

**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 систем контролю притискового зусилля висівних секцій на показники якості посіву соняшнику»

Виконав:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Іван ГОНЧАРОВ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

\_\_\_\_\_ СТЗ 2401-1М

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Михайло ШУЛЯК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_ (підпис)

В'ячеслав ТАРЕЛЬНИК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2025

## АНОТАЦІЯ

**Гончаров Іван Михайлович**

Дослідження впливу систем контролю притискного зусилля висівних секцій на показники якості посіву соняшнику.

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

Випускна кваліфікаційна робота представлена на 44 сторінках машинописного тексту пояснювальної записки, що містить 7 таблиць, 13 рисунків, додатків 2, 25 літературних джерел.

Мета роботи полягає в тому, щоб детально оцінити ефективність функціонування системи контролю притискної сили висівної секції сівалки під час роботи з різними технологічними параметрами та за різних умов навколишнього середовища при виконанні посіву соняшнику.

Для реалізації поставленого завдання під час дослідження було використано 12-рядну сівалку, обладнану гідравлічною системою керування притискною силою. Цей агрегат застосовували для посіву трьох окремих полів, що дало змогу отримати різнопланові умови експлуатації. Сівалку було налаштовано на висів насіння соняшнику на глибину 5,2 см та 5,7 см. При цьому підтримували фіксовану цільову норму контролю притискної сили, яка діє на опорне колесо секції (НК), встановлену на рівні  $35 \pm 23$  кг (у діапазоні від 12 до 57 кг). Додатково було передбачено можливість змінювати НК у межах від 0 до 90 кг.

Отримані результати дослідження засвідчили, що для забезпечення стабільної роботи машинно-тракторного агрегату необхідна автоматична система регулювання притискної сили з меншою кількістю висівних секцій,

що працюють у режимі «контрольної секції». Це дозволить підтримувати цільове значення НК у допустимих межах для всіх секцій сівалки під час реальної польової роботи. Проведений регресійний аналіз підтвердив, що текстура ґрунту є суттєвим фактором, який впливає на рівень НК у режимі реального часу та може змінювати стабільність її підтримання. Окрім цього, ущільнення ґрунту, спричинене проходженням тракторних шин, призвело до помітного зниження фактичної НК, що негативно вплинуло на рівномірність роботи сівалки.

У сукупності отримані дані вказують на важливість застосування активних систем контролю притискної сили, які здатні оперативно реагувати на зміну умов ґрунтового середовища. Це є необхідною передумовою для забезпечення кращої рівномірності НК та підвищення якості посіву соняшнику за різних умов експлуатації агрегату.

Ключові слова: точність висіву, притискне зусилля, навантаження на колесо, керуюча секція, контроль норми.

## ANNOTATION

### **Goncharov Ivan Mikhailovych**

Study of the influence of the systems of control of the pressing force of the sowing sections on the quality indicators of sunflower sowing.

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

The final qualification work is presented on 44 pages of typewritten text of the explanatory note, containing 7 tables, 13 figures, 2 appendices, 25 literary sources.

The purpose of the work is to assess in detail the effectiveness of the functioning of the system of control of the pressing force of the sowing section of the

seeder when working with different technological parameters and under different environmental conditions when sowing sunflower.

To implement the task set during the study, a 12-row seeder equipped with a hydraulic pressing force control system was used. This unit was used for sowing three separate fields, which made it possible to obtain diverse operating conditions. The seeder was set to sow sunflower seeds to a depth of 5.2 cm and 5.7 cm. At the same time, a fixed target control rate of the pressure force acting on the support wheel of the section (WL) was maintained, set at  $35 \pm 23$  kg (in the range from 12 to 57 kg). Additionally, the possibility of changing the WL within the range from 0 to 90 kg was provided.

The results of the study showed that to ensure stable operation of the machine-tractor unit, an automatic pressure force control system with a smaller number of seeding sections operating in the “control section” mode is necessary. This will allow maintaining the target WL value within acceptable limits for all sections of the seeder during real field work. The regression analysis confirmed that soil texture is a significant factor that affects the NC level in real time and can change the stability of its maintenance. In addition, soil compaction caused by the passage of tractor tires led to a noticeable decrease in the actual WL, which negatively affected the uniformity of the seed drill.

Taken together, the data obtained indicate the importance of using active downforce control systems that are able to quickly respond to changes in soil conditions. This is a necessary prerequisite for ensuring better uniformity of WL and improving the quality of sunflower sowing under different operating conditions of the unit.

Keywords: seeding accuracy, downforce, wheel load, control section, rate control.

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
Розділ 1. Огляд досліджень та публікацій .....	10
Розділ 2. Методика досліджень .....	18
2.1 Обладнання посівної машини .....	18
2.2 Налаштування сівалки та план експерименту .....	20
2.3 Електропровідність ґрунту .....	26
Розділ 3. Аналіз даних польових досліджень .....	29
3.1 Перевірка фіксованої притискної сили сівалки.....	29
3.2 Розподіл притискної сили (НК).....	29
3.3 Розподіл притискної сили.....	33
3.4 Сценарії керування НК посекаційно.....	33
3.5 Вплив типу ґрунту на середнє НК.....	34
3.6 Ущільнення від шин і НК.....	37
Висновки.....	40
Список використаних джерел.....	41

## **ВСТУП**

### **1. Актуальність теми**

Варіативність ґрунтових умов, присутність ущільнених зон, зміни структури та вологості ґрунту створюють суттєві виклики для машинно-тракторних агрегатів. За таких умов застосування традиційних механічних або пасивних систем притискної сили не забезпечує стабільної роботи посівних секцій. Тому дослідження ефективності активних систем контролю притискної сили є надзвичайно важливим як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки сприяє підвищенню точності висіву, зменшенню затрат та збільшенню продуктивності аграрного виробництва.

### **2. Аналіз стану наукової розробки проблеми**

Попри значний науковий доробок, питання ефективності автоматичного контролю притискного зусилля, особливо під час роботи на різних типах ґрунтів та в умовах неоднорідності поля, залишається недостатньо опрацьованим. Зокрема, бракує експериментальних досліджень, які б комплексно оцінювали роботу систем гідравлічного регулювання притискної сили в реальних польових умовах, а також аналізували взаємозв'язок між фактичною притискною силою, текстурою ґрунту та якістю висіву. Це створює наукову прогалину, яку необхідно заповнити для подальшого удосконалення систем точного землеробства.

### **3. Мета дослідження**

Метою роботи є детальна оцінка ефективності роботи системи контролю притискного зусилля висівної секції сівалки за різних ґрунтових умов, технологічних параметрів та режимів експлуатації під час посіву соняшнику.

### **4. Об'єкт дослідження**

Об'єктом дослідження є процес функціонування висівних секцій просапної сівалки під час виконання посіву соняшнику.

## **5. Предмет дослідження**

Предметом дослідження є показники притискного зусилля висівних секцій та їхній вплив на якість посіву в умовах варіативності ґрунтового середовища.

## **6. Завдання дослідження**

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати існуючі наукові підходи до автоматизації контролю притискної сили посівних секцій;
- дослідити вплив різних глибин висіву та режимів притискної сили на роботу висівних секцій;
- оцінити варіативність притискного зусилля під час роботи сівалки на полях з різною текстурою ґрунту;
- проаналізувати вплив ущільнення ґрунту від коліс трактора на фактичне притискне зусилля;

## **7. Методи дослідження**

У роботі використано методи експериментальних польових досліджень, інструментального контролю технологічних параметрів сівалки, статистичні методи аналізу, зокрема кореляційний та регресійний аналіз, методи порівняльної оцінки параметрів висіву, а також методи обробки даних, отриманих з бортових сенсорних систем.

## **8. Структура та обсяг роботи**

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг становить 44 сторінки пояснювальної записки, що включає 7 таблиць, 13 рисунків та 25 бібліографічних джерел.



## 1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Керування зусиллям притискання на сівалці забезпечує висівним секціям можливість утримувати необхідне навантаження на опорних колесах (НК) залежно від змін опору ґрунту в різних частинах поля. Регулювання цієї сили виконується для підтримання оптимальної глибини загортання насіння й може працювати у кількох режимах — від ручного фіксованого до автоматичного або активного, що дозволяє досягти заданого рівня навантаження НК. Використання сучасних систем контролю дає змогу керувати кожною секцією окремо, що істотно підвищує точність, стабільність і рівномірність розподілу зусиль по всій ширині захвату агрегату.

Сівалки для просапних культур повинні забезпечувати розміщення насіння на практично однаковій глибині з дотриманням рівних інтервалів між зернами вздовж рядка. Для формування борозни заданої глибини висівні диски використовують масу посівного агрегату, завдяки чому відбувається проникнення у ґрунт. Контроль за глибиною висіву здійснюють опорні колеса, котрі не дозволяють робочим органам занурюватися надмірно глибоко.

Додаткова сила, що діє на опорне колесо висівної секції під час його контакту із поверхнею поля, називається «навантаженням на колесо» (НК). Коли опір ґрунту змінюється по площі, це може призвести до зменшення тиску агрегату на сошники, внаслідок чого колеса втрачають надійне зчеплення із землею, що своєю чергою негативно впливає на стабільність глибини посіву.

Щоб уникнути таких коливань, виробники оснащують сучасні просапні сівалки спеціальними системами, які створюють додаткове навантаження на кожну окрему секцію. Це дозволяє формувати борозну потрібної глибини й підтримувати її постійною по всій площі поля, незалежно від типу ґрунту, його щільності або кількості рослинних решток. Сумарне значення додаткової сили

разом із власною вагою висівного вузла утворює притискне зусилля. Це зусилля може змінюватися залежно від обраної системи регулювання — механічної, пневматичної чи гідравлічної, що дає змогу адаптувати роботу агрегату до конкретних умов посіву.

Гідравлічні системи відзначаються значно швидшою реакцією на зміну потреби у притискній силі висівної секції порівняно з пневматичними аналогами. У складі такої системи використовуються гідроциліндри, які забезпечують прикладання додаткового тиску до секцій сівалки, коли цього потребують умови роботи. Значення цільового навантаження на опорне колесо встановлюється ще до початку посівного процесу. Воно має бути достатнім, щоб гарантувати стабільне підтримання необхідної глибини закладання насіння у ґрунт. Гідравлічна система в автоматичному режимі зберігає це навантаження, завдяки чому досягається задане занурення сошника, рівномірна глибина посіву та запобігається надмірному ущільненню ґрунтового шару. Датчик, розміщений на колесі, фіксує зворотний сигнал щодо фактичного навантаження, що дозволяє системі оцінити, чи потрібно коригувати прикладену силу притиску.

Подібні системи особливо ефективні на полях із нерівномірними умовами — різними типами обробітку, неоднорідною структурою ґрунту, змінним рельєфом поверхні чи наявністю рослинних решток. У таких ситуаціях важливо забезпечити миттєве реагування техніки на зміну польових параметрів, що й досягається завдяки гідравлічним системам.

Незважаючи на це, на сьогоднішній день залишається недостатньо вивченим питання просторової варіативності навантаження на колесо (НК), зокрема різниця цього показника між рядами, а також визначення оптимальних параметрів для ефективного керування НК під час роботи сівалки в реальних умовах поля. Тому метою даної наукової роботи було:

1. встановити кількісні характеристики коливань НК у режимі реального часу між окремими секціями 12-рядної посівної машини, що працює з автоматичним регулюванням притискної сили під час посіву;
2. визначити діапазон зміни НК як для окремих висівних секцій, так і в межах груп із двох, трьох або чотирьох рядів, щоб обґрунтувати оптимальну кількість секцій у керованому модулі системи контролю тиску;
3. дослідити вплив структурного стану ґрунту та рівня його ущільнення, спричиненого проходженням шин, на просторову варіативність показників НК.

Рівномірність загортання насіння на певну глибину та показники розвитку культури на початковому етапі вегетації, зокрема швидкість появи сходів і густота стояння рослин, належать до головних характеристик, які визначають якість роботи сівалок і кінцевий рівень урожайності соняшнику. Відмінності у строках появи сходів часто пояснюються неоднаковою глибиною загортання насіння або нерівномірністю агрофону поля. На це впливають такі чинники, як розподіл пожнивних решток у безвідвальних технологіях, стан посівного ложа, вологість та енергія проростання насіння. Наукові дослідження доводять, що правильне дотримання глибини висіву має вирішальне значення, адже надмірне заглиблення насіння здатне викликати нерівномірні сходи.

Параметр глибини посіву належить до основних факторів, які формують рівномірність появи сходів і початковий розвиток посівів соняшнику. Отримання однорідних, дружніх сходів є обов'язковою умовою для реалізації потенційної врожайності культури. Надто глибоке загортання може призвести до зменшення кількості пророслих насінин, затримки розвитку молодих рослин і, як наслідок, зниження врожаю на 6–22 %. Водночас надто мілкий посів часто спричиняє слабе формування кореневої

системи або навіть повну відсутність сходів. Щоб забезпечити стабільну роботу основних механізмів посівного агрегату, у сучасних сівалках застосовують притискну силу, яка створює необхідне навантаження на секцію під час руху. Під поняттям «притискна сила» розуміють сумарне зусилля, що діє на висівний блок і включає вагу самої секції та додаткові прикладені сили. У процесі висіву це зусилля розподіляється між чотирма головними вузлами сівалки: відкриваючими дисками, напрямними колесами, загортаючими колесами та очисниками рядків або сошниками. При цьому закриваючі колеса й очисники сприймають лише незначну частину навантаження, величина якого практично залишається сталою. Основна частка притискної сили припадає на відкриваючі диски, які формують борозну необхідної глибини для розміщення насіння, а також на напрямні колеса, що забезпечують точне дотримання заданої глибини висіву.

Під час проведення посівних робіт навантаження, що діє на відкриваючий диск сівалки, істотно змінюється залежно від конкретних умов у полі. До таких факторів належать коливання у структурі ґрунту, його вологість, кількість післяжнивних решток на поверхні, особливості мікрорельєфу, швидкість руху агрегату, ступінь ущільнення ґрунтового шару під дією коліс техніки, а також конструктивні параметри дисків, які формують посівну борозну. Наприклад, коли застосовується постійна притискна сила, посів у легкий, пухкий ґрунт потребує значно меншого зусилля для формування борозни необхідної глибини, у той час як більша частка навантаження припадає на опорне колесо. Це зусилля, яке забезпечує безперервний контакт колеса з поверхнею поля й стабільну глибину висіву насіння, прийнято називати навантаженням на направляюче колесо.

Разом з тим, під час роботи на важких, щільних ґрунтах із грубішою структурою сошникові диски потребують збільшення тиску для ефективного

розкриття борозни, що, у свою чергу, призводить до зменшення навантаження на колесо (НК). У певних ситуаціях відкриваючі диски можуть вимагати більшого навантаження, ніж доступно в системі, і тоді опорне колесо тимчасово втрачає контакт із поверхнею. Така ситуація спричиняє зменшення глибини загортання насіння, що негативно впливає на рівномірність сходів. Одним із технічних рішень цієї проблеми є збільшення величини додаткового навантаження, що передається на висівну секцію. У літературі його часто позначають як «запас навантаження» для сошникового диска. Завдяки цьому параметру можна підтримувати стабільну глибину висіву та постійний тиск опорного колеса на ґрунт навіть за змінних умов польової поверхні.

Однак надмірне збільшення навантаження може викликати іншу проблему — надто глибокий посів і небажане ущільнення стінок борозни. Це погіршує аерацію посівного ложа й створює несприятливі умови для розвитку кореневої системи рослин. Тому необхідно ретельно підібрати оптимальне значення НК, яке дасть змогу сошникам мати певний запас додаткового навантаження. Цей запас можна буде використовувати частково або повністю, не змінюючи глибини висіву та не викликаючи зайвого ущільнення бокових стінок борозни.

Електропровідність ґрунту (ЕП) — це його властивість пропускати електричний струм. Її величину визначають експериментально та зазвичай виражають у мілісіменсах на метр (мСм/м). Проходження електричного струму через ґрунт можливе трьома основними шляхами:

1. через водний розчин із розчиненими іонами у порах;
2. завдяки катіонам, що адсорбовані на поверхні глинистих часток;
3. через безпосередні контакти між твердими часточками мінеральної фази.

Експериментальні дослідження показали, що у більшості випадків високі значення електропровідності спостерігаються на ділянках із підвищеним вмістом глинистих фракцій та органічної речовини. Це свідчить про існування

тісного взаємозв'язку між електропровідністю, гранулометричним складом ґрунту, його структурою й рівнем засолення. Отже, просторове картування ЕП може бути ефективним інструментом для визначення неоднорідності ґрунтового покриву в межах окремого поля та використання цих даних у технологіях диференційованого обробітку.

Ґрунти, що характеризуються підвищеним значенням енергетичної потужності (ЕП), потребують більшої сили, яку прикладають диски для формування посівної борозни. Це, своєю чергою, зменшує навантаження або силу тиску на опорні колеса висівної секції, і навпаки. Підібрати оптимальне значення притискної сили досить складно, оскільки польові умови часто істотно різняться навіть у межах одного поля.

Через виражену просторову неоднорідність ґрунтів і ділянок поля окремі висівні секції можуть потребувати індивідуального контролю, щоб забезпечити стабільну глибину закладання насіння. У загальному випадку система регулювання притискної сили сівалки може працювати як на кожному висівну секцію окремо, так і на групу так званих «контрольних» або «керуючих секцій», які об'єднують кілька рядів. Реалізація такого регулювання можлива за допомогою натяжних пружин, пневматичних подушок або гідравлічних циліндрів.

Зазвичай збільшення тиску опорних коліс секцій на поверхню ґрунту досягають шляхом підвищення натягу пружин через спеціальні з'єднання, що з'єднують висівні секції з рамою сівалки. У сучасних моделях посівних машин для керування розподілом навантаження все частіше застосовуються пневматичні або гідравлічні системи, які забезпечують стабільний контакт коліс секцій із поверхнею поля.

Використання технологій автоматичного регулювання притискної сили має суттєве значення, адже дозволяє уникнути надмірного ущільнення ґрунту, зберегти його структуру та гарантувати рівномірність глибини посіву по всій

площі. Результати попередніх досліджень показали, що тягове зусилля, необхідне для роботи сошникових дисків, помітно зростає на важких за механічним складом ґрунтах порівняно з легкими.

Змінні польові умови обумовлюють необхідність точного керування притискною силою, щоб підтримувати сталу глибину загортання насіння. Однак наразі існує обмежена кількість публікацій і рекомендацій щодо практичного використання сучасних технологічних засобів, призначених для управління просторовою мінливістю навантаження на колеса (НК). Це суттєво ускладнює вибір оптимальної системи контролю для конкретних типів полів під час посівних робіт.

Саме тому дане дослідження було організовано з такими цілями:

1. здійснити кількісну оцінку мінливості навантаження на опорні колеса в режимі реального часу між окремими секціями 12-рядної сівалки, обладнаної системою постійного моніторингу притискної сили під час висіву;
2. визначити межі зміни навантаження для індивідуальних рядів, а також для контрольних груп, що складаються з двох, трьох або чотирьох рядкових секцій, з метою встановлення оптимального розміру такої групи;
3. дослідити вплив структури ґрунту та ступеня його ущільнення, викликаного проходженням рушіїв техніки по поверхні поля.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Обладнання посівної машини

Дослідження виконували із застосуванням 12-рядної просапної сівалки Horsch Maestro 12 30 SW, обладнаної системою змінної норми висіву та функцією автоматичного керування секціями. Посівний агрегат було налаштовано на автоматичне відключення або вмикання електродвигунів окремих висівних рядків (модель BG 45x15 SI, виробник Dunkermotoren, м. Шварцвальд, Німеччина) залежно від даних карти-завдання. Сівалку агрегатували з трактором J. Deere 8270R.

Зручність роботи з посівним агрегатом забезпечував бортовий комп'ютер J. Deere 2630 (система GreenStar-3, Deere&Company, США), який був підключений до електронного блока керування сівалки (ECU, виробництва Horsch, Німеччина) через стандартний інтерфейс ISOBUS. Конструкція сівалки передбачала розташування висівних рядків з міжряддям 70 см, що відповідало загальноприйнятим параметрам для просапних культур.

Для проведення експериментальних спостережень сівалку було поділено на чотири контрольні секції (рис. 1), що дозволило детально оцінити рівномірність та якість висіву залежно від налаштувань і режимів роботи обладнання.



Рис. 1 - Робочі органи сівалки, що містить 12 рядків (висівних секцій), пронумерованих від 1 до 12 зліва направо, разом із секцією гідравлічного керування притискною силою

Кожну висівну секцію обладнали спеціальним датчиком, що фіксував навантаження на опорне колесо. Усі секції були відрегульовані на сталий рівень гідравлічного тиску, аби забезпечити рівномірне прикладання притискного зусилля до ґрунту.

Керуючі секції під номерами 1 і 4 охоплювали по три рядки з обох боків сівалки — зліва та справа. Контрольна секція №2 включала чотири висівні модулі, розташовані поблизу тракторної колії (це рядки 4, 5, 8 та 9). Секція керування №3 складалася з двох рядків (6 і 7), розміщених у центральній частині робочої панелі сівалки.

Висівні секції, що належали до керуючих блоків 1, 3 і 4, не пересувалися по слідах коліс ані трактора, ані самої сівалки, тому надалі вони визначаються як секції «без колії». На відміну від них, у другій керуючій секції робочі елементи рухалися по доріжках, утворених шинами агрегату, і надалі ці рядки позначаються як секції «по колії шин».

Для вимірювання гідравлічного тиску на всіх контрольних вузлах використовувався сенсор HDA 844L-A-0250-161 (Hydac, Glendale Heights, IL, США). Щоб підтримувати задану відстань між насінинами при зміні швидкості руху посівної машини, електронний блок управління (ECU) отримував сигнал зворотного зв'язку від радарного датчика швидкості (Radar III, Dickey-John Corp., Auburn, IL, США). Кожен модуль електроприводу висівного апарата (Horsch Maschinen GmbH, Німеччина) був оснащений цим датчиком, що дозволяло точно регулювати оберти двигуна відповідно до встановленої норми висіву за допомогою планетарного редуктора типу PLG 42S (Dunkermotoren GmbH, Німеччина).

Для контролю процесу подавання насіння у висівних трубках використовувався сенсор обліку насінин *Hy Rate Plus* (*Dickey-John Corp.*, Auburn, IL, США), який передавав до бортового комп'ютера дані про рівномірність розподілу, випадки подвійного висіву та пропуски.

## **2.2 Налаштування сівалки та план експерименту**

Польові випробування здійснювалися із використанням посівного агрегату, оснащеного гідравлічною системою регулювання притискного зусилля сошників. Система управління з чотирма незалежними секціями, розроблена та інтегрована безпосередньо виробником техніки, була налаштована на функціонування у двох режимах — активного контролю або стабільного (фіксованого) тиску. У межах даного експерименту механізм регулювання притискної сили працював у режимі постійного тиску, що забезпечувалося програмуванням системи на підтримання незмінного значення гідравлічного навантаження.

Для визначення оптимальної величини зусилля проводилися попередні лабораторні випробування на спеціально виготовленому стенді, призначеному для точного вимірювання притискної сили. Це дозволило встановити величину гідравлічного тиску, необхідну для досягнення заданого рівня навантаження на кожен сошник (НК). Під час тестування на стенді було визначено, що тиск 5,6 МПа відповідає фіксованому НК у 35 кг. Отримані параметри попередньо перевірили безпосередньо перед проведенням польових дослідів для підтвердження їх коректності.

Додатково було проаналізовано інструкції з налаштування посівних агрегатів, рекомендовані виробниками техніки, а також узагальнено практичний досвід агровиробників. Це дозволило більш точно встановити необхідну глибину висіву насіння та оцінити ефективність фіксованої притискної сили при різних умовах.

Польові експерименти з постійним тиском проводилися на трьох ділянках із різною площею: поле А мало 7 гектарів, поле В — 4 гектари, а поле С — 11 гектарів. Усі ділянки засівали насінням соняшнику на двох різних глибинах посіву відповідно до рекомендацій компаній-виробників посівної техніки.

Робочі механізми посівної машини було налаштовано для полів А і В на глибину висіву 5,2 см, тоді як для поля С встановили 5,7 см. Блоки управління ECU були запрограмовані на стандартні норми висіву: 62,5 тис., 64 тис. та 67 тис. насінин на гектар для полів А, В і С відповідно. Сівба виконувалася при середній швидкості 11,3 км/год, яка варіювалася в межах 7,2–12,0 км/год. У попередніх польових випробуваннях застосовували різні рівні навантаження на колесо та притискної сили, що змінювалися від 18 кг до 173 кг.

До початку основних дослідів були проведені консультації з кількома виробниками, які надали рекомендації щодо базових налаштувань сівалки. Враховуючи отримані практичні відгуки, було визначено цільове навантаження на рівні 35 кг. Передбачалося, що під час польових робіт навантаження на колесо (НК) залишатиметься в межах 12–57 кг. Вибір цього діапазону  $\pm 23$  кг базувався на попередніх тестуваннях, що показали здатність системи HORSCH підтримувати цільову величину НК у цьому інтервалі майже 99% часу за умов відносно однорідного поля.

Дані навантаження окремих висівних секцій було ретельно проаналізовано з метою визначення частки часу, коли НК перебувала: 1) у межах цільового діапазону  $35 \pm 23$  кг, 2) вище верхньої межі, або 3) нижче встановленого діапазону. Усі точки даних датчиків, отримані під час проходження сівалки у повороті з піднятою рамою секцій, також були враховані для кількісного оцінювання роботи в режимі холостого ходу.

Мета аналізу полягала у перевірці того, чи датчики навантаження стабільно реагують на холостий рух сівалки, а також у підтвердженні того, що

запропонована калібрувальна крива адекватно відображає фактичне навантаження на опорне колесо кожної висівної секції.

Діапазон навантаження на окреме колесо визначався як різниця між максимальними та мінімальними значеннями НК на будь-яких висівних секціях у кожному конкретному випадку. Основним завданням було кількісно оцінити рівень змінності НК на панелі управління та, за необхідності, показати потребу в оснащенні машини контрольними секціями для забезпечення точного регулювання цільових значень НК. Більші коливання НК між секціями свідчать про доцільність використання секцій, що керують висівними агрегатами, для підтримки високої роздільної здатності при динамічному виконанні операцій.

Навантаження на секції оцінювалося кількісно через обчислення різниці для всіх 12 секцій сівалки, а також для комбінацій із 2, 3 та 4 суміжних рядків. 2-рядкова комбінація, що далі позначатиметься як опція управління дворядковими секціями, включала секції 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10 та 11-12; 3-рядкова комбінація, надалі іменована як контроль трьохрядкових секцій, складалася з висівних секцій 1-2-3, 4-5-6, 7-8-9 та 10-11-12; 4-рядкова комбінація, яку далі називатимемо опцією управління чотирирядковими секціями, охоплювала секції 1-2-3-4, 5-6-7-8 та 9-10-11-12.

Середні показники НК для кожної секції в рамках різних варіантів контролю на трьох полях порівнювалися, щоб визначити оптимальну кількість рядків для контрольної секції, у якій НК була найменшою. Керування секцією з мінімальним навантаженням гарантувало досягнення потрібної притискної сили для забезпечення максимально рівномірного розподілу НК на всіх рядкових секціях у межах контрольної групи. Значення середнього НК і НК для всіх рядів відображалися на карті за допомогою ArcMap 10.3 (ESRI, Каліфорнія, США).

Просторовий аналіз проводився у програмному забезпеченні ArcGIS 10.3 (ESRI, Редлендс, США) із застосуванням інструментів ArcMap 10.3, щоб створити набір точок даних, які відповідали кожному окремому класу структури ґрунту (за показником ЕП) для всіх полів дослідження. Кожна окрема точка, отримана для конкретного класу структури ґрунту, розглядалася як репліка та використовувалася для визначення середнього навантаження в межах відповідного класу електропровідності ґрунту. Розрахунки середнього НК виконувалися для ділянок без слідів шин (керуючі секції 1, 3 і 4) і для ділянок із наявними слідами шин (керуюча секція 2) на всіх полях.

Статистичний аналіз здійснювався у середовищі SAS University Edition 2016. Зокрема, із застосуванням процедури **proc reg** проводився множинний регресійний аналіз для оцінки зв'язку між електропровідністю ґрунту та навантаженням на колеса, з метою визначити, чи є показник ЕП істотною змінною, що потенційно впливає на значення НК у режимі реального часу. Було проаналізовано статистичну значущість різниці між середніми значеннями НК та показниками ЕП ґрунту. Крім того, взаємозв'язок між середнім навантаженням і розташуванням ділянок «сліди шин» або «без слідів» оцінювався із використанням процедури **proc** та оператора **lsmeans**. Результати вважали статистично значущими при рівні ймовірності  $p \leq 0,05$ .

Система збору даних включала посівну машину, заводське оснащену датчиками навантаження (модель 6784, Horsch Maschinen GmbH, Німеччина), встановленими на кожному з 12 рядів (рисунок 2), що дозволяло отримувати точні вимірювання під час роботи агрегату.



Рис. 2 - Датчик навантаження, встановлений на кулачковому вузлі, розміщеному поперек важелів коліс

Розрахунковий інтервал вимірювання навантаження датчиків складав до 9,8 кН із лінійним вихідним сигналом 4–20 мА на відповідній шкалі. Кожен датчик навантаження проходив калібрування в лабораторних умовах із використанням контрольних ваг, під час якого фіксувався сигнал датчика у відповідності до сили, переведеної в кілограми. Для того щоб перетворити вихідні сигнали датчиків на значення сили у НК, була побудована регресійна залежність між показаннями датчиків та фактичними силовими величинами (див. рис. 3). Щоб здійснити вимірювання тиску гідравлічної рідини у кожній з чотирьох керуючих секцій, на кожній секції був встановлений окремий датчик тиску. Оскільки кожна секція керування мала власний гідравлічний циліндр і прикладала однаковий тиск до всіх рядів у межах цієї секції,

використання одного датчика тиску для кожної керуючої секції вважалося достатнім.

Для контролю секцій 1, 3 та 4 застосовували датчик тиску з робочим діапазоном до 25 МПа (HDA 844L-A-0250-161, Hydac, Glendale Heights, США), який забезпечував лінійний вихід 4–20 мА по шкалі. У той же час, секція 2 була обладнана перетворювачем тиску з максимальною межею 52 МПа (KM41, Ashcroft, Stratford, США) з лінійним сигналом 0,5–4,5 В постійного струму по шкалі. Паралельно збір даних про координати та швидкість посіву здійснювався за допомогою GPS-пристрою з сантиметровою точністю (GR5, Topcon Positioning Systems, Inc., Каліфорнія, США).

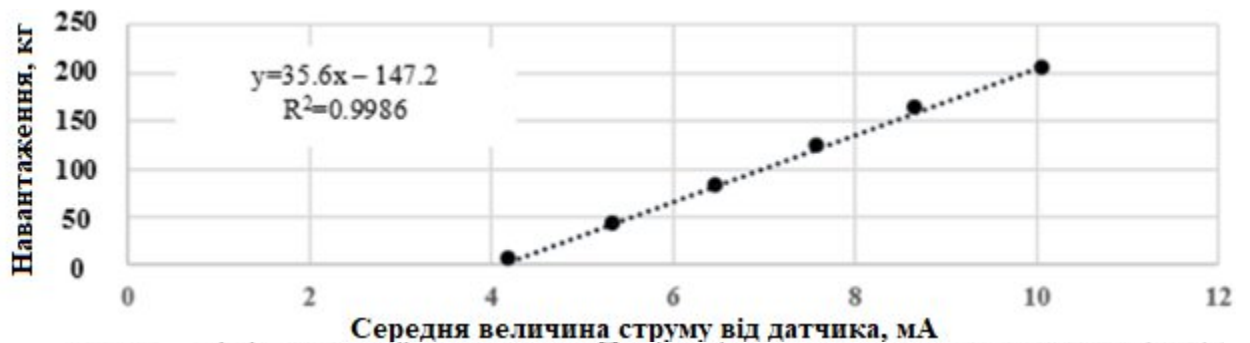


Рис. 3 - Лінія регресії, встановлена між відомими навантаженнями (НК) та струмом датчика навантаження

Сівалка обладнана гідравлічними циліндрами, які забезпечують підйом та опускання секцій разом із рамою посівної машини. Для контролю положення панелі інструментів — у робочому або транспортному режимі — на осі коліс бункера встановили потенціометр (модель 424A11A090B, виробник Elabou Sensor Technology Inc.) зі шкалою 4–20 мА (рис. 4).

Перед початком експлуатації потенціометр було відкалібровано, щоб гарантувати точність відображення як піднятого, так і робочого положення рами з секціями. Висоту панелі інструментів сівалки та значення вихідного сигналу від датчика у діапазоні 4–20 мА із кроком 1 мА фіксували, що

дозволяло кількісно визначати точне розташування панелі під час процесу посіву.

Виходячи з отриманих вимірювань, визначали, чи знаходиться панель керування в оптимальному положенні, яке відповідає необхідній для висіву глибині. Для фіксації параметрів була спроектована спеціалізована система реєстрації даних, що ґрунтувалася на обладнанні National Instruments (NI) cRio. Програмне забезпечення для збору інформації створене в середовищі LabVIEW, забезпечувало безперервне зчитування сигналів від чотирьох гідравлічних датчиків тиску, дванадцяти тензометричних сенсорів, потенціометричного вимірювача положення та GPS-модуля з частотою дискретизації 10 Гц. Усі значення, зафіксовані під час експерименту, надходили на аналіз у первинному вигляді, без будь-якої попередньої корекції або фільтрації. Для побудови часових залежностей використовували усереднені показники кожних п'яти послідовних вимірювань, що давало змогу візуалізувати динаміку змін параметрів з кращою наочністю.

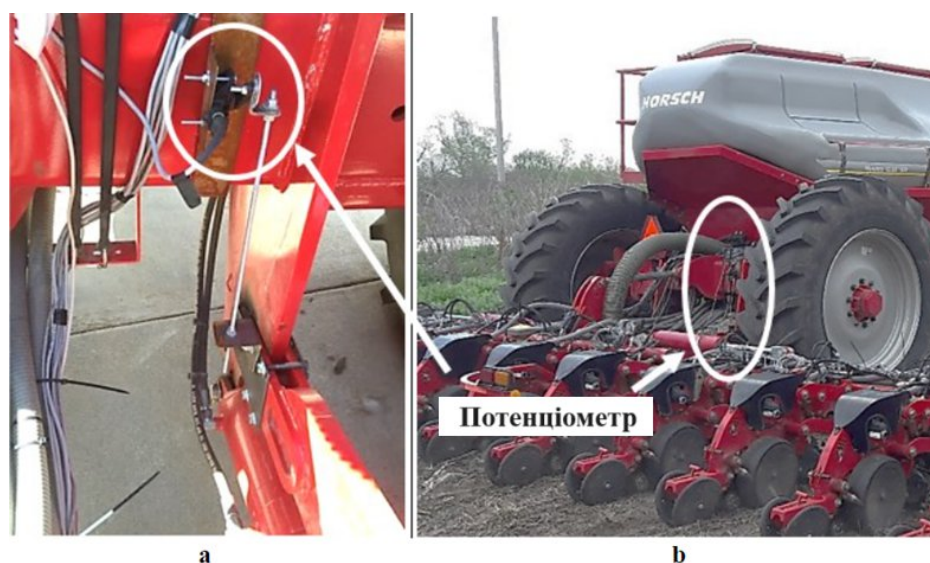


Рис. 4 - Потенціометр, встановлений на корпусі осі насінневого візка, і нижній ланці, прикріпленій до панелі інструментів сівалки (а) для контролю положення панелі інструментів сівалки відносно корпусу осі, щоб кількісно визначити підняте або посівне положення (б) панелі інструментів

### 2.3 Електропровідність ґрунту

Електричну провідність ґрунтового шару під час руху техніки проводили шляхом застосування пересувної сенсорної системи Veris MSP (м. Саліна, штат Канзас, Сполучені Штати Америки). Дані вимірювання отримували за допомогою агрегата Veris MSP, змонтованого на триточковій підвісці трактора марки Kubota M9000, що забезпечувало стабільність і рівномірність збирання інформації. Обладнання EC Mapper, інтегроване в платформу MSP, було налаштовано на реєстрацію показників ЕП на двох рівнях профілю ґрунту: поверхневому (0–0,31 м) та глибшому (до 0,91 м), що дозволяло оцінити просторову мінливість властивостей орного шару.

Програмне забезпечення Veris SoilViewer версії 2.70 здійснювало фіксацію просторових точок вимірювання в реальному часі з залученням GPS-навігації. Частота збору даних становила 1 Гц, а переміщення виконувалося вздовж трансект завдовжки 18,3 м, що гарантувало високу деталізацію польового картографування.

Сенсорна система Veris MSP автоматично розподіляла значення електропровідності на п'ять інтервалів: низький (8,0–19,71 мСм/м), середньо-низький (19,4–25,4 мСм/м), середній (23,5–31,1 мСм/м), середньо-високий (29,8–48,2 мСм/м) та високий (37,2–87,1 мСм/м). Території, що відповідали двом мінімальним діапазонам, центральному та двом максимальним рівням показників ЕП, визначались як ключові для відбору проб ґрунту з метою їхнього поглибленого аналізу.

Після завершення процедур польових вимірювань здійснювався відбір ґрунтового матеріалу за допомогою пробовідбірника Classic Soil Probe з наконечником діаметром 1,9 см (модель L, Oakfield Apparatus, Fond du Lac, Вісконсин, США). У межах кожної ділянки відбирали по дванадцять проб для лабораторних досліджень: по чотири зразки з кожної групи, що

характеризувалася різними рівнями електропровідності. Глибина відбору матеріалу становила 30,6 см, що дозволяло дослідити властивості орного шару, який є найбільш важливим для вирощування культур. Усі відібрані проби були передані до лабораторії аналізу ґрунтів для визначення їх фактичної електропровідності та подальшої оцінки фізико-хімічних характеристик.

Після калібрування даних електропровідності (ЕП) ґрунту, отриманих за допомогою системи Veris, їх було застосовано для формування згладжених тематичних карт ЕП у програмному середовищі ArcGIS 10.3, використовуючи метод точкового звичайного крігінгу для просторової інтерполяції. З метою наочного відображення варіацій електропровідності створені картографічні матеріали були поділені на три різні ділянки за допомогою класифікаційного підходу природних розривів у ArcMap. Виділені просторові сегменти ЕП співпадають із зонами, де проводився відбір зразків ґрунтового матеріалу, після чого вони були розподілені відповідно до рівня показника: низький, середній та високий ступінь електропровідності ґрунтового шару. Для кожної з отриманих класифікаційних зон було визначено середній показник вмісту нутрієнтів (НК), що дозволило простежити, наскільки чітко просторові відмінності НК відповідають переходам між рівнями ЕП на межах кожного господарського поля. Згідно з попередніми науковими спостереженнями існує тісна залежність між електропровідністю та гранулометричним складом ґрунтів. У зв'язку з цим у межах даного дослідження виділення ґрунтів з низькою, середньою та високою ЕП трактувалося як умовне відображення ґрунтів легкої, середньої та важкої текстурної будови відповідно.

Вміст води в ґрунті визначали із застосуванням переносного цифрового приладу для контролю вологості ґрунтового середовища Hydrosense II (виробництва *Campbell Scientific, Inc.*, штат Юта, Сполучені Штати Америки). Обладнання комплектувалося датчиком довжиною 12 см, що забезпечував точне фіксування значень у верхньому шарі ґрунту.

У межах кожного дослідного поля здійснювали 9 замірів вологості: по три вимірювання з окремих функціональних зон електропровідності (ЕП), розташованих на глибині 12 сантиметрів. Отримані результати дозволили сформулювати уявлення про просторову неоднорідність водного режиму ґрунту.

Середній показник вологості під час картування ЕП склав близько 34,5% об'ємного вмісту води, при цьому встановлено значні коливання — від 17,3% у найсухіших точках до 43,7% у зонах з підвищеним зволоженням.

## 3 АНАЛІЗ ДАНИХ ПОЛЬВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Перевірка фіксованої притискної сили сівалки

Контроль параметрів тиску в гідравлічній системі робочої рідини дозволив переконатися, що необхідна притискна дія на всі висівні секції була стабільною та витримувалася в процесі польового досліджу. На рисунку 5 наведено типовий фрагмент зміни гідравлічного тиску під час функціонування посівного агрегату в умовах реального часу. Отримані дані свідчать про те, що гідравлічний привід ефективно забезпечував постійний робочий тиск близько 5,6 МПа протягом практично всього інтервалу експериментальних досліджень. Разом з тим, можна помітити декілька моментів, коли значення нормальної сили опускалося до 0 Н. Такі ситуації характеризувалися тим, що висівна секція тимчасово втрачала контакт із поверхнею ґрунту під час переміщення агрегату.

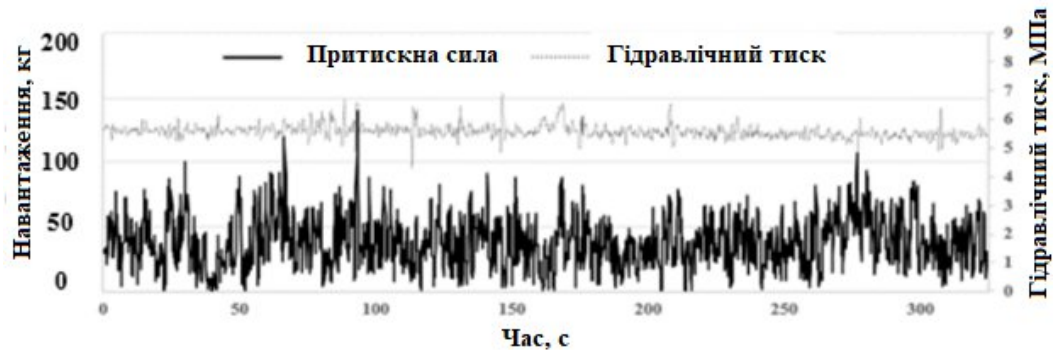


Рис. 5 - Приклад польових даних, які демонструють тиск гідравлічного масла для застосування фіксованої притискної сили на одній висівній секції

Під час обробки отриманих результатів застосовувався метод ковзного середнього, який забезпечував згладжування випадкових стрибків шляхом обчислення усередненого показника для п'яти поспіль зафіксованих значень. У таблиці 1 продемонстровано, що сенсори контролю навантаження на опорне колесо вимірювальної системи постійно фіксували стан, еквівалентний відсутності будь-якого тиску, у моменти, коли секції сівалки підіймалися на

розворотах протягом усього періоду виконання посівних робіт. Низькі величини стандартного відхилення підтверджують регулярне повернення кожного з датчиків до нульового рівня навантаження, щойно панель інструментів знову опускалася до робочої позиції. Подібні результати є доказом коректної калібровки навантажувальних датчиків НК, що гарантувало їхню стабільну та точну роботу на всіх етапах проведеного експерименту.

**Таблиця 1 - Описова статистика показань тензодатчиків без навантаження для кожної секції під час посіву**

Поле		Показання тензодатчиків для кожного рядка, мА											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
А	сер.	4,43	-	4,17	4,05	4,46	4,73	4,56	4,32	4,07	4,33	4,02	4,31
	відх.	0,02	-	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	мін.	4,26	-	3,95	3,70	4,15	4,46	4,29	4,04	3,82	4,00	3,70	4,03
	макс.	4,61	-	4,40	4,36	4,80	5,02	4,80	4,61	4,39	4,63	4,34	4,57
В	сер.	4,43	4,05	-	4,11	4,45	4,67	4,53	4,30	4,17	4,34	4,01	4,28
	відх.	0,02	0,06	-	0,11	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
	мін.	4,36	3,73	-	3,95	4,35	4,55	4,44	4,21	4,08	4,25	3,90	4,16
	макс.	4,55	4,36	-	4,39	4,59	4,81	4,61	4,43	4,26	4,45	4,11	4,39
С	сер.	4,44	4,06	4,18	4,07	4,44	4,67	4,53	4,29	4,48	4,33	4,02	4,25
	відх.	0,02	0,13	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03
	мін.	4,26	2,39	3,90	3,68	4,04	4,30	4,16	3,90	4,10	3,98	3,66	3,92
	макс.	4,76	5,45	4,48	4,45	4,77	5,02	4,83	4,61	4,80	4,66	4,42	4,61

### **3.2 Розподіл притискної сили (НК)**

Опрацьовані дані свідчать, що оптимальні значення навантаження на копіювальні колеса (НК), у межах 12–57 кг, забезпечувалися під час 27%, 34% і 38% тривалості посіву відповідно для ділянок А, В та С (див. рис. 6). На

графіку (рис. 6) також видно, що параметр НК у різних секціях висівного апарата істотно змінювався протягом усього виконання сівби на всіх дослідних ділянках, що свідчить про високу мінливість умов у полі.

За середніми показниками встановлено, що на полі А приблизно 35% часу НК перебував нижче нуля, на полі В – 28%, тоді як на полі С лише 12% часу фіксували подібну ситуацію. Посів за умов, коли НК має від’ємне значення, говорить про неналежний контакт колес із поверхнею ґрунту, що, у свою чергу, призводить до нестабільної та непередбачуваної глибини загортання насіння.

Щодо випадків надмірного тиску, коли НК перевищував 100 кг, то найменша частка таких ситуацій виявлена на ділянці В — всього близько 6% загального часу. Такий широкий діапазон коливань НК — приблизно від 0 до 100 кг протягом усього технологічного процесу — добре корелює з результатами інших експериментів. Раніше повідомлялося, що вимірні значення НК можуть варіювати в межах 20...600 кг, причому суттєві зміни спостерігаються навіть на коротких відрізках руху вздовж борозни, що підкреслює вплив нерівностей поверхні та неоднорідності ґрунту.

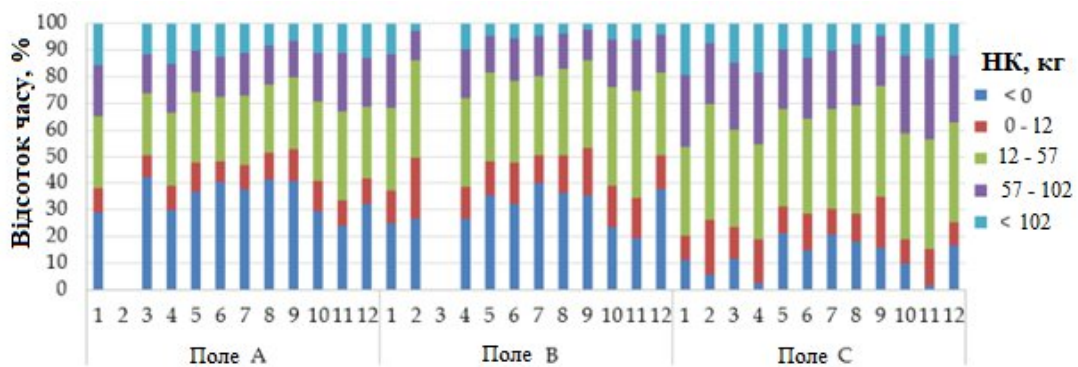


Рис. 6 - Середнє навантаження на коліс (НК) у відсотках часу для окремих висівних секцій було в межах і вище або нижче цільового діапазону від 12 до 57 кг для поля А, поля В і поля С. Дані для висівного агрегату 1 для поля А та одиницю рядка 3 для поля В видалено через помилки вимірювання

Отримані дані засвідчили, що використання норм висіву (НК) спричинило формування значних ділянок (Рис. 7а, 8а та 9а), які охоплюють близько 67% території або приблизно 14,7 га, засіяних із завищеним чи недоцільно обраним значенням НК. Зміни у величині норми висіву переважно пояснюються необхідністю додаткового навантаження на сошниковий диск, що залежить від рельєфу поля, кількості рослинних решток на поверхні, швидкості руху під час посіву, а також щільності ґрунтового шару для забезпечення потрібної глибини закладання насіння. Встановлено, що НК у 7% випадків була нижчою від оптимальних параметрів, а впродовж 24% періоду роботи — перевищувала рекомендовані значення. Частка площі, на якій норма висіву становила 0 кг, головним чином була наслідком вибору занадто низького цільового показника НК для окремих зон поля.

Величина притискного зусилля на одну висівну секцію складала приблизно 138 кг (власна вага секції разом із запланованим нормативним навантаженням на копіюючі колеса). Такий показник може виявитися недостатнім для стабільного забезпечення постійного контакту коліс із поверхнею ґрунту в процесі висіву. Є підстави вважати, що при загальному навантаженні нижче 220 кг виникає потреба у підвищенні тиску притискної системи для якісного заглиблення сошників у ґрунт. Якщо ж маси буде бракувати, існує загроза періодичного відриву опорного колеса від ґрунтового профілю, що негативно вплине на рівномірність посіву.

Таким чином, просторові коливання та відхилення цільового навантаження на копіюючі колеса, які спостерігаються під час роботи на певній ділянці, демонструють необхідність збільшення розрахункового НК відповідно до польових умов. Крім того, для підвищення якості копіювання рельєфу та стабілізації тиску може бути доцільним застосування автоматизованого механізму регулювання притискної сили на секцію. Така адаптивна система дозволить налаштовувати навантаження індивідуально для

кожного рядка і забезпечить більш рівномірне прикладання тиску під час сівби, що сприятиме покращенню загальних показників якості висіву.

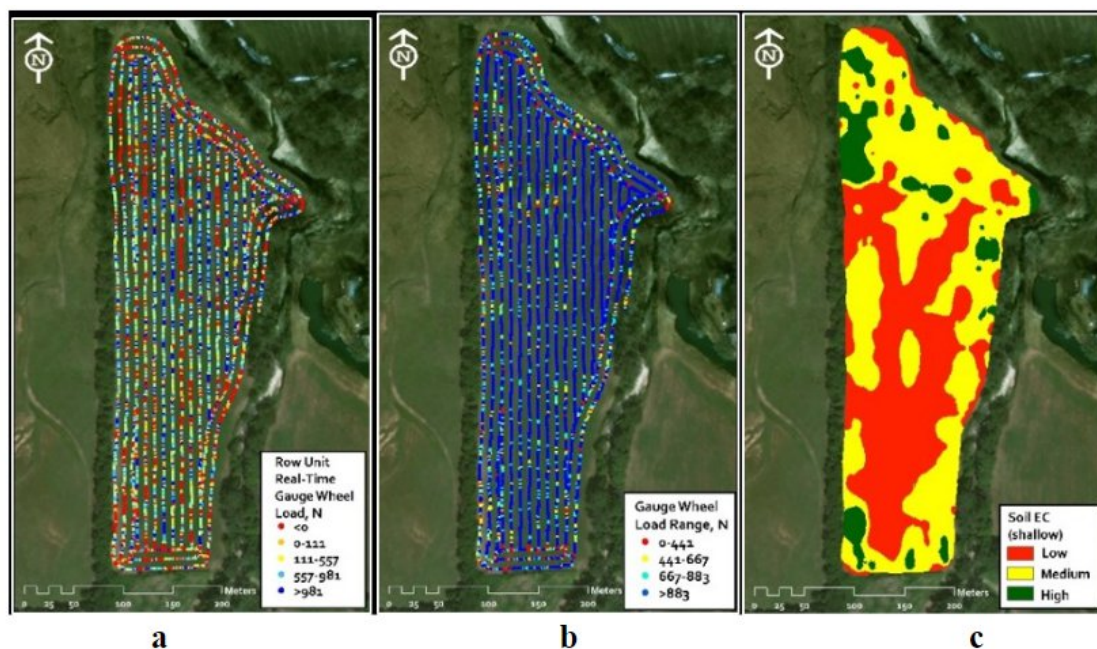


Рис. 7 - Навантаження на колесо (НК) висівної секції 1 (а); діапазон навантаження коліс (НК) (b) і; карта ЕП ґрунту (с) для поля А

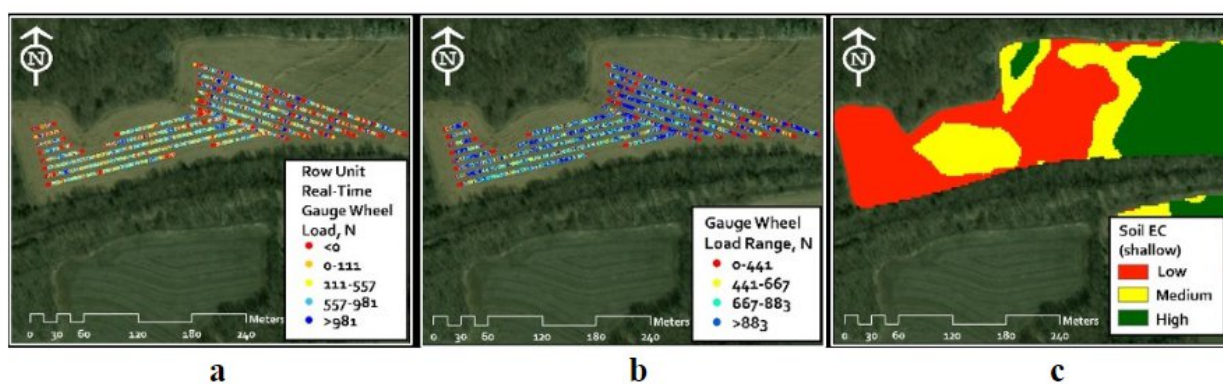


Рис. 8 - Навантаження на колесо секції (НК) 1 (а); діапазон навантаження коліс (НК) (b) і; ґрунтова карта ЕП (с) для поля В

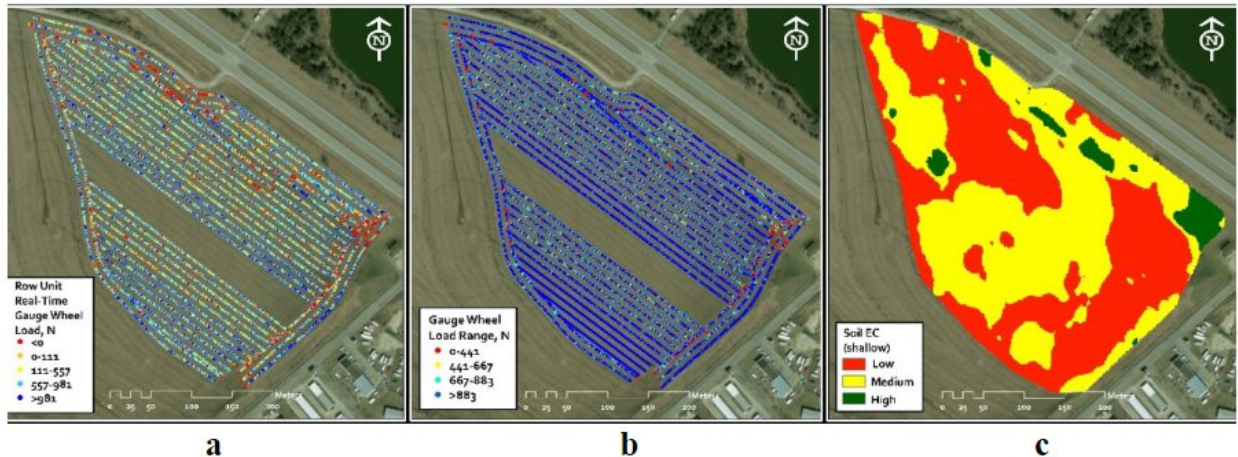


Рис. 9 - Навантаження на колесо (НК) висівної секції 1 (а); діапазон навантаження на колесо (НК) (b) і карта ЕП ґрунту (с) для поля С

### 3.3 Розподіл притискної сили

Отримані під час випробувань дані засвідчили, що на ділянках А та С упродовж майже 70% загального часу роботи навантаження на копіювальні колеса (НК) на всіх висівних секціях перевищувало значення у 90 кг, тоді як на полі В така ситуація мала місце лише приблизно в 41% часу (див. рис. 10). Для поля С було зафіксовано найменшу кількість випадків — приблизно 2% тривалості посіву — коли різниця навантажень між суміжними рядами, що відображалась на панелі інструментів, перебувала в рекомендованих межах від 0 до 45 кг. Як показано на рисунку 8, подібні різкі коливання величини НК спричинені нерівномірним навантаженням на висівні секції в процесі роботи, коли одна секція практично не має тиску на ґрунт (НК наближається до нульового рівня), у той час як інша секція піддається значним навантаженням, що сягають понад 90 кг.

Зміни НК між різними рядами на панелі управління свідчать про те, що окрема висівна секція протягом більшої частини часу потребуватиме різного рівня притискної сили для забезпечення заданого НК. Іншими словами, одного єдиного налаштування для всієї панелі інструментів буде недостатньо, щоб досягти потрібного НК на всіх окремих секціях одночасно.

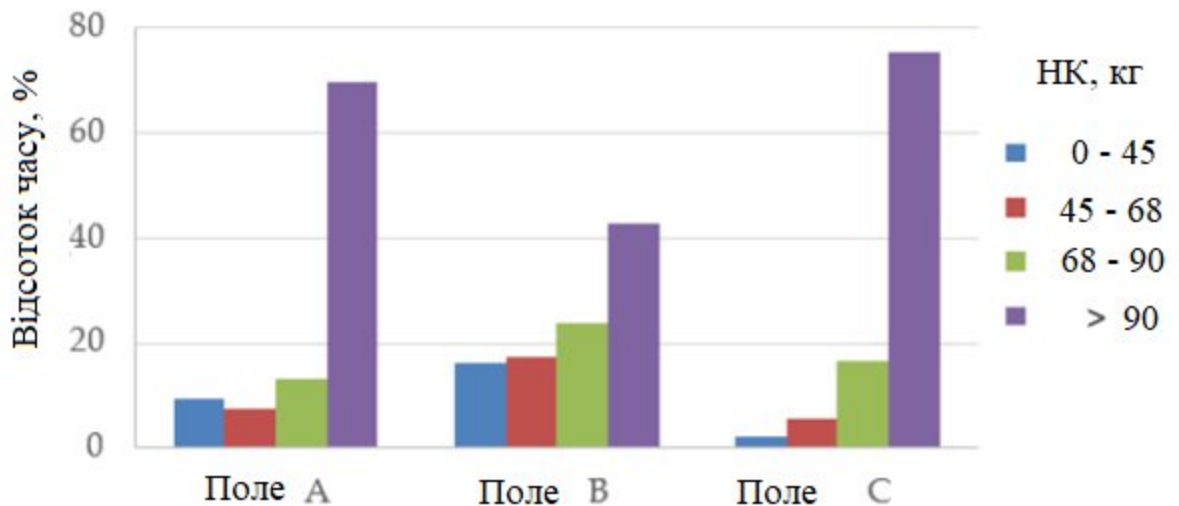


Рис. 10 - Відсотковий діапазон навантаження на колесо (НК)

### 3.4 Сценарії керування НК посекаційно

Аналіз результатів із різними сценаріями керування секціями на 2, 3 та 4 ряди демонструє, що досягнення нижчого НК протягом більшої частини часу посіву легше реалізувати при меншій кількості рядків у секційному контролі (рис. 11). Для контролю 2-рядів НК перебував у бажаному інтервалі від 0 до 45 кг приблизно 81%, 85% та 60% від загального часу посіву на полях А, В і С відповідно. У свою чергу, при застосуванні 4-рядного секційного контролю НК залишалося у вказаних межах лише 23%, 46% та 15% часу посіву на цих самих ділянках. Зі збільшенням кількості рядків у секції спостерігається зростання варіабельності НК, зокрема значення понад 90 кг зустрічалися 23%, 4% та 19% часу для полів А, В і С відповідно при 4-рядному управлінні. Ці дані підкреслюють, що вимоги до НК висівних секцій значною мірою залежать від

змін польових умов, і застосування меншої кількості рядків на одну секцію може сприяти більш однорідному НК під час проведення посівних робіт.

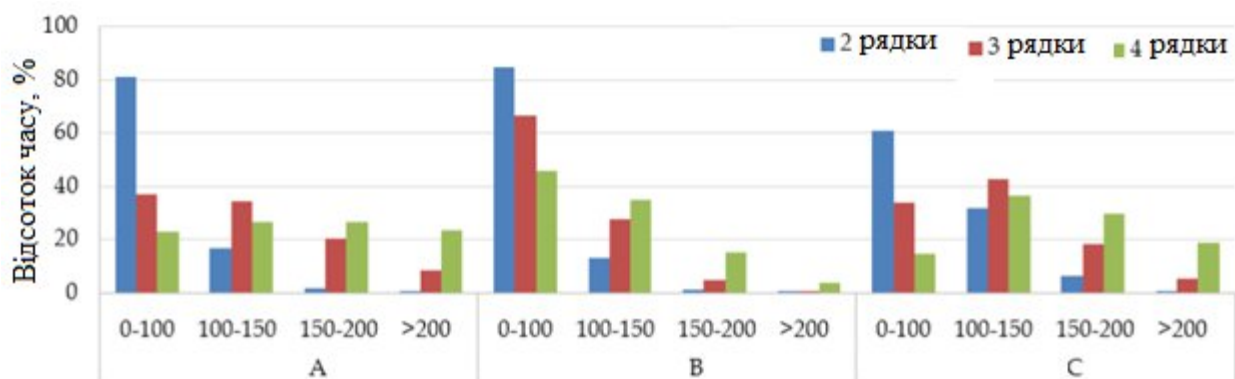


Рис. 11 - Варіабельність НК від рядка до рядка з різними комбінаціями контрольних секцій для всіх полів

## ВИСНОВКИ

Дослідження надало такі основні висновки: у середньому бажана норма навантаження (НК) від 12 до 57 кг була досягнута лише в 27%, 34% та 38% часу для полів А, В і С відповідно. Значення НК у реальному часі нижче встановленого діапазону спостерігали у 38% випадків, а перевищення цільового показника – у 29% часу для всіх трьох ділянок. Аналіз різних сценаріїв управління секціями рядків показав, що 2-рядний контроль секції є більш ефективним, ніж 4-рядний, для забезпечення більш рівномірного розподілу НК між рядками та врахування різноманітних властивостей ґрунту під час сівби. Звернено увагу, що в середньому лише 9% часу НК на 12-рядних агрегатах перебувала у межах 0–45 кг, тоді як для 4-рядних секцій цей показник складав 28%, а для 2-рядних керованих секцій – 76%.

Регресійний аналіз продемонстрував, що електропровідність (ЕП) або текстура ґрунту є важливим фактором, який істотно впливає на фактичну НК. Порівняння показало, що низька ЕП ґрунту призводить до значного підвищення НК у порівнянні з ділянками з високою ЕП на всіх трьох полях. Проте швидкість пересування агрегату, наявність пожнивних решток та інші змінні також можуть спричиняти коливання НК. Доріжки з колесами і без них демонстрували значну різницю середньої НК: на смугах без слідів шин середня норма становила 38,6 кг, 31,6 кг та 48,8 кг для полів А, В і С відповідно, що на 13%, 12% та 14% нижче, ніж на ділянках зі слідами шин.

Отримані дані свідчать, що обрана цільова НК для системи з фіксованою притискною силою була надто низькою, через що досягти встановленої норми вдалося лише частково під час сівби. Це може призвести до недостатньої глибини загортання насіння. Результати підкреслюють потребу в автоматичній системі регулювання притискної сили, яка дозволяє контролювати менші секції рядків та незалежно управляти окремими частинами агрегату як на колії,

так і поза нею, забезпечуючи більш однорідне внесення НК на всіх рядках. Подальші дослідження слід проводити на просапній сівалці з автоматичною системою управління притисковою силою для кількісної оцінки рівномірності НК окремих рядків або контрольних секцій за різних умов роботи на полі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

6. Полторецький С. П. Оцінка залежності врожайності і показників якості насіння проса залежно від строку та способу сівби / С. П. Полторецький, Н. М. Полторецька. // ВІСНИК Полтавської державної аграрної академії. – 2019. – №4. – С. 29–31.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

20. Спосіб оцінки точності висіву [Електронний ресурс] / О.Банний, А. Новицький, С. Карабиньош, Ю. Новицький // Пропозиція, № 5. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://propozitsiya.com/ua/sposib-ocinky-tochnosti-vysivu>.
21. Shannon D., Clay E., Kitchen N. (2018). Precision Agriculture Basics. American Society of Agronomy, Incorporated, 230p.
22. Jupp L. (2018). Precision Farming From Above. Writing Matters Publishing, 113 p.
23. Zubko V., Sirenko V., Kuzina T., Onychko V., Sokolik S., Roubik H., Koszelg M., Shchurh T. (2022) Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. Agricultural Engineering, Vol. 26 , No 1 , pp. 25-37 DOI: 10.2478/agriceng-2022-0003.
24. Delta Force [Електронний ресурс] // Precision Planting. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.precisionplanting.com/products/product/deltaforce>.
25. Збірник методик з використання машин в землеробстві /За ред. Мельника В. І. – Харків: “Промпроект” – 2020, 257 с