

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-5>

УДК 631.67:004.94

М. Л. Заєць¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-2290-1892

П. К. Погребніченко², асистент

ORCID: 0009-0005-1943-6538

¹ Поліський національний університет² Державний університет «Житомирська політехніка»

e-mail: mzaec81@gmail.com

РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОНТРОЛЕРА ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ В СИСТЕМІ ТОЧНОГО ЗЕЛЕРОБСТВА

Анотація. У статті запропоновано низьковартісний модернізований контролер диференційованого внесення (VRAC), який враховує неоднорідність ґрунту та сприяє впровадженню технологій змінної норми. У межах виробничих полів спостерігається значна просторова варіабельність ґрунтових умов, що впливає на ефективність використання ресурсів і продуктивність культур. Система базується на платформі Raspberry Pi з використанням RTK-сумісної GNSS, крокового двигуна та енкодера колеса. Контролер забезпечує високоточне регулювання норми внесення в реальному часі відповідно до карт-завдань. Реалізація за принципом plug-and-play дозволяє використовувати систему для диференційованого висіву та внесення добрив. Експериментально підтверджено високу точність роботи (97,17 %), низьку похибку (RMSE 4,57; $R^2 = 0,994$) та швидку реакцію системи. Запропоноване рішення є доступним і сприяє розвитку точного землеробства.

Ключові слова: точне землеробство, диференційоване внесення, контролер VRAC, Raspberry Pi, GNSS-навігація, кроковий електродвигун, автоматизоване керування, змінна норма внесення, агротехнологічні системи.

Постановка проблеми. Застосування комплексних добрив (надалі КД) є невід'ємною складовою вирощування сільськогосподарських культур на даний час. Використання КД з метою покращити показники родчості ґрунту та збільшення врожаності культур, постійно зростало протягом останніх років [1].

Ефективне та раціональне застосування РКД є важливим фактором для підвищення ефективності та продуктивності в рослинництві, та аграрній галузі в цілому. З метою безпечного та ефективного застосування важливо застосовувати технологічні системи точного внесення та мінімізувати похибку в дозуванні, та зменшити непотрібне потрапляння добрив за межі ділянки внесення. Застосовуючи сучасні передові методи управління технологічними процесами, одним зі способів досягнення цієї мети є використання сучасних технологій точного землеробства, такі як регулятори та контролери дози внесення [4, 5], автоматичне регулювання подачі добрив на секції машин для внесення КД, індивідуальний контроль дозаторів [6, 7] та системи диференційованого внесення (Variable Rate Application, VRA) [8, 9].

Точне землеробство здатне сприяти задоволенню зростаючого попиту на продовольчу продукцію, одночасно підвищуючи ефективність господарювання за рахунок оптимізації витрат на матеріально-технічні ресурси. Технології точного землеробства, зокрема диференційоване внесення (Variable Rate Application, VRA), забезпечують удосконалене управління ресурсами шляхом точного дозування технологічних матеріалів – насіння, мінеральних добрив, зрошувальної води, вапна та засобів захисту рослин. Це сприяє підвищенню ефективності аграрного виробництва.



Технологію VRA можна розглядати як базовий інструмент реалізації заходів із захисту клімату та підвищення економічної результативності виробництва. Застосування диференційованого внесення забезпечує точність дозування матеріалів, зменшує їх перевитрати та мінімізує негативний вплив на довкілля. Зокрема, знижується вимивання поживних речовин у ґрунтові та поверхневі води, а також скорочуються викиди парникових газів [10–14].

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження підтвердили, що раціональне дозування рідких добрив та інших агрохімічних матеріалів сприяє запобіганню надлишковому накопиченню поживних речовин у ґрунті, підтриманню його родючості та підвищенню врожайності культур [10, 11, 13, 15].

З економічної точки зору технологія диференційованого внесення (VRA) забезпечує зниження виробничих витрат шляхом оптимізації використання матеріальних ресурсів. Адаптивність VRA до кліматичних умов і використання сучасних цифрових технологій для прийняття рішень на основі даних роблять її невід’ємною складовою сталих агротехнологій [8, 9].

Дослідження, проведене Schimmelpfennig (2018) на основі аналізу 750 тисяч полів сої, передбачало порівняння витрат на внесення добрив залежно від рівня просторової варіабельності ґрунту. Оцінювання продуктивної варіабельності здійснювалося за допомогою індексу (NCCPI), нормованого в межах від 0 до 1. Результати показали, що господарства з низькою варіабельністю ґрунтів мали витрати на добрива в середньому 54,73 дол. США на гектар, тоді як у господарствах із високою варіабельністю цей показник становив лише 2,75 дол. США на гектар (за умов індивідуалізованого внесення).

Отримані дані свідчать про суттєвий вплив технологій змінної норми внесення на зниження витрат і підвищення економічної ефективності виробництва залежно від ґрунтових умов.

Попри те, що технологія змінної норми внесення (VRT) застосовується з 1990-х років, за даними звітності United States Department of Agriculture (2023), лише 27 % фермерських господарств США використовують практики диференційованого управління посівами. Водночас 19 % виробників перебувають на етапі впровадження цієї технології, тоді як 28 % орних земель уже обробляються із застосуванням VRT.

Разом із тим сучасні машини, оснащені системами змінної норми внесення, зазвичай характеризуються високою вартістю. Значні капіталовкладення в обладнання для VRT, особливо для сучасних сівалок, а також потреба у фахівцях із відповідним рівнем технічної підготовки для експлуатації та обслуговування таких систем є суттєвими бар’єрами для їх впровадження в малих фермерських господарствах.

Таким чином, основними чинниками, що стримують поширення VRT, залишаються висока вартість технічного оснащення та необхідність спеціалізованих знань і навичок для роботи з цими системами, що особливо ускладнює їх доступність для дрібних сільськогосподарських виробників.

Низка досліджень, спрямованих на розроблення доступних систем змінної норми внесення (VRT), створила підґрунтя для подальших інновацій у сфері точного землеробства з метою зниження витрат для малих фермерських господарств.

Зокрема, у дослідженні Coelho та співавт. (2020) було розроблено низьковартісний контролер змінної норми внесення, інтегрований в однорядну ручну сівалку. Система використовувала електродвигун постійного струму, керований одноплатним комп’ютером BeagleBoard.org BeagleBone Black. Випробування проводилися під час висіву кукурудзи в різних зонах управління. Контролер автоматично регулював густоту висіву відповідно до карт-завдань, що підтвердило можливість використання доступних компонентів (загальна вартість 337,97 дол. США) для реалізації елементів точної сівби, придатних для малих господарств.

Інше дослідження, виконане MirzakhaniAfshar та співавт. (2021), було присвячене створенню аплікатора добрив зі змінною нормою внесення, здатного виявляти дефіцит азоту в режимі

реального часу безпосередньо в польових умовах та відповідно коригувати норму внесення. Система базувалася на мікроконтролері, який отримував сигнали від азотного сенсора та регулював клапан із широтно-імпульсною модуляцією (PWM), змінюючи частоту обертання гідравлічного двигуна. Орієнтовна вартість такої системи становила близько 700 дол. США.

Наведені приклади демонструють, що розроблення економічно доступних рішень для VRT є реалістичним напрямом підвищення рівня впровадження технологій точного землеробства серед дрібних і середніх агровиробників.

У 2026 році прогнозоване споживання азотних добрив під посіви кукурудзи в Україні, визначене методом лінійної регресійної інтерполяції на основі даних (USDA) за 2003 ... 2024 роки, становить орієнтовно 3,4 ... 3,5 млн тонн.

Прогнозований обсяг виробництва кукурудзи у 2026 році оцінюється на рівні 29,9 млн тонн, що на 11,2 % більше, порівнюючи з минулим маркетинговим роком, хоча і на 6,8 % менше за середній показник останніх 5 років.

Отримані розрахунки свідчать про значний економічний потенціал застосування технологій диференційованого внесення в системах точного землеробства.

Сучасні механізми контролерів змінної норми внесення (VRT) часто базуються на використанні сигналів широтно-імпульсної модуляції (PWM) для керування виконавчими електродвигунами постійного струму. Такий підхід може спричиняти часові затримки при перетворенні вхідних сигналів від польових сенсорів або GNSS-навігації до керуючого впливу на виконавчий механізм. Крім того, в окремих системах VRT як основний обчислювальний модуль застосовуються програмовані логічні контролери (PLC), які були розроблені переважно для промислових умов експлуатації та демонструють оптимальну ефективність у закритих виробничих середовищах, а не в польових агротехнологічних умовах.

Сучасний ринок сільськогосподарської техніки також пропонує нові апарати для внесення матеріалів без функцій диференційованого регулювання. Наприклад, продукція компанії John Deere, зокрема сівалка John Deere 1590 No-Till Drill, а також обладнання типу Agromaster Seed Drills, Landoll 5000 Series Grain Drill та пневматична сівалка Gandy OrbitAir, постачається як стандартне обладнання, яке після придбання розраховане на роботу приблизно на 15 000 гектарів без функцій VRT.

Формулювання мети досліджень. Аналіз літературних джерел показав, що більшість попередніх досліджень, які вивчали вплив не варіативного внесення добрив на навколишнє середовище та значні економічні витрати, за рахунок неефективного застосування [10–14, 15]. Однак якісні показники диференційованого адаптивного застосування залишалися поза увагою. Зокрема, більшість робіт не досліджували, яким чином технології точного внесення КД, відповідно контролери дози внесення, дадуть змогу адаптивно за потреби підвищити ефективність під час застосування рідких азотних чи інших добрив.

Інвестиції в сільськогосподарську техніку часто характеризуються ефектом «заморожених витрат», оскільки після придбання обладнання вкладені кошти стають незворотними, що формує так звані комітовані витрати.

Отже, метою даного дослідження є розроблення та експериментальне оцінювання ретрофитного контролера VRAC для модернізації вже наявних аплікаторів із використанням просторової варіабельності агроумов та існуючого машинного парку, що сприятиме підвищенню рівня впровадження технологій змінної норми внесення.

Основна частина. Вимоги до конструкції VRAC (SDSU-VRAC) охоплюють кілька критично важливих функціональних компонентів, кожен з яких має специфічні технічні параметри. Модернізація висівного апарата повинна забезпечувати безшовну інтеграцію виконавчого механізму та систем зворотного зв'язку з сенсорами.

Розроблення контролера VRAC передбачає забезпечення швидкої реакції системи для динамічного коригування норми висіву на основі вхідних даних у режимі реального часу. Процедури калібрування та експериментального оцінювання є ключовими етапами дослідження, оскільки потребують високої точності налаштування для забезпечення надійності та стабільності роботи контролера в різноманітних польових умовах.

Модифікація висівного апарата. Ретрофитний контролер змінної норми внесення був розроблений та випробуваний на чотирирядному аплікаторі Gandy Company (модель P454WP12 – аплікатор поживних речовин із чотирма виходами), що показано на (рис. 1, а).

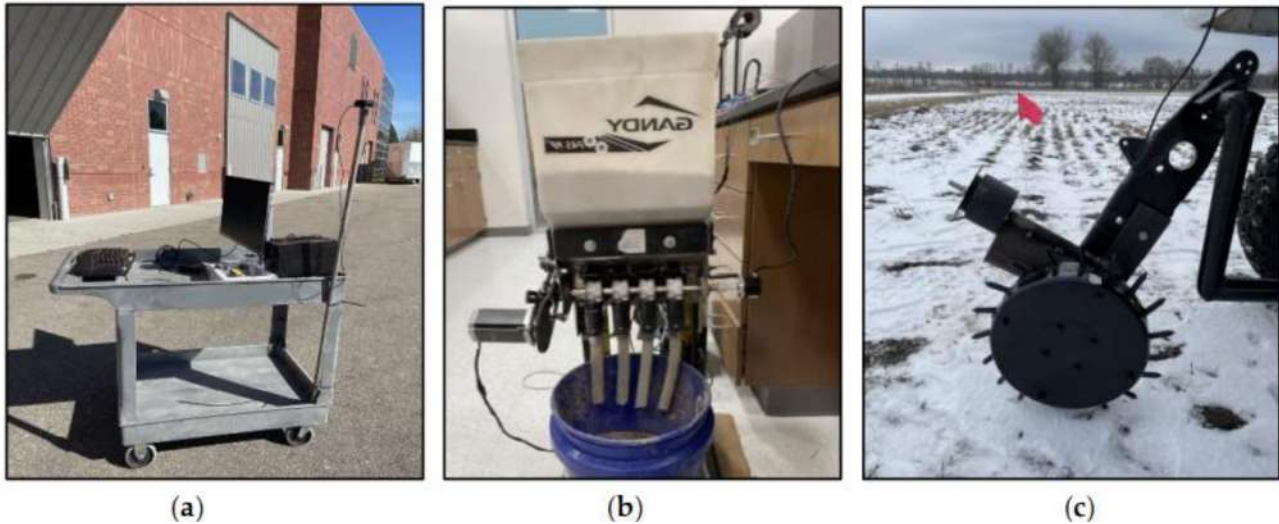


Рис. 1. Розробка системи SDSU-VRAC: (а) розроблення та випробування контролера SDSU-VRAC; (б) модернізація чотирирядного аплікатора Gandy Company; (с) випробування протиковзного приводного колеса

Джерело: розроблено авторами

Модифікація апарата включала доопрацювання чотирьох дозувальних висівних коліс, встановлення крокового двигуна типу NEMA 23 із крутним моментом 3 Н·м, який з'єднувався ланцюговою передачею зі зірочкою з передавальним відношенням редукції 1:2 відносно головного дозувального вала.

Додатково було встановлено інкрементний енкодер колеса для контролю виходу висівного матеріалу (рисунок 5b) та протиковзне приводне колесо з ґрунтовим контактом для керування електродвигуном, як показано на рисунку 5с.

Технічні характеристики компонентів, а також вартість системи контролера змінної норми внесення наведено в табл. 1.

Структура системи SDSU-VRAC представлена на (рис. 2.). Вхідними даними є інформація від GNSS-модуля для визначення просторового положення агрегату в полі та карта-завдання з диференційованими нормами внесення технологічного матеріалу.

Отримані сигнали обробляються на платформі Raspberry Pi, яка виконує функції керуючого обчислювального модуля системи. Через драйвер двигуна здійснюється керування кроковим електродвигуном, що забезпечує виконання технологічних операцій, таких як висів насіння або внесення добрив відповідно до заданої карти-завдання.

Додатково інкрементний енкодер забезпечує передачу сигналів зворотного зв'язку про режим роботи двигуна до обчислювального модуля, що дозволяє підтримувати параметри технологічного процесу відповідно до запрограмованих норм внесення. Така архітектура забезпечує підвищену точність та стабільність функціонування контролера в польових умовах.

Таблиця 1

Технічні характеристики контролера змінної норми внесення

Кількість	Компонент	Технічна характеристика	USD/од.
1	Raspberry Pi 4 Model B	4 ГБ RAM, 64-бітний чотириядерний процесор 5 GHz, 40 GPIO	90
1	GNSS-приймач	Прийом сигналів GLONASS, Galileo, BeiDou; точність позиціонування до 10 мм	275
1	SparkFun Electronics Arduino Qwiic	ATMega328P, інтерфейс USB-C	22
2	Інкрементний енкодер	600 імп/об, АВ канал, NPN-вихід	19
1	Кроковий двигун NEMA 23	Крутний момент 3 Н·м; кут кроку 1,8° (200 кроків/об); струм 4,2 А	40
1	Драйвер крокового двигуна	Логічна напруга 5–24 В; сигналізаційний вихід; робочий струм 1,0–4,2 А; напруга живлення 20-50 В	29
1	Монітор	7-дюймовий LCD-дисплей, роздільна здатність 024 × 600 IPS	50
1	Акумулятор	12 В, 75 А·год, глибокий цикл перезарядження	140
–	Електричні комплектуючі	Екрановані кабелі, конектори та допоміжні матеріали	50
	Загальна вартість		715

* Ціни є орієнтовними та відповідають вартості обладнання на час проведення дослідження; у майбутньому можливі зміни вартості компонентів.

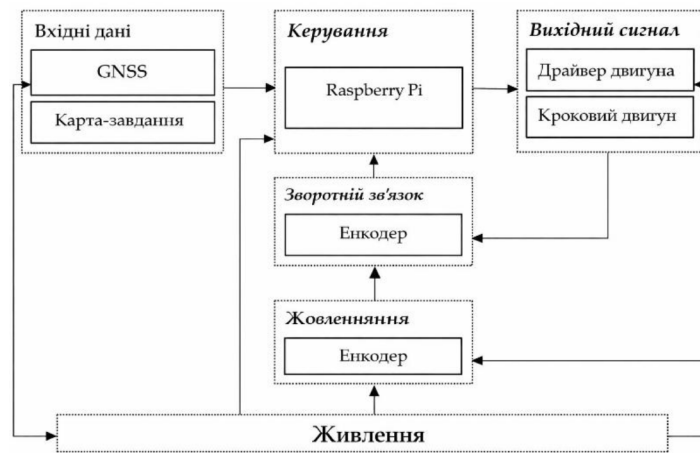


Рис. 2. Блок-схема системи керування зворотнім зв'язком

Джерело: розроблено авторами

Розроблений у цифровій лабораторії Житомирської політехніки, SDSU-VRAC, показаний на рис. 3 (a–i), потребує стандартного джерела живлення 12 В (a) і складається з інкрементального енкодера (b), GNSS (c) та флеш-пам'яті (d) як пристроїв введення, Raspberry Pi 4 (e) як процесорного блоку, монітора (f), драйвера крокового двигуна (g) і двигуна (h) як пристроїв виведення, з використанням зворотного зв'язку від інкрементального енкодера (i). Другий інкрементальний енкодер був використаний для вимірювання кутової швидкості обертання та положення валу висівного апарата.

Процес починається з того, що система зчитує карту приписів з USB-накопичувача та визначає позицію машини для забезпечення її відповідності певним зонам. Далі машина реєструє імпульси руху, коригує співвідношення імпульсів відповідно до заданої щільності та здійснює керування для застосування необхідної технологічної обробки. На завершення система записує дані зворотного зв'язку на карту для подальшого використання, як показано на рис. 4.

У таблиці 2 наведено вимоги до електроживлення компонентів системи SDSU-VRAC. Raspberry Pi 4 працює при напрузі 5 В і струмі 3 А, споживаючи 5 Вт потужності. GNSS-

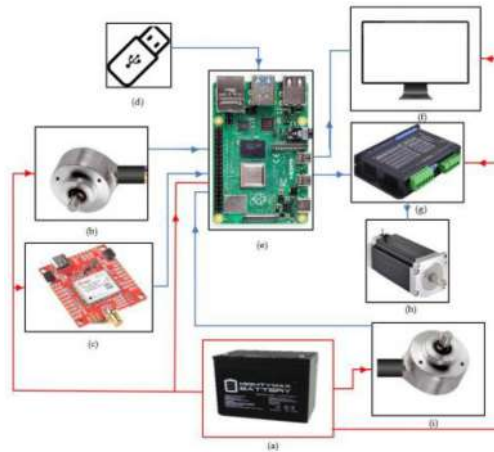


Рис. 3. Компоненти VRAC:

(a) джерело живлення 12 В, (b) колісний енкодер, (c) GNSS, (d) карта приписів, (e) Raspberry Pi, (f) монітор, (g) привод двигуна, (h) кроковий двигун та (i) енкодер зворотного зв'язку.
Джерело: розроблено авторами

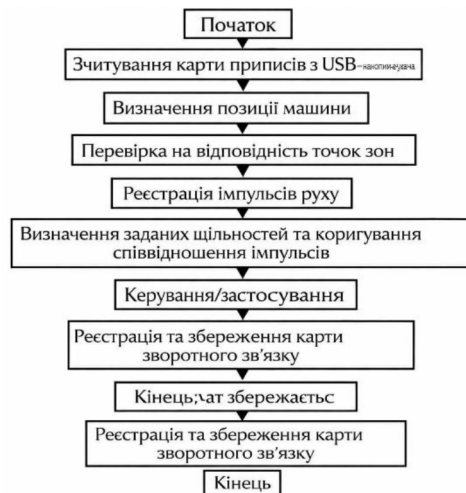


Рис. 4. Схема управління мехатронним процесом

Джерело: розроблено авторами

модуль може працювати при напрузі 3,3 або 5 В і споживає струм від 0,085 до 0,13 А, що відповідає потужності 0,65 Вт. Аналогічно Sparkfun Arduino потребує напругу 7–12 В при струмі 1,5 А, загальне споживання становить 1,0 Вт. Інкрементальний енкодер, що працює в діапазоні напруги 5–24 В, споживає 0,16 А та використовує 0,8 Вт потужності.

Двигун NEMA 23, який функціонує в межах 12–36 В, споживає струм 4,2 А та використовує 3 Вт потужності. Крім того, драйвер крокового двигуна, що працює в діапазоні 20–50 В і споживає струм від 1 до 4,5 А, має логічний варіант керування 5/24 В; його потужність залежить від крутного моменту двигуна. Монітор, який потребує 12 В, споживає 15 Вт потужності. Загальне енергоспоживання зазначених компонентів становить 28,45 Вт.

Акумулятор ємністю 12 В, 75 А·год здатний безперервно жити систему із споживаною потужністю 28,45 Вт приблизно протягом 31,65 год. Це розрахункове значення, а фактична тривалість роботи може змінюватися залежно від таких чинників, як ступінь зношення акумулятора, температурні умови та ефективність системи перетворення електроенергії. У практичних умовах розроблений контролер може житися від стандартних клем живлення трактора напругою 12 В.

Таблиця 2

Споживання потужності контролера

Компонент	Необхідна напруга	Струм, А	Споживана потужність
Raspberry Pi 4	5 V	3 А	5 W
GNSS приймач	3,3/5 V	0,085–0,13 А	0,65 W
Sparkfun Arduino	7–12 V	1,5 А	1,0 W
Інкрементальний енкодер	5–24 V	0,16 А	0,8 W
Двигун NEMA 23	12–36 V	4,2 А	3 W
Драйвер крокового двигуна	20–50 V	1–4,5 А	–
Монітор	12 V	–	15 W
Разом			28,45 W

Оскільки дослідний висівний механізм (модифікований дозуючий апарат Gandy) спочатку не був призначений для висіву пшениці із застосуванням електронних систем керування, налаштування електропривода SDSU-VRAC було відкалібровано відповідно до розробленого експериментального зразка.

На основі рекомендацій [35] було побудовано калібрувальну характеристику норм висіву пшениці, яка використовується як довідкова та калібрувальна база (рис. 5).

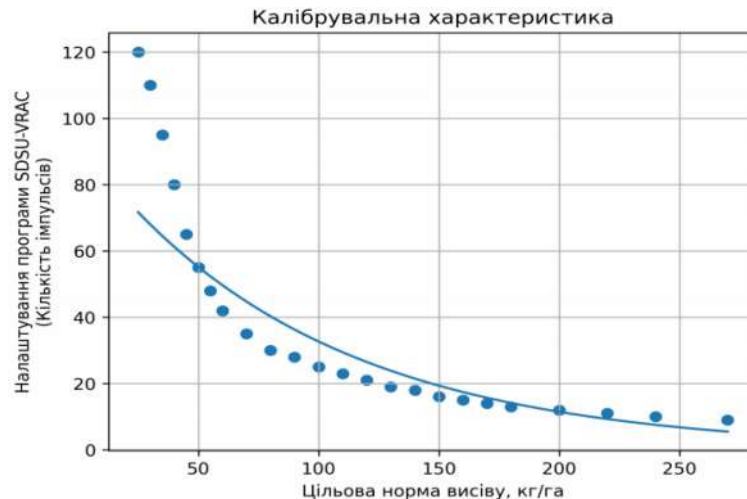


Рис. 5. Характеристика калібрування висівного апарату

Джерело: розроблено авторами

На площі 0,8 га експеримент проводили за рандомізованою схемою, що включала 42 контрольні точки, розміщені на відстані 45 м одна від одної, для оцінювання точності та прецизійності висіву насіння системою (рис. 6).

Крім того, було створено іншу карту-завдання (рис. 7), яка складалася з 5 зон, розташованих через 60 м. Вона використовувалася для оцінювання часу реакції системи під час зміни норми висіву при переході з однієї зони в іншу.

Обидві дослідні ділянки були промарковані для забезпечення контролю та оцінювання ефективності роботи модернізованої системи VRAC.

Зони були обрані відповідно до плану експерименту для ефективно оцінки роботи розробленого контролера. Крім того, для забезпечення достовірності результатів необхідно проводити кілька повторностей (щонайменше 3), особливо при роботі з даними з високою варіабельністю, такими як норми висіву. Більша кількість повторень дозволяє точніше виявити закономірності та зменшити вплив викидів. Додатково збільшення кількості повторностей дає змогу суттєво звужити довірчі інтервали, забезпечуючи більш точні оцінки ефектів обробок.

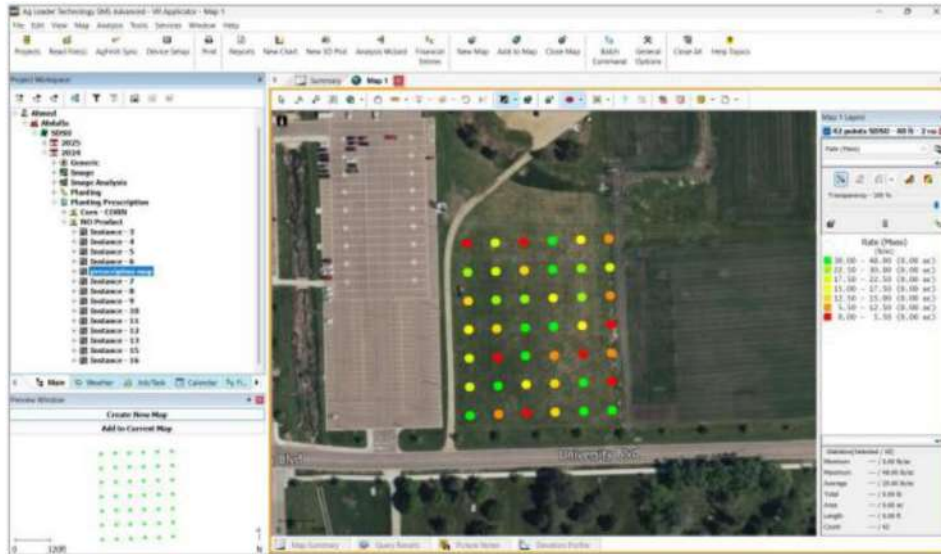


Рис. 6. Карта завдання висіву для дослідної ділянки з рандомізованим планом експерименту
Джерело: розроблено авторами

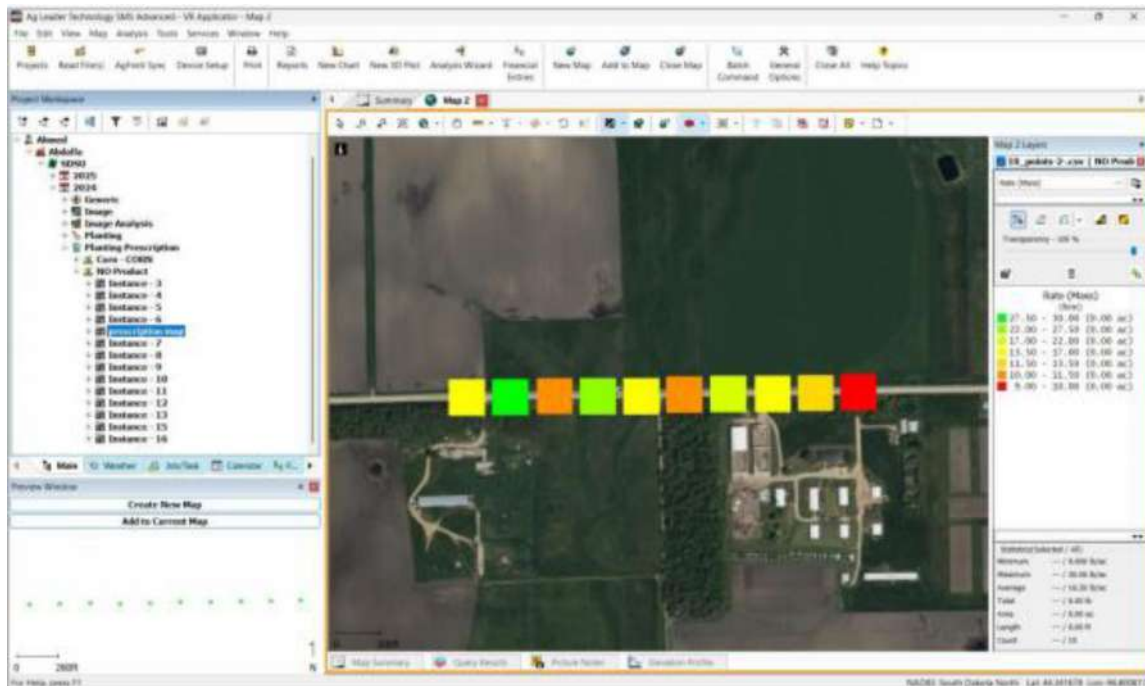


Рис. 7. Карта оцінки часової реакції для різних швидкостей і норм висіву
Джерело: розроблено авторами

Оцінка продуктивності висівного апарата. Експериментальне поле було розмічено 56 прапорцями для встановлення меж кожної зони. Модифікований висівний апарат Gandy був розміщений у кузові вантажівки, а протиковзний енкадер колеса встановлено в задній частині до його причіпного пристрою. Під час руху з фіксованою швидкістю 8 км/год висівний патрубков розміщували у пластиковому пакеті, який замінювали на межах зон для розділення норм висіву в кожній зоні; після цього пакети окремо зважували в лабораторії. Для проведення оцінювання були потрібні два оператори: один керував вантажівкою, а інший відбирав зразки, як показано на рис. 8.

Експеримент проводився на дослідній ділянці Дослідного поля університету, на відрізку дороги довжиною 300 м. Дорогу було поділено на 5 зон, а на межі кожної зони через кожні



Рис. 8. Оцінювання подачі насіння висівним апаратом

Джерело: розроблено авторами

60 м встановлено прапорець. Експеримент проводили за 6 різних швидкостей і 6 різних норм висіву.

На вікні вантажівки було нанесено контрольну смугу, вирівняну з GNSS-приймачем, закріпленим на даху автомобіля. Для фіксації сигналів, що надсилалися від контролера до електродвигуна для зміни норми висіву, використовувався осцилограф. Осцилограф також був підключений до ручної кнопки, яка подавала сигнал на межі зони. Під час руху вантажівки один оператор керував транспортним засобом, а інший відбирав зразки, натискаючи кнопку в момент, коли прапорець вирівнювався з контрольною смугою, як показано на рис. 9.

Дані були випадково відібрані та протестовані для 8 варіантів обробки. Для оцінювання точності та прецизійності висівної подачі використовували такі показники: середню похибку (ME) (рівняння 1), середньоквадратичну похибку (RMSE) (рівняння 2), коефіцієнт детермінації (R^2) (рівняння 3), похибку (рівняння 4), точність (рівняння 5) та прецизійність (рівняння 6).

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - X_i), \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - X_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X}_i)^2 (\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})^2}} \right]^2, \quad (3)$$

$$\text{похибка\%} = \frac{\bar{X}_i - \hat{X}_i}{\hat{X}_i} \times 100, \quad (4)$$

$$\text{достовірність \%} = (100 - \text{похибка}) \%, \quad (5)$$

$$\text{прецизійність (точність)} = 100 - \text{STD}, \quad (6)$$

де \hat{X}_i, X_i, N – відповідно фактичне значення, виміряні зразки та кількість зразків.

Осцилограф також був підключений до ручної кнопки, яка використовувалася для подачі сигналу на межі зони. Під час руху вантажівки один оператор керував транспортним засобом,

а інший відбирав зразки, натискаючи кнопку в момент, коли прапорець вирівнювався з контрольною смугою, як показано на рис. 9.

Було проведено рандомізований експеримент (рис. 10) для оцінювання ефективності подачі насіння. Для оцінювання роботи системи SDSU-VRAC використано вісім різних норм висіву:

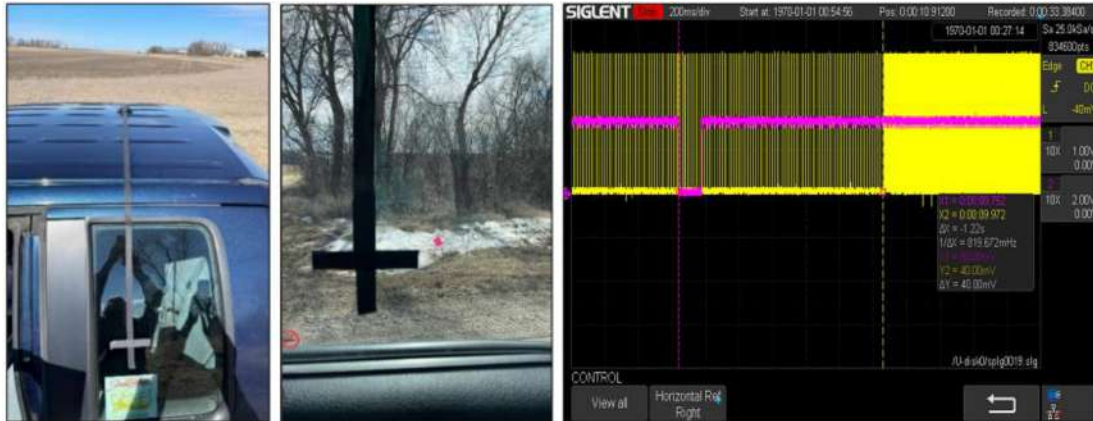


Рис. 9. Схема проведення випробування часової реакції системи

Джерело: розроблено авторами

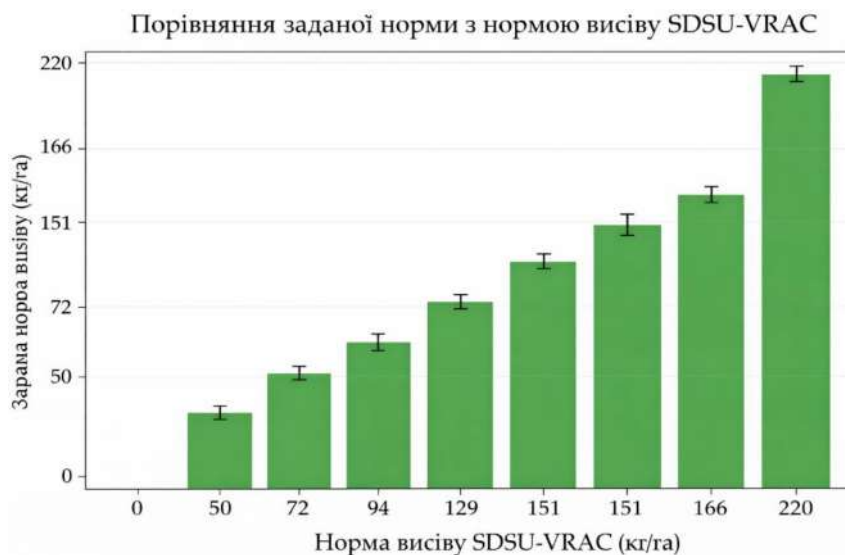


Рис. 10. Порівняння заданої норми висіву з нормою подачі SDSU-VRAC

Джерело: розроблено авторами

0, 50, 72, 94, 129, 151, 166 та 220 кг/га. Ці значення були обрані з урахуванням можливостей дослідного поля забезпечити випробування з різними нормами.

Загалом було виділено 42 зони розміром 15×15 м кожна. Розрахунок фактичної подачі насіння здійснювали для чотирьох рядків із міжряддям 2,5 м за сталої швидкості руху 8 км/год із п'ятьма повторностями.

Використання восьми різних норм висіву, від дуже низьких до дуже високих – забезпечує комплексну оцінку роботи контролера в широкому діапазоні умов. Такий підхід дозволяє перевірити здатність системи стабільно подавати задану кількість насіння незалежно від встановленої норми.

Випробування також оцінюють, наскільки ефективно контролер здійснює переходи між різними нормами, перевіряючи стабільність роботи в часі та за різних налаштувань. Крім того,

використання норм, що перевищують або є нижчими за типові робочі значення, фактично виступає стрес-тестом, перевіряючи систему за межами звичайних експлуатаційних параметрів.

У таблиці 3 наведено статистичний аналіз подачі насіння, де стандартне відхилення (STD) знаходиться в діапазоні від 0 до 8,68 кг, коефіцієнт варіації (C.V.) становить 4,59, середньо-квадратична похибка (RMSE) – 5,13 кг, середня похибка – 0,85, а коефіцієнт детермінації R^2 – 0,9948, як показано на рис. 11.

Таблиця 3

Статистичний аналіз подачі насіння

Варіант дослідю	Середнє значення	Мінімум	Максимум	Стандартне відхилення (STD)	Коефіцієнт варіації (C.V.), %
Варіант 1	0 кг	0 кг	0 кг	0 кг	0
Варіант 2	48,44 кг	43,95 кг	53,82 кг	4,53 кг	8,38
Варіант 3	75,53 кг	68,17 кг	80,73 кг	6,30 кг	7,48
Варіант 4	95,62 кг	91,49 кг	104,05 кг	6,23 кг	5,84
Варіант 5	129,35 кг	124,68 кг	134,55 кг	4,82 кг	3,34
Варіант 6	142,98 кг	133,65 кг	152,49 кг	7,47 кг	4,69
Варіант 7	158,23 кг	145,31 кг	165,94 кг	8,68 кг	4,92
Варіант 8	226,22 кг	220,66 кг	233,22 кг	5,22 кг	2,07

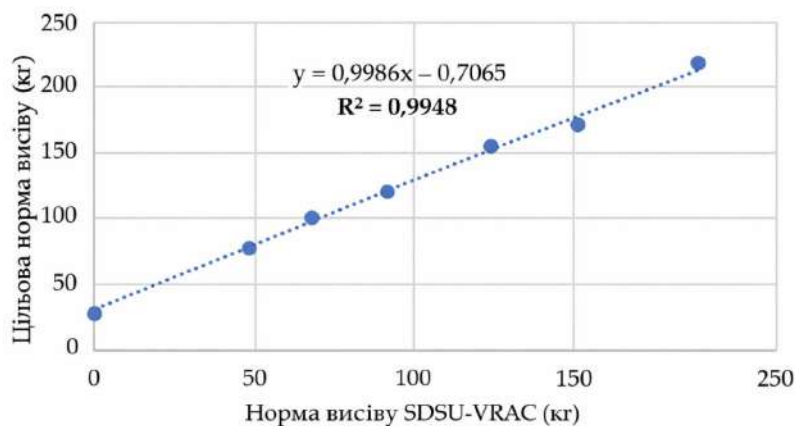


Рис. 11. Графік взаємозв'язку між цільовою нормою висіву та нормою подачі SDSU-VRAC, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,0994$ для 8 варіантів дослідю

Джерело: розроблено авторами

У межах варіантів дослідю варіант 1 не мав варіації, середня маса становила 0 кг. Для варіанта 2 середня маса становила 48,44 кг у діапазоні від 43,95 до 53,82 кг.

Загалом стандартне відхилення вихідної норми висіву відображає тенденцію до зростання зі збільшенням середньої норми висіву. Це свідчить про те, що зі збільшенням норми висіву варіативність також має тенденцію до зростання. Однак у варіантах 5 і 8 демонструють значні відхилення від цієї тенденції, характеризуючись нижчими за очікувані значення стандартного відхилення. Ці винятки можуть бути зумовлені специфічними експлуатаційними факторами, пов'язаними з в'язкістю насінин пшениці та швидкістю обертання висівного колеса за певних умов роботи. Однією з можливих причин таких відхилень є динаміка руху насіння, що змінюється при підвищенні робочої швидкості.

За певних вищих швидкостей в'язкість насіння може взаємодіяти з висівним колесом непередбачуваним чином. При збільшенні швидкості обертання висівного колеса насіння може зазнавати підвищеного опору руху або тертя, що впливає на рівномірність проходження через висівний отвір.

Крім того, швидше обертання висівного колеса може спричинити нерівномірний потік насіння, коли воно подається з різною інтенсивністю через фізичні збурення та коливання потоку всередині бункера.

Стандартне відхилення середніх вимірних зразків знаходилося в діапазоні від 0 до 8,68 кг, як наведено в табл. 4. Норма внесення та відповідні похибки системи SDSU-VRAC представлені на рис. 12. Значення похибки змінювалися в межах від -5,51 % до 3,67 %, при середній похибці 2,82 %, що детально показано на рисунку 17а.

Результати для середніх вимірних зразків продемонстрували точність 96,17 % та прецизійність 95,15 %.

Таблиця 4

Результати точності, прецизійності та похибки

Швидкість	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	Середнє
Цільова норма, кг/га	0	50	73	94	129	151	166	220	–
Середнє значення, кг/га	0	48,43	75,52	95,62	129,34	142,98	158,23	226,22	–
STD	0	4,53	6,3	6,23	4,82	7,47	8,68	5,22	1,764
Точність, %	100	96,03	96,33	98,44	99,65	94,49	95,38	97,02	96,17
Прецизійність, %	100	96,4	95	95	96,1	94	93,1	95,8	95,15
Похибка, %	0	-3,97	3,67	1,56	0,35	-5,51	-4,62	2,97	2,83

Примітка: інтенсивність норми висіву відображає градацію інтенсивності подачі насіння.

Похибки вимірювань у порівнянні з цільовими нормами, представленими на рис. 12, становлять: 0 кг для першої норми внесення, 1,98 кг для 50 кг, 2,68 кг для 73 кг, 1,47 кг для 94 кг, 0,4 кг для 129 кг, 8,32 кг для 151 кг, 7,66 кг для 166 кг та 6,55 кг для 220 кг.

Гістограма кластерів, представлена на рис. 12, ілюструє кореляцію між швидкістю руху та часом, необхідним для зміни робочої норми з однієї зони на іншу. При цьому значення $R^2 = 0,505$ свідчить про наявність 50,5 % кореляції між швидкістю та часом реакції системи на зміну норми.

Варіації у часовій відповіді частково обумовлені похибкою вимірювань оператора. В середньому зафіксований час, необхідний для переходу між нормами, становив 0,867 с, із діапазоном відхилень приблизно $\pm 0,3$ с.

На основі ширини аплікатора 63,5 см зміщена цільова норма (кг) унаслідок затримки часової відповіді коливалася в межах від 0 до 0,13 кг. Відповідні зміщення по дистанції становили 2,22; 3,06; 4,44; 5,28; 6,67 та 8,89 м для швидкостей 8, 11, 16, 19, 24 та 32 км/год відповідно.

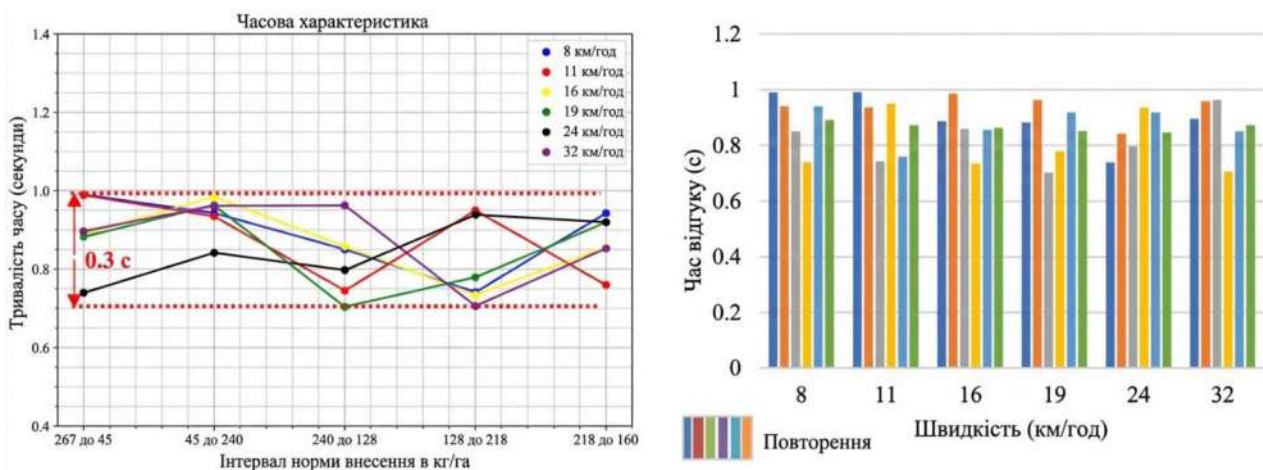


Рис. 12. Часова відповідь



У практичних застосуваннях часова відповідь визначає швидкість реакції системи на зміни експлуатаційних умов, таких як варіювання швидкостей під час сівби або внесення добрив. Затримки у часі при різних швидкостях можуть призвести до нерівномірного внесення матеріалів (насіння, добрив), що спричиняє локальні диспропорції в розподілі посівів, нераціональне використання ресурсів та, як наслідок, зниження врожайності.

Висновки. Контролер системи демонструє високу надійність з точністю 96,17 %, прецизійністю 95,15 % та низьким рівнем похибки 2,82 %, що підтверджує стабільну та ефективну роботу. Затримки часової відповіді призводять до незначних зміщень цільових норм у межах від 0 до 0,13 кг та відстаней від 2,22 до 8,89 м при швидкостях від 8 до 32 км/год. Ці результати підтверджують здатність системи підтримувати високу точність і ефективність при різних швидкостях експлуатації.

Дослідження представляють внесок у сферу точного землеробства через розробку та оцінку низьковартісного, модернізованого контролера аплікатора змінної норми (VRAC), створеного як відкрита платформа для широкого впровадження. Основні результати показують, що контролер досягає точності та прецизійності 97,17 % та 95,15 % відповідно при дозуванні насіння, з середньоквадратичною помилкою (RMSE) 4,57 кг, коефіцієнтом варіації 4,59 % та середньою похибкою 2,83 %. Система також демонструє середній час реакції 0,836 с при зміні норм на різних швидкостях.

Дослідження сприяє впровадженню ефективних та зручних технологій точного землеробства, забезпечуючи їх доступність для фермерів із обмеженими ресурсами. Подальші роботи будуть спрямовані на інтеграцію мобільних рішень для моніторингу в реальному часі та розширення застосування системи для більш широкого спектра культур та польових умов.

Список використаних джерел

1. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2024.
2. Huang J. X., Zhou H. B., Wang J. F., Hou Y. Research on variable rate fertilization control system based on fuzzy PID. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 614. P. 207–210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.614.207
3. Abdalla A., Mirzakhani Nafchi A. Development and evaluation of an affordable variable rate applicator controller for precision agriculture. *AgriEngineering*. 2025. Vol. 6, No. 4. P. 4639–4657. DOI: 10.3390/agriengineering6040265
4. Tang X. Y., Chen Y. Z., Peng Y. K., Wang X., Xu Y., Yang W. L., Wang W. A DSP based control system for precision variable rate fertilization. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 605–607. P. 1408–1414. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.605607.1408
5. Su N., Xu T. S., Song L. T., Wang R. J., Wei Y. Y. Variable rate fertilization system with adjustable active feed roll length. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2015. Vol. 8, No. 4. P. 19–26. DOI: 10.3965/j.ijabe.20150804.1644
6. Zhang J. C., Hou S. Y., Wang R. T., Ji W. Y., Zheng P., Wei S. Design of variable rate liquid fertilization control system and its stability analysis. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 109–114. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.2583
7. Smith R., et al. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 160. P. 31–39. DOI: 10.1016/j.compag.2019.03.011
8. McFadden J., Njuki E., Griffin T. Precision agriculture in the digital era: Recent adoption on US farms. In *Economic Information Bulletin*; United States Department of Agriculture, Economic Research Service: Washington, DC, USA, 2023.
9. Askarzadeh Y., Jones E., Sahraei M., Abdalla A., Nafchi A. M. Sustainable Weed Management through Precision Cover Cropping System. In *Proceedings of the 2024 ASABE Annual International Meeting*, Anaheim, CA, USA, 28–31 July 2024; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2024. P. 1.
10. Schimmelpfennig D. Crop production costs, profits, and ecosystem stewardship with precision agriculture. *J. Agric. Appl. Econ.* 2018. Vol. 50. P. 81–103.



11. Coelho A. L. D. F., de Queiroz D. M., Valente D. S., Pinto F. A. Development of a variable-rate controller for a low-cost precision planter. *Appl. Eng. Agric.* 2020. Vol. 36. P. 233–243.
12. Maleki M. R., Mouazen A. M., De Ketelaere B., Ramon H., De Baerdemaeker J. On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99. P. 35–46.
13. Kempenaar C., Been T., Booij J., Van Evert F., Michielsen J. M., Kocks C. Advances in variable rate technology application in potato in the Netherlands. *Potato Res.* 2017. Vol. 60. P. 295–305.
14. English B. C., Mahajanashetti S. B., Roberts R. K. Assessing spatial break-even variability in fields with two or more management zones. *J. Agric. Appl. Econ.* 2001. Vol. 33. P. 551–565.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



M. Zayets¹, P. Pohrebniichenko²

¹ Polissia National University

² “Zhytomyr Polytechnic” State University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A SPRAYER WITH A DOSAGE RATE CONTROLLER AT VARIABLE OPERATING SPEED

Summary

Spatial heterogeneity of agro-physical and agro-chemical soil properties is one of the key challenges of modern agriculture, as it leads to uneven plant development, inefficient use of fertilizers and other resources, and may reduce production economic efficiency. In modern agrotechnology development, particular importance is given to the implementation of intelligent process control systems that allow adapting material application rates to the actual conditions of each field zone.

The development of low-cost and technically accessible devices for implementing precision agriculture principles is an important task, since the high cost of commercial systems often limits their use among small and medium-sized producers. The proposed Variable Rate Applicator Controller (VRAC) is aimed at reducing the financial cost of technology implementation by using an open hardware architecture and affordable electronic components.

The system is based on the Raspberry Pi platform and uses an RTK-compatible Global Navigation Satellite System to ensure high-precision positioning of the machine in field conditions. Additionally, a wheel encoder is used to measure travelled distance and calculate instantaneous movement speed while minimizing slip error, enabling accurate determination of motor rotation speed (RPM).

The Raspberry Pi platform processes input data and implements dynamic control algorithms for material application rates according to predefined prescription maps. Experimental results showed that the average switching time between application rates (from 267 to 45; from 45 to 241; from 241 to 128; from 128 to 218; from 218 to 160 kg/ha) is 0.864 s at operating speeds of 8, 11, 16, 19, 24, and 32 km/h.

The average coefficient of variation of system performance is 4.59, the control accuracy is 97.17 %, and the root mean square error (RMSE) is 4.57. The coefficient of determination R^2 is 0.994, indicating a high agreement between the set and actual parameter values. The average standard deviation of seeding rate is 1.76 kg.

The modular plug-and-play architecture allows the controller to be integrated into existing agricultural machinery without significant structural modification. This provides opportunities for gradual technical modernization of farms and promotes the wider adoption of digital technologies in agricultural production.

Therefore, the affordability of the proposed solution, high system accuracy, and the possibility of upgrading existing machinery make the developed controller a promising tool for improving technological process efficiency and ensuring environmentally safe and sustainable agricultural development.

Keywords: precision agriculture, variable rate application, VRAC controller, Raspberry Pi, GNSS positioning, stepper motor, automated control, variable rate seeding, agrotechnological systems.