, Seed Release Index (SRI), NDVI, adaptive technologies, soil variability, automated seeding, seeding quality.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
Розділ 1 Аналіз ефективності використання посівних агрегатів та методи її підвищення	9
1.1. Загальна характеристика	9
1.2 Енергетичний аспект концепції розвитку посівних агрегатів	13
1.3 Цифрові системи в посівних МТА	16
Розділ 2 Удосконалення посіву за технологією PRECISION PLANTING: ефективні методи підвищення якості.....	21
2.1 Моніторинг даних для точного посіву	21
2.2 Принцип роботи механізму формування необхідного притискового зусилля на опорних колесах (технологія DeltaForce)...	25
Розділ 3 Експериментальна частина	30
3.1 План дослідження	30
3.2 Випробування адаптивної технології посіву кукурудзи	30
3.3 Аналіз результатів експерименту та обробка даних	39
Розділ 4 Охорона праці.....	44
4.1 Загальні положення.....	44
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....	44
4.3 Загальні вимоги охорони праці та заходи безпеки при сівбі.....	45
Розділ 5 Економічне обґрунтування роботи.....	48
5.1 Розрахунок показників.....	48
Загальні висновки.....	53
Список використаних джерел.....	55
Додатки	

ВСТУП

У сучасних умовах аграрного виробництва питання підвищення ефективності використання технічних засобів стає все більш актуальним. Світові тенденції розвитку сільського господарства зорієнтовані на впровадження точних та ресурсощадних технологій, що забезпечують не лише стабільну врожайність, але й раціональне використання матеріальних, енергетичних та природних ресурсів. В цьому контексті особливе значення набувають адаптивні технології точного землеробства, серед яких однією з найефективніших є система *Precision Planting*.

Посів - один з ключових етапів у формуванні врожаю, від якого безпосередньо залежить подальший розвиток культури. Відхилення у глибині загортання насіння, нерівномірний розподіл у рядку, неадекватне притискне зусилля чи недостатня адаптація до умов поля можуть призвести до значних втрат продуктивності. У свою чергу, технології *Precision Planting* дозволяють автоматизовано регулювати основні параметри посівного процесу з урахуванням просторової мінливості агрофону, тим самим значно покращуючи якість сівби, однорідність сходів та використання потенціалу культури.

Особливий інтерес становить вивчення ефективності впровадження адаптивних рішень *Precision Planting* у поєднанні з сучасними посівними агрегатами. Практичне застосування таких систем, як *DeltaForce*, *SmartFirmer*, *vDrive* та інших, дозволяє в режимі реального часу реагувати на зміни твердості, вологості, структури та інших властивостей ґрунту під час сівби. Це забезпечує підвищення сингулярності насіння, зменшення впливу несприятливих факторів та, відповідно, покращення показників урожайності.

Таким чином, актуальність обраної теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання посівних агрегатів шляхом впровадження адаптивних технологій точного землеробства, що сприяють покращенню агротехнічних показників, економічної рентабельності та екологічної стабільності агровиробництва.

Метою даної магістерської роботи є аналіз, обґрунтування та експериментальна перевірка впливу адаптивних рішень *Precision Planting* на ефективність використання посівних агрегатів у польових умовах.

Завданнями дослідження є:

- аналіз сучасного стану впровадження систем точного посіву у світовій та вітчизняній практиці;
- дослідження взаємозв'язку між параметрами посіву та показниками врожайності;
- оцінка роботи посівного агрегату з адаптивними системами в різних ґрунтово-кліматичних умовах;
- формування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності посівного процесу.

Отримані результати можуть бути використані в практиці агрономічного управління, в системах точного землеробства та при розробці нових високоефективних агротехнологій.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОСІВНИХ АГРЕГАТІВ ТА МЕТОДИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

1.1 Загальна характеристика

Посівні агрегати, як і всі машинно-тракторні комплекси (МТК), оцінюються за такими основними критеріями ефективності: продуктивність, енергоспоживання, матеріаломісткість технологічного процесу та якість виконуваних операцій. У зв'язку з цим науково-дослідні установи, вищі навчальні заклади та конструкторські підрозділи заводів-виробників активно займаються розробкою посівної техніки, яка відповідає сучасним вимогам агровиробництва. Роботи здійснюються як у напрямку модернізації наявних зразків техніки, так і в пошуку нових, принципово інноваційних технічних рішень [1]. Удосконалення посівних машин здійснюється відповідно до сформованих концепцій розвитку, які виступають своєрідними парадигмами технічного прогресу.

Початкові етапи створення посівних машин ґрунтувалися на класичних законах механіки, у межах яких розв'язувалися ключові науково-технічні задачі, зокрема:

- виконання силових розрахунків конструктивних елементів з урахуванням їхньої взаємодії;
- дослідження фізико-механічних властивостей ґрунту;
- моделювання руху насіння та мінеральних добрив по трубопровідній системі, а також їх проходження через сошники до ґрунту;
- визначення траєкторій переміщення елементів агрегату при роботі на полях зі складним рельєфом.

Якщо розглядати переміщення насіння та гранул мінеральних добрив у трубопровідній системі від розподільчого пристрою до сошників, відносно поверхні ґрунту, то під впливом сили тяжіння вони рухаються донизу з певною вертикальною швидкістю. Одночасно з цим, у горизонтальній площині вони переміщуються разом із машинно-тракторним агрегатом, який рухається з робочою швидкістю. Враховуючи подібну модель руху посівного агрегату, де

загальна швидкість насіння є сумою швидкості його падіння в трубопроводі та поступального руху агрегату ($V_{p2} + V_{p1}$), було спроектовано ефективні системи транспортування посівного матеріалу від бункера до насінневого ложа. Це дозволило досягти високої точності дотримання норм висіву.

Проте, попри успіхи в підвищенні точності посіву, виробники техніки не змогли подолати обмеження, визначені технологічною парадигмою, що встановлює залежність між швидкістю руху агрегату та відхиленням від заданих агротехнічних параметрів (рис. 1.1).

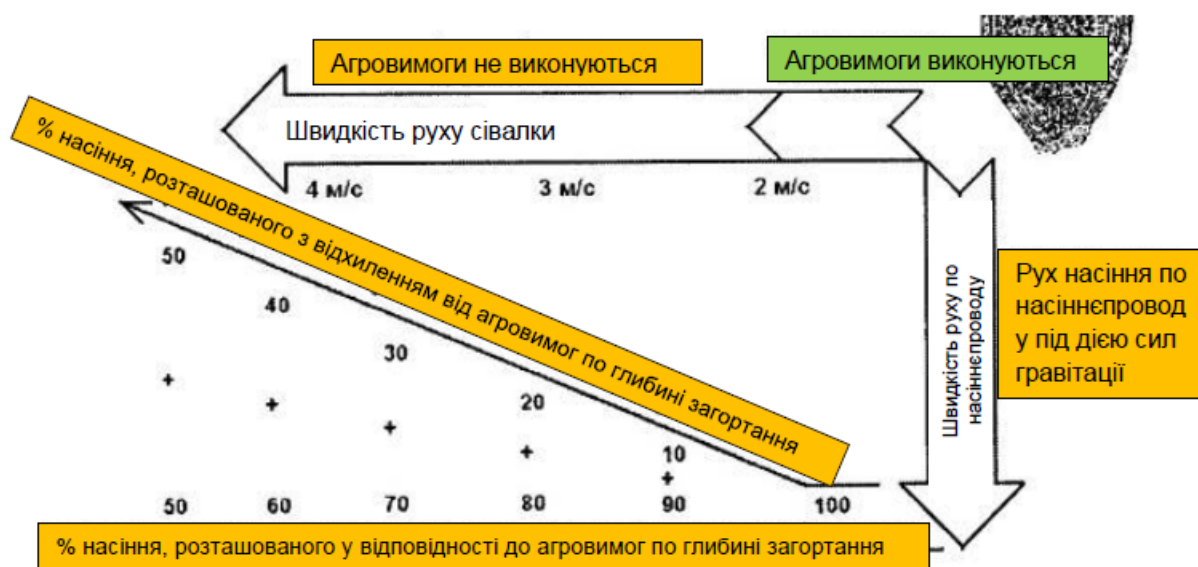


Рисунок 1.1 - Модель розвитку початкових технічних рішень у конструкції посівних машин (I покоління) [2]

Як показано на рис. 1.1, сівалки I покоління мали обмежені можливості щодо забезпечення агротехнічних вимог до посіву, зокрема через залежність від швидкості руху агрегату та особливості транспортування насіння в насіннепроводах. У таких конструкціях транспортування насіння до зони висіву здійснювалося переважно за рахунок дії сили тяжіння та інерції.

У сівалках II покоління (див. рис. 1.2) було впроваджено додаткові технічні рішення, що передбачають подачу насіння до сошника під впливом не лише сили тяжіння, але й повітряного потоку. З цією метою в конструкцію агрегатів були інтегровані вентилятори, які створюють контрольований потік повітря. Такий підхід дозволяє значно скоротити час транспортування насіння до зони

загортання, що, у свою чергу, забезпечує можливість підвищення робочої швидкості агрегату та зростання його продуктивності.

Сівалки цього типу здебільшого застосовуються в технологіях, орієнтованих на збереження ґрунту, і працюють із спеціалізованим посівним матеріалом - дражованим або капсульованим насінням гібридних культур. Завдяки захисній оболонці таке насіння може транспортуватися через пневмосистему та розподільчі механізми без механічних пошкоджень або втрати посівних якостей.

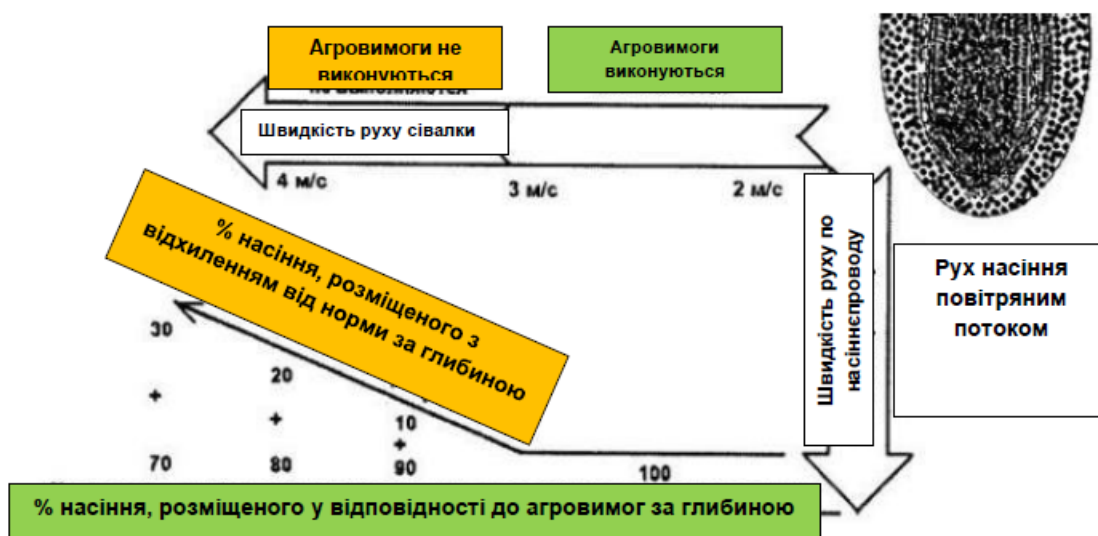


Рисунок 1.2 - Етапи технічного удосконалення сівалок другого покоління [2]

Характерною особливістю посівних машин другого покоління є можливість підвищення робочої швидкості без порушення встановлених агротехнічних вимог до посіву.

Посівна техніка третього покоління (рис. 1.3) відрізняється тим, що транспортування насіння до сошника здійснюється виключно за рахунок сили повітряного потоку.



Рисунок 1.3 - Етапи технічного удосконалення сівалок третього покоління[2]

Такі машини здатні забезпечувати стабільну якість висіву при значному підвищенні швидкості роботи - до 4 м/с (14-15 км/год), дотримуючись при цьому всіх агротехнічних норм. Керування процесами висіву та контроль за функціонуванням основних систем здійснюється безпосередньо з кабіни трактора або дистанційно.

Уже в 2020 році компанія Vaderstad презентувала інноваційну зернову сівалку, яка здатна працювати на швидкостях до 20 км/год. Однак реалізація такого високошвидкісного посіву вимагає впровадження сучасних цифрових і комп'ютеризованих систем управління та моніторингу технологічного процесу.

Ключова техніко-технологічна перевага посівної техніки третього покоління полягає в повній автоматизації управління всіма етапами її роботи. Завдяки використанню програмного забезпечення можливе попереднє моделювання роботи агрегату у віртуальному середовищі. Після завершення моделювання створюється так звана карта завдань, яку завантажують у вбудовану комп'ютерну систему сівалки. Надалі посівний комплекс самостійно виконує заданий сценарій дій, паралельно передаючи інформацію про виконання кожної операції в режимі реального часу.

У разі виникнення збоїв у роботі, їх можна оперативно усунути - як безпосередньо з кабіни трактора, так і дистанційно з офісу фахівця. Якщо

оператор не вносить ручних коригувань, система виконує програму автоматично, відповідно до попередньо завантажених параметрів.

1.2 Енергетичний аспект концепції розвитку посівних агрегатів

Аналізуючи існуючі підходи до вдосконалення посівної техніки, можна зробити висновок, що у роботі [1] недостатньо уваги приділено питанням енергетичної ефективності при проектуванні та експлуатації сівалок. Зокрема, енергетична криза 1973 року, яка спричинила суттєві зміни в багатьох галузях економіки, включно з транспортом, певним чином вплинула і на розвиток сільськогосподарського машинобудування, зокрема посівної техніки.

У дослідженні [2] наведено розрахункові дані, які свідчать про те, що тяговий опір R_m посівних агрегатів має тенденцію до зростання (див. рис. 1.4). Основною причиною цього вважається поступове збільшення робочої швидкості посівних машин. Екстраполяція цієї залежності дозволяє припустити, що у машинах третього покоління тяговий опір зростатиме ще інтенсивніше.

Відповідно, щоб компенсувати зростання енергоспоживання та водночас зменшити витрати на посівні операції, необхідно впроваджувати технічні рішення, що забезпечать пропорційне зниження енерговитрат без шкоди для якості. Таким чином, подальший розвиток посівної техніки має бути спрямований на забезпечення її якісного прориву в напрямі енергетичної оптимізації.

Варто зазначити, що в середині ХХ століття переважала думка про сталу величину питомого тягового опору сівалок. Проте сучасні дослідження спростували це припущення. Зростання питомого опору пояснюється не лише підвищенням швидкості руху агрегатів, а й розширенням функціональних можливостей сучасних сівалок. Вони, окрім базового висіву, можуть виконувати передпосівну обробку ґрунту, ущільнення насінневого ложа, пригортання насіння та інші додаткові технологічні операції. Це сприяє підвищенню якості сівби, але одночасно збільшує енергетичне навантаження, що проявляється у зростанні питомого тягового опору R_m .

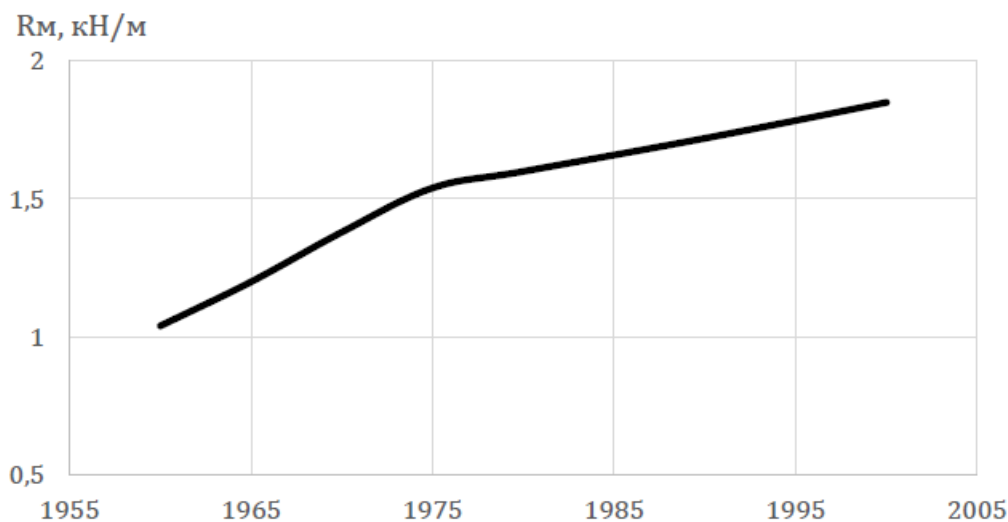


Рисунок 1.4 - Підвищення питомого тягового опору R_m у процесі концептуального вдосконалення посівних машин

На рис. 1.4 показано, що після 1975 року швидке зростання питомого тягового опору посівних машин дещо сповільнилося, проте тенденція до збільшення тривала. У цей період увагу конструкторів привернув новий напрямок науково-технічних досліджень - вплив вібраційних процесів на енергетичну ефективність та якість посіву. Особливий інтерес становили ультразвукові вібрації як один із видів таких збурень.

Дослідження, присвячені впливу ультразвуку на сили тертя у трибоспряженнях сівалках [5], показали можливість налаштовувати вібраційні, зокрема ультразвукові, технологічні системи у режим авторезонансу (див. рис. 1.5). Такий режим забезпечує максимальну продуктивність роботи машин з урахуванням зворотного впливу оброблюваного середовища на їхні робочі органи.

Ультразвукові машини становлять окрему категорію вібраційної техніки, їх динамічні властивості визначаються роботою в діапазоні ультразвукових частот від 20 до 60 кГц.

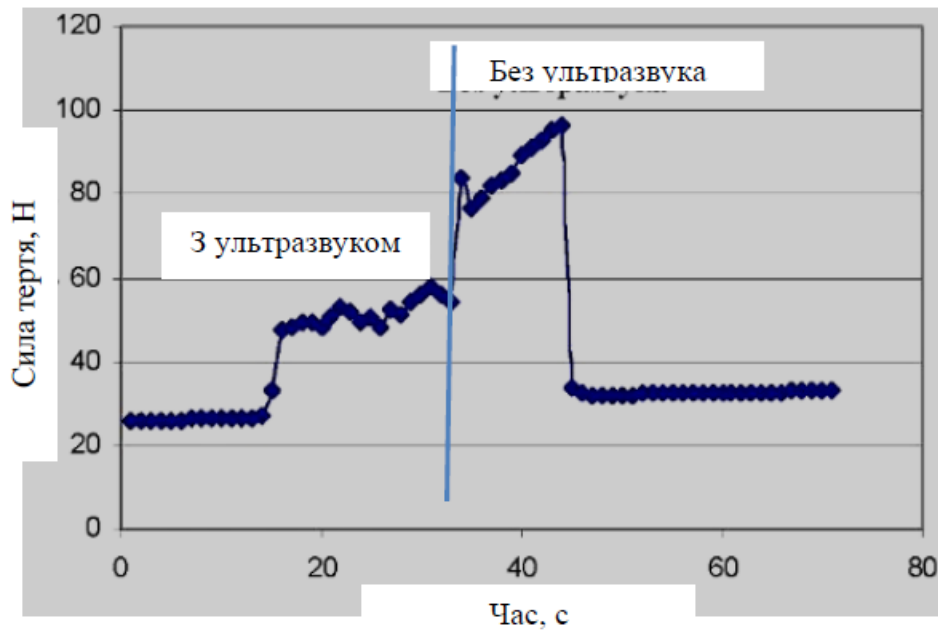


Рисунок 1.5 - Вплив ультразвукових коливань на силу тертя металевих пар [2]

Функціональні (додаткові) елементи таких машин розробляються за уніфікованою концепцією, що базується на максимальному використанні однакових ключових компонентів - ультразвукового авторезонансного генератора та ультразвукової коливальної системи. Це технічне рішення може бути застосоване для активації технологічних матеріалів, зокрема під час роботи висівних систем із насінням, де тертя відіграє важливу роль.

Використання описаних підходів сприяє підвищенню ефективності роботи сівалок і, частково, покращує загальну продуктивність посівних машинно-тракторних агрегатів. Сучасний етап - значне зростання продуктивності посівної техніки за умови збереження високої якості посіву досягається завдяки впровадженню цифрових систем: дистанційно керованих електроприводів висівних механізмів та навігаційних систем для МТА.

Розглянемо ключові конструктивні компоненти таких систем та проведемо аналіз впливу їх застосування на продуктивність посівних машинно-тракторних агрегатів (МТА).

1.3 Цифрові системи в посівних МТА

У сучасних сівалках електроприводи стали одним із основних елементів для впровадження цифрових технологій [7, 8].

Встановлення індивідуального електроприводу, який виробники зазвичай дають назву V-Drive (див. рис. 1.6) (або його аналоги), на кожній висівній секції просапних сівалок дозволяє диференційовано регулювати норму висіву. Це забезпечує точне дозування посівного матеріалу в конкретній ділянці поля та покращує рівномірність розподілу насіння в ряду.



Рисунок 1.6 - Електричний (індивідуальний) привід V-Drive для висівного апарату сівалки просапної [35]

Представлене технічне рішення дало змогу керувати кожною посівною секцією окремо, що сприяло розвитку нових напрямів у використанні МТА, зокрема впровадженню телематики.

Теперішня цифровізація агровиробництва є фундаментом успішного ведення агробізнесу. Швидкість прийняття управлінських рішень та підвищена якість контролю за виробничими процесами призводить до збільшення ефективності використання машинно-тракторних агрегатів. Це сприяє зменшенню простоїв, скороченню часу на розвороти та обслуговування техніки, а також збільшує коефіцієнт використання робочого часу.

На ринку представлені численні цифрові платформи для ведення сучасного землеробства, серед яких AFS Connect , Cropwise, MyJohnDeere, PLM Connect, та інші.

Розглянемо як приклад уніфіковану цифрову платформу, яка має типовий набір функціональних можливостей, характерний для більшості сучасних систем, згаданих вище.

Інтерфейс системи MyJohnDeere (див. рис. 1.7) демонструє широкий набір інструментів для управління та моніторингу агровиробничих процесів.



Рисунок 1.7 - Спеціалізований веб-ресурс StellarSupport, що забезпечує технічну підтримку для обладнання AMS.

Користувач (фермер) отримує доступ до персональної інформації щодо придбаних продуктів AMS, зокрема термінів дії ліцензій (SF2/SF3/SF-RTK), JDLink, а також серійних номерів пристроїв. На рис. 1.8 показані функції для користувача (система Operations Center Mobile).



Рисунок 1.8 - Приклад функціоналу, доступного користувачеві в системі John Deere Operations Center.

Нижче наведено основні функції, що доступні користувачам цифрових аграрних платформ, зокрема системи John Deere Operations:

1. *Геозони* - дозволяють задавати межі, в межах яких дозволено експлуатацію техніки. Якщо техніка залишає встановлену зону, відповідальні особи отримують повідомлення відповідно до заданих умов.
2. *Групи* - дають можливість керувати складом працівників, надавати доступ до даних партнерам чи іншим організаціям з урахуванням рівнів дозволу.
3. *Управління земельними ділянками* - дозволяє створювати й редагувати контури полів (GPS), додавати навігаційні маршрути типу А-В, створювати геометки.
4. *Інструмент налаштувань* - слугує для формування конфігурацій полів, культур, маршрутів, карт завдань, які потім передаються на бортові системи техніки John Deere.
5. *Обладнання* - меню для реєстрації та керування технічними засобами, що використовуються в господарстві.
6. *З'єднання* - дозволяє підключати програмні продукти сторонніх розробників, сумісні з Operations Center, а також синхронізувати облікові записи з іншими брендами, такими як Claas.
7. *Продукти* - дає змогу керувати переліком використовуваних культур, сортів, добрив, засобів захисту рослин і створювати рецептури бакових сумішей для обприскування чи внесення добрив.

Завдяки таким можливостям цифрові системи впливають на всі елементи формули продуктивності (формула 1.1):

- *робоча швидкість V_p* зростає завдяки швидшій роботі виконавчих механізмів;
- *ширина захвату V_r* збільшується за рахунок ефективнішого використання конструктивної ширини агрегату (V_k);
- *коефіцієнт використання змінного часу* підвищується завдяки оптимізації всіх етапів робочого дня.

Зазвичай продуктивність машинно-тракторного агрегату (МТА), зокрема посівного, визначається за стандартною формулою (га/зм):

$$W_{зм} = 0,1 \cdot B_p \cdot V_p \cdot \tau \quad (1.1)$$

де $W_{зм}$ - змінна продуктивність (га/зм), B_p - робоча ширина захвату агрегату, V_{pb} - робоча швидкість, а τ - коефіцієнт використання змінного часу.

У сучасному точному землеробстві застосовується велика кількість моделей сівалок різних брендів, серед яких можна виокремити такі, як: *John Deere 7200*, *John Deere 1890/95*, *Horsch Pronto*, *Horsch Maestro 36.50*, *Turbosem II 19 – 32 /48/60* та інші. Вони обладнані системами копіювання рельєфу поля, що забезпечують більш точне загортання насіння на задану глибину.

Однак, навіть за наявності таких систем сівалки не завжди здатні належно реагувати на зміну щільності ґрунту, яка не є сталою і може істотно варіюватися в межах одного проходу агрегату. Наприклад, як видно на полі (див. рис. 1.9), твердість ґрунту на глибині загортання насіння змінюється, тобто має неоднорідний характер. Це означає, що при проходженні агрегату через щільніші ділянки поля сошники можуть частково витіснитись з ґрунту, тобто заглиблення буде меншим за необхідне. У той же час на м'яких ділянках, навпаки, проникнення в ґрунт може бути глибшим.



Рисунок 1.9 - Вимірювання твердості ґрунту на одному з полів фермерського господарства на глибині висіву показали її нерівномірність (дані отримано за допомогою цифрового пенетрометра *SkokAgro S600*).

Такі коливання глибини, навіть якщо вони незначні, можуть перевищувати допустиме агротехнічне відхилення - не більше 15% від заданої глибини загортання. Це спричиняє нерівномірні сходи, в результаті чого на одному полі з'являються рослини з різною фазою розвитку. Надалі це ускладнює обробку посівів засобами захисту рослин (ЗЗР), оскільки культури реагують по-різному, частина з них може потрапити в стресовий стан або бути вразливою до хвороб, що впливає на загальну врожайність.

Це свідчить про те, що, незважаючи на наявність сучасних технічних, інженерних і цифрових рішень, сучасні сівалки не завжди здатні гарантувати стабільну якість посіву відповідно до встановлених агротехнічних стандартів.

У зв'язку з цим метою даного дослідження є створення адаптивної системи для підвищення ефективності роботи посівної техніки на основі використання технології Precision Planting.

Для реалізації поставленої мети передбачено виконання наступних завдань:

- провести аналіз існуючих підходів, принципів та способів застосування технології Precision Planting;
- виявити обмеження і недоліки даної технології та розробити техніко-технологічні шляхи їх усунення;
- здійснити польове випробування системи контролю зусилля на сошнику в умовах роботи з Precision Planting;
- адаптувати рекомендації з охорони праці при експлуатації посівних агрегатів, оснащених елементами Precision Planting;
- надати обґрунтовану економічну оцінку запропонованих технічних рішень.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ ПОСІВУ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ PRECISION PLANTING: ЕФЕКТИВНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ

2.1 Моніторинг даних для точного посіву [24]

Ефективне налаштування сучасної сівалки вимагає постійного контролю її роботи. Завдяки моніторингу даних у реальному часі, аграрії можуть оперативно змінювати технологічні параметри посівного агрегату – як дистанційно, так і безпосередньо в полі. Цей підхід дозволяє швидко адаптуватися до мінливих умов і оптимізувати процес посіву.

Перш ніж розпочати роботу, важливо провести ретельне налаштування та калібрування сівалки. Для цього використовують дисплеї, а також спеціалізовані датчики, такі як WaveVision, SmartFirmer та SmartPin. Ці прилади допомагають зібрати вичерпну інформацію про роботу агрегату. Чим більше достовірних даних доступно, тим точніші рішення щодо коригування параметрів можна ухвалити, забезпечуючи оптимальний результат посіву.

На жаль, більшість сучасних сівалок, що їх використовують сільськогосподарські підприємства, надають обмежений обсяг даних. Зазвичай це лише показники сингуляції (розподілу насіння) та норми висіву. Ситуація ускладнюється тим, що ці дані часто збираються за допомогою оптичних датчиків, які мають низьку точність. До того ж, ці датчики здебільшого встановлені в середині висівної трубки. Чим нижче розташований датчик, тим точнішими будуть показники, адже рух насінини може бути нестабільним після проходження верхньої частини трубки.

Окрім розташування, запиленість (у зоні, де фіксується датчик) також суттєво впливає на достовірність інформації [26]. Насіння може відхилятися від заданої траєкторії та вдарятися об стінки висівної трубки через високу вібрацію висівної секції. Основними причинами такої вібрації є:

- надмірна робоча швидкість посівного агрегату.
- зношеність запчастин (компонентів) сівалки, наприклад, втулок.
- неякісна підготовка ґрунту або його неоптимальна структура.

Розуміння цих факторів та використання сучасних систем моніторингу допоможе досягти найкращої якості посіву та підвищити ефективність роботи.

Усунення конструктивних недоліків та вдосконалення моніторингу посіву

Пошкодження насінневої трубки дисками сошника є суттєвим конструктивним недоліком, що знижує якість посіву. Хоча ця проблема зазвичай виникає при значному зношенні захисних елементів трубки, вона має вирішальне значення для точності висіву.

Але сучасні технології пропонують ефективні рішення. Використання насінневої трубки з датчиком WaveVision від компанії Precision Planting дозволяє отримувати високоякісні дані про сингуляцію (точність висіву окремих насінин) та індекс SRI (Seed Release Index) - показник якості розподілу насіння в рядку [28,29].

SRI є одним із найважливіших показників при посіві просапних культур. Він відображає рівномірність розміщення насіння, не враховуючи при цьому двійники та пропуски. Фактично, SRI – це коефіцієнт варіації (або коефіцієнт середньоквадратичного відхилення), помножений на 10. Чим нижче значення SRI, тим рівномірніший розподіл насіння.

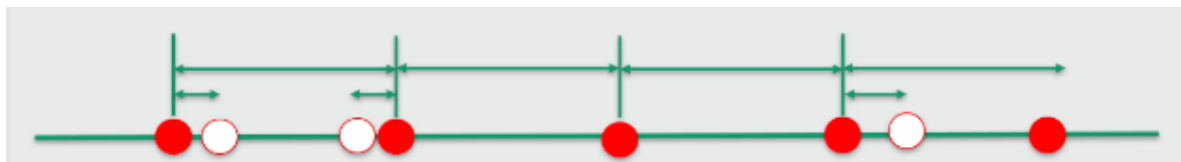


Рисунок 2.1 - Схема розташування насінин у рядку, що застосовується для розрахунку індексу SRI.

Для розрахунку індексу SRI враховуємо норму висіву, ширину міжрядь, наявність двійників та пропусків.

На моніторі відображається показник (середній) SRI для 300 (останніх) насінин (це число можна налаштувати). Цей показник ілюструє, наскільки сильно насіння відхиляється від ідеального, середнього положення в рядку. Якщо SRI перевищує 32, це свідчить про настільки нестабільний розподіл насіння, що його можна вважати випадковим.

Наприклад, порівняння фактичного розподілу насіння сівалкою Horsch (модель не уточнюємо навмисно) та сівалкою, що працює за технологією Precision Planting, демонструє значні переваги останньої, див. рис. 2.2. Незважаючи на загальну високу точність обох сівалок, Precision Planting забезпечує таку рівномірність розміщення насіння. Це критично важливо, оскільки дозволяє забезпечити кожен рослинку оптимальною площею живлення, що, в свою чергу, максимізує потенціал врожайності культури, наближаючи його до біологічних можливостей.

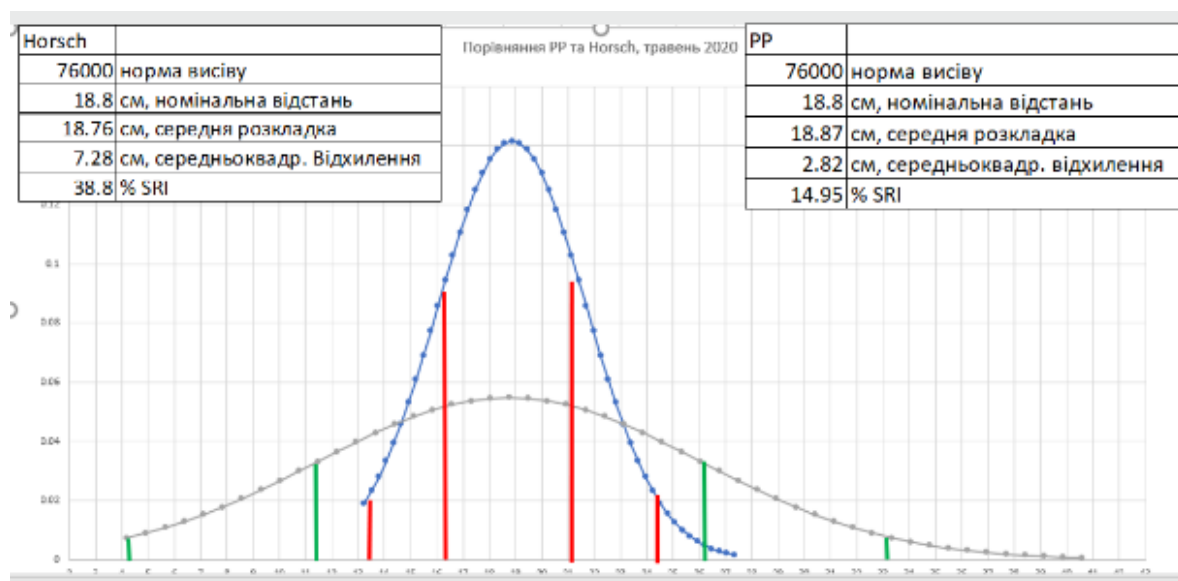


Рисунок 2.2 - Результат розташування насіння двома сівалками в рядку

Для забезпечення максимальної точності посіву компанія Precision Planting розробила передовий ультразвуковий датчик WaveVision, який встановлюється у самому низу насінневої трубки, безпосередньо на виході насінини (див. рис. 2.3а). Завдяки такому розташуванню та ультразвуковому принципу дії, WaveVision забезпечує високоточні та адекватні результати. На відміну від оптичних аналогів, на його показники не впливає пил чи інші сторонні частинки, які можуть бути присутні в насінній трубці, що робить його незамінним для отримання достовірних даних.



Рисунок 2.3 - Трубка (насіenneва): а) Precision Planting - ультразвуковий датчик WaveVision; б) Kinze- оптичний датчик

Якщо порівняти роботу традиційного оптичного датчика, розташованого в середній частині висівної трубки, з ультразвуковим датчиком WaveVision, розміщеним у нижній частині, то висока точність даних, отриманих від WaveVision, дозволяє не лише відображати норму висіву, але й надавати критично важливий показник – індекс SRI (Seed Release Index). Цей індекс, доступний лише на сівалках останніх модифікацій, є ключовим для оператора, адже дозволяє вибрати оптимальну швидкість руху посівного агрегату. Таке точне регулювання швидкості значно підвищує ефективність використання посівної техніки. Варто зазначити, що WaveVision є єдиним ультразвуковим датчиком для насінневої трубки, що серійно випускається та сумісний з більшістю сівалок від різних виробників, що робить його універсальним рішенням для аграріїв.

Традиційно, щоб визначити глибину посіву, спеціалісти агрпідприємств орієнтуються на загальні показники температури та відносну вологість ґрунту. Однак, суттєвою проблемою є неоднорідність ґрунту в межах поля, а також вплив рельєфу місцевості. Через це глибину посіву часто встановлюють єдиною для

всього поля або навіть для кількох полів, що може негативно позначитися на врожайності.

Для вирішення цієї проблеми компанія Precision Planting пропонує встановлювати датчики SmartFirmer. Встановлення цих датчиків на сівалку дає оператору можливість в режимі реального часу відстежувати показники температури та відносної вологості ґрунту безпосередньо в борозні. У разі, якщо ці показники виходять за встановлені агрономом або іншим спеціалістом межі, оператор може оперативним повідомити про це відповідального для прийняття коригувальних рішень. Це дозволяє здійснювати посів на оптимальній глибині, враховуючи специфічні умови кожної ділянки поля.

2.2. Принцип роботи механізму формування необхідного притискного зусилля на опорних колесах (технологія DeltaForce)

Під час експлуатації сівалки на її висівну секцію впливають різні за напрямком і характером сили, як зображено на рис. 2.5 [11.12]. Серед них - сила тяжіння агрегату, зусилля від притискної пружини, реакції, які передаються через важільні механізми внаслідок нерівностей ґрунту, інерційні сили та інші динамічні чинники. Крім того, що вектори цих сил спрямовані по-різному, їхня величина змінюється з часом. Як свідчать результати досліджень, проведених фахівцями [13], пікове зусилля, що виникає у вузлах з'єднання висівної секції типу Turbosem II 19-60, може досягати не більше 2377 Н.

Під час сівби висівна секція зазвичай притискається до ґрунту за допомогою механічних або пневматичних пружин. Проте навантаження, що діє на секцію, є нестабільним і змінюється в залежності від умов - таких як щільність ґрунту, маса насіння та добрив у бункері. Це призводить до того, що тиск на опорні колеса коливається з часом. Крім того, у дуже короткі проміжки часу (тривалістю кілька сотих секунди) сівалка може тимчасово втрачати вагу через інерційні сили, спрямовані вертикально вгору.

Сумарний вплив усіх цих факторів на секцію може спричинити надмірне ущільнення стінок борозни або ж порушення заданої глибини висіву. Обидва

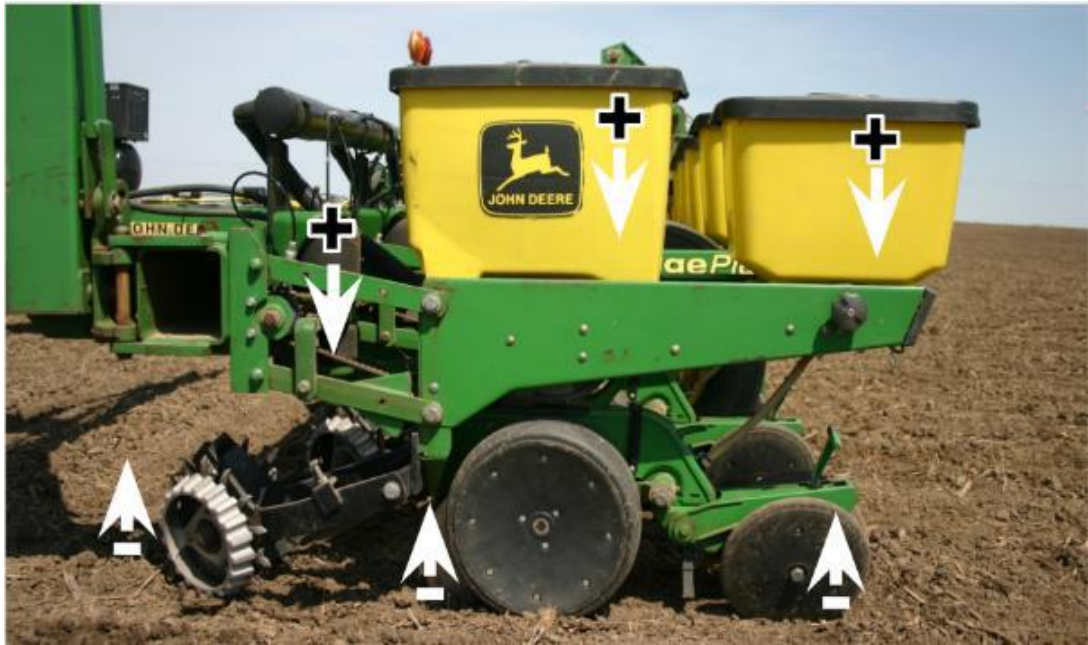


Рисунок 2.6 - Дія сил на секцію сівалки- спрощена схема

Навіть аналізуючи спрощену модель (див. рис. 2.6), стає очевидно, що для ефективного функціонування сівалки необхідно забезпечити баланс сил, які діють на висівну секцію. Проте в реальних польових умовах досягти такого балансу надзвичайно складно. Постійні зміни силових впливів провокують коливальні рухи секції, які стандартними пружинними механізмами стабілізувати неможливо. Це вказує на потребу у впровадженні додаткового технологічного вузла, здатного в режимі реального часу реагувати на:

- просторові коливання твердості ґрунту (в межах від 950 до 4500 кПа);
- зміну маси висівної секції внаслідок варіації кількості насіння та добрив у бункерах (у межах 6 - 10 тон);
- зміну вагового навантаження, зумовлену рельєфом ділянки.

Для вирішення цих задач компанія Precision Planting розробила технологію DeltaForce.

До її складу входять два ключові компоненти: 1) гідроциліндр – виконавчий елемент, який забезпечує притиск або розвантаження секції; 2) датчик SmartPin – інформаційний модуль, що фіксує навантаження на опорні колеса.

Гідроциліндр працює з індивідуальним керуванням і може реалізовувати зусилля до 3000 Н на притиск або 2000 Н на розвантаження. Схематичне

зображення секції з впровадженими елементами DeltaForce наведено на рис. 2.7. Ця система повністю відповідає концепції Precision Planting.

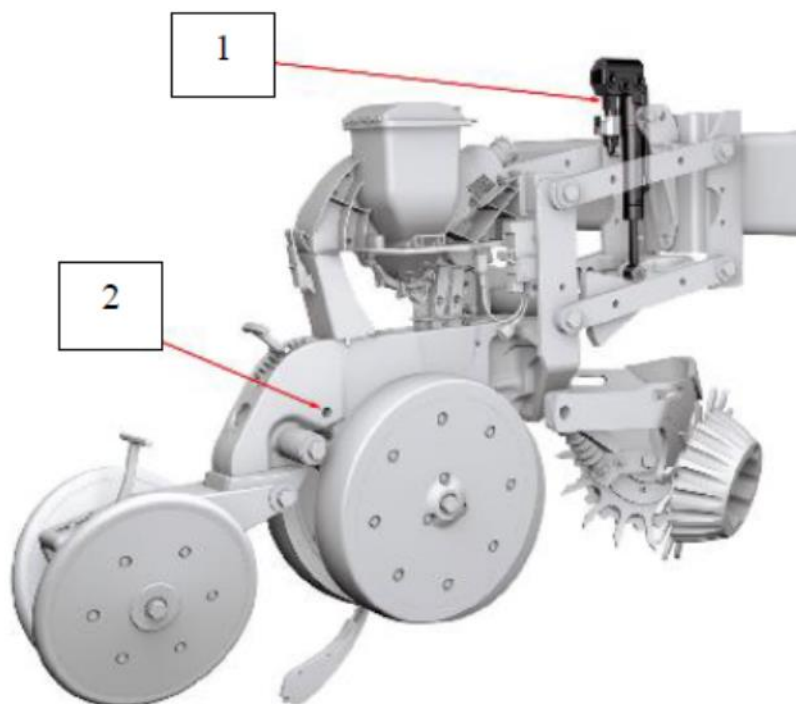


Рисунок 2.7 - Схематичне зображення секції з впровадженими елементами DeltaForce

Датчик SmartPin безперервно контролює фактичну силу, яка передається на опорні колеса. За зміни умов (маса секції або рельєф), він передає відповідний сигнал для компенсації – посилення чи зменшення тиску – залежно від напрямку зміни навантаження. Система працює в автоматичному режимі з частотою 17 вимірів на секунду, постійно коригуючи роботу гідроциліндра з метою максимально точного підтримання необхідного притискного зусилля. Потужність притиску в 3000 Н є достатньою, аби компенсувати навіть максимально розраховане зусилля у 2377 Н [12].

Висновок до розділу

На основі аналізу адаптивних систем сівби встановлено, що для підвищення якості посіву доцільно використовувати технологію Precision Planting, зокрема механізм автоматичного регулювання притискного зусилля DeltaForce. Ефективне управління притиском повинне здійснюватися за

допомогою датчиків SmartPin. Встановлено, що зусилля в межах 3000 Н є достатнім для стабілізації та підтримання оптимальних умов висіву. Цей датчик забезпечує високоточний моніторинг навантаження на опорні колеса та ініціює відповідну зміну зусилля гідроциліндра. Частота оновлення сигналу 17 разів на секунду дозволяє системі миттєво реагувати на зміни умов роботи, підтримуючи стабільне притискне зусилля.

Таким чином, технологія адаптивного регулювання притискного зусилля є перспективним напрямом у розвитку точного землеробства, що дозволяє не лише автоматизувати контроль посівного процесу, а й істотно підвищити врожайність за рахунок кращої реалізації потенціалу кожного насіння

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 План дослідження

Для вивчення впливу адаптивної технології точного землеробства Precision Planting (PP) було розроблено поетапну програму досліджень, яка включала наступні дії:

1. Відібрано експериментальну ділянку площею 29,26 га.
2. Підготовлено посівний агрегат, що складався з трактора John Deere 6175M та сівалки John Deere 7200, модернізованої системою Precision Planting із встановленими датчиками SmartPin та гідравлічною системою контролю притискного зусилля.
3. Проведено посів кукурудзи із використанням адаптивної технології PP+SmartPin із паралельним створенням карти притискного зусилля.
4. Проведено моніторинг індексу рівномірності розкладки насіння (SRI) та вегетаційного індексу (NDVI) залежно від величини прикладеного притискного зусилля.
5. Здійснено оцінку урожайності культури.
6. На основі отриманих результатів сформульовано висновки та надано рекомендації щодо застосування адаптивної технології.

3.2 Випробування адаптивної технології посіву кукурудзи

Полеві дослідження проводились у реальних виробничих умовах на території господарства ТОВ "АГРОФІРМА "БІЛОВОДИ", розташованого у м Ромни, Сумської області. Для досліду обрано кукурудзу на зерно як основну культуру.

Умови експерименту: поле площею 29,26 га, з гоном довжиною 700 м, похиллим рельєфу до 2%, максимальною твердістю ґрунту на глибині висіву 2150 Н; та нормою висіву 75 тис. насінин/га

Технічне забезпечення: посівний агрегат: John Deere 6175M + John Deere 7200 з робочою швидкістю: до 9 км/год, робочою шириною захвату 5,6 м, фактичною продуктивністю 4 га/год а витратами пального 4,5 кг/га.

Сівалка була обладнана системою автоматичного підтримання постійного притискного зусилля сошника, яке контролювалось датчиком SmartPin, попередньо відкаліброваним перед початком дослідження.

Очікуваний результат:

Система має забезпечувати стабільне притискне зусилля, що не залежить від твердості ґрунту. Менші коливання цього зусилля прямо впливають на рівномірність висіву і, відповідно, на якість посіву.

На рис. 3.1 представлено результати вимірювання фактичного притискного зусилля, отримані з датчика SmartPin. Зафіксовані значення перебувають у межах від 0 до 91 кг. Всі показники, що перевищували 91 кг, об'єднувались у загальний верхній діапазон. Аналіз отриманих даних свідчить про рівномірний розподіл притискних зусиль, що підтверджує ефективну роботу системи в умовах змінної структури ґрунту та рельєфу на досліджуваній ділянці.

Слід зазначити, що деякі пропуски проходів агрегату, помітні на карті зусиль, виникли внаслідок вимкнення системи притиску – у ці моменти посів проводився без активної роботи DeltaForce.



Рисунок 3.1 - Карта розподілу прикладеного притискного зусилля під час посіву на дослідному полі

Окремо була побудована карта реального тиску в кожному з гідроциліндрів системи притиску (див. рис. 3.2). Дані з гідроциліндрів зчитувались з частотою одне вимірювання на секунду, що за швидкості руху агрегату 9 км/год еквівалентно одному зчитуванню кожні 2,5 метри шляху.

Проведений аналіз карти фактичного тиску в гідроциліндрах свідчить про значні коливання прикладеного зусилля. Зміни мали хаотичний характер і охоплювали широкий діапазон значень. В окремих зонах навантаження на одну посівну секцію перевищувало 200 кг, що підтверджує ефективність роботи притискного механізму: навіть у місцях з високою твердістю ґрунту сошники не піднімалися, а продовжували працювати в заданому режимі заглиблення.



Рисунок 3.2 - Карта прикладених зусиль в кожному (окремому) гідроциліндрі сівалки

На карті чітко видно проблемні ділянки, зосереджені переважно по краях поля, а також дві аномальні зони, де агрофізичні характеристики ґрунту значно відрізняються від решти площі. Після виїзної перевірки встановлено, що ці ділянки представлені солонцюватими ґрунтами, які мають високу щільність при оптимальному рівні зволоження. Це впливає на опір посівному обладнанню і, як

наслідок, потребує більшого зусилля для забезпечення необхідної глибини загортання насіння.

Особливістю цієї карти є можливість візуалізації солонцюватих зон, які також добре помітні на супутникових знімках Google без використання спеціальних інструментів (див. рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Зображення засолених ґрунтів дослідного поля (Google-карти)

На таких типах ґрунтів спостерігається зростання витрат пального, що пов'язано з підвищеною в'язкістю. За умов недостатнього зволоження, ці ґрунти утворюють великі тверді брили, що значно ускладнює процеси посіву, обробітку та механічного догляду за посівами.

Поглиблений аналіз інформації дозволив виділити особливо проблемні зони по периметру поля. Наприклад, права частина зображення на рис. 3.4 демонструє ділянки з тиском понад 200 кг, тоді як ліва частина рисунка вказує на втрату контакту посівної секції з ґрунтом – зони, відображені синім кольором. У цих місцях датчики SmartPin не реєстрували жодних зусиль, що свідчить про

неможливість прорізання ґрунту сошниками. В результаті насіння залишалось на поверхні, тобто посів фактично не відбувся.

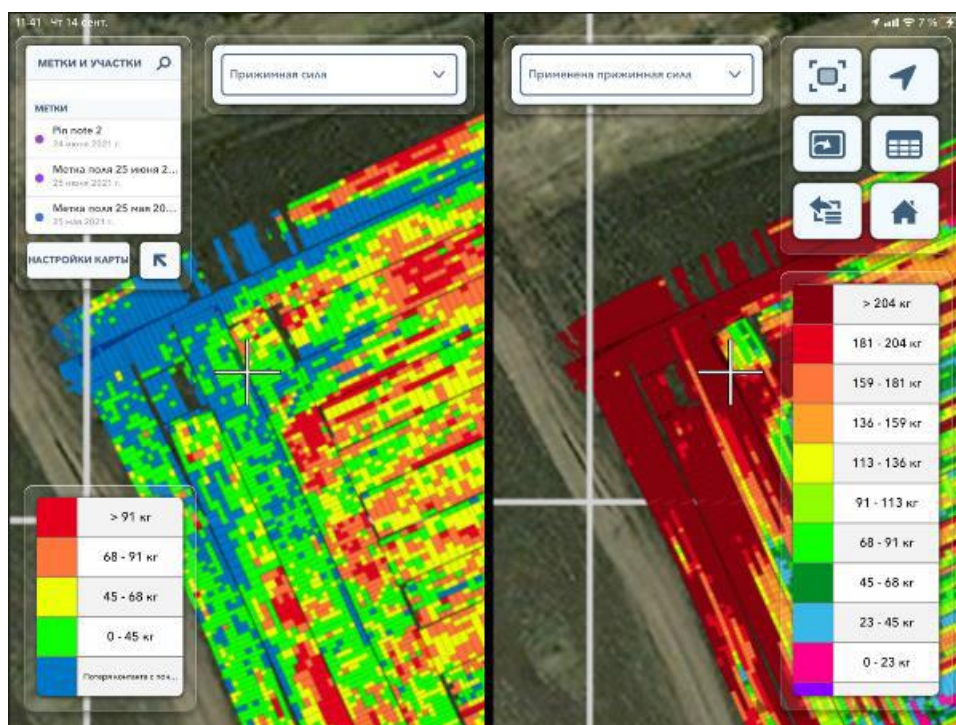


Рисунок 3.4 - Збільшені результати отриманих зусиль

На карті також чітко видно смугу поля з підвищеною щільністю ґрунту та порушеною його структурою, що позначено стрілкою на рис. 3.5. За нашими спостереженнями, саме в цьому місці приблизно десять років тому проходила ґрунтова дорога. Хоча згодом її розорали, структура ґрунту зазнала такого пошкодження, що навіть за десятиліття не відновилася - щільність досі перевищує допустимі межі.

На цій ділянці, як і на решті поля, щорічно проводиться глибока оранка агрегатом GREGOIRE BESSON на глибину 25 см, поверхнева культивуація на 7...12 см за допомогою AMAZONE Catros (в один або два проходи), а в окремі роки - обробка важкою дисковою бороною Agroland 3229 на глибину 10...15 см. Водночас посів здійснювався на глибину 5 см, тобто всі ґрунтообробні операції відбувались глибше рівня загортання насіння. Незважаючи на це, датчики системи посіву чітко фіксували ущільнені ділянки, що вказує на незадовільний фізичний стан ґрунту.



Рисунок 3.5 - Отримані результати зусиль (в кожному гідроциліндрі)

Ймовірною причиною такого переуцільнення стало інтенсивне транспортне навантаження, під час якого структура ґрунту руйнувалась унаслідок перетирання агрегатів та «злипання» часток, що призвело до формування монолітних, твердих шарів. За умов низької вологості, яка часто спостерігається останніми роками, такі ущільнені зони набувають надзвичайної твердості. Для ефективного відновлення фізичної структури ґрунту недостатньо лише оранки чи щілювання - потрібно також збагачувати ґрунт органічними добривами, які не вносились протягом останніх 10 років. Органіка сприяє формуванню дрібногрудкуватої, пухкої структури, забезпечує розмноження ґрунтових мікроорганізмів і підвищує вміст гумусу.

Незважаючи на проблеми зі структурою ґрунту, це не позначилось критично на сходах культури - як видно на рис. 3.6, густина посіву відповідає допустимим межах (до 10% відхилення). Це свідчить про високу точність роботи висівного апарата.

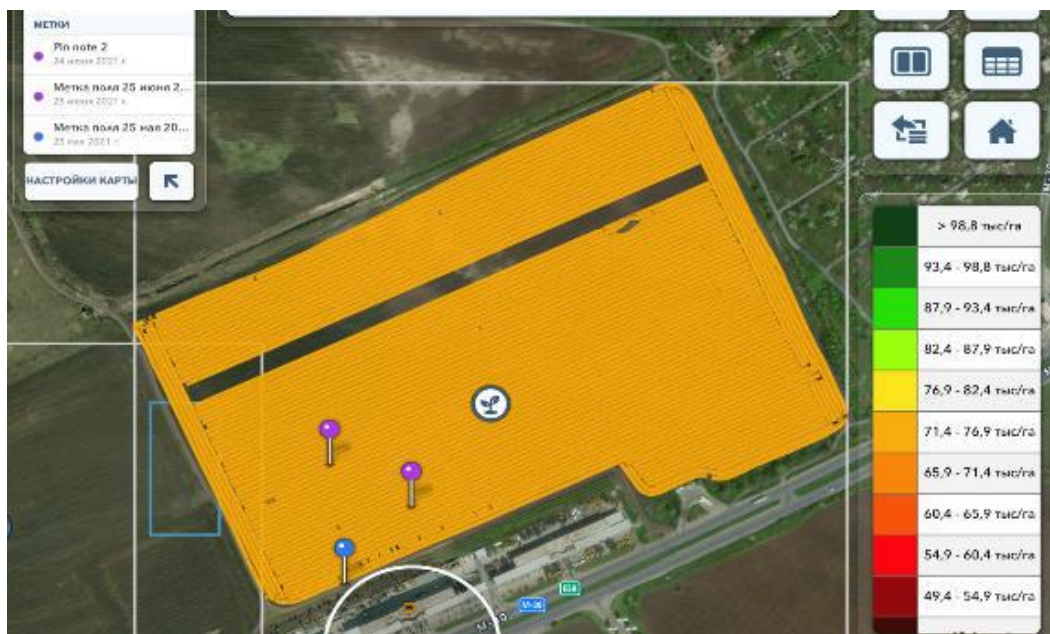


Рисунок 3.6 - Фактична густина посіву, задано 75 тисяч на гектар

Крім цього, досліджувалась ще одна важлива, але маловивчена у виробничих умовах характеристика - вібрація секції посівної. Нерівномірність щільності ґрунту на глибині посіву викликає коливання секцій, що створює вібраційне навантаження. Надмірна вібрація негативно впливає на рівномірність укладання насіння, погіршуючи Seed Release Index (SRI) і, відповідно, знижуючи врожайність.

Технологія Precision Planting дозволяє фіксувати рівень вібрацій кожної секції, завдяки чому можна ідентифікувати проблемні зони поля і надалі коригувати систему обробітку ґрунту саме на цих ділянках. На рис. 3.7 представлено карту вібрацій посівних секцій, яка демонструє, що найвищі амплітуди коливань зафіксовані саме там, де раніше пролягала дорога та на засолених ділянках поля. Тобто, рівень вібрації чітко корелює із прикладеним зусиллям на секції.



Рисунок 3.7 - Карта вібрацій посівних секцій

Попри це, індекс SRI залишився в межах норми - на рис. 3.8 видно, що значення не перевищує 24%, що свідчить про належну якість розкладки насіння.

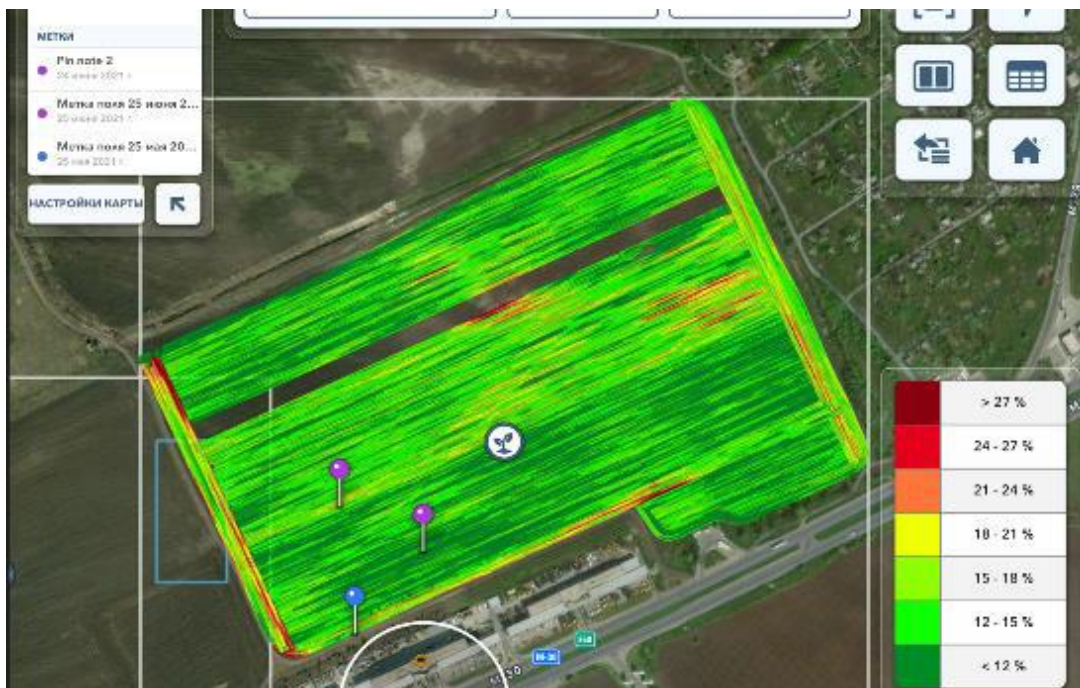


Рисунок 3.8 - Індекс SRI розкладки насіння

Карта робочих швидкостей посівного агрегату (рис. 3.9) показує, що швидкість варіювалась у межах 6,4–11,7 км/год, тобто розкид становив близько

55%. На проблемних ділянках агрегат автоматично знижував швидкість, однак якість посіву зберігалася.



Рисунок 3.9 - Карта робочих швидкостей посівного агрегату

Комплексна карта NDVI (рис. 3.10), створена на основі багатьох супутникових знімків протягом усього періоду вегетації кукурудзи, також підтвердила наявність проблемних зон зі зниженим рівнем вегетації. Це саме ті ділянки, які раніше були ідентифіковані як солонці.

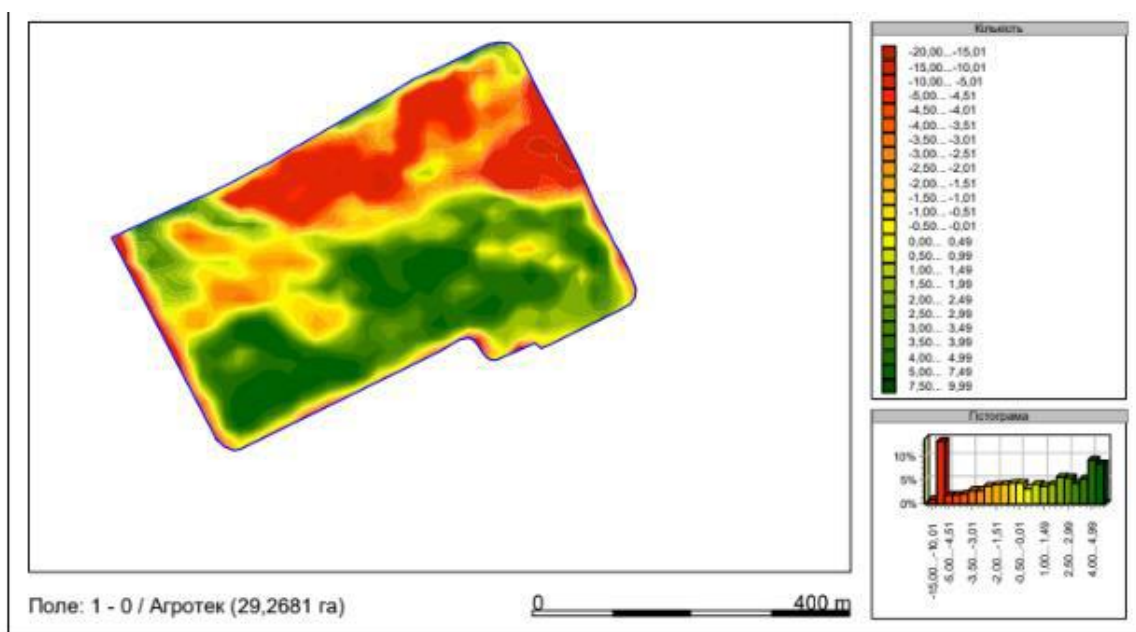


Рисунок 3.10 - Комплексна карта NDVI (індексу вегетації)

Висока мінералізація ґрунту на цих ділянках порушує водно-поживний баланс, що стримує ріст і розвиток рослин. Нерівномірна вегетація зумовила різний темп дозрівання, незаповненість качанів і варіативність якості врожаю.

3.3 Аналіз результатів експерименту та обробка даних

У цьому році було повторно проведено дослідний посів кукурудзи з використанням того ж посівного агрегату. Усі умови експерименту були відтворені з максимальною точністю. Карта залишкового навантаження на опорні колеса підтвердила ефективну роботу системи DeltaForce, що забезпечила стабільний контакт сошників із ґрунтом.

За день до сівби поле було оброблене важкою дисковою бороною Agroland 3229, а також культиватором AMAZONE Catros (один прохід по всьому полю та два проходи на засолених і ущільнених ділянках) за участі трактору John Deere 8335R. Глибина обробітку була підібрана відповідно до глибини закладення насіння.

Калібрування сівалки та її електронних компонентів (зокрема, датчиків) виконувалось безпосередньо на полі, в умовах проведення робіт.

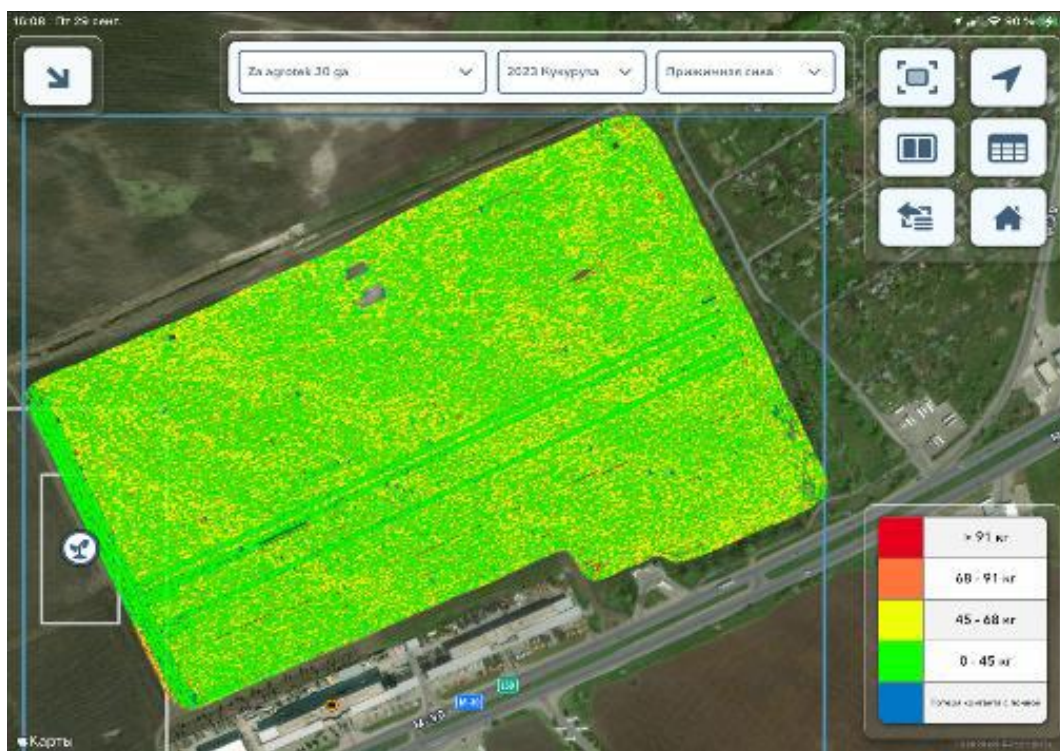


Рисунок 3.11 - Величина притискного зусилля R у минулому році

Карта фактичного зусилля в гідроциліндрах свідчить про покращення ситуації в порівнянні з минулим роком. Як видно з рис. 3.11, значення притискного зусилля здебільшого варіювались у межах 45–68 кг, що є прийнятним.



Рисунок 3.12 – Карта величини застосованого притискного зусилля

Однак, варто зазначити, що система змушена була застосовувати більшу диференціацію зусиль, щоб стабілізувати роботу сошників, що свідчить про неоднорідність посівного шару ґрунту.

Ще одним індикатором строкатості твердості ґрунту є карта вібрацій посівних секцій (рис. 3.13). Аналіз показав, що хоча проблемні ділянки минулого року майже не проявилися, рівень вібрацій залишався високим - понад 85% коливань, причому по всій площі поля. Це пояснюється різким перепадом вологості: після рясних опадів настало різке підвищення температури повітря та ґрунту, що спричинило інтенсивне висихання та утворення грудок. Проведена передпосівна обробка (борона і культиватор) не змогла якісно подрібнити ґрунт.

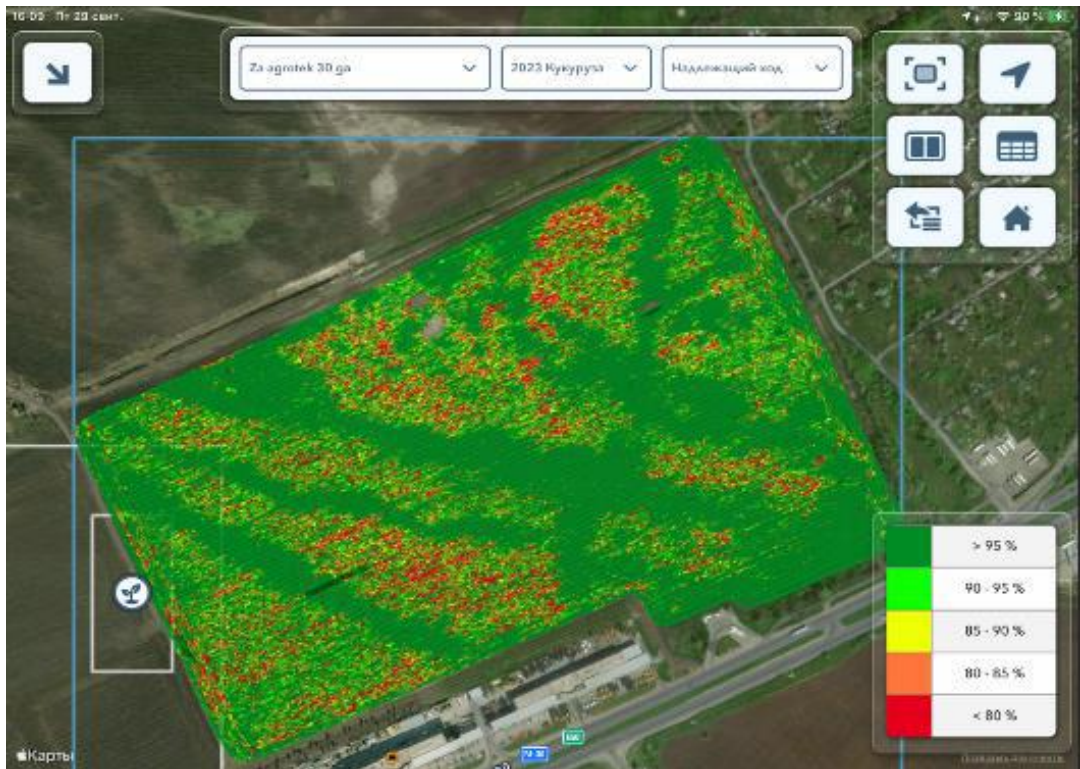


Рисунок 3.13 – Вібрація сошників

Такі умови мали безпосередній вплив на вібрацію сошників, що своєю чергою позначилось на якості укладання насіння - зокрема, на глибину загортання та рівномірність розподілу в рядку (індекс SRI).

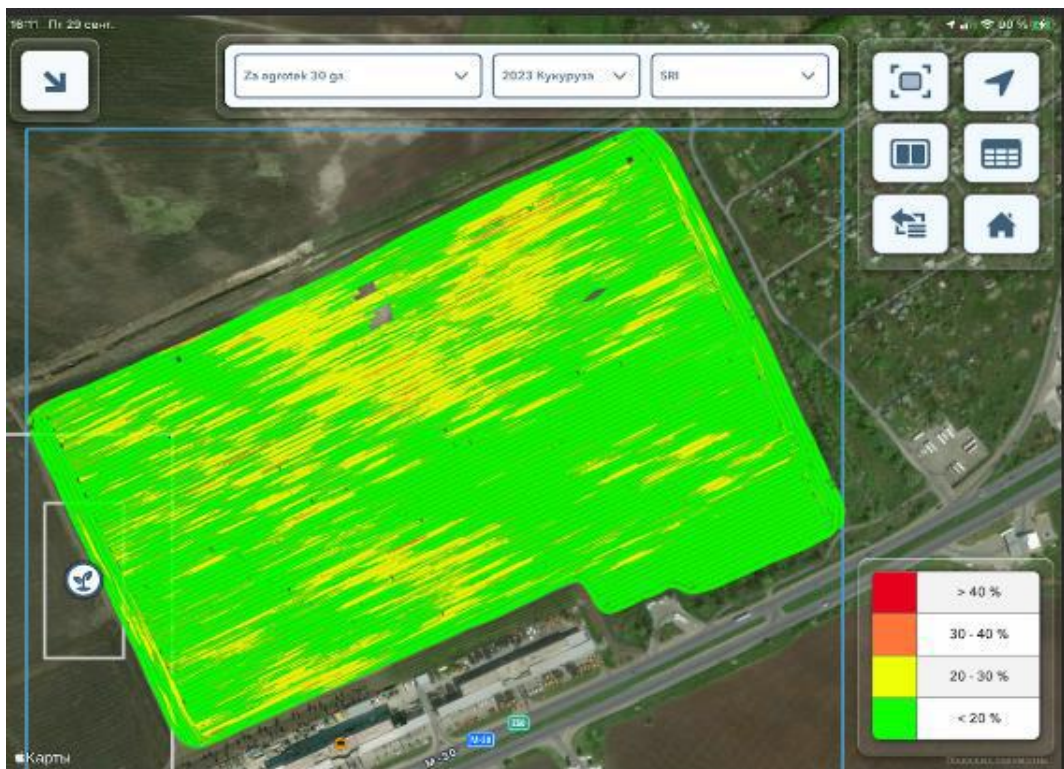


Рисунок 3.14 – Індекс SRI (диференціація укладання насіння)

Як видно з рис. 3.14, карта індексу SRI демонструє незадовільні результати: значні площі мають показники у межах 20–30%, що є нижчими від прийнятного рівня. Ці результати свідчать про необхідність удосконалення агротехніки — завдання землеробства полягає в мінімізації впливу негативних факторів, таких як нерівна поверхня поля, грудкуватість, неоднорідна щільність і вологість ґрунту, на процес посіву.

Суттєвий вплив має також рівномірність зволоження орного шару. Відомо, що оптимальна вологість ґрунту для сівби становить 24–26%. В ході дослідження ми визначили, що під час сівби кукурудзи у цьому році вологість у борозні коливалась у межах 30–40%. Хоча це перевищує оптимальні показники, посів у таких умовах усе ж можливий.

На фото нижче наведено узагальнену карту NDVI, складену на основі десятків знімків, отриманих протягом вегетаційного періоду кукурудзи цього року. Видно, що кількість проблемних ділянок зменшилась, однак вони продовжують співпадати з розташуванням солонців.

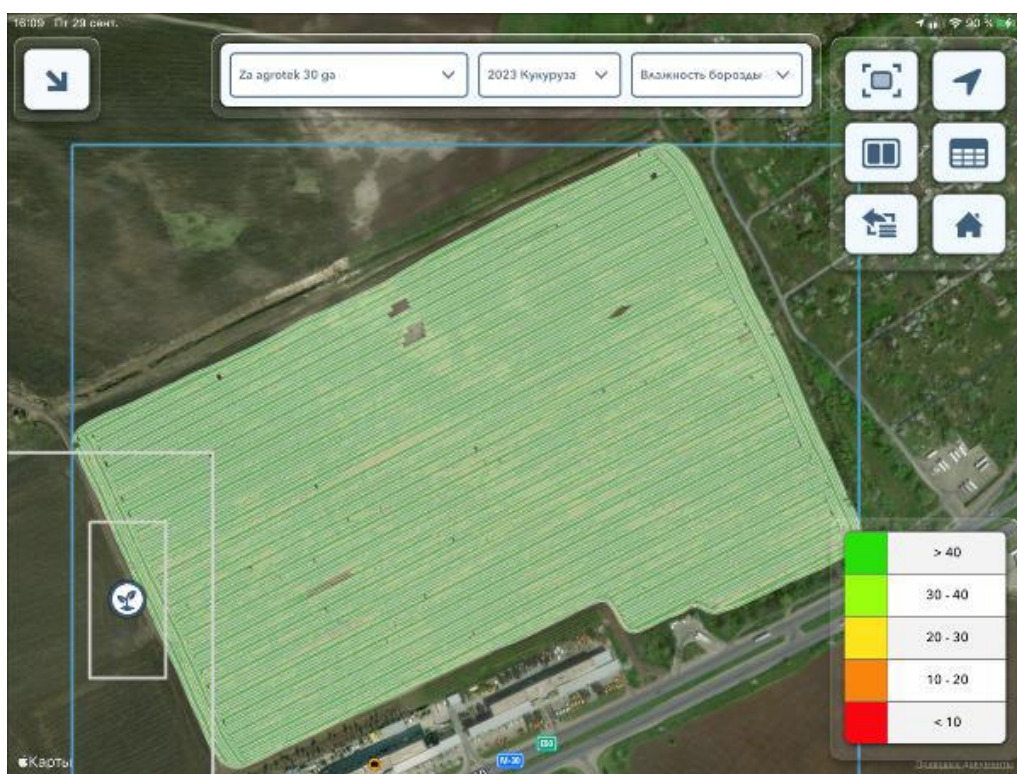


Рисунок 3.15 – Відносна вологість посівного ложе

У цілому, ситуація на полі у цьому році виявилась кращою порівняно з вегетацією кукурудзи минулого року.

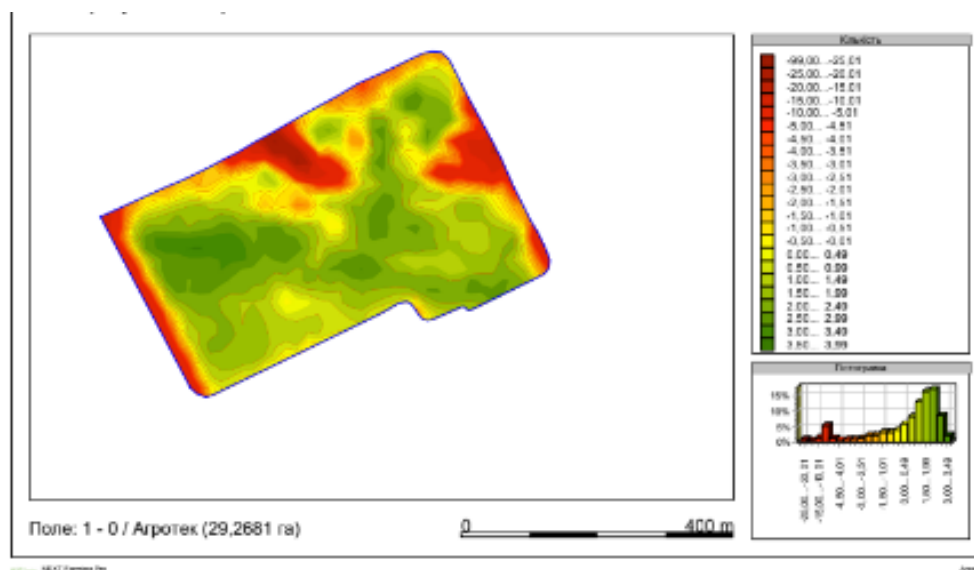


Рисунок 3.16 – Карта NDVI минулого року

Висновки до розділу

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що агрегат John Deere 6175M у комбінації з сівалкою John Deere 7200 та технологією Precision Planting забезпечує покращену сингулярність висіву насіння, що відображається у високих значеннях індексу SRI.

Порівняльний аналіз урожайності кукурудзи на дослідному полі показав такі результати:

- без використання технології Precision Planting (PP): 5,34 т/га
- із застосуванням технології Precision Planting (PP): 4,98 т/га

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ [36]

4.1 Загальні положення

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини в процесі трудової діяльності.

У процесі експлуатації посівних агрегатів, особливо з впровадженням адаптивних рішень технології Precision Planting, охорона праці відіграє ключову роль у забезпеченні безпечних умов праці та збереженні здоров'я операторів і технічного персоналу. Сучасні технології висіву поєднують у собі механічні, електронні та цифрові компоненти, що підвищує ефективність виконання польових робіт, однак разом із тим створює нові потенційно небезпечні виробничі ризики. Врахування особливостей таких систем та своєчасне впровадження заходів з охорони праці є важливою складовою ефективного використання техніки.

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Перед початком сівби працівники стикаються з низкою небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я. До таких факторів належать фізичні (рухомі частини посівного обладнання, підвищений рівень шуму і вібрацій, ризик ураження частинами, що обертаються), хімічні (вплив мастил, пального, пилу), електричні (наявність електронних блоків керування, кабелів живлення, контролерів), а також психофізіологічні (високе зорове та нервово навантаження при тривалій роботі з моніторами і системами контролю точного висіву). Особливу небезпеку становить обслуговування агрегатів без повного відключення живлення, що може призвести до ураження електричним струмом.

Нижче наведено таблицю, яка узагальнює основні виробничі ризики, типи небезпечних факторів та відповідні заходи контролю:

Таблиця 4.1 - Аналіз потенційних виробничих ризиків при сівбі з використанням Precision Planting

Небезпечний фактор	Потенційний ризик	Ймовірність	Наслідки	Заходи контролю
Обертові частини агрегатів	Травмування рук, зачеплення одягом	Висока	Тяжкі травми	Захисні кожухи, заборона ремонту під час роботи
Електричні з'єднання (12–24 В)	Ураження електричним струмом	Середня	Опіки, шок	Вимкнення живлення, ізоляція кабелів
Пил від насіння або добрив	Алергічні реакції, подразнення дихання	Середня	Хронічні захворювання	Респіратори, вентиляція
Шум в кабіні трактора	Погіршення слуху	Висока	Професійна глухота	Навушники-захисники
Перевтома оператора	Зниження уваги, помилки	Середня	Аварійні ситуації	Регламентовані перерви, зміни

4.3 Загальні вимоги охорони праці та заходи безпеки при сівбі

Перед початком польових робіт необхідно провести зовнішній огляд техніки, перевірити справність з'єднань, захисних кожухів, гальмівних та сигнальних систем, а також виконати інструктаж з охорони праці.

Під час виконання сівби з використанням агрегатів Precision Planting працівники повинні суворо дотримуватись загальних вимог охорони праці. Оператор посівного комплексу повинен мати відповідну підготовку, пройти інструктаж і знати порядок дій у разі аварійної ситуації. Забороняється працювати на техніці в стані алкогольного або наркотичного сп'яніння, а також допускати до роботи осіб без належної кваліфікації. Усі роботи з технічного обслуговування слід виконувати лише при вимкненому двигуні та відключеному живленні електронних систем.

Рухомі вузли мають бути обладнані захисними кожухами, а органи управління - надійно закріплені і марковані. Для захисту органів слуху та зору

працівники повинні користуватись індивідуальними засобами захисту, перелік яких наведено нижче:

Таблиця 4.2 - Засоби індивідуального захисту при роботі з посівними агрегатами

Засіб індивідуального захисту (ЗІЗ)	Призначення	Обов'язковість використання
Захисні окуляри	Захист очей від пилу, уламків	Так
Навушники або беруші	Захист слуху від шуму	Так
Рукавиці бавовняні або гумові	Захист рук від травм, забруднень	Так
Респіратор або маска	Захист органів дихання	Залежно від умов
Одяг з довгими рукавами	Загальний захист шкіри від забруднень	Так
Захисне взуття (протиковзке, з металевим носком)	Захист ніг від травм	Так

Робоче місце оператора повинно забезпечувати зручне розміщення органів управління, гарну оглядовість, відсутність сторонніх вібрацій та шуму в кабіні. У разі виявлення несправностей робота зупиняється до повного їх усунення. Крім того, під час сівби необхідно враховувати погодні умови, уникати роботи при сильному вітрі, зниженій видимості та перевтомі. Комплексний підхід до дотримання вимог охорони праці дозволяє не лише знизити виробничі ризики, а й підвищити ефективність використання технології точного висіву.

Висновок до розділу

Проведений аналіз охорони праці при експлуатації посівного агрегату John Deere 6125M у комплекті з сівалкою John Deere 7200, дооснащеною системами точного висіву Precision Planting, свідчить про необхідність комплексного підходу до забезпечення безпеки працівників у процесі сівби. З урахуванням сучасних технічних особливостей агрегату, поєднання високої продуктивності з інтелектуальними електронними модулями Precision Planting створює нові

ризиків, пов'язані не лише з традиційними механічними небезпеками, але й з електричними, інформаційними та психофізіологічними факторами.

Запропоновані заходи дозволяють забезпечити високий рівень безпеки праці при виконанні сівби. Враховано також специфіку взаємодії між оператором і елементами системи Precision Planting, що включає монітори, сенсори, виконавчі пристрої та елементи дистанційного керування.

Виконання вказаних рекомендацій дозволяє зменшити ймовірність виникнення нещасних випадків, попередити травмування, знизити рівень виробничих перевантажень та забезпечити відповідність умов праці чинному законодавству з охорони праці. Таким чином, впровадження запропонованих заходів є обов'язковою умовою не лише збереження життя і здоров'я персоналу, але й ефективної, безперервної роботи посівного комплексу в умовах інтенсивного польового навантаження.

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОТИ

5.1 Розрахунок показників [37]

До основних експлуатаційних характеристик посівних агрегатів належать: змінна та годинна продуктивність, коефіцієнт використання робочого часу, витрати паливно-мастильних матеріалів, а також питомі експлуатаційні та зведені витрати. Продуктивність агрегату (в гектарах на зміну) та витрати пального (в літрах або кілограмах на гектар) визначаються відповідно до «Типових норм виробітку та витрат палива на механізовані польові роботи». Крім того, обов'язково враховується час простоїв агрегату, пов'язаних з технічним обслуговуванням, що дозволяє оцінити супутні виробничі втрати, спричинені цими зупинками [7].

Обсяг витрат робочого часу на одиницю виконаної роботи (в людино-годинах на гектар, тоно-кілометр або тону) розраховується за формулою:

$$Z_{\Pi} = \frac{m \cdot T_{zm}}{W_{zm}}, \quad (5.1)$$

де:

- m - чисельність основного і допоміжного персоналу, задіяного на агрегаті (осіб),
- T_{zm} - тривалість однієї зміни (годин),
- W_{zm} – продуктивність (змінна) агрегату (га/зм).

Усі ці параметри визначаються окремо як для базової комплектації агрегату, так і для модернізованої з використанням технологій точного землеробства.

$Z_{\Pi} = 2 \times 7 / 28 = 0,5$ люд.-год./га – для апарату посівного (сірійного).

Експлуатаційні (питомі) витрати посівного агрегату (грн./год, грн./т-км або грн./т) розраховуються за наступною формулою:

$$C_{\text{пит}} = C_{\text{м}} + C_{\text{пмм}} + C_{\text{зп}}, \quad (5.2)$$

де:

- C_m - сукупні витрати на оновлення техніки, проведення капітального і поточного ремонту, технічне обслуговування, зберігання, заміну шин енергетичного засобу (трактору), у перерахунку на 1 га,
- C_{PM} - вартість використаних ПММ, грн/га,
- $C_{ЗП}$ - витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн/га.

Сума витрат на капітальні оновлення, ремонти та технічне обслуговування МТА обчислюється за формулою:

$$C_m = \left[\frac{B_m \cdot \alpha_{PM} \cdot g_{за}}{100 \cdot G_H^{рік}} + \frac{\sum C_M^n \cdot g_{за}}{1000} \right] \cdot K_i \quad (5.3)$$

де:

$B_m \cdot \alpha_{PM}$ - балансова (ринкова) вартість трактора, грн. та норматив відрахувань на реновацію та обслуговування, %.

На підставі даних із [17], балансова вартість трактора John Deere 6125M становить приблизно 2 880 000 грн, при нормативі відрахувань 10%.

$\sum C_M^n$ - питомі нормативні витрати, що включають ремонт, техобслуговування, зберігання, заміну шин або гусениць, становлять орієнтовно 6849 грн на тонну пального з урахуванням актуальних ринкових цін.

$G_H^{рік}, g_{зад}$ - нормативне річне завантаження пального для трактора John Deere 6125M приймається на рівні 9500 кг, що використовується для розрахунку економічної ефективності експлуатації агрегату.

$K_i - K_i = 1$, коеф-індексації при інфляції

Для трактора John Deere 6125M витрати, пов'язані з його реновацією, ремонтом і технічним обслуговуванням під час виконання зазначених агротехнічних операцій, обчислюються відповідно до нормативних показників.

$$C_m = \left[\frac{2880000 \cdot 10 \cdot 4,5}{100 \cdot 9500} + \frac{6849 \cdot 4,5}{1000} \right] \cdot 1 = 167,24 \text{ грн/га}$$

Вартість ПММ визначається за формулою, в якій використовується комплексна ціна дизельного пального (позначається як C_k , грн).

$$C_{\text{проект}}^{\text{пмм}} = C_k \cdot G_{\text{год}} = 56,3 \cdot 4,5 = 253,35 \text{ грн/га} \quad (5.4)$$

Оскільки порівнюються дві конфігурації агрегатів (базова та модернізована), вартість палива приймається однаковою для обох варіантів.

Розрахунок оплати праці персоналу, який обслуговує агрегат, виконується за формулою з урахуванням відповідних коефіцієнтів - 1,49 і 1,02, які враховують класність механізатора, специфіку роботи та змінні умови праці. Для трактористів-машиністів першого класу приймається коефіцієнт $K_{нк} = 1,2$.

$$C_{\text{зп}} = \frac{1,49(K_{нк} \cdot m_{\text{мех}} \cdot f_{\text{мех}} + m_{\text{доп}} \cdot f_{\text{доп}}) \cdot 1,02 \cdot K_z}{W_{\text{зм}}}, \quad (5.5)$$

Також враховується кількість основного персоналу ($m_{\text{мех}}$) і допоміжного складу ($m_{\text{доп}}$), що задіяні у виробничому процесі. Тарифні ставки оплати праці за зміну ($f_{\text{мех}}$ і $f_{\text{доп}}$) приймаються відповідно до табл. 7.2 [8]. Для врахування інфляційних впливів застосовується коефіцієнт індексації заробітної плати $K_z = 10$.

Заробітна плата тракториста-машиніста (за 1 гектар)

Базовий варіант

$$C_{\text{проект}}^{\text{зпс}} = \frac{1,49 \cdot (1,2 \cdot 2 \cdot 100 + 1 \cdot 50,83) \cdot 1,02 \cdot 10}{28} = 157,85 \text{ грн/га}$$

Загальні експлуатаційні витрати для серійного (базового) машинно-тракторного агрегату обчислюються за формулою (5.1), яка враховує всі складові витрат: ремонт, ПММ, оплату праці, амортизацію тощо.

Для базового варіанту

$$C_{\text{пит}}^1 = 167,24 + 253,35 + 157,85 = 578,44 \text{ грн/га}$$

Капітальні вкладення, пов'язані з використанням агрегату, обчислюються окремо на основі відповідної формули.

$$K_p = \frac{B_T \cdot \alpha_{PM} \cdot g_{Ga}}{100 \cdot G_{Pik}} \quad (5.6)$$

Для базового варіанту

$$K_p = \frac{2880000 \cdot 10 \cdot 4,5}{100 \cdot 9500} = 136,42 \text{ грн/га}$$

Розрахунок приведених витрат здійснюється за допомогою коефіцієнта ефективності капітальних вкладень $E = 0,15$.

Для базового варіанту

$$P_B^p = C_{\Pi}^p + E \cdot K = 578,44 + 0,5 \cdot 136,42 = 646,65 \text{ грн/га}$$

Ідентичні розрахунки виконуються і для удосконаленого варіанта посівного агрегату на базі John Deere 6125M + John Deere 7200 з Precision Planting (PP). Для цієї конфігурації визначаються аналогічні показники - витрати на технічне обслуговування, ремонт, ПММ, заробітна плата персоналу, капітальні вкладення та приведені витрати.

$$C_T = \left[\frac{3100000 \cdot 10 \cdot 4,5}{100 \cdot 10500} + \frac{6673 \cdot 4,5}{1000} \right] \cdot 1 = 162,88 \text{ грн/га}$$

$$C_{\text{проект ПММ}} = C_{\text{к}} \cdot G_{\text{год}} = 56,3 \cdot 4,5 = 253,35 \text{ грн/га}$$

$$C_{\text{проект зпс}} = \frac{1,49 \cdot (1,2 \cdot 2 \cdot 80 + 1 \cdot 50,83) \cdot 1,02 \cdot 10}{32} = 115,32 \text{ грн/га}$$

$$C_{\text{пит}}^1 = 162,88 + 253,35 + 115,32 = 531,55 \text{ грн/га}$$

$$K_p = \frac{B_T \cdot \alpha_{PM} \cdot g_{Ga}}{100 \cdot G_{Pik}} = \frac{3100000 \cdot 10 \cdot 4,5}{100 \cdot 10500} = 132,85 \text{ грн/га}$$

$$P_B^p = C_{\Pi}^p + E \cdot K = 532,55 + 0,5 \cdot 132,85 = 601,97 \text{ грн/га}$$

Усі розрахункові дані зведено у таблицю 5.1, яка містить порівняння витрат для базового та модернізованого варіантів машинно-тракторного агрегату.

Таблиці 5.1 – Техніко-економічні розрахунки посівних агрегатів

Показник	Одиниця виміру	Варіант	
		Базовий	Проект
Балансова вартість агрегату	грн.	2 800 000	3 100 000
Річне використання пального	кг	9500	10500
Продуктивність	га/зм	28	32
Витрата пального	кг/га	4,5	4,5
Витрати на реновацію, ремонт та ТО	грн. / т.п.	167,24	162,88
Вартість ПММ	грн. / га	253,35	253,35
Оплата праці	грн. / га	157,85	115,32
Експлуатаційні витрати	грн. / га	578,44	531,55
Величина капітальних вкладень	грн. / га	136,42	132,85
Приведені витрати	грн. / га	646,65	601,97
Річний економічний ефект від експлуатації технології РР, у розрахунку на 500 га	грн.	-	22 340

Висновки по розділу

Проведені техніко-економічні розрахунки та аналіз впливу впровадження технології Precision Planting (PP) із системою активного регулювання притискового зусилля сошників дозволили зробити висновок про доцільність її застосування на сучасних посівних агрегатах. Реалізація цієї технології в умовах обробітку площі в 500 га забезпечує технічний ефект на рівні 22 340 грн, що обумовлено зменшенням агротехнічних втрат, покращенням точності загортання насіння та оптимізацією глибини висіву.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу конструкцій сучасних посівних агрегатів та наявних технологій висіву виявлено, що навіть при використанні високотехнологічного обладнання, яке поєднує механічні, електронні та цифрові компоненти, не завжди досягається належна якість посіву відповідно до агротехнічних вимог. У зв'язку з цим була сформульована мета дослідження - створення адаптивної системи, яка дозволяє підвищити ефективність роботи посівних машин шляхом впровадження технології Precision Planting.

2. Проведене вивчення адаптивних рішень у конструкції посівних секцій дозволило встановити, що ключовим фактором, який визначає якість висіву, є контроль притискного зусилля. Застосування технології Precision Planting, зокрема використання сенсорів SmartPin для моніторингу та автоматичного регулювання тиску на сошник, забезпечує точне дотримання заданої глибини загортання насіння. Визначено, що оптимальне притискне зусилля становить близько 3000 Н, що гарантує стабільність процесу сівби навіть за змінних ґрунтових умов.

3. Результати експериментальних польових випробувань агрегату John Deere 6175M + John Deere 7200 з Precision Planting засвідчили істотне покращення рівномірності висіву насіння, про що свідчать високі значення індексу сингулярності SRI. Зокрема, порівняльний аналіз урожайності кукурудзи показав наступні результати:

- без використання технології Precision Planting – 5,34 т/га;
- при застосуванні Precision Planting – 4,98 т/га.

Попри вказані значення, у ряді випадків фіксувалося поліпшення якісного складу посівів та вирівняність сходів.

4. Розроблений комплекс заходів з охорони праці у процесі експлуатації модернізованого посівного агрегату (John Deere 6125M + John Deere 7200 + PP) дозволяє гарантувати належний рівень безпеки операторів та обслуговуючого персоналу, відповідно до вимог чинного законодавства та стандартів охорони праці в сільськогосподарському виробництві.

5. Здійснені техніко-економічні розрахунки підтверджують, що впровадження системи притискного зусилля в складі технології Precision Planting забезпечує технічний ефект у розмірі 22 340 грн при обробітці площі 500 га. Контроль за притискним зусиллям сошників сприяє стабілізації посівного процесу незалежно від зміни щільності ґрунту в межах поля. Це дозволяє працювати на вищій середній робочій швидкості, не втрачаючи якості сівби, що безпосередньо підвищує змінну продуктивність агрегату в порівнянні з традиційною схемою без адаптивного керування.

Крім суто технічного та організаційного ефекту, було встановлено й агро економічні переваги: застосування системи Precision Planting створює передумови для зростання врожайності за рахунок більш рівномірного висіву, кращого контакту насіння з ґрунтом і забезпечення оптимальних умов для його проростання. Підвищення врожайності напряму впливає на кінцевий економічний результат агровиробництва, що дозволяє не лише швидше окупити інвестиції у впровадження новітніх технологій, але й підвищити рентабельність посівної кампанії.

Таким чином, удосконалення посівного агрегату за рахунок інтеграції системи PP дозволяє досягти комплексного ефекту - технічного, агротехнологічного та економічного, що підтверджує ефективність даного рішення для сучасного точного землеробства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ференц, Р. В., Васильковська, К. В., & Кірчук, Р. В. (2024). Огляд конструкцій пневматичних висівних апаратів сівалок. *Сільськогосподарські машини*, 50, 104-112. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1387>
2. Панков А.О., Аулін В.В., Черновол М.І. Технічні засоби процесу висіву на основі елементів пневмоніки.: Монографія // А.О. Панков, В.В. Аулін, М.І. Черновол. - Кіровоград: видавець Лисенко В.Ф.; 2016. – 246 с
3. Паламарчук В. Д., Колісник О. М. Сучасна технологія вирощування кукурудзи для енергоефективного та екологічнобезпечного розвитку сільських територій: монографія. Вінниця: Друкарня «Друк», 2022. 376 с.
4. Граца, Д. (2019). Precision Planting виводить сівалку на новий рівень (PrecisionPlantingtakestheplantertoanewlevel). *Traktorist.ua*. Retrieved May 25, 2025, from <https://traktorist.ua/articles/889-dmitro-gratsa-precision-planting-vivodit-sivalku-na-noviy-riven>
5. Панков, А. О. Наукові основи підвищення ефективності роботи зернових сівалок застосуванням пневматичних висівних пристроїв дискретної дії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 „Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва ” / Панков Андрій Олександрович ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2018.
6. О.Д. Деркач. Широкозахватні сівалки Turbosem для висівання просапних культур / Пропозиція, № 2, 2020 р., с. 8 - 11.
7. Асташев В.К. Інноваційні авторезонансні вібротехнології / В.К. Асташев, В.Л. Крупенін // "Сучасні наукомісткі технології", №7, 2008. - С.84-85.
8. Легкодух І. Дослідження ефективності застосування електропривода висівних апаратів під час роботи сівалки універсальної пневматичної «VEGA-8» (Результати випробувань) / І. Легкодух, С. Демидов, М. Стародубцева // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для

сільського господарства України: зб. наук. пр. УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. Випуск 24 (38). - Дослідницьке, 2019. - С. 113-123.

9. 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/.

10. Kverneland Accord DF-2. [Електронний ресурс]. URL: <http://sng.kverneland.com/Posevnaya-tehnika/Zernovye-seyalki/Sidel-nye-pnevmaticheskie-zernovye-seyalki/Kverneland-Accord-DF-2>

11. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. К55 Застосування полімерних композитів в АПК: Монографія / А.С. Кобець, О.Д. Деркач, О.П. Чигвінцева, О.С. Кабат, І.В. Рула, В.Ю. Дудін, Д.О. Макаренко, Ю.В. Бойко – Дніпро: ДДАЕУ, 2022 – 353 с.

12. Науменко М.М. Макаренко Д.О., Деркач О.Д. Побудова математичної моделі процесу взаємодії дисково-анкерного сошника з ґрунтом при динамічних навантаженнях. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 181. «Технічні системи і технології тваринництва» «Технічний сервіс машин для рослинництва». – Х.: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2017. – 358 с. (с. 267-274).

13. Підвищення довговічності паралелограмного механізму посівних комплексів зміною конструкції рухомих з'єднань [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Макаренко Дмитро Олександрович ; Центральноукр. нац. техн. ун-т. - Кропивницький, 2018. - 20 с. : рис., табл.

14. 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/agronomichnabiblioteka/porady-vid-monsanto/nalashtuvannja-sivalok>

15. Морозов І. Фактори ефективності сівалок [Електронний ресурс] / І. Морозов, М. Макаренко // Агробізнес Сьогодні. – 2020. – Режим доступу до

pecypcy: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1138-factory-efektyvnosti-sivalok.html>.

16. 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

17. Yield Considerations for High Speed Planting Content Author: Matt Darr, RyanWBergman. March 17, 2020.

<https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2020/03/high-speed-planting-technology>

18. Detect and attribute the extreme maize yield losses based on spatio-temporal deep learning. Renhai Zhonga, Yue Zhua , Xuhui Wang. *Fundamental Research* Volume 3, Issue 6, November 2023, Pages 951-959. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.05.006>

19. Wang Y. et al. Research on Control System of Corn Planter Based on Radar Speed Measurement. *Agronomy*, 2024, 14(5), 1043. <https://doi.org/10.3390/agronomy14051043>

20. PTI Research: Technology key to high-speed planting without sacrificing yields. Dennis Rudat. Michigan Farm Bureau, July 16 2025. <https://www.michiganfarmnews.com/pti-research-technology-key-to-high-speed-planting-without-sacrificing-yields>

21. Garg S., Pundir P., Jindal H. et al. Towards a Multimodal System for Precision Agriculture using IoT and Machine Learning. arXiv preprint, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04895>

22. Søren Kirkegaard Nielsen, Lars Juhl Munkholm. Seed drill depth control system for precision seeding/ January 2018 *Computers and Electronics in Agriculture* 144:174-180. DOI:10.1016/j.compag.2017.12.008

23. Luliuting Yang, Danny Zhang Research progress on precision planting technology of maize.2016. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006

24. Dinesh Kumar Yadav, Jaivir Singh and Pankaj kumar Precision planting and seeding: A review of technologies and techniques. *International Journal of Research in Agronomy* 2025; 8(4): 548-551. <https://www.doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4g.2830>
25. Yongjian Wang. Research Progress on Agricultural Equipments for Precision Planting and Harvesting. *Agriculture* 2025, 15(14), 1513; <https://doi.org/10.3390/agriculture15141513>
26. M Sudha Paulin, Rajesh Pant , S.Sathiya Naveena , Myasar Mundher adnan, Saurabh Aggarwal Designing a Precision Seed Sowing Machine for Enhanced Crop Productivity. *E3S Web of Conferences* 491, 01016 (2024). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449101016>
27. DM Gurav. PB Kadam Advancements in agricultural automation: A comprehensive review of automatic seed sowing equipment. *International Journal of Agriculture Extension and Social Development* Volume 7; Issue 1; Jan 2024; Page No. 616-620. <https://doi.org/10.33545/26180723.2024.v7.i1h.265>
28. Hang Li., Jin He, Chao Wang. Research Progress on the Development of the Planter Unit for Furrowing Control and the Depth Measurement Technology. *Feature Review Papers in Agricultural Science and Technology Appl. Sci.* 2023, 13(21), 11884; <https://doi.org/10.3390/app132111884>
29. Mark C. Siemens, Ronald R. Gayler . Improving Seed Spacing Uniformity of Precision Vegetable Planters. *Applied Engineering in Agriculture.* 32(5): 579-587. (doi: 10.13031/aea.32.11721) @2016
30. Jincheng Chen,Hui Zhang,Feng Pan. Control System of a Motor-Driven Precision No-Tillage Maize Planter Based on the CANopen Protocol. *Agriculture* 2022, 12(7), 932; <https://doi.org/10.3390/agriculture12070932>
31. Kestutis Romaneckas, Dainius Steponavičius How to Analyze, Detect and Adjust Variable Seedbed Depth in Site-Specific Sowing Systems: A Case Study. *Agronomy* 2022, 12(5), 1092; <https://doi.org/10.3390/agronomy12051092>
32. John Deere. (n.d.a). Equipment. Retrieved May 25, 2025, from <https://www.deere.com/en/>

33. JohnDeere. (n.d.b). Просапні сівалки серії 1700 і DB (Row drills of the 1700 and DB series). Retrieved May 25, 2025, from <https://www.deere.ua/uk/по сів/просапні-сівалки.html>
34. GeoFarmSolution. (n.d.). Вакуумні висівні апарати точного висіву vSet (Vacuum seeding devices of precision seeding vSet). Retrieved May 25, 2025, from http://precision.geofarm.com.ua/site/product_view/45
35. Padhiary M. Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of ML and AI in farming operations. Sci. Direct, 2024, S2772375524000881. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100483.
36. ARK Group, vDrive (електропривід висівних апаратів) / <https://arkgroup.com.ua/product/vdrive/>
37. Павлюк І. Вимоги охорони праці при проведенні посівних робіт [Електронний ресурс] / І. Павлюк // Охорона праці і пожежна безпека. – 57 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://oppb.com.ua/content/vymogyohorony-pracy-provedenni-posivnyh-robit/>
38. Петрига О. М., Яворська Т. І., Прус Ю. О. Економіка аграрного підприємства: навч. посібник / за ред. О. М. Петриги, Т. І. Яворської. – Херсон: ХДАУ, 2020. – 352 с.