

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 систем точного землеробства на показники якості внесення мінеральних добрив»

Виконав:

(підпис)

Артем ЗАЄЦЬ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

СТЗ 2401-2М

Науковий керівник:

(підпис)

Анатолій ЛЕБЕДЄВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Михайло ШУЛЯК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

АНОТАЦІЯ

Заєць Артем Юрійович

Дослідження впливу елементів систем точного землеробства на показники якості внесення мінеральних добрив.

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

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 46 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 2 таблиці, 6 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Метою проведеного дослідження була оптимізація просторового розташування ґрунтового датчика «на ходу», інтегрованого в систему диференційованого (змінного) внесення гранульованих мінеральних добрив (VR-технологія). Основна увага приділялася визначенню оптимальної відстані між місцем отримання інформації про вміст фосфору (P) у ґрунті та точкою фактичної зміни норми внесення добрив. Для цього оцінювався повний час затримки між сигналом від датчика та реакцією виконавчих механізмів системи внесення.

Конструктивно система складалася з ґрунтового датчика, з'єднаного зі спектрофотометром Ziess (волоконний модуль CORONA VISNIR 1.7), та чотирирядної сівалки-аплікатора AMAZONE (ED302), яка виконувала функцію внесення добрив. Загальний час затримки включав кілька послідовних етапів: збір спектральних характеристик ґрунту, опрацювання й компіляцію вимірних даних, зміну встановленої норми внесення, а також час транспортування гранул від дозувального механізму до сошників.

Отримані експериментальні результати показали, що зі збільшенням швидкості руху агрегату на кожні додаткові 1 км/год датчик необхідно зміщувати вперед приблизно на 0,5 м. Це дозволяє компенсувати збільшення

часу, потрібного системі для аналізу інформації та регулювання дози внесення добрив. Крім того, встановлено, що неоднорідність просторового розподілу поживних речовин у ґрунтовому профілі додатково впливає на вимоги до оптимального зміщення сенсора. У міру зростання варіабельності вмісту поживних елементів по полю датчик потребує більшого випередження, оскільки система має частіше та оперативніше коригувати норму внесення для забезпечення максимальної точності технологічного процесу.

Ключові слова: мінеральні добрива, якість внесення, норма внесення, фосфорні добрива, технологія змінних норм.

ABSTRACT

Zayets Artem Yuriyovych

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

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

The final qualification work is presented on 46 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 2 tables, 6 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

The purpose of the study was to optimize the spatial location of the soil sensor "on the go", integrated into the system of differentiated (variable) application of granular mineral fertilizers (VR-technology). The main attention was paid to determining the optimal distance between the place of obtaining information about the phosphorus (P) content in the soil and the point of actual change in the fertilizer application rate. For this purpose, the total delay time between the signal from the sensor and the response of the actuators of the application system was estimated.

Structurally, the system consisted of a soil sensor connected to a Ziess spectrophotometer (CORONA VISNIR 1.7 fiber module) and a four-row AMAZONE seed drill-applicator (ED302), which performed the function of

applying fertilizers. The total delay time included several consecutive stages: collection of spectral characteristics of the soil, processing and compilation of measured data, changing the set application rate, and the time of transporting granules from the dosing mechanism to the coulters.

The obtained experimental results showed that with an increase in the speed of the unit for every additional 1 km/h, the sensor must be moved forward by approximately 0.5 m. This allows you to compensate for the increase in the time required by the system to analyze information and adjust the fertilizer application rate. In addition, it was found that the heterogeneity of the spatial distribution of nutrients in the soil profile additionally affects the requirements for optimal sensor offset. As the variability of the content of nutrients in the field increases, the sensor requires greater lead, since the system must adjust the application rate more often and more quickly to ensure maximum accuracy of the technological process.

Keywords: mineral fertilizers, application quality, application rate, phosphorus fertilizers, variable rate technology.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Стан питання і задачі досліджень.....	11
1.1 Агротехнічні вимоги до внесення добрив при посіві	11
1.2 Сенсорні технології варіабельного внесення добрив	15
1.3 Внесення змінних норм добрив на основі даних спектрофотометра VIS-NIR.....	21
Розділ 2. Технічне забезпечення та методика дослідження	28
2.1 Спектрофотометр і мобільний датчик ґрунту	28
2.2 Аплікатор добрив	29
2.3 Час затримки	31
2.4 Час затримки механічного налаштування для зміни норми	32
2.5. Час затримки випадання добрива в статичних умовах вимірювання.....	32
2.6. Час затримки випадіння добрива за умови динамічного вимірювання.....	34
Розділ 3. Результати досліджень та їх аналіз	36
3.1 Час затримки для сканування ґрунту та обробки даних.....	36
3.2 Час затримки механічного налаштування для зміни норми.....	37
3.3. Час затримки внесення добрив	39
3.4. Визначення положення датчика відповідно до загального часу затримки.....	39
Висновки.....	43
Список використаних джерел.....	44

ВСТУП

1. Актуальність теми

У сучасних умовах розвитку аграрного виробництва одним із ключових напрямів підвищення його ефективності є впровадження технологій точного землеробства, які забезпечують раціональне використання матеріальних ресурсів і підвищення продуктивності. Значну частину витрат у структурі технологічних операцій становлять мінеральні добрива, ефективність використання яких безпосередньо залежить від точності їх внесення. Традиційні підходи до встановлення норм добрив часто не враховують реальної просторової неоднорідності ґрунтових характеристик, що призводить до їх перевитрати, зниження врожайності та негативного впливу на довкілля.

Сучасні системи змінних норм внесення (VR-технології), оснащені датчиками оперативного вимірювання показників ґрунту, дозволяють адаптувати дозу добрив відповідно до конкретних умов у кожній точці поля. Проте точність їх роботи значною мірою визначається часовими та технічними характеристиками компонентів системи, зокрема затримками між моментом отримання інформації від сенсорів і фактичним регулюванням норми внесення. Оптимізація просторового розташування датчиків «на ходу» є важливою технічною задачею, що забезпечує підвищення якості внесення добрив та ефективності реалізації VR-технологій. Саме тому дослідження впливу елементів систем точного землеробства на показники точності внесення добрив є актуальним як з наукового, так і з практичного погляду.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питанням підвищення точності технологічних операцій у точному землеробстві присвячено значну кількість досліджень, що розглядають принципи роботи сенсорів, алгоритми диференційованого внесення добрив та конструктивні особливості аплікаторів. Наукові праці зосереджені на використанні оптичних спектроскопічних систем, зокрема спектрофотометрів VIS-NIR, для визначення вмісту поживних елементів у ґрунті в режимі

реального часу. Разом із тим у літературі недостатньо висвітлені питання, пов'язані з часовими характеристиками елементів системи внесення та їх впливом на просторову точність роботи.

Існуючі підходи обмежуються загальними принципами калібрування та використання сенсорів, тоді як питання оптимального зміщення датчика відносно точки внесення в конкретних технологічних умовах розроблені недостатньо. Недостатньо дослідженим залишається вплив швидкості руху агрегату та варіабельності ґрунтових показників на сумарний час затримки, що знижує ефективність реалізації технологій змінних норм. Отже, існує наукова прогалина щодо визначення таких параметрів та розробки рекомендацій з оптимізації конструктивних елементів VR-систем.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є визначення оптимального просторового розташування ґрунтового датчика оперативного контролю, інтегрованого в систему змінного внесення гранульованих мінеральних добрив, шляхом оцінювання повного часу затримки між моментом вимірювання вмісту фосфору та фактичним регулюванням норми внесення.

4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є технологічний процес диференційованого внесення гранульованих мінеральних добрив у системах точного землеробства.

5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є часові та технічні характеристики елементів системи змінних норм внесення добрив, що впливають на точність установлення фактичної дози добрива відносно місця вимірювання параметрів ґрунту.

6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати агротехнічні вимоги та сенсорні технології, що застосовуються при варіабельному внесенні добрив.

2. Охарактеризувати технічні складові системи внесення, включно з ґрунтовим датчиком і аплікатором добрив.
3. Визначити та експериментально оцінити основні складові часу затримки.
4. Встановити залежність оптимального зміщення ґрунтового датчика від швидкості руху агрегату.
5. Провести аналіз впливу просторової варіабельності поживних речовин на необхідне випередження датчика.
6. Розробити рекомендації щодо оптимізації просторової конфігурації елементів VR-системи.

7. Методи дослідження

У роботі застосовувалися аналітичні методи для опрацювання літературних джерел та визначення теоретичних закономірностей процесу внесення добрив; експериментальні методи польових і лабораторних досліджень часу затримки; спектрофотометричний аналіз у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах; методи математичної обробки результатів, включно зі статистичним аналізом.

8. Структура та обсяг роботи

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг пояснювальної записки становить 46 сторінок машинописного тексту, містить 2 таблиці, 6 рисунків та 25 джерел літератури.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Агротехнічні вимоги до внесення добрив при посіві

У нинішніх умовах розвитку аграрної галузі результативне використання добрив у момент висіву культур набуває ключового значення для формування здорового розвитку рослин, підвищення потенційної продуктивності та збереження родючості ґрунтів. Агротехнічні норми, що стосуються внесення поживних речовин, включають комплекс рекомендацій та технологічних рішень, спрямованих на відповідність між потребами рослин у мінеральному живленні та фактичним забезпеченням ґрунту на початкових фазах органогенезу. Такі вимоги охоплюють правильний вибір виду добрив, спосіб їх застосування, визначення оптимального часу внесення, встановлення необхідної дози й урахування екологічних аспектів. Усі ці чинники мають адаптуватися до специфічних характеристик конкретної культури, складу й властивостей ґрунту, а також умов клімату регіону. Грамотне внесення мінеральних речовин сприяє ефективному засвоєнню елементів живлення кореневою системою рослин і скорочує небажані втрати через фіксацію в ґрунтовому профілі, випаровування або вимивання, що підсилює сталий напрям сільськогосподарського виробництва.

Одним із провідних елементів технології удобрення під час висіву є визначення найбільш придатного типу добрив. На такий вибір переважно впливають потреби вирощуваної культури у макро- та мікроелементах, а також фактичний поживний стан поля. Найважливіші основні елементи живлення — азот (N), фосфор (P) і калій (K) — здійснюють ключовий вплив на стартове формування кореневої системи й розвиток молодих рослин. Фосфор, зокрема, відповідає за потужність коренів і енергетичні процеси, тоді як азот забезпечує інтенсивний ріст надземної маси. Саме тому для великої частини культур доцільним є внесення стартових N-P-K добрив із раціонально підібраними співвідношеннями компонентів. Окрім цього, для повноцінного розвитку сходів інколи є потреба у додаткових мікроелементах, таких як бор,

цинк, марганець, що можуть бути включені до початкових добривних композицій.

Додатково необхідно враховувати взаємодію різних форм добрив, щоб уникнути небажаних фізико-хімічних процесів, серед яких утворення нерозчинних сполук, що блокують доступність поживних елементів. Наприклад, застосування амонійних форм може локально знижувати рН, негативно впливаючи на розвиток ніжних коренів проростків. З метою запобігання подібним наслідкам рекомендовано використовувати гранульовані або спеціально вкриті добрива, здатні поступово вивільняти елементи живлення. Зростає популярність інноваційних матеріалів із контрольованим вивільненням поживних речовин, які дозволяють синхронізувати надходження елементів із критичними фазами росту рослин, водночас підвищуючи економічність технології удобрення й обмежуючи екологічні втрати.

Надзвичайно важливим параметром внесення добрив під час посіву є вибір часу застосування. Забезпечення рослин доступними поживними речовинами на початкових стадіях має вирішальне значення для формування життєздатних сходів. Оскільки на ранніх фазах коренева система ще слабо розвинена, добрива необхідно розміщувати в зоні близького доступу до насіння. Стрічкове розміщення, коли поживні речовини подаються паралельно рядку посіву, але без прямого контакту із зерниною, є поширеним і ефективним технологічним підходом. Він значною мірою усуває ризик хімічних опіків насіння та підвищує доступність фосфору, який погано рухається у ґрунтового середовищі.

Втім надмірне використання азотних форм безпосередньо поруч із насінням створює небезпеку аміачної токсичності, особливо у посушливих умовах. Тому агрономічні рекомендації передбачають внесення азоту на певній відстані від рядка висіву, залежно від виду культури: зернові частіше переносять ближче розташування, тоді як бобові або овочеві рослини є чутливішими. Точне розміщення добрив під час сівби або з використанням

ін'екційних методів сприяє найкращому використанню поживних елементів. Деякі азотні продукти, наприклад сечовина чи аміачна селітра, можуть бути внесені після завершення посівних робіт, що дає змогу мінімізувати ризики для насіння й забезпечити азотне живлення в найбільш критичний момент росту розсади.

Ще однією важливою умовою агротехніки є точний розрахунок дози добрив. Необхідний рівень внесення визначається прогнозованим потенціалом врожаю, потребами культури, природною забезпеченістю ґрунту та екологічними факторами. Надмірне удобрення здатне спричинити забруднення водних ресурсів через вимивання нітратів та посилити процеси евтрофікації водойм, тоді як дефіцит елементів значною мірою стримує ріст рослин і формування врожаю. Тому агрохімічний аналіз ґрунту є ключовим інструментом оптимізації дози добрив і прийняття обґрунтованих рішень. Знання реальної родючості дає можливість господарствам раціонально використовувати добривні ресурси, забезпечувати збалансоване живлення культур та зменшувати негативний вплив агровиробництва на навколишнє природне середовище.

Інтегроване управління родючістю ґрунтів (ISFM) передбачає гармонійне використання як органічних, так і мінеральних добрив для збереження родючості та покращення агрономічних властивостей ґрунту. Додавання компосту, гною, сидеральних культур та інших біологічних матеріалів підсилює вміст органічної речовини, поліпшує водно-повітряний режим і стимулює розвиток корисної ґрунтової мікрофлори, завдяки чому елементи живлення стають більш засвоюваними. Розміщення таких матеріалів у період посіву дає можливість частково скоротити використання синтетичних добрив, оскільки вони забезпечують поступове вивільнення поживних елементів, одночасно доповнюючи швидкодіючі інорганічні джерела. Крім цього, ISFM знижує надмірну залежність від промислових добрив та зміцнює екологічну стабільність виробництва, адже органічні складові сприяють підвищенню стійкості ґрунту до деградації, ущільнення та ерозійних процесів.

Сучасні технологічні рішення, зокрема точне землеробство та системи змінних норм внесення (VRT), докорінно змінюють підхід до забезпечення рослин поживними елементами під час висіву. Використання GPS-навігації, ґрунтових сенсорів і цифрової аналітики дає змогу точно налаштувати норму внесення з огляду на просторову мінливість показників родючості в полі. Техніка зі змінною подачею добрив працює у реальному часі, узгоджуючи кількість поживних речовин із потребами конкретних мікроділянок, що дозволяє мінімізувати перевитрати у зонах з високою забезпеченістю та компенсувати нестачу в проблемних частинах поля. Такий адаптивний підхід одночасно скорочує витрати, зменшує негативний вплив на довкілля та підтримує рівномірний ріст культур. Додатково сівалки забезпечують точне укладання насіння й добрив у ґрунт, що сприяє кращому стартовому розвитку рослин.

Безпілотні літальні апарати й супутниковий моніторинг активно застосовуються для оперативного контролю стану посівів, виявлення живильних дефіцитів та своєчасного корегування норм удобрення протягом вегетації. Ці засоби забезпечують гнучке управління живленням, дозволяючи аграріям ухвалювати рішення на основі реальної динаміки росту та умов середовища. Завдяки впровадженню таких технологій забезпечується доцільніша подача добрив, підвищення результативності виробництва та зменшення втрат поживних елементів через вимивання або випаровування, що сприяє сталому розвитку агросфери.

Внесення добрив під час посіву — це комплексний агротехнічний захід, який спирається на класичні принципи землеробства та новітні інженерні розробки для ефективного забезпечення культур необхідними елементами живлення. Виконання технологічних вимог, правильний вибір форм добрив, оптимізація часу й місця внесення та використання високоточної техніки дають змогу збільшувати врожайність, одночасно підтримуючи якість ґрунтів і екологічну рівновагу. Поєднання органічних і мінеральних ресурсів, інструментів точного землеробства й прийняття рішень на основі даних стає

основою для досягнення високої продуктивності культур разом із охороною природи. Застосування таких методів є критично важливим не лише для негайного збільшення обсягів виробництва, але й для довгострокового збереження родючості земельних ресурсів, зміцнення продовольчої безпеки та стійкості агропромислового комплексу.

1.2 Сенсорні технології варіабельного внесення добрив

Головною ідеєю застосування технологій точного землеробства є забезпечення раціонального використання усіх необхідних ресурсів агровиробництва: посівного матеріалу, мінеральних добрив, засобів захисту рослин, пального та інших складових виробничого процесу. Такий результат можливий завдяки запровадженню методів локалізованого, чітко контрольованого внесення відповідних речовин на конкретні ділянки, що дійсно потребують їх у певний момент.

Крім економії матеріальних ресурсів, ця система сприяє зниженню витрат на ремонт і придбання машино-тракторного парку, оскільки техніка працює з вищим коефіцієнтом корисного використання, що зменшує її зношування. Підвищується продуктивність польових робіт: сучасні рішення, пов'язані з автоматизованим керуванням технікою, навігаційними системами й електронним картуванням врожайності, дозволяють скоротити витрати робочого часу та мінімізувати людський фактор.

Окреме місце займає технологія диференційованого внесення добрив, що є одним із базових елементів точного землеробства. Принцип її полягає у застосуванні живлення лише там, де це є обґрунтовано агрохімічним станом ґрунту. При цьому використовують два основних підходи: оперативне регулювання дозування в реальному часі або робота заздалегідь сформованими картами поля. На практиці частіше використовують другий варіант, ґрунтуючись на докладному попередньому аналізі площі.

Спершу створюють цифрову карту забезпеченості ґрунту поживними елементами, яка формується завдяки комплексному дослідженню поля.

Джерела даних можуть відрізнятися: від інформації про врожайність, яку збирають під час жнив бортові комп'ютери машин, — до масового відбору зразків, якщо дані врожайності відсутні. Аналіз продуктивності дозволяє знайти проблемні фрагменти поля з низькими показниками та зосередити дослідження передусім на них, однак за потреби проводиться відбір проб по всій площі.

Наступним кроком є польовий відбір ґрунту. Процедура ґрунтується на визначенні точного місця кожної проби на карті за допомогою високоточного сигналу супутникової навігації. При плануванні відбору враховують вертикальну неоднорідність ґрунтового профілю, мікрорельєф території, особливості клімату та рівень строкатості ґрунтових властивостей.

Методика відбору може бути різною:

- випадковий відбір — застосовується на однорідних територіях, але не забезпечує деталізації, необхідної для високоточної агрономії;
- кластеризація за даними врожайності — зосереджує увагу на ділянках з різними потенціалами продуктивності;
- еталонний відбір — ефективний на строкатих полях, де територію ділять на окремі сегменти (приблизно 3–10 га), для кожного з яких у майбутньому формуватимуть індивідуальні рекомендації.

Координати місць відбору прив'язують до географічної системи навігації, щоб надалі можна було повторити відбір у тих самих точках і відстежувати динаміку змін родючості. Найліпший період проведення такого відбору — рання весна перед внесенням поживних речовин або осінь після збору врожаю, коли рослини вже використали основні елементи живлення.

Найпоширенішою схемою відбору є варіант «конверт»: у визначеній елементарній ділянці проби беруть у п'яти точках — чотири по периметру та одна центральна. Глибина відбору зазвичай відповідає орному горизонту (приблизно 0–30 см), а використовувані інструменти можуть бути як ручними, так і автоматизованими.

Подальшим етапом є лабораторне визначення агрохімічних параметрів. Дослідження охоплює вимірювання значень вмісту азоту в нітратній формі, доступних сполук фосфору та калію, сірки, особливостей кислотності, вмісту органічних речовин, засоленості та структурних характеристик ґрунту. За окремою потребою перевіряють наявність мікроелементів — заліза, марганцю, міді, цинку, кобальту, бору та інших важливих складових.

Результати аналізу дозволяють отримати точне уявлення про реальний стан родючості, що забезпечує можливість побудови інформаційної моделі поля у вигляді електронної карти. Доведено, що існує стійкий зв'язок між показниками врожайності та концентрацією гумусу, рухомих форм азоту та фосфору. Території з низьким рівнем органічної речовини (менше 2%) частіше потерпають від ерозійних процесів та мають менший потенціал продуктивності.

Стрімке впровадження цифрових технологій в агровиробництво зумовлює підвищений попит на фахівців, які здатні оптимізувати використання ресурсів, аналізувати просторово-часові дані про стан посівів та забезпечувати ефективність виробничих процесів на засадах сучасних інновацій. Водночас, на ринку праці зростає запит на випускників, що володіють інтегрованими компетентностями, пов'язаними із застосуванням цифрових систем, сенсорного моніторингу, геоінформаційних методів і технологій точного внесення виробничих ресурсів.

Розвиток програм підготовки магістрів у царині цифрової та інноваційної агрономії має бути спрямований на формування здатності використовувати великі масиви даних, оцінювати стан агроєкосистем, проводити моделювання врожайності й управління ризиками. Сучасний фахівець з точного землеробства повинен володіти знаннями щодо оптимального застосування техніки, обладнання та автоматизованих рішень, які дозволяють підвищувати економічні показники сільськогосподарських підприємств з урахуванням екологічної сталості.

Попит на таких фахівців невідмінно зростає не лише у великих агрохолдингах, але й у малих і середніх господарствах, які орієнтуються на цифрову трансформацію виробництва. Таким чином, освітні програми вищої школи повинні своєчасно адаптуватися до потреб ринку, впроваджуючи навчальні дисципліни, які забезпечують формування актуальних компетенцій у сфері агротехнологій майбутнього.

Цифровізація та впровадження інтелектуальних рішень у сільське господарство передбачають використання безпілотних літальних апаратів, супутникового моніторингу, систем глобального позиціонування, телеметричних даних і спеціалізованого аналітичного програмного забезпечення. Масштабування наведених технологій дозволяє здійснювати постійний контроль стану посівів, оперативно виявляти відхилення в розвитку культур та приймати обґрунтовані рішення щодо управління агровиробничими процесами.

Все більшої значущості набуває підготовка фахівців, здатних працювати з автоматизованими системами, високоточними датчиками, обладнанням для змінної норми внесення добрив і засобів захисту, а також цифровими платформами для моделювання продуктивності та аналізу агрономічних ризиків. Випускники, які поєднують глибоке розуміння агробіологічних процесів із впевненими навичками цифрових технологій, стають ключовою ланкою у забезпеченні конкурентоспроможності аграрних систем.

Підвищення ролі інтелектуальних рішень у сільському господарстві зумовлює необхідність удосконалення процесів збору, інтеграції та опрацювання аграрних даних. Сучасні системи моніторингу дозволяють оцінювати неоднорідність ґрунтового покриття, вміст поживних елементів, запаси вологи та рівень забур'яненості на окремих ділянках поля, що створює передумови для диференційованого підходу до внесення ресурсів та управління рослинницькими процесами. Автоматизація отримання важливої інформації про продукційний стан культур з використанням дистанційних

методів спостереження підвищує оперативність та точність планування технологічних операцій.

Ефективне застосування цих технологій передбачає необхідність формування компетентностей із аналізу геопросторової інформації, математичного моделювання та програмування. Випускник-магістр повинен не лише орієнтуватися в технічних параметрах обладнання, але й бути здатним здійснювати вибір оптимальних алгоритмів обробки даних, проводити оцінку їх якості та формувати управлінські рішення, спрямовані на оптимізацію виробничих витрат.

У контексті адаптації освітнього процесу до сучасних вимог важливим є оновлення навчальних планів на основі компетентнісного підходу із урахуванням розвитку цифрових технологій та запитів аграрного ринку. Навчальні дисципліни, що забезпечують формування навичок використання геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, сенсорного моніторингу та автоматизованого управління технологіями, мають бути невід'ємною складовою професійної підготовки.

Крім того, значущим залишається забезпечення студентів можливістю практичного опанування сучасних інструментів у реальних польових умовах. Співпраця зі сільськогосподарськими підприємствами, агросервісними компаніями та розробниками спеціалізованого обладнання сприяє поглибленому формуванню професійних навичок, що особливо важливо в умовах стрімкої зміни технічних стандартів і технологічних вимог у галузі.

Забезпечення готовності майбутніх фахівців до професійної діяльності у сфері точного землеробства потребує комплексного поєднання теоретичної складової з практично орієнтованими завданнями, що стимулюють розвиток аналітичного мислення та здатність адаптуватися до технологічних інновацій. Важливо формувати вміння критично оцінювати результати вимірювань, коректно інтерпретувати картографічні моделі, застосовувати методи багатовимірного аналізу та цифрові підходи до управління агроєкосистемами.

У контексті підготовки висококваліфікованих кадрів набуває значення і розвиток навичок командної роботи, комунікації та взаємодії зі спеціалістами суміжних галузей — інженерами, ІТ-фахівцями, економістами, екологами. Адже ефективне застосування інноваційних агротехнологій часто передбачає мультидисциплінарний підхід, що об'єднує різні напрями професійної компетентності для досягнення найкращих результатів у виробництві сільськогосподарської продукції.

Особливої уваги потребує розвиток здатності оцінювати економічний ефект від запровадження високотехнологічного обладнання та цифрових інструментів. Розуміння структури витрат, окупності інновацій, впливу оптимізованих технологічних рішень на рентабельність виробництва має стати важливою складовою професійного мислення магістрів у сфері точного землеробства.

Також сучасна аграрна освіта має забезпечити усвідомлення екологічних ризиків і наслідків впливу господарської діяльності на навколишнє середовище. Опанування підходів до сталого управління земельними ресурсами, що базуються на зменшенні використання хімічних засобів, ерозійного тиску та нераціонального водокористування, дозволить майбутнім фахівцям впроваджувати екологічно безпечні технології вирощування сільськогосподарських культур.

Підготовка магістрів, компетентних у питаннях цифрової трансформації аграрної галузі, виступає важливою передумовою зміцнення продовольчої безпеки, підвищення конкурентоспроможності вітчизняного агросектору та формування сучасної моделі ефективного і відповідального землекористування.

Упровадження новітніх технологій у виробничі процеси аграрного сектору є невід'ємною складовою підвищення ефективності використання земельних ресурсів і зменшення негативного впливу на довкілля. Системи точного землеробства забезпечують можливість ситуаційного управління окремими ділянками поля, що сприяє раціональному використанню добрив,

засобів захисту рослин і посівного матеріалу. В результаті впровадження таких підходів господарства досягають більшої стабільності показників врожайності та знижують собівартість виробленої продукції.

Поглиблення цифровізації та широке застосування автоматизованих засобів сприяють переходу від традиційних методів вирощування культур до інноваційних технологічних рішень, що дозволяють здійснювати детальний контроль за їх розвитком упродовж всього періоду вегетації. Використання сучасних електронних пристроїв, сенсорів, систем картографування та обробки просторових даних забезпечує високий рівень точності і надійності планування технологічних операцій, підвищує продуктивність праці та створює нові можливості для фахівців аграрного сектору.

Однак для ефективного застосування цих технологій у виробничих умовах важливо забезпечити фахівцям достатній рівень компетентностей, що охоплюють не лише технічні знання, але й здатність проводити комплексну оцінку агробіологічних процесів і враховувати економічні та екологічні чинники прийняття рішень. Саме тому підготовка кадрів у сфері точного землеробства має орієнтуватися на розвиток інтегрованого мислення, міждисциплінарної взаємодії та здатності застосовувати інновації у практичній діяльності.

1.3 Внесення змінних норм добрив на основі даних спектрофотометра VIS-NIR

Використання технології VR (змінної норми внесення) може сприяти підвищенню врожайності сільськогосподарських культур. Проте одночасно витрати, пов'язані з проведенням додаткових звичайних аналізів ґрунту, інколи здатні перевищити прибуток, отриманий від зростання продуктивності. З цієї причини значне збільшення кількості ґрунтових проб на одиницю площі, взятих для оцінки рівня поживних елементів, часто виявляється економічно недоцільним. Незважаючи на це, рекомендації щодо внесення добрив мають бути адаптовані під максимальне зменшення розміру сітки відбору проб, щоб

забезпечити виявлення просторової неоднорідності навіть на дуже обмежених ділянках — на рівні метра або й менше. Реалізувати таку ідею можливо лише за допомогою інноваційних систем оперативних вимірювань, наприклад VR-технологій, що працюють на основі сенсорних датчиків.

Підходи, базовані на картографуванні, менш ефективні для VR застосування, оскільки вони спираються на порівняно невелику кількість аналітичних точок на гектар, що не забезпечує потрібної деталізації. До того ж, карта-орієнтований метод може спричинити додаткові похибки під час позиціонування під час збору інформації та внаслідок інтерполяції між розрізненими вимірюваними величинами при створенні карт внесення.

Сенсорне внесення добрив зі змінними нормами на основі спектрофотометричних даних VIS-NIR (у діапазоні видимого та ближнього інфрачервоного світла) є перспективним кроком уперед у точному землеробстві. Така технологія надає можливість оптимізувати кількість поживних речовин, що вносяться, із прив'язкою до реальних потреб рослин у різних робочих зонах поля. На відміну від традиційної практики рівномірного розподілу добрив, що ігнорує мінливість властивостей ґрунту та стану культур, цей підхід враховує внутрішньопольові відмінності, сприяючи раціональнішому використанню ресурсів. Отримані дані дозволяють досягти вищої точності в удобренні, що може позитивно впливати на виробничі результати, скорочення негативних екологічних наслідків і зниження витрат агровиробника.

Спектрофотометри VIS-NIR фіксують показники відбиття електромагнітного випромінювання у видимому та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах, що надає надзвичайно цінну інформацію про фізико-хімічні характеристики рослинних і ґрунтових об'єктів. Аналіз спектральних даних дає можливість оцінити низку критичних параметрів культури, до яких належать рівень хлорофілу, забезпеченість вологою, забезпечення основними поживними компонентами. Одночасно визначаються властивості ґрунту, зокрема кількість органічної речовини,

ступінь вологості, особливості структури. Обробка цих показників дозволяє оперативнo встановлювати потребу рослин у поживних елементах. У поєднанні з геоінформаційними системами та додатковими цифровими інструментами точного землеробства спектральні вимірювання сприяють формуванню високодеталізованих карт просторової неоднорідності живлення культур. Саме такі карти стають ключовою основою для функціонування систем VRA (Variable Rate Application), які забезпечують кероване внесення добрив із максимальною точністю.

Першим етапом є отримання спектрофотометричної інформації VIS-NIR у різних частинах поля. Параметри відбиття фіксують за допомогою мобільних наземних спектрометрів, сенсорів на безпілотноїках або датчиків, змонтованих на сільськогосподарських машинах, які здатні сканувати значні ділянки посівів. Зібрані спектральні показники проходять процедуру калібрування та подальшого аналізу для визначення вмісту базових елементів живлення, серед яких насамперед азот, фосфор і калій, необхідні для оптимального живлення окремих зон поля. Для коректного трактування спектральної інформації та високоточного прогнозування забезпеченості поживними компонентами застосовують широкий спектр математичних методів — зокрема часткову регресію найменших квадратів (PLSR), алгоритми опорних векторних машин (SVM) і штучні нейронні мережі (ANN). Такі моделі працюють із коефіцієнтами спектрального відбиття, прив'язаними до конкретних діапазонів хвиль, що дає змогу оцінити нестачу чи надмір речовин у рослин та ухвалювати обґрунтовані рішення щодо диференційованого внесення мінеральних добрив.

Після встановлення потреби посівів у харчувальних елементах ці відомості завантажуються в системи VRA, які у режимі реального часу коригують норми внесення. Система змінної норми, зазвичай інтегрована з розкидачами або обприскувачами, обладнаними GPS-навігацією, працює за принципом адаптивного управління. Під час руху сільськогосподарської техніки по полю обладнання зчитує картографічні дані про поживний стан,

складені на основі оброблених спектрів VIS-NIR, і подає добрива у відповідній кількості залежно від локальної потреби рослин. Приміром, там, де виявлено надлишок азоту, вносять мінімальні дози, тоді як на ділянках із низьким рівнем цього елемента норма збільшується для вирівнювання показників по всій площі посівів. Такий спосіб управління живленням культур забезпечує ощадливе використання добрив, зменшуючи витрати агровиробника та одночасно мінімізуючи негативний вплив на екосистеми, пов'язаний із надмірним внесенням, включно з підкисленням ґрунтів, вимиванням мікро- і макроелементів та забрудненням водою.

Попри значні переваги, впровадження добрив із використанням VRA на основі даних VIS-NIR стикається з низкою техніко-технологічних і організаційних перешкод. Процедури збору, обробки й аналізу інформації нерідко потребують значних фінансових затрат, а побудова точних моделей прогнозування вимагає великих та репрезентативних масивів даних. Додаткові труднощі спричиняє природна неоднорідність ґрунту й рослинності: відмінності у структурі ґрунтів, вмісті органічного матеріалу або ботанічному складі культур впливають на спектральні властивості. Тому алгоритми калібрування мають враховувати конкретний тип культури, агрономічні особливості ґрунтового покриву та локальні умови середовища, а інколи потребують коригування безпосередньо на конкретному полі чи навіть періодичного оновлення з часом. Крім того, на результативність технології впливають практичні чинники — сумісність обладнання зі змінною нормою із наявною технікою, зручність експлуатації систем і достатній рівень підготовки операторів, від яких залежить ефективність використання сучасних рішень точного землеробства.

Попри наявні труднощі, застосування VIS-NIR спектрофотометрії для управління внесенням добрив зі змінними нормами має суттєві переваги. Наукові результати доводять, що регульоване VRA-дозування на основі спектральних показників здатне підвищувати урожайність різних культур, забезпечуючи оптимальне надходження поживних елементів до кореневої

системи, що, у свою чергу, стимулює активніший розвиток рослинного покриву. Економічний ефект проявляється у подвійній формі: хоч впровадження обладнання VIS-NIR і системи VRA потребує значних початкових витрат, аграрії у перспективі скорочують свої фінансові витрати завдяки усуненню надлишкового внесення добрив. До того ж така технологія зменшує екологічне навантаження, обмежуючи втрати азоту й фосфору зі стоком води та знижуючи обсяг шкідливих газів, пов'язаних із синтезом і використанням мінеральних добрив.

Отже, диференційоване удобрення на основі спектрофотометричних вимірювань VIS-NIR є інноваційним та ефективним напрямом точного землеробства, який гармонійно поєднується з цілями сталого розвитку агросфери. Технологія дає можливість підвищити обсяги виробництва врожаю, покращити економічну результативність агробізнесу та обмежити негативні наслідки для довкілля. Подальша адаптація та вдосконалення VIS-NIR у повсякденній агрономічній роботі потребує збільшення точності зчитування інформації та зменшення експлуатаційних витрат, проте швидкий прогрес у сфері спектрального аналізу й алгоритмів машинного навчання свідчить про значний потенціал. За умов постійного розвитку технологій аналізу ґрунту спектрофотометрія VIS-NIR здатна перетворитися на один із ключових інструментів сучасного фермера, відкриваючи шлях до більш екологічно збалансованого та високоефективного агровиробництва.

Технологія внесення добрив у змінних дозах (VR) ґрунтується на регулюванні кількості поживних речовин відповідно до неоднорідності агрохімічних властивостей ґрунту в межах поля. Основна мета такого підходу — підвищення рівня врожайності й одночасне скорочення негативного впливу на навколишнє середовище шляхом більш точного управління просторовою мінливістю ґрунтового покриву. Якщо певні зони поля вимагають додаткового удобрення, то на інших ділянках можливо отримати високі результати продуктивності навіть без додаткового внесення поживних речовин.

З погляду агрономії, технологія VRT сприяє впровадженню ефективних стратегій живлення конкретних культур, що є ключовим фактором для максимального розвитку рослин та формування високої продуктивності. Результати численних польових експериментів демонструють, що використання керованого диференційованого внесення добрив, як правило, забезпечує підвищення врожайності, особливо на ділянках із суттєвою просторовою неоднорідністю показників родючості. Можливість точно реагувати на відмінності в межах одного поля гарантує, що зони з високим потенціалом росту отримують належний рівень поживних елементів, у той час як території зі зниженим потенціалом не перевантажуються надлишковою кількістю добрив. Такий локалізований підхід узгоджується з фундаментальним принципом точного землеробства — забезпечувати правильну операцію у відповідному місці та оптимальний момент часу. Водночас результати не всіх досліджень підтверджують суттєве підвищення урожайності у випадках, коли варіабельність ґрунтових параметрів початково низька. У подібних умовах основний ефект VRT пов'язаний передусім із раціональним використанням ресурсів, зменшенням втрат поживних речовин та покращенням екологічної ситуації, а не прямим приростом урожаю.

Основним завданням технології змінних норм внесення гранульованих добрив є усунення ризиків як надлишкового, так і недостатнього удобрення. Система має доставляти оптимальну кількість поживних речовин на кожную частину поля з урахуванням різниці в родючості ґрунту. Сучасні дослідження свідчать про значну мінливість елементів живлення навіть на дуже обмежених площах — інколи на рівні одного метра. Тому для точного задоволення потреб різних мікрозон необхідно, щоб регулювання норми відбувалося для найменших можливих одиниць площі. У зв'язку з цим найкращим рішенням для систем VR є використання сівалок-аплікаторів, які забезпечують точне розташування добрив у ґрунті, тоді як розкидачі відцентрового типу орієнтовані більше на ширину охоплення, а не на прецизійність внесення.

У варіантах застосування VR, що базуються на роботі ґрунтових сенсорів «на ходу», внесення здійснюється відповідно до інформації, що безперервно збирається датчиком, змонтованим у передній частині трактора. Для забезпечення коректної роботи така система потребує точного визначення оптимальної відстані між сенсором і аплікатором, оскільки на неї впливають як швидкість руху техніки, так і затримка в обробці зібраних даних.

Під час функціонування VR-аплікатора виникає часовий інтервал між моментом сканування показників ґрунту (наприклад, концентрації фосфору — P) та фактичним внесенням гранул з відповідною нормою у борозну. Цей проміжок часу охоплює декілька етапів: сприйняття інформації датчиком, її аналіз, передавання команд обчислювальною системою та механічну реакцію обладнання, включно з інерційністю потоку частинок добрив. Аналіз наукових джерел показує відсутність достатньої кількості досліджень, присвячених визначенню точного часу затримки для VR-обладнання під час внесення гранульованих добрив за даними датчиків. Це пояснюється відносно новим характером технології «на ходу» та активним розвитком відповідних технічних рішень.

Основна мета представленого дослідження полягає у встановленні величини часу затримки для системи VR-внесення фосфатних добрив (P_2O_5), що дозволить визначити оптимальне розташування сенсорів видимого (VIS) та ближнього інфрачервоного (NIR) діапазону відносно зони внесення, забезпечивши високу точність роботи обладнання та підвищивши ефективність адаптивного удобрення в польових умовах.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Спектрофотометр і мобільний датчик ґрунту

Одним із варіантів реалізації технології оперативного зондування ґрунту за допомогою спектрофотометра у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (VIS–NIR) є спеціальна конструкція з робочим долотним елементом. Цей елемент заглиблюється в ґрунтовий шар до встановленого рівня, створюючи вузьку траншею. Нижня поверхня траншеї вирівнюється під дією спрямованих донизу сил, що прикладаються до плоскої частини долота під час руху агрегату. Оптичний модуль, закріплений у тильній зоні долотного вузла, забезпечує зчитування та реєстрацію спектральної інформації безпосередньо з вирівняного дна сформованої траншеї (див. рис.



1).

Рис. 1 – Схематична діаграма видимого та ближнього інфрачервоного (VIS–NIR) датчика ґрунту

Оптичний модуль з'єднують із волоконно-оптичними лініями, що використовуються для подачі випромінювання та приймання відбитого сигналу від поверхні ґрунту. Волоконні елементи були змонтовані всередині власника лінзи під кутовим нахилом приблизно 45°. Через пару оптичних волокон (одне служить для передачі світла, інше – для його реєстрації) здійснюється контакт зі спектрофотометром, що дозволяє реєструвати

спектральні характеристики відбиття зразків ґрунту. Ефективність та доцільність застосування такого підходу для визначення вмісту фосфору в ґрунтовому горизонті за допомогою VIS–NIR спектроскопії вже була підтверджена попередніми експериментами. У межах цієї роботи вказаний рухомий ґрунтовий сенсор інтегрували з портативним світловодним спектрофотометром видимої та ближньої інфрачервоної області (модель VISNIR CORONA 1.7, C. Zeiss, Німеччина).

Згаданий прилад характеризується високою точністю та оперативністю вимірювань: час одного сканування становить близько 500 мс, діапазон аналізованих хвиль – 306,5–1710,9 нм, похибка визначення довжини хвилі знаходиться в межах 0,5–1 нм, рівень шуму не перевищує 0,1%, а дрейф сигналу – менше ніж 0,5% на годину; калібрувальні процедури виконують щогодини. Такі технічні параметри сприяють широкому використанню апаратури цього типу як мобільного спектрофотометра у сучасних сільськогосподарських дослідженнях. Під час проведених експериментів також було визначено період затримки, необхідний для реєстрації спектрів видимого та ближнього ІЧ-відбиття ґрунту рухомим сенсорним комплексом.

2.2 Аплікатор добрив

У ході експериментальних досліджень була застосована просапна сівалка моделі ED302 від компанії AMAZONE (Німеччина), оснащена спеціальним обладнанням для точного внесення мінеральних добрив. Регулювання величини подачі поживних речовин здійснювалося за допомогою електропривода виробництва LINAK & Co., інтегрованого безпосередньо в конструкцію машини.

Зазначений електричний механізм забезпечував можливість плавної зміни частоти обертання дозувального пристрою добрив, що відбувалося завдяки використанню безступінчастої коробки передач, кінематично з'єднаної з опорними колесами агрегату. Відсоцтінь між вихідними

елементами дозаторів та нижньою точкою сошників складала 950 мм, що забезпечувало належні умови потрапляння добрив у ґрунтову борозну.

Керування приводом виконувалося через послідовний інтерфейс типу RS232, що дозволяло оперативно змінювати норму внесення під час роботи. Також електропривід, відповідальний за транспортування добрив, було попередньо відкалібровано відповідно до необхідної інтенсивності подачі сполук P_2O_5 , з урахуванням заданої швидкості потоку.



Рис. 2 – Електричний привод для зміни норми внесення (ED 302, AMAZONE) і кодер для вимірювання переміщення приводу

Для кожного варіанта налаштувань привідного механізму ґрунтове колесо приводили в обертання з метою моделювання процесу подачі добрив на площу, еквівалентну 100 м². Матеріал, що подавався дозатором, ретельно відбирали, після чого його масу визначали за допомогою високоточних електронних ваг із точністю 0,01 г. Процедуру вимірювання здійснювали для 25 окремих положень на шкалі електроприводу (див. рис. 2), а для підвищення

достовірності результати отримували шляхом трикратного повторення кожного експерименту. Після збору даних виконували калібрування параметрів приводу, при цьому отримано дуже високий коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,999$), що підтверджує якісну відповідність між встановленою нормою і фактичним внесенням. Це забезпечувало можливість у будь-який момент підібрати необхідні налаштування для заданої норми внесення добрив у перерахунку на P_2O_5 , причому діапазон регулювання становив від 0 до 200 кг/га P_2O_5 з кроком у 5 кг/га P_2O_5 .

Крім того, була створена спеціальна програма у середовищі LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) від компанії National Instruments (США, версія 6.1), яка забезпечувала збір спектральної інформації про ґрунт, здійснювала первинну обробку даних, а також дозволяла керувати системою змінного (VR) внесення добрив. Ефективність програмного забезпечення оцінювали шляхом вимірювання часу виконання алгоритмів на комп'ютерах із трьома різними частотами процесора: 366 МГц, 600 МГц та 3,2 ГГц, що дозволило оцінити вплив швидкодії обчислювальних ресурсів на роботу всієї системи.

2.3 Час затримки

Час затримки охоплює період, необхідний для проведення ґрунтового сканування, оброблення інформації програмними засобами, передавання керуючого сигналу, а також проміжок, потрібний аплікатору для реагування на встановлення оновленої норми внесення. Загальний час інерційності обладнання для внесення добрив умовно поділяють на два ключові етапи. Першим є технічна або машинна затримка — проміжок між переданням команди про зміну подачі мінеральних речовин і фактичним виконанням цього коригування механізмами дозування. Другу складову формує затримка масового потоку: це час від моменту, коли дозатор гранульованих добрив отримує новий режим роботи, до того, коли змінена кількість поживної

речовини реально надходить у борозну на полі, тобто починає контактувати з ґрунтом.

2.4 Час затримки механічного налаштування для зміни норми

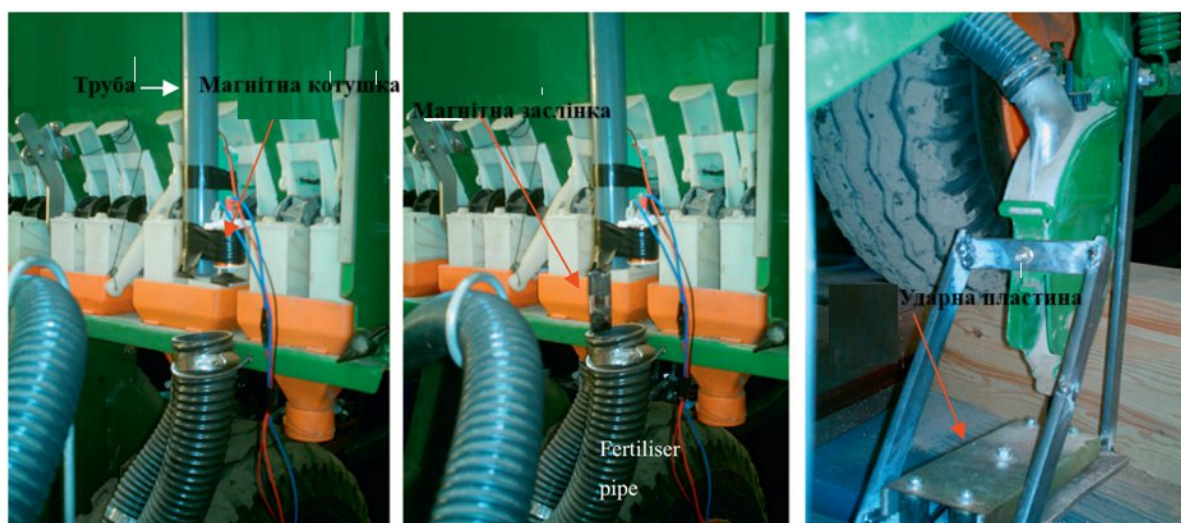
Через те, що електропривід не реагував миттєво на команду, яка надходила від програмованого контролера для зміни встановленої норми внесення добрив, затримка його спрацювання була врахована як складова загального часу відгуку системи. На аплікаторі додатково закріпили інкрементальний енкодер PKS09 (виробник SICK ISTEGMANN, Німеччина) (рис. 2), який фіксував момент початку та характер переміщення виконавчого механізму. Далі визначали тривалість переходу приводу з одного положення у наступне, здійснюючи інтегрування сигналів, що надходили від енкодера як зворотний зв'язок. Параметр часу затримки реєстрували під час зміни встановленої дози внесення добрив при різних кроках варіації — 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 і 200 кг/га P₂O₅. Вимірювання проводили для переходів як від нижчих норм до вищих, так і у зворотному напрямку, охоплюючи всі зазначені діапазони застосування.

2.5. Час затримки випадання добрива в статичних умовах вимірювання

Ще одним чинником виникнення часової затримки є проміжок, який потрібен гранульованому фосфору (P₂O₅), щоб дістатися до кінцевих трубок подавання добрива після зміни положення приводу для встановлення нової дозувальної норми. Власне, йдеться про час, протягом якого частинки добрива просуваються від дозуючих елементів до нижньої частини сформованої борозни, котру створюють робочі органи сошників під час руху сівалки полем.

Детектор із ударною пластиною монтували на завершенні трубопроводів для внесення добрив, безпосередньо поруч із сошниками. Його розташовували на тій же глибині, на якій у ґрунті формувалася борозенка для закладання поживних речовин. Вище дозувального механізму добрив у

вертикальному положенні закріплювали поліетиленову трубку так, щоб її нижній торець знаходився на одному рівні з вихідною частиною дозаторів



(рис. 3). Таке компонування забезпечувало відповідність висот і точність подачі гранульованого матеріалу під час дослідження.

Рис. 3 – Експериментальна установка для вимірювання часу затримки падіння добрива в тукопроводах, магнітний затвор у двох положеннях (а) закритий і (б) відкритий та ударна пластина (в), встановлена під сошниками ; зазор між пластиною і вихідним отвором вважався таким, щоб компенсувати довжину труби з верхньої сторони.

У кінцевій частині цієї трубки встановлено електромагнітний клапан, який забезпечує керування моментом початку падіння добрив через його відкриття. Проте для того, щоб гранульоване добриво безперешкодно потрапляло всередину трубопроводу, поліетиленовий відрізок було опущено на 110 мм вниз від початкового положення. Для компенсації цієї зміщеної довжини ударну пластину розташували на такій же відстані — 110 мм — відносно сошників.

Для визначення проміжку часу, який витрачають частинки добрива під час переміщення від дозаторів до зони сошників, застосовували програмне забезпечення LabVIEW (розробник — National Instrument, вер. 6.1). На початку кожного експерименту імпульсні сигнали фіксувалися з незмінною частотою, що подавалася сенсором ударної пластини. Після ручного поміщення гранул

усередину трубки система автоматично реєструвала часовий інтервал між запуском електромагнітного механізму та появою імпульсу, сформованого датчиком у момент удару частинки об пластину.

З метою підвищення достовірності результатів процедуру вимірювання виконували п'ятдесят разів. Дослідження проводили як для поодинокі гранули добрива, так і для їх групового падіння, коли в трубку одночасно завантажували повну ложку матеріалу. У варіанті з декількома частинками замість одиничного елемента в канал поміщали кілька гранул. Усі експериментальні тести здійснювалися в умовах відсутності руху агрегату, тобто на стаціонарному обладнанні.

2.6. Час затримки випадіння добрива за умови динамічного вимірювання

Визначення часу запізнення подачі матеріалу здійснюється однаково під час роботи приводу як у нерухомому стані, так і при наявності руху. Водночас коливання, що виникають в аплікаторі під час роботи, можуть змінювати траєкторію переміщення частинок добрив всередині розрядних трубок. Для аналізу можливого впливу таких вібрацій на показники затримки висіву доцільно проводити дослідні вимірювання в умовах, максимально наближених до реального поля. З метою спрощення експериментального налагодження польова ситуація була відтворена у лабораторних умовах шляхом використання спеціального вібраційного стенду з чотирма платформами (FPVS), що показано на рисунку 4.

Коливання, характерні для роботи техніки на ріллі, відтворювалися на основі методики, запропонованої Anthonis та співавторами (2020). У згаданих дослідженнях було зафіксовано динаміку вібрацій, встановивши по чотири датчики-акселерометри на кожну з осей трактора під час його функціонування на різних полях. На основі зареєстрованих відхилень було отримано низку синтетичних сигналів, що охоплювали широкий спектр умов, і впорядковано їх за п'ятьма рівнями амплітуди: 15, 20, 25, 30 та 35 мм.

У межах цієї роботи було сформовано нові вібраційні сигнали із збереженням типової частотної структури, середньої для основних варіантів польових умов. Амплітуда коливань на FPVS задавалася у діапазоні 15–35 мм, що повністю відповідало встановленим рівням. Задні тракторні колеса разом із колесами аплікатора сівалки розмістили на платформі стенду та запустили процес струшування. Показники часу падіння добрив реєстрували з використанням тієї ж процедури, що описана у підрозділі 2.5. Для кожного значення амплітуди вібрацій повторили 40 вимірювань, що забезпечило достовірність отриманих даних.



Рис. 4 – Вібраційні стійки з чотирма плакатами для струшування машини, що імітує польові умови; задні колеса трактора та два колеса аплікатора були розміщені на струшувальних підставках і вимірювався час затримки падіння добрива

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Час затримки для сканування ґрунту та обробки даних

Тривалість процесу спектрального сканування ґрунту визначається конструкцією та характеристиками конкретного спектрофотометра. Наприклад, прилад, виготовлений компанією **Zeiss**, забезпечує приблизно **500 мс** ефективного часу для зчитування спектрів відбиття ґрунтової поверхні, що дозволяє проводити вимірювання з малої дистанції. Водночас цей часовий інтервал, який інколи називають затримкою або лагом, спричиняє певне відхилення. Це обов'язково необхідно враховувати під час монтажу й налаштування датчика для аналізу ґрунту в польових умовах.

У технології змінної норми внесення добрив (VR), яка використовує сенсорне визначення властивостей ґрунту, дані про стан ґрунтового шару мають бути оперативно зібрані, опрацьовані та передані до аплікатора. Це потрібно для автоматичного коригування кількості внесених добрив у процесі руху техніки полем.

Таблиця 1 – Відстань (зсув) у метрах між датчиком ґрунту та вихідними отворами для добрив для компенсації часу затримки збирання даних на основі трьох швидкостей процесора комп'ютера

Швидкість трактора, км/год	Швидкість комп'ютерної обробки		
	366 MHz	600 MHz	3.2 GHz
2	0,361	0,143	0,019
3	0,542	0,214	0,029
4	0,722	0,285	0,039
5	0,903	0,357	0,048
6	1,083	0,428	0,058
7	1,264	0,499	0,067
8	1,444	0,571	0,077

Оперативність формування рекомендацій залежить від складності розрахунків, обсягу інформації, що підлягає аналізу, а також від

продуктивності обчислювальної системи. Для визначення цих параметрів було проведено вимірювання часу обробки даних на трьох комп'ютерах, що відрізнялися між собою швидкістю та технічними характеристиками.

Затримка сигналу, що виникала через процеси оброблення й компіляції інформації, становила відповідно 650, 395 і 135 мс при використанні трьох різних тактових частот ПК: 366, 600 та 3200 МГц. Підбираючи ці варіанти швидкодії обчислювальної системи, зважали на те, що робоча швидкість трактора під час проведення операцій сівби та внесення мінеральних добрив зазвичай знаходиться в межах близько 6–8 км/год, що створює потребу у коригуванні положення сенсора в напрямку руху. У таблиці 1 наведено параметри необхідного лінійного зсуву для встановлення ґрунтового датчика попереду вихідних каналів аплікатора добрив при використанні трьох рівнів швидкості комп'ютера та діапазону руху трактора від 2 до 8 км/год. Із представлених даних видно, що додаткове відставання або випередження становило від 0,019 м до 1,44 м: мінімальне значення відповідало роботі системи з процесором 3,2 ГГц за швидкості агрегату 2 км/год, а максимальне — при частоті 366 МГц і русі трактора зі швидкістю 8 км/год.

3.2 Час затримки механічного налаштування для зміни норми

Отримавши інформацію про необхідність встановлення іншої норми внесення, привідний механізм переходить до коригування положення важеля варіатора, що забезпечує зміну частоти обертання дозувальних пристроїв добрив. Унаслідок цього виконується дозування нової кількості поживних речовин на одиницю площі.

На рисунку 5 наведено значення часу затримки, потрібного для переходу між різними нормами внесення, які змінювалися з кроком 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 і 200 кг P₂O₅ на гектар.

Зі збільшенням різниці між поточною та заданою нормою зростає й тривалість роботи виконавчого механізму, необхідна для встановлення нової швидкості внесення. Так, для зміни норми на 1 кг/га P₂O₅ затримка становить

приблизно 21 мс. Це супроводжується зміщенням положення датчика в межах 0,011–0,088 м при русі трактора зі швидкістю від 2 до 8 км/год. Натомість при коригуванні дози на 20 кг/га P_2O_5 час уповільнення сягає 420 мс, що вимагає значно більшого додаткового зміщення датчика — від 1,27 до 5,07 м залежно від швидкісного режиму руху агрегату (2–8 км/год).

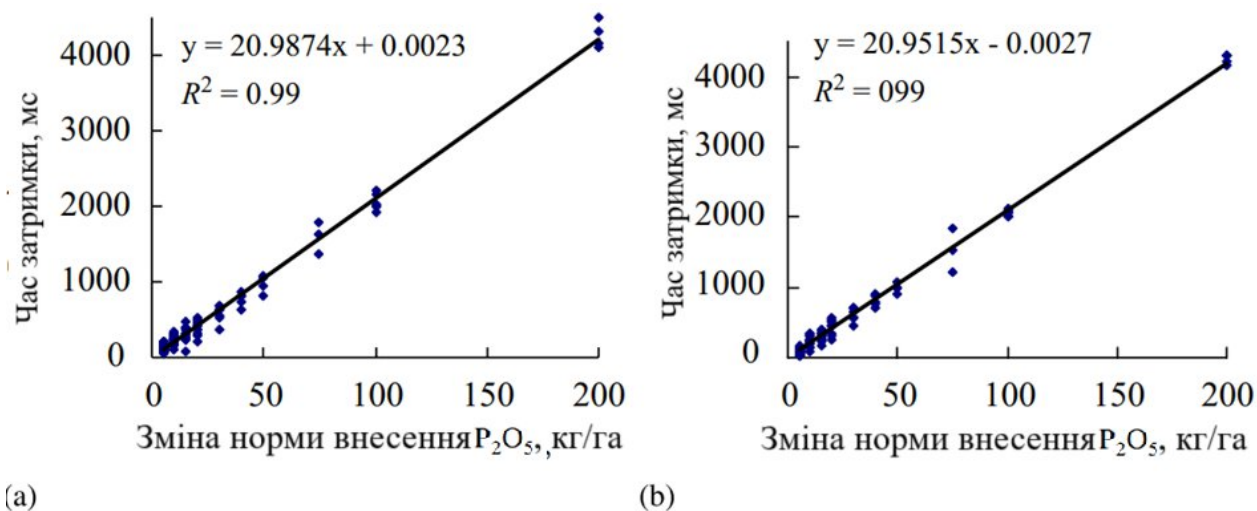


Рис. 5 – Час затримки, виміряний для зміни норми внесення з інтервалами 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 і 200 кг/га від 0 до 200 кг/га P_2O_5 для комерційного використання аплікатор добрив (ED302, AMAZONE): (a) вимірювання від нижчої норми до верхньої норми та (b) вимірювання від верхньої норми до нижчої норми

Зазначена затримка у встановленні нової норми спричиняє перехідний період внесення, коли фактична доза поступово змінюється від попередньої до бажаної. Наприклад, під час збільшення застосування добрива з 10 до 20 кг/га затримка дорівнює близько 0,21 с. За швидкості руху трактора 7 км/год це відповідає проходженню близько 0,4 м по поверхні поля. Таким чином, ділянка площею орієнтовно $3 \times 0,4 \text{ м}^2$ (за шириною робочого обладнання 3 м) отримує проміжну кількість добрива: від початкових 10 і поступово до цільових 20 кг/га. Застосування більш швидкодіючих механізмів приводу дає змогу зменшити площу такої перехідної зони, однак повністю усунути дане явище технічно неможливо.

3.3. Час затримки внесення добрив

Під час проведення статичних експериментів було встановлено, що добриву потрібен проміжок у приблизно 1116 мс, аби переміститися від дозуючих елементів до борозенних сошників аплікатора. Зазвичай значення цього інтервалу неоднакове для різних аплікаторів, оскільки на нього впливають конструкційні особливості трубопроводів, такі як їх довжина, вигини та вид матеріалу, з якого вони виготовлені. Дослідження в умовах динамічного навантаження продемонструвало скорочення часу затримки до 1008 мс у порівнянні зі статичними умовами. Ймовірною причиною цього є підвищена рухливість гранул, викликана вібраційною дією на внутрішню поверхню трубки.

Коли проводили вимірювання з окремими частинками добрив, тривалість їхнього осадження виявилася більшою, ніж при одночасному падінні кількох гранул. У статичних режимах цей час становив 1169 мс для одиничних частинок та 1062 мс для групи гранул.

У випадку динамічних тестувань зафіксовано 1061 мс для окремої гранули та 955 мс для їх сукупності. Зменшення часу при пересуванні групи гранул може пояснюватися тим, що система фіксувала момент прибуття найшвидшого елемента серед усіх частинок у потоці.

Підсумовуючи результати всіх типів дослідів, середня величина затримки переміщення добрив склала близько 1124 мс, і саме це значення було прийнято як загальний параметр затримки для роботи аплікаційної системи.

3.4. Визначення положення датчика відповідно до загального часу затримки

Як уже було зазначено, положення датчика, що визначає властивості ґрунту, може зміщуватися залежно від величини змін у нормі внесення та робочої швидкості машини. Існує два основні варіанти розміщення такого сенсора у системах диференційованого внесення добрив (VR-технологій).

Перший спосіб передбачає монтаж датчика безпосередньо на робочій платформі аплікатора, що дає змогу легко контролювати як сам сенсор, так і необхідну глибину внесення живлення в ґрунт. Однак відстань від вимірювального елемента до отвору, через який подаються добрива, залишається надто незначною, що не дозволяє сформувати потрібний час на реакцію при швидкості руху агрегату приблизно 6–8 км/год.

Другий варіант полягає у встановленні ґрунтового датчика на передній частині трактора, використовуючи окремий гідравлічний механізм навіски з трьома точками опори. Такий підхід створює більший проміжок між місцем вимірювання параметрів ґрунту та подачею добрив і, відповідно, забезпечує можливість точніше адаптувати норму внесення до реальних умов під час руху машини.

Дистанцію зміщення для розташування датчика в системі VR внесення добрив можна обчислити як

$$D = \frac{S_{Tr}(T_S + T_P + T_R + T_D)}{3.6} \quad (1)$$

де D – відстань зміщення між виходами датчика ґрунту та аплікатора в м; S_{Tr} – швидкість трактора в км/год; T_S – час сканування ґрунту в с; T_P – час обробки даних у с; T_R – час зміни норми внесення в с; T_D – час, необхідний для проходження добрива від дозуючих пристроїв до сошників у с.

У таблиці 2 наведено дані, що характеризують вплив швидкості руху трактора на необхідне зміщення для монтажу ґрунтового датчика при частоті роботи комп'ютера 600 МГц і різних межах зміни норми внесення фосфатних добрив. Саме швидкість агрегату є основним чинником, який визначає величину зсуву. Спостерігається суттєве збільшення відхилення, коли швидкість зростає в діапазоні від 2 до 8 км/год. Крім того, з таблиці 2 видно, що коливання норми внесення добрив також впливає на розташування датчика щодо вихідних отворів для подачі поживних речовин у ґрунт.

Якщо враховувати типовий робочий режим під час сівби та внесення добрив зі швидкістю приблизно 7 км/год, то оптимальна відстань для

встановлення датчика відносно розподільних отворів становить близько 3,83 м. У ситуації, коли сенсор монтується у передній частині трактора, фактична дистанція між ґрунтовим датчиком та отворами для подачі добрив, як правило, є більшою від необхідного зсуву, що забезпечує відповідність встановленим вимогам точного внесення.

Таблиця 2 – Зсув (м), необхідний для встановлення датчика ґрунту для швидкості комп'ютера 600 МГц при різних швидкостях трактора та різних інтервалах для внесення фосфату

Інтервал внесення P ₂ O ₅ , кг /га	Швидкість трактора, км/год						
	2	3	4	5	6	7	8
1	1,05	1,579	2,09	2,62	3,14	3,66	4,19
2	1,06	1,59	2,12	2,65	3,17	3,70	4,23
5	1,09	1,64	2,19	2,73	3,28	3,83	4,37
10	1,15	1,73	2,30	2,88	3,45	4,03	4,61
20	1,27	1,90	2,53	3,17	3,80	4,44	5,07
Час збору спектрів ґрунту становив 0,5 с.							

У такій ситуації до робочого програмного середовища LabVIEW можливо додати додатковий часовий інтервал затримки, який забезпечить компенсацію необхідного зміщення. Крім того, цей інтервал може динамічно змінюватися залежно від поточної швидкості системи. Вказану компенсаційну часову затримку допускається визначити у вигляді наступного математичного виразу:

$$\Delta t = \frac{3,6(L-D)}{S_{Tr}} \quad (2)$$

де Δt – додаткова затримка часу для встановлення датчика ґрунту на передній частині трактора в с, L – відстань між датчиком ґрунту та бороздорозпушувачами аплікатора (рис. 6) у м, D – вимкнений датчик ґрунту. задана потреба в м, S_{Tr} – швидкість трактора в км/год.

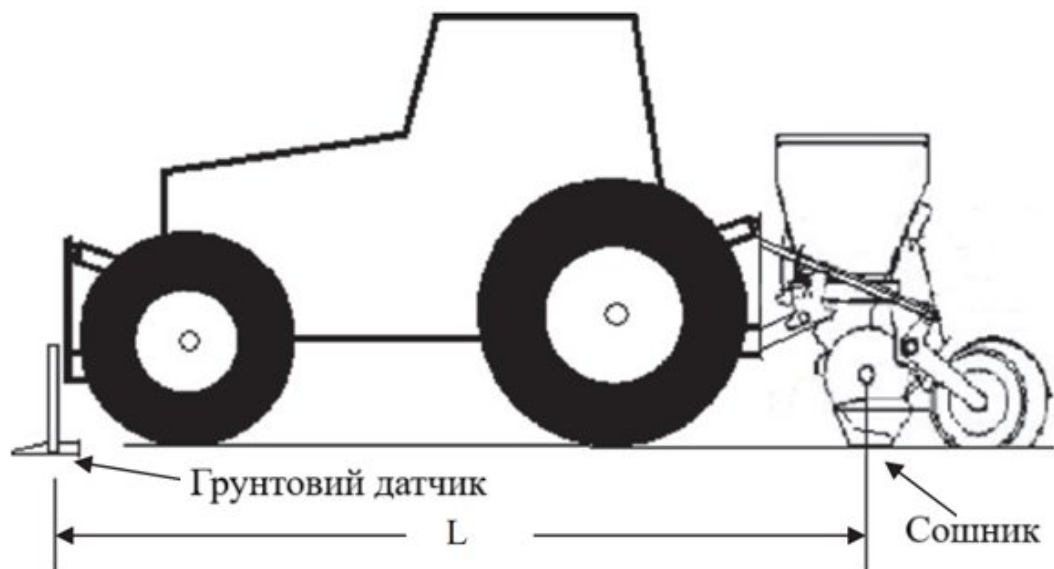


Рис. 6 – Схематична діаграма положення датчика ґрунту для системи внесення добрив із змінною нормою на основі датчика: L – відстань між датчиком ґрунту та сошниками

ВИСНОВКИ

Визначення часу реакції системи під час диференційованого внесення поживних речовин є необхідним для точного подавання встановлених доз у потрібних точках поля за допомогою VR-аплікатора, що функціонує на основі сигналів від датчика властивостей ґрунту. Цей сенсор монтується попереду механізму внесення добрив. На величину затримки впливає низка чинників: тривалість зчитування параметрів ґрунту, їх цифрова обробка, момент перемикання обладнання, зміна заданої норми, а також відстань між дозатором і робочими органами та швидкість руху сільськогосподарської машини — усі ці елементи потребують обов'язкового врахування.

Здобуті експериментальні дані свідчать, що для кожного зростання швидкості агрегату на 1 км/год потрібно зміщувати сенсор приблизно на пів метра вперед за ходом руху. До того ж неоднорідний розподіл поживних складників у ґрунтовому шарі додатково впливає на вимоги до такого коригування. Чим сильніше змінюється вміст поживних речовин по полю, тим більшого просторового випередження потребує датчик, оскільки система мусить компенсувати варіацію шляхом частішої зміни норми внесення.

Крім того, отримані результати підтверджують наявність інваріантної складової запізнення у надходженні добрив у будь-якій технологічній лінії внесення. Вона визначається геометрією, діаметром і довжиною подаючих трубок, які з'єднують дозувальну систему з вихідними отворами для подавання добрив у борозну.

Оптимальним розташуванням сенсора вважається передня частина трактора, адже саме там доступне найбільше можливе просторове випередження, що компенсує часові втрати. У випадках, коли механічного зміщення недостатньо для нейтралізації повного часу затримки, необхідно використовувати додаткову штучну паузу в передаванні керуючого сигналу на аплікатор, забезпечуючи тим самим точне внесення поживних речовин у відповідне місце польової ділянки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. [USDA-NASS]. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022. Available online: https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Chemical_Use/ (accessed on 13 November 2022).
2. Virk, S.; Meena, R. Pulse Width Modulation Technology for Agricultural Sprayers. University of Georgia Cooperative Extension, Athens, GA. Circular 1277; 2022; pp. 1–8. Available online: <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=C1277> (accessed on 14 February 2023).
3. Hou, Z.; Yang, H. Effects of soil fertilization periods and methods on the growth and fruiting of fruit trees. *Pract. Rural Technol.* 2019, 11, 48.
4. Liu, J.; Li, H.; Hao, B.; Qu, Z.; Han, L. Effects of different fertilization treatments on apple fruit quality and fruit tree growth. *Shaanxi Agric. Sci.* 2021, 67, 48–51
5. Du, J. Effect of Organic Fertilizer Substitution for Chemical Fertilizer and the Level of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Regulation on Apple Production. Master's Thesis, Shandong Agricultural University, Shanghai, China, 2022.
6. Сіяти соняшник зі змінною нормою чи ні? Результати дослідів 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/>.
7. Przywara, A.; Santoro, F.; Kraszkiewicz, A.; Ресуна, А.; Pascuzzi, S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture* 2020, 10, 467.
8. 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/>.

9. Amankulova K., Farmonov N., Mucsi L. Time-series analysis of Sentinel-2 satellite images for sunflower yield estimation, *Smart Agricultural Technology*, Vol. 3, 2023 DOI:10.1016/j.atech.2022.100098.

10. 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>.

11. 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/.

12. 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.

13. 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>.

14. 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/>.

15. 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>.

16. Wang, X. Analysis of the results of a trial of organic fertilizer replacing some chemical fertilizers in potatoes. *Mod. Agric.* 2021, 01, 56–57.

17. Wang, S.; Li, L.; Wu., D.; Liu, F.; Zhang, P. Experimental study on the effect of replacing chemical fertilizers with equal-nutrient commercial organic fertilizers. *Mod. Agric. Sci. Technol.* 2020, 12, 199–200.
18. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). *Precision Agriculture Basics*. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.
19. Jupp L. (2018). *Precision Farming From Above*. Writing Matters Publishing, 113 p.
20. Alameen, A.A.; Al-Gaadi, K.A.; Tola, E.K. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 160, 31–39.
21. Colaço, A., Bramley, R., 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *F. Crop. Res.* 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>.
22. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с.
23. Heiß, A., Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2020. Modelling and Simulation of a Fuzzy System for Site-Specific Nitrogen Fertilization. In: *Proceedings of the 21st IFAC World Congress (virtual)*, July 12-17, Berlin, Germany (in press).
24. Paraforos, D.S., Sharipov, G.M., Griepentrog, H.W., 2019. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Comput. Electron. Agric.* 163, 104863. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863>.
25. Mendes, W.R., Araújo, F.M.U., Dutta, R., Heeren, D.M., 2019. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Syst. Appl.* 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

Додатки