

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Допускається до захисту
Завідувач кафедри

_____ Володимир ДІДУР
“ ” _____ 2025

ДИПЛОМНА РОБОТА
магістр
(освітній ступінь)

на тему: «ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНОГО
ВИСІВНОГО АПАРАТА»

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім,
спеціальність Н7 «Агроінженерія»

_____ Валерій ОСАДЧИЙ

Керівник: _____ Олександр ПУШКА

м. Умань – 2025

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Освітній рівень магістр
Спеціальність Н7 «Агроінженерія»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Володимир ДІДУР
“ ” _____ 2025

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Осадчий Валерій Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

керівник роботи Пушка Олександр Сергійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«___» _____ 2025 року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Огляд стану питання в галузі машинобудування та існуючих машин для сівби. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1.Особливості сучасного стану сівби зернових культур. 2. Теоретичні дослідження роботи пневматичного висівного апарата. 3. Програма і методи експериментальних досліджень. 4. Результати експериментальних досліджень розроблених струминних елементів і висівних систем. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Економічна ефективність впровадження сівалки у виробництво. Загальні висновки. Список використаної літератури.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1,2. Мета роботи, об'єкт, предмет дослідження. 3. Аналіз технічних засобів для реалізації диференційованого висіву зернових культур. 4.

Теоретичні дослідження роботи пневматичного висівного апарата 5. Дослідження показників робочого процесу пневматичної висівної системи дискретної дії з елементами пневмоніки. 6. Структурна послідовність методології досліджень 7. Загальний вигляд запропонованого універсального висівного апарату. 8. Теоретичне обґрунтування технологічного процесу роботи. 9. Загальний вигляд запропонованого універсального висівного апарату. 10. Загальні висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
1	Пушка О.С., к.т.н., доцент		
2	Пушка О.С., к.т.н., доцент		
3	Пушка О.С., к.т.н., доцент		
4	Пушка О.С., к.т.н., доцент		
5	Прокопенко Е.В., к.с.-г.н., доцент		
6	Пушка О.С., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання: _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 18.04.2025 р.	Виконав
2	Теоретичний	до 20.06.2025 р.	Виконав
3	Методика виконання	до 25.08.2025 р.	Виконав
4	Експериментальний	до 12.09.2025 р.	Виконав
5	Охорона праці	до 17.10.2025 р.	Виконав
6	Економічний	до 07.11.2025 р.	Виконав
7	Демонстраційна частина	до 14.11.2025 р.	Виконав

Студент

_____ (підпис)

Валерій ОСАДЧИЙ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Олександр ПУШКА
(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	8
1. Особливості сучасного стану сівби зернових культур.....	10
1.1. Обґрунтування підходу до аналізу проблеми підвищення ефективності роботи зернових сівалок.....	10
1.2. Аналіз показників якості висівних систем зернових сівалок та агробіологічна оцінка їх роботи.....	12
1.3. Продуктивність посівних агрегатів в проблемі підвищення ефективності їх функціонування.....	14
1.4. Аналіз технічних засобів для реалізації диференційованого висіву зернових культур.....	18
1.5. Недоліки та ускладнення, що виникають при адаптації зернових сівалок до диференційованого висіву в технологіях точного землеробства	29
1.6. Висновки до розділу.....	30
2. Теоретичні дослідження роботи пневматичного висівного апарата.....	32
2.1. Функціонально-структурний аналіз систем автоматизації та управління нормою висіву.....	32
2.1.1. Структурний синтез мехатронного модуля управління висівом.....	32
2.1.2. Метод функціонально-структурної інтеграції систем регулювання норми	36
2.2. Дослідження енергетичних характеристик силового струминного елемента.....	37
2.3. Дослідження показників робочого процесу пневматичної висівної системи дискретної дії з елементами пневмоніки.....	40
2.3.1. Визначення діапазону норм висіву зернових культур висівним апаратом маятникового типу.....	40
2.3.2. Визначення енергетичних показників роботи висівного апарату.....	41
2.3.3. Визначення енергетичних показників роботи насіннєпроводів.....	42
2.4. Висновки до розділу.....	46
3. Програма і методи експериментальних досліджень.....	48
3.1. Програма досліджень.....	48
3.1.1. Прилади, обладнання і матеріали для виконання завдань експериментальних досліджень.....	49
3.1.2. Методи проведення експериментальних досліджень та обробка бази експериментальних даних.....	50
3.2. Методика досліджень реологічних властивостей технологічних матеріалів.....	53
3.3. Методика стендових досліджень розроблених струминних висівних пристроїв з елементами пневмоніки.....	55
3.3.1. Дослідження запропонованих струминних висівних пристроїв з елементами пневмоніки на нерівномірність і нестійкість висіву.....	55
3.4. Висновки до розділу.....	60
4. Результати експериментальних досліджень розроблених струминних елементів і	

висівних систем.....	61
4.1. Результати визначення початкового опору зсуву ґрунту, підготовленого до сівби.....	61
4.2. Результати імітаційного моделювання функціонування силового струминного елемента.....	62
4.3. Результати випробувань автоматизованої системи регулювання норми висіву.....	68
4.4. Висновки до розділу.....	70
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	71
5.1. Дослідження та оцінка стану з охорони праці в ПП «Ларіни».....	71
5.2 Аналіз показників виробничого травматизму та захворювань, причини їх виникнення в господарстві.....	74
5.3. Заходи по поліпшенню умов праці.....	76
6. Економічна ефективність впровадження сівалки у виробництво.....	80
Загальні висновки.....	86
Список використаної літератури.....	88

РЕФЕРАТ

Оптимізація ефективності функціонування пневматичного висівного апарата. Магістерська кваліфікаційна робота включає вступ, п'ять основних розділів, підсумкові висновки та список використаних джерел, що налічує 47 позицій. Основний матеріал представлено на 82 сторінках друкованого тексту та доповнено 32 ілюстраціями і 4 таблицями.

Метою дослідження є підвищення результативності робочого процесу зернових сіялок шляхом упровадження пневматичних висівних апаратів та систем дискретної дії.

У межах роботи розглянуто сучасний стан та особливості функціонування зернових сіялок, проаналізовано їхні конструктивні та технологічні характеристики. Проведено теоретичні дослідження ефективності різних типів висівних апаратів, запропоновано та обґрунтовано конструкцію пневматичного висівного механізму дискретної дії. Виконано комплекс експериментальних досліджень, за результатами яких підвищено ефективність роботи модернізованого експериментального висівного апарата, наведено характеристику його функціонування, отримано техніко-економічні показники та сформульовано практичні рекомендації для подальшого впровадження у виробництво.

Ключові слова: пневматичний висівний апарат, насіння, зернова сіялка, процес сівби, розрідження, прискорення, ефективність, сила тяжіння, продуктивність.

ВСТУП

На сьогодні значна частина сівби польових культур здійснюється із застосуванням застарілих технологічних рішень та конструктивно недосконалих посівних машин. Домінуюче положення на ринку й надалі займають рядові сівалки типу СЗ-3,6, які відомі високою матеріало- та енергоємністю. Технологія висіву такими агрегатами вже не відповідає сучасним агротехнічним вимогам: під час роботи відбувається перевитрата насіння на рівні 10...30%, а також його механічне травмування. Низька точність дозування та недосконалість висівних апаратів призводять до скорочення врожайності посівів на 15...30%. Тому подальший розвиток технічної політики у цьому напрямі має ґрунтуватися не лише на модернізації чинних моделей, а й на створенні принципово нового покоління посівних машин.

Інноваційна динаміка розвитку аграрної галузі нині залишається недостатньою, що знижує ефективність застосування передових технологій і негативно впливає на конкурентоспроможність сільськогосподарської продукції. Виробництво нової техніки стримується надто повільним оновленням та впровадженням прогресивних робочих органів, здатних забезпечити вищі якісні та енергетичні показники під час сівби.

Оскільки традиційні можливості підвищення ефективності існуючих механічних систем практично вичерпані, пріоритетного значення набуває упровадження інтелектуальних керуючих систем, автоматизації, роботизації, широке застосування електроніки та рішень точного землеробства. Подальше розширення можливостей класичних механічних систем не дає очікуваного ефекту, що проявляється в уповільненні темпів зростання їхніх технічних та функціональних характеристик.

Порівняно з провідними світовими аграрними економіками, українські виробники все ще обмежено використовують сучасні технічні та технологічні напрацювання. Вітчизняні машинобудівні підприємства продовжують

випускати морально застарілу техніку, створену 30–40 років тому. У результаті в господарствах часто вимушено застосовуються спрощені екстенсивні технології, що базуються на використанні техніки третього, подекуди четвертого технологічного укладу. Водночас продуктивність таких рішень до 10–15 разів нижча порівняно з показниками, характерними для країн із високотехнологічним землеробством. Сільськогосподарські машини п'ятого технологічного укладу мають забезпечувати високоточне інформаційне управління технологічними процесами вирощування культур.

Для подолання причин, що об'єктивно знижують ефективність техніки та технологічних операцій, необхідно забезпечити перехід на новий етап технічного прогресу. Це можливо реалізувати шляхом удосконалення робочих процесів, перегляду механіко-технологічних принципів впливу на насіннєвий матеріал, а також оновлення конструктивно-компонувальних схем і параметрів посівних машин. У зв'язку з цим формування наукових засад підвищення ефективності зернових сівалок шляхом розроблення нових технічних рішень із використанням пневматичних висівних апаратів дискретної дії є безперечно актуальним завданням.

1. ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНОГО СТАНУ СІВБИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

1.1. Обґрунтування підходу до аналізу проблеми підвищення ефективності роботи зернових сівалок

У загальній системі агротехнічних заходів особливу роль відіграє процес сівби. Саме ця технологічна операція є визначальною як в агрономічному аспекті, так і з позиції техніко-економічної ефективності виробництва [7]. Ефективність роботи зернових сівалок є ключовою вимогою до будь-якої технічної системи, що використовується в рослинництві. Оскільки аграрна техніка працює у складних умовах взаємодії різнохарактерних процесів, її дослідження та розроблення потребують комплексного підходу, який охоплює технічні, технологічні, біологічні та соціальні аспекти. Це зумовлює необхідність аналізу всіх факторів і складових частин як єдиної інтегрованої системи.

Відповідно, основним методологічним підходом у даному дослідженні є системний підхід, що дає можливість обґрунтувати і сформулювати найбільш раціональні рішення, спрямовані на підвищення ефективності функціонування зернових сівалок. Для цього слід сформулювати концепцію розвитку системи, визначити її основні параметри та встановити пріоритетні напрями вдосконалення, як зазначено в роботах [5, 32].

Ураховуючи вищевикладене, можна стверджувати, що проблема підвищення результативності роботи зернових сівалок належить до розряду слабо структурованих, оскільки поєднує кількісні та якісні характеристики. Для аналізу й вирішення таких проблем доцільно застосовувати методи системного аналізу, метою яких є трансформація слабо структурованих задач у чітко сформульовані моделі, придатні до розрахунку та порівняльної оцінки з використанням як традиційних, так і сучасних наукових методів [46].

Одними з ключових принципів системного підходу є принципи оптимальності та системності. Принцип оптимальності вимагає вибору серед

можливих технічних рішень таких варіантів, які забезпечують найкращий комплекс експлуатаційних, технологічних та економічних показників у конкретних виробничих умовах [46]. Таким чином, оцінювання ефективності роботи висівних апаратів і сівалок здійснюється за відповідними показниками або критеріями ефективності — кількісними моделями якісних цілей, як це доведено у працях [43, 46]. Вирішальне значення має правильне формулювання критеріїв і показників, а також можливість порівняння різнорідних величин та запровадження універсальних параметрів оцінки [24].

Принцип системності, зі свого боку, передбачає сприйняття нової техніки як комплексного об'єкта, що складається з взаємопов'язаних функцій та елементів, узгоджена робота яких забезпечує досягнення необхідного результату за мінімальних витрат ресурсів, часу і з мінімальним впливом на довкілля.

Проблема оцінювання ефективності потребує цілісного аналізу всієї системи. Методи оцінювання можуть мати формалізований (математичний) характер або бути евристичними (експертними) [44]. Експертний підхід передбачає залучення думок фахівців і врахування досвіду та напрацювань дослідників відповідної наукової галузі, що дозволяє об'єктивно оцінити перспективність технічних рішень та визначити їх практичну цінність.



Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема факторів, що формують ефективність функціонування зернових сівалок.

За умов застосування системного підходу під час аналізу функціонування технічних систем у процесі формалізації визначається обмежене коло ключових властивостей, що найбільш повно відображають специфіку роботи об'єкта. У цьому контексті структурна схема (рис. 1.1), яка відображає систему показників ефективності роботи зернових сівалок E_{pc} , сформована на основі експертних оцінок, може бути подана у вигляді узагальненого комплексу показників, як це зазначено у працях [41, 43]:

$$E_{pc} = f(x_1, x_2, x_3, x_i, \dots, x_n), \quad (1.1)$$

де x_i – окремі критерії та показники, що характеризують ефективність функціонування системи.

Аналіз структурних чинників, представлених на рис. 1.1, дозволяє встановити кількісну природу критеріїв, за допомогою яких формується інтегрований комплекс показників ефективності 1.1. Такий підхід забезпечує можливість подальшого математичного описання системи та створює підґрунтя для кількісної оцінки впливу кожного показника на загальний результат роботи зернових сівалок.

1.2. Аналіз показників якості висівних систем зернових сівалок та агробіологічна оцінка їх роботи

Якість виконання операції сівби є одним із ключових чинників, що визначає рівень технологічного забезпечення виробництва продукції рослинництва. Саме якість висіву впливає на інтенсивність проростання насіння, рівень схожості та подальшу динаміку росту і розвитку рослин [7].

Попри це, значна частина культур і досі висівається із застосуванням застарілих технологій та конструктивно недосконалих посівних машин. На практиці домінує використання рядкових зернотукових сівалок типу СЗ-3,6, які відомі високою матеріало- та енергоємністю. Технологія висіву такими агрегатами

не відповідає сучасним агротехнічним вимогам, спричиняє 10...30% перевитрати насіння та підвищений рівень його травмування [26]. Крім того, моделі СЗ-3,6 морально застаріли й потребують глибокої модернізації.

Одним із перспективних напрямів розвитку техніки для висіву зернових культур є впровадження сівалок із пневматичними централізованими висівними системами (ПЦВС). Такі машини мають високий потенціал щодо продуктивності й технологічної гнучкості. Разом з тим, вони характеризуються низкою недоліків. Найбільш значущими є підвищена нерівномірність розподілу насіння між сошниками (у межах 4...9% при вертикальному розташуванні трубопроводів та 12...18% — при їх нахилі до 15°), а також суттєве пошкодження насіння. Це пов'язано з багаторазовими ударами насінин об стінки трубопроводу, зустрічною взаємодією з розподільчою головкою та високою швидкістю їх руху у пневмотрактах, яка становить 25 м/с і може досягати 70 м/с — значно більше, ніж у механічних висівних системах (1,6 м/с).

Аналіз наявних технічних рішень і конструкцій, спрямованих на поліпшення якості висіву, свідчить, що окремі вдосконалення дають змогу певною мірою підвищити рівномірність розподілу насіння в поперечному напрямі. Однак ці заходи можуть призвести до небажаних явищ: підвищення травмування насіння, ускладнення конструкції розподільників, збільшення опору руху насіння тощо. Таким чином, доведено, що недосконалість посівних машин може знижувати врожайність зернових культур на 15...30% [3].

Вітчизняний парк посівної техніки гостро потребує модернізації та впровадження принципово нових технічних рішень. За даними роботи [16], на один гектар в Україні висівають у середньому втричі більше насіння, ніж у країнах із розвинутим рослинництвом. Така перевитрата — результат низької якості насіннєвого матеріалу, недостатньої підготовки ґрунту та технічної недосконалості машин. Через це щорічно додатково витрачається близько 1,5 млн тонн насіння.

Дослідження [9, 10] акцентують увагу на біологічних особливостях зернових культур, що визначають агротехнічні вимоги до сівби. Практика показує, що для колосових культур надмірна точність розподілу насіння не завжди є критичною,

оскільки після проростання рослини здатні до кущіння. На загущених посівах кущіння слабше, тоді як на розріджених — інтенсивніше, що частково вирівнює густоту стояння після фази кущіння. Проте це не означає, що норму висіву можна ігнорувати, адже надмірне загущення неминуче призводить до зниження врожайності [29].

Згідно з роботами [10, 30], чинні допуски на рівномірність висіву були встановлені без детального агротехнічного обґрунтування і без перевірки можливості їх забезпечення серійними зразками машин. На практиці досягти цих показників досить складно, навіть за умови суттєвого ускладнення конструкцій сівалок. Установлено, що агротехнічно прийнятною є нерівномірність між апаратами на рівні 6...12%. Відомі конструкції висівних апаратів досліджені достатньо глибоко, і важливо, що за якістю розподілу насіння вони демонструють приблизно однакові результати [30].

У процесі проєктування нових висівних апаратів і систем зернових сівалок необхідно забезпечити відповідність агротехнічним вимогам показників якості висіву, серед яких:

- коефіцієнт середньої нерівномірності $H, \%$ між апаратами;
- показник нестійкості висіву $H_v, \%$;
- коефіцієнт варіації поздовжнього розподілу насіння $V, \%$.

Ці величини входять до інтегрованого комплексу показників ефективності 1.1.

Підвищення якості сівби можливе, зокрема, за рахунок усунення пульсацій потоків насіння, спричинених нерівномірністю дозування та хаотичним рухом насіння у насіннєпроводах [7].

1.3. Продуктивність посівних агрегатів в проблемі підвищення ефективності їх функціонування

Відомо, що одним із найбільш точних і об'єктивних показників, які характеризують рівень розвитку сільськогосподарської техніки (СГТ), є її годинна продуктивність [34]. Згідно з роботою [25], аналіз тенденцій розвитку технічних

засобів для рослинництва свідчить, що протягом 15...20 років принципові конструктивні рішення більшості машин практично не змінюються. З середини 1980-х років фахівці не прогнозували суттєвого збільшення робочих швидкостей машинно-тракторних агрегатів (МТА), у тому числі й посівних комплексів, незважаючи на те, що підвищення швидкості дозволяє активніше використовувати наявний запас потужності, зменшити експлуатаційні витрати та підвищити продуктивність агрегатів.

Існувала думка, що резерви зростання продуктивності МТА традиційної конструкції за рахунок збільшення робочих швидкостей практично вичерпані, оскільки за межами певних значень швидкості різко знижується якість виконання технологічних операцій [19]. Це призводило до випереджального збільшення енергонасиченості тракторів, яке не супроводжувалося пропорційним зростанням ефективної робочої швидкості навісних і причіпних машин. У результаті виникала необхідність компенсувати це відставання шляхом збільшення тягового навантаження на трактор [17]. Тому в перспективі на 20...25 років одним із головних напрямів підвищення продуктивності вважали збільшення ширини захвату робочих машин [15]. Під впливом цього процесу широке поширення отримали широкозахватні сівалки як модульного виконання, так і у вигляді окремих великогабаритних машин [28].

Застосування екстенсивного підходу — збільшення ширини захвату без зміни принципів роботи — сьогодні піддається ґрунтовному аналізу. Встановлено, що неконтрольоване розширення ширини захвату призводить до істотного збільшення маси агрегату, погіршення паливної економічності, зростання трудомісткості обслуговування, нестабільності технологічного процесу й лише незначного зростання продуктивності праці. Крім того, із збільшенням ширини робочого захвату погіршується копіювання нерівностей поверхні ґрунту сошниковою групою, що негативно впливає на рівномірність загортання насіння.

Відомо, що ефективність роботи широкозахватної машини визначається тим, чи зростає її продуктивність швидше, ніж збільшується маса. Наприклад, продуктивність 12-рядної сівалки перевищує продуктивність 8-рядної на 21,9...36,6%, проте цей приріст супроводжується непропорційним збільшенням

маси машини. Отже, підвищення продуктивності лише за рахунок збільшення ширини захвату не гарантує зростання ефективності. Для цього необхідно забезпечувати зниження енерговитрат, маси та матеріаломісткості машини [4]. Продуктивність сівалки зростає майже лінійно, тоді як маса і вартість — за параболічною залежністю, що обмежує можливість подальшого екстенсивного нарощування габаритів.

Ширина захвату сучасних машин наближається до фізично обґрунтованих меж через збільшення розриву між значеннями їхньої чистої та експлуатаційної продуктивності, а також через підвищення ризику переущільнення ґрунту внаслідок зростання маси агрегату, більшого буксування трактора, ускладнення стикування проходів і погіршення копіювання рельєфу. Частина резервів підвищення продуктивності може бути реалізована за допомогою автоматизації, проте за використання традиційних технологій цей шлях потребує впровадження складних та дорогих систем, що знижує рентабельність.

Слід також враховувати специфіку експлуатації техніки АПК: більшість машин працює лише 20...30 днів на рік, решту часу перебуваючи на консервації. Тому при зростанні продуктивності виникає парадоксальна ситуація — чим продуктивніша машина, тим більше капіталу та праці «заморожується» у вигляді малоефективно використовуваних активів. Підвищення балансової вартості агрегатів прямо збільшує собівартість продукції, що свідчить про домінування екстенсивного напрямку розвитку техніки. Це формує негативну тенденцію до зниження віддачі виробничих фондів.

Оскільки збільшення ширини захвату потребує підвищення потужності трактора, встановлено, що робочі витрати при цьому можуть зростати в 1,5...2 рази порівняно з агрегатами стандартної енергетичної насиченості. Проте підвищення робочої швидкості також потребує тракторів нового типу, у яких максимум тягового ККД зміщується в область високих швидкостей.

Таким чином, постає завдання зниження енерговитрат при роботі із звичайними тракторами. Для цього необхідні технічні рішення, які б одночасно забезпечували приріст продуктивності та зниження собівартості робіт, зокрема розроблення нових конструкцій робочих органів із мінімізацією негативних явищ.

Сучасні європейські виробники зернових сівалок роблять акцент на збільшенні продуктивності через підвищення робочої швидкості при стабільно високій якості висіву. Натомість американські конструктори у широкозахватних комплексах більше уваги приділяють удосконаленню процесу загортання насіння. У середньому в Україні робоча швидкість сівби становить 7...8 км/год, тоді як провідні зарубіжні зразки техніки (Amazon, John Deere) здатні працювати зі швидкістю 14 км/год і більше без втрати якості. Це дає змогу скоротити строки виконання робіт, зменшити втрати вологи, економити паливо та знизити ступінь ущільнення ґрунту.

Удосконалення висівних апаратів та сошникових систем дозволяє підвищити робочу швидкість до 15 км/год. Проте фактичний стан поверхні полів у період сівби не завжди дозволяє реалізувати такі можливості. Тому збільшення ширини захвату продовжує залишатися актуальним засобом підвищення продуктивності.

Отже, разом з аналізом продуктивності зернових сівалок необхідним є дослідження взаємозв'язку між динамікою продуктивності W , шириною захвату B та швидкістю руху v , які формують комплекс показників 1.1. Також слід зазначити, що орієнтація виключно на максимальну продуктивність є невиправданою, оскільки ігнорує інші важливі критерії ефективності. Не менш актуальними є якість виконання операції, рівень енергоспоживання, вплив на навколишнє середовище та стабільність технологічного процесу [28]. Урахування сукупності цих факторів дозволяє всебічно оцінити ефективність і перспективність технічних рішень.

1.4. Аналіз технічних засобів для реалізації диференційованого висіву зернових культур

Сучасні посівні машини суттєво відрізняються від своїх попередників завдяки можливості оперативної, у тому числі диференційованої, зміни норми висіву без зупинки агрегату, залежно від умов роботи. Це є одним із ключових напрямів удосконалення конструкцій висівних систем та розвитку технологій

сівби [28].

На світовому ринку вже представлений широкий спектр програмно-апаратних комплексів, призначених для реалізації технологій систем точного інформаційного землеробства (СТІЗ). Вони базуються на сучасних досягненнях аграрного машинобудування, сенсорики та електроніки [26]. Серед найвідоміших рішень — системи компаній Amazone (Німеччина), Rawson, Micro-Trak System, Bourgault (США) та ін. Спільною характерною рисою цих систем є те, що опорне колесо сівалки перестає бути джерелом механічного приводу та виконує роль одометричного датчика, тобто пристрою для контролю кінематичних і технологічних параметрів роботи агрегату.

Для з'ясування можливостей диференціювання норми висіву зернових культур розглянемо існуючі та перспективні варіанти машинної реалізації цього процесу.

Механічні висівні апарати та системи з можливістю диференційованої норми висіву

У висівній системі з котушковим висівним апаратом (рис. 1.2) управління нормою висіву здійснюється за допомогою електронного процесора. На підставі програмного алгоритму він формує керуючий сигнал, який подається на виконавчий механізм 2, що конструктивно виконаний у вигляді електродвигуна з редуктором. При цьому опорне колесо сівалки вже не бере участі у приводі висівного апарата, а виконує функції генератора імпульсів, які відповідають швидкості руху та пройденому агрегатом шляху.

Одним із варіантів реалізації принципової схеми, показаної на рис. 1.2, є пристрій для сівби зі змінною нормою висіву. Він містить висівну котушку, розташовану на валу апарата, а зміна подачі здійснюється за рахунок переміщення цієї котушки уздовж осі за допомогою гвинтової передачі. Це дозволяє плавно регулювати подачу насіння без зупинки агрегату та забезпечувати точність дозування залежно від робочих умов.

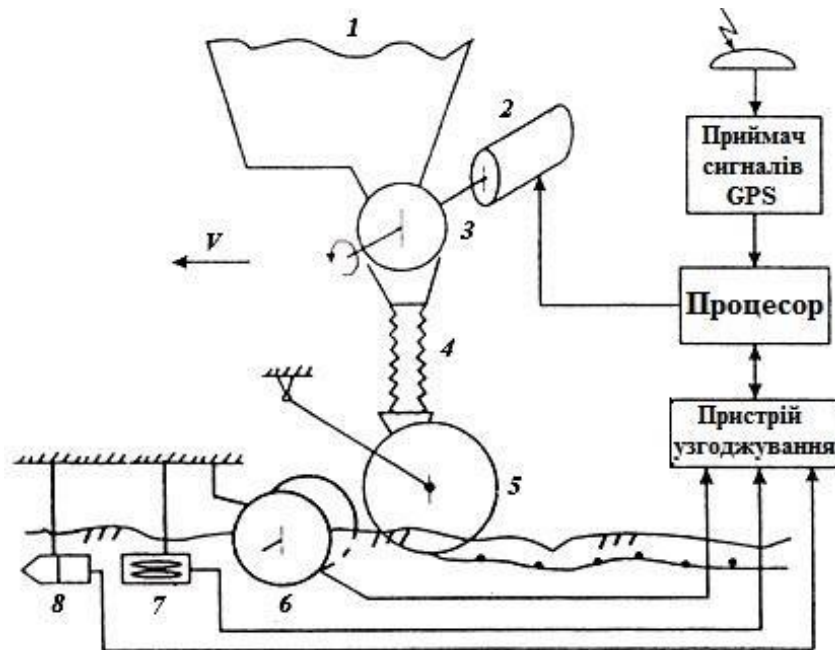


Рисунок 1.2 – Принципова схема диференційованого висіву із застосуванням потокового регулювання котушкових висівних апаратів:

1 – бункер для насінневих матеріалів; 2 – виконавчий електромеханічний привод; 3 – котушковий висівний апарат; 4 – насіннепровід; 5 – сошниковий робочий орган; 6, 7, 8 – датчики контролю фізико-технологічного стану ґрунтової ділянки.

Для забезпечення зміни норми висіву відповідно до змін зовнішніх умов посіву пристрій оснащується надвисокочастотним вологоміром, блоком автоматичного налаштування норми висіву, а також датчиком, що вимірює робочу довжину котушки висівного апарата та електрично під'єднаний до керуючого блоку. Механізм переміщення висівного валу доповнено проміжним валом із кулачковою муфтою, другою гвинтовою передачею та реверсивним електродвигуном. Така конструктивна схема забезпечує можливість реалізації диференційованого висіву котушково-штифтовим апаратом безпосередньо під час виконання технологічної операції, що дозволяє формувати оптимальну площу живлення рослин з урахуванням просторової неоднорідності ґрунтового профілю.

Розроблення системи автоматизованого управління (САУ) змінними нормами висіву зернових культур на основі сівалки СЗ-3,6 (рис. 1.3) у контексті технологій точного землеробства докладно розглянуто у працях [2, 3].

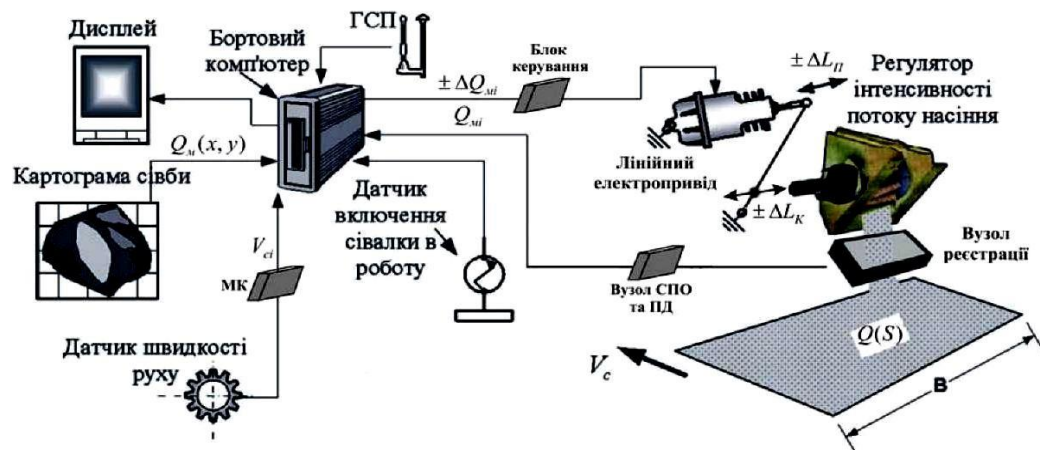


Рисунок 1.3 – Узагальнена структурна схема системи автоматизованого управління процесом висіву в технологіях точного землеробства на базі сівалки СЗ-3,6.

Апаратна частина системи автоматизованого управління (САУ) включає комплекс пристроїв, необхідних для реалізації функції диференційованого висіву. До її складу входять: бортовий комп'ютер із графічним дисплеєм, GPS-приймач, електронна технологічна карта-завдання (картограма посіву), датчик швидкості руху посівного агрегату, датчик увімкнення сівалки в робочий режим, система комп'ютерної ідентифікації зернового потоку, лінійний електропривід з блоком керування та механізмом подачі висівного валу. Обробка вхідних даних і формування поточних значень параметрів висіву реалізуються засобами бортового комп'ютера. У сукупності ці елементи утворюють замкнуту динамічну систему автоматичного керування.

Відповідно до роботи [3], на рис. 1.4 наведено принципову схему обладнання, призначеного для регулювання норми висіву зернової сівалки, оснащеної катушковими висівними апаратами. Основними елементами комплексу є бортовий комп'ютер (БК) та робочий комп'ютер (РК), між якими встановлено зв'язок за інтерфейсом RS485. Живлення системи здійснюється від бортової електромережі МТА напругою 12 В. У конструкції БК передбачено слот для змінної карти пам'яті (типу PC Card), на яку записується картограма сіви для конкретного поля. На внутрішній пам'яті БК зберігаються операційна система, базова система вводу-виводу (BIOS), спеціалізоване програмне забезпечення, а також бази даних техніко-експлуатаційних параметрів посівної машини та фізико-

механічних характеристик насіннєвих матеріалів.

До складу системи також входять GPS-модуль, датчик робочого режиму сівалки та датчик швидкості руху МТА, що забезпечують однозначну прив'язку параметрів висіву до конкретної ділянки поля та реальних умов роботи.

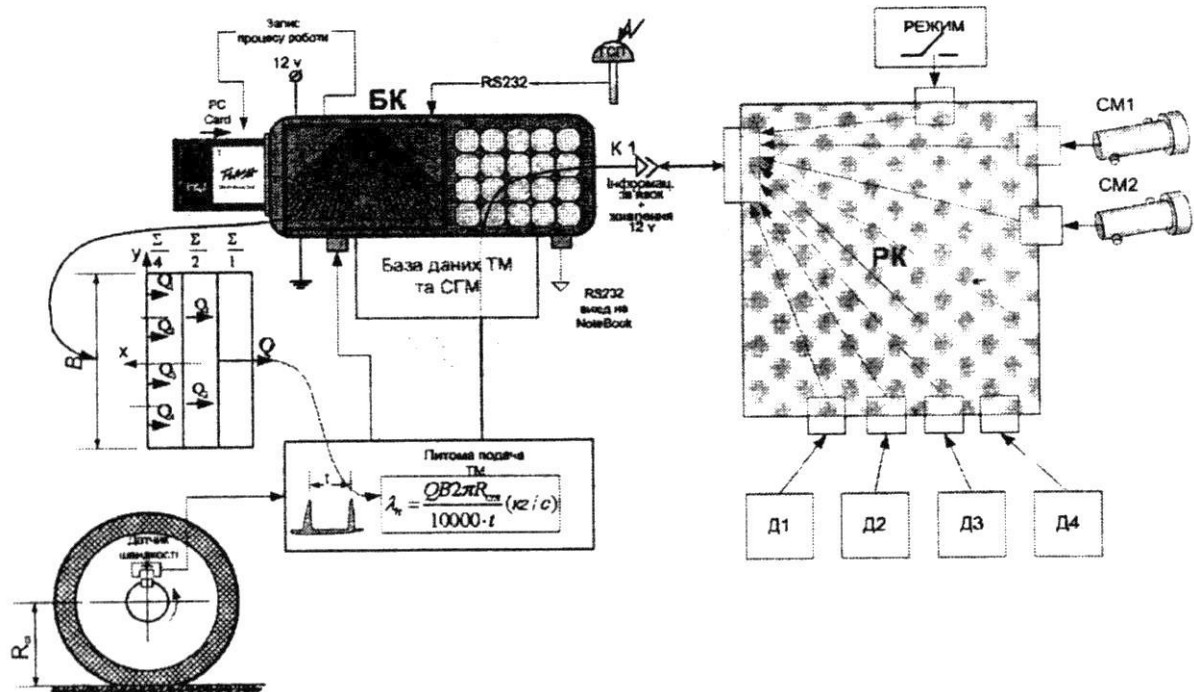


Рисунок 1.4 – Принципова схема обладнання для автоматизованого керування нормою висіву зернової сівалки (позначення наведені в тексті).

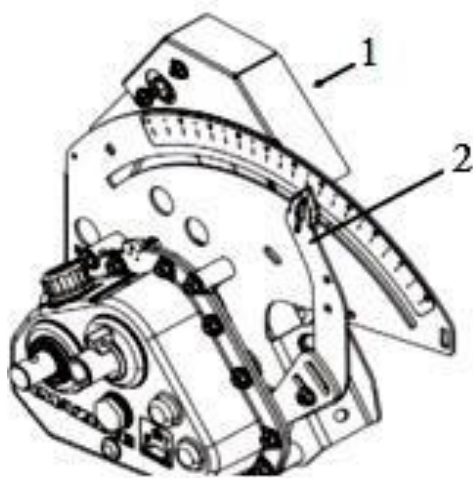
Сервопривід СМ-1 забезпечує регулювання частоти обертання вала катушкових висівних апаратів, тоді як СМ-2 відповідає за зміну робочої довжини катушок. Конструкцією системи передбачена можливість підключення датчиків Д1...Д4 для роботи в режимі «сенсор-технологія», а також під'єднання переносного комп'ютера через додатковий інтерфейс RS-232 з метою виконання тестових, налаштувальних і контрольних операцій під час підготовки експериментів.

У момент, коли датчик «РЕЖИМ» переводиться у положення «робочий процес», координатний датчик ГСП починає приймати навігаційні дані, визначає поточні координати машинно-тракторного агрегату та передає цю інформацію на бортовий комп'ютер (БК). БК за електронною картограмою визначає норму висіву, встановлену для відповідної точки поля, і формує сигнал керування, який

передається на робочий комп'ютер (РК). РК обслуговує силові модулі, що керують сервомеханізмами СМ-1 і СМ-2.

Датчики зворотного зв'язку сервоприводів через інтерфейс RS-232 передають інформацію про фактичний стан керованих елементів, забезпечуючи замкнуту систему контролю. Важливою перевагою створеного обладнання є наявність функції запису всіх поточних параметрів технологічного процесу — фактичної норми висіву, кількості висіяного насіння, обробленої площі, часу роботи, швидкості руху тощо, що суттєво підвищує інформативність і точність подальшого аналізу.

Провідний виробник «Amazon» (Німеччина) пропонує пневмомеханічні висівні апарати та системи, здатні реалізовувати диференційоване нормування висіву в складі сівалок AD-P Special на базі електронної системи Amatron+ (рис. 1.5), згідно з даними роботи [4].



а



б

Рисунок 1.5 – Принципова схема (а) та загальний вигляд (б) безступінчастого редуктора регулювання норми висіву в сівалках AD-P Special:

1 – серводвигун; 2 – важіль керування редуктором.

На основі результатів, отриманих під час визначення норми висіву, система Amatron+ розраховує необхідне положення важеля редуктора 2. Серводвигун 1

автоматично встановлює важіль у відповідну позицію, а на дисплеї Amatron+ відображається фактичне встановлене значення. У разі відсутності безступінчастого редуктора привід вала висівних апаратів здійснюється за допомогою електродвигуна [4], частота обертання якого визначається швидкістю руху агрегату та заданою нормою висіву.

У працях [2, 4] описані програмно-апаратні комплекси для реалізації технології змінних норм висіву. До їх складу входять: супутникова антена навігації, робочий комп'ютер, електроциліндр, датчики швидкості та датчики зворотного зв'язку. У робочий комп'ютер встановлюється флеш-карта, яка містить картограму поля — електронне завдання на норму висіву. Система супутникової навігації забезпечує визначення координат агрегату в полі. Працює комплекс таким чином: під час руху МТА робочий комп'ютер отримує GPS-сигнал, і відповідно до параметрів місцевості та агротехнологічних вимог здійснює керування приводом електродвигуна, що регулює частоту обертання шнекового дозатора. Саме цей параметр визначає моментальну норму висіву.

Ключовим елементом такої системи, який забезпечує виконання технології змінної норми висіву, є блок керування висівним апаратом (рис. 1.6).

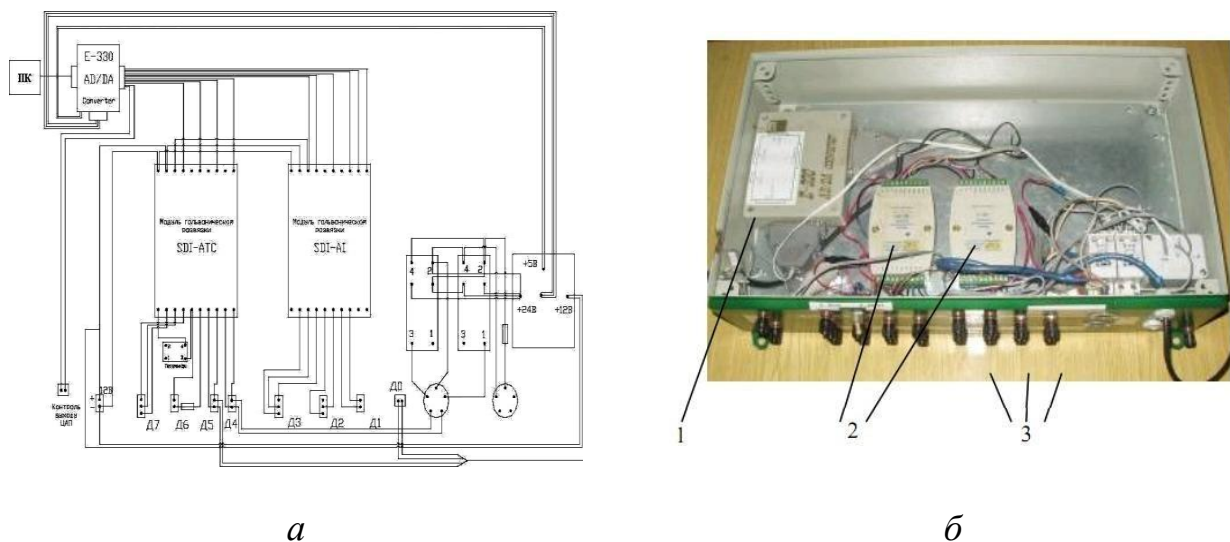


Рисунок 1.6 – Принципова схема блоку керування висівним апаратом (а) та зовнішній вигляд блоку керування (б):

1 – цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП); 2 – узгоджувальні модулі; 3 – вихідні сигнали датчиків.

Для реалізації місцевизначеного висіву в системі передбачено застосування комплексу датчиків, які забезпечують контроль за виконанням технологічного процесу. Кожен із датчиків під'єднується до бортового комп'ютера через узгоджувальні модулі 2. Основною функцією узгоджувального модуля є гальванічне розділення вихідного сигналу датчика та входу бортового комп'ютера, а також приведення електричних параметрів сигналу до стандартизованого рівня.

Ключовим елементом електронної системи керування є цифро-аналоговий перетворювач 1. Він забезпечує передавання внутрішніх цифрових даних між функціональними модулями бортового комп'ютера та формує аналоговий сигнал керування для серводвигуна, який виводиться на контрольну точку процесорного блока з метою сервісного обслуговування.

Робота системи здійснюється таким чином (рис. 1.7): GPS-приймач отримує радіосигнали від супутників та передає їх до бортового комп'ютера. На підставі координатної інформації та електронної картограми посіву бортовий комп'ютер формує сигнал для блока керування нормою висіву. Останній обробляє цей сигнал та за допомогою відповідних виконавчих механізмів задає необхідну норму висіву в кожній конкретній точці поля.



Рисунок 1.7 – Принципова схема функціонування системи автоматизованого керування нормою висіву.

Регулювання інтенсивності потоку насіння в посівній системі виконується за допомогою дозуючого механізму. Частота обертання дозатора формується серводвигуном, а її стабільність забезпечується роботою датчика зворотного зв'язку та відповідного регулятора, що входить до складу системи керування.

Одним із технічних рішень, які дозволяють реалізувати диференційований висів, є система контролю Raven Omniseed. Вона містить спеціально розроблений гідравлічний мотор-редуктор (рис. 1.8), що може монтуватися на вал висівних апаратів або на будь-який інший приводний вал сівалки замість традиційної системи приводних коліс. Частота обертання приводного механізму налаштовується плавно в широкому інтервалі — від 1 до 125 об/хв.

Гідравлічний мотор-редуктор оснащено вбудованим датчиком частоти обертання, який забезпечує керування висівом окремих рядків або секцій, включаючи можливість їх повного відключення. Така система дає змогу здійснювати висів із змінною щільністю, що може задаватися як вручну оператором, так і автоматично — на основі електронних картограм посіву, згідно з даними роботи [5].



Рисунок 1.8 – Гідроелектричний мотор-редуктор для реалізації диференційованого висіву.

Технологія змінної норми висіву може бути реалізована також за допомогою гідравлічних приводів, які пропонує компанія *Ag Leader Technology & Brunswick CVA*. Основою такого рішення є система автоматичного контролю проходів, що забезпечує відключення правої або лівої секції сівалки відповідно до електронної карти поля. Це дозволяє усунути перекриття, оптимізувати витрати насіння та підвищити точність виконання технологічної операції (рис. 1.9, а, б) [5].



а

б

Рисунок 1.9 – Способи регулювання норми висіву: звичайне керування (а) та автоматизоване регулювання за допомогою гідроприводу Ag Leader Technology & Brunswick CVA (б).

Таким чином, наведені технічні засоби забезпечують автоматичне регулювання норми висіву залежно від показників вологозабезпеченості, вологоутримувальної здатності та продуктивності ґрунту. У результаті впровадження таких систем досягається економія посівного матеріалу і добрив, підвищення урожайності та поліпшення якісних характеристик отриманої продукції.

Далі розглянемо імпульсні та вібродискретні висівні системи, що дозволяють реалізувати диференційовану норму висіву зернових культур. Аналіз існуючих висівних систем свідчить, що найбільш повно вимогам диференційованого висіву відповідають конструкції, у яких виконавчий механізм керується електромагнітними імпульсами. На рис. 1.10 представлена схема пневматичної імпульсної висівної системи зернової сівалки, призначеної для роботи в технологіях змінних норм висіву, відповідно до даних роботи [2].

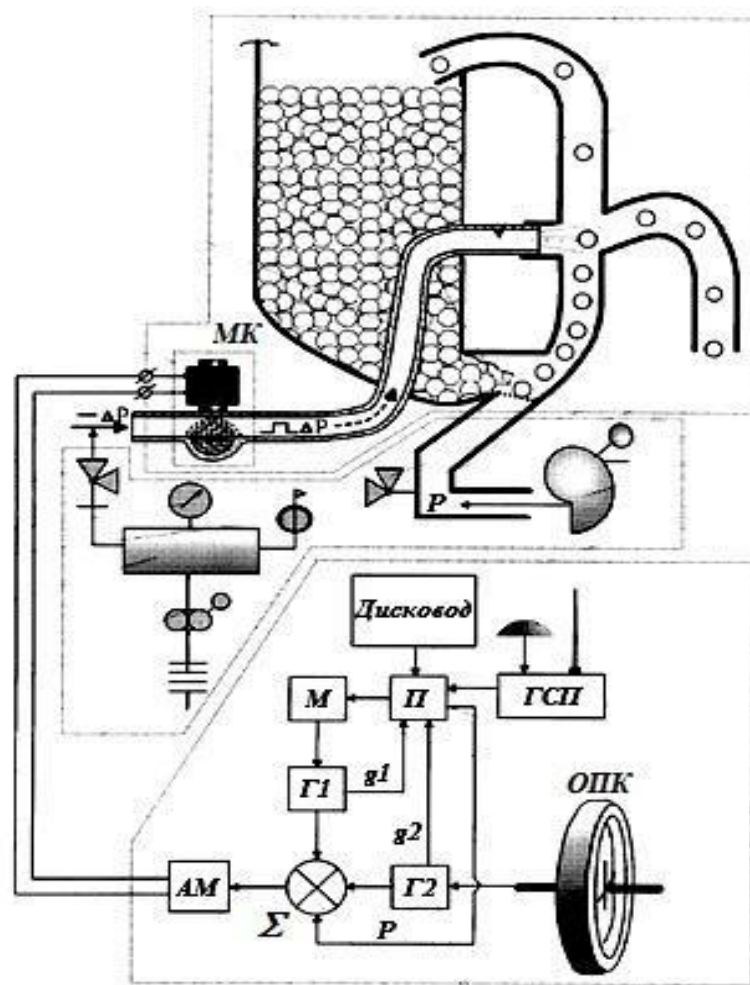


Рисунок 1.10 – Принципова схема висівної системи зернової сівалки для технологій точного землеробства:

М – модулятор; П – процесор; ГСП – глобальна система позиціонування; Г1, Г2 – генератори; g1, g2 – контури зворотного зв’язку; Р – стиснене повітря; АМ – багатоканальний підсилювач; ОПК – опорно-приводне колесо; МК – магнітний клапан; С – суматор.

З наведених матеріалів видно, що сівалка обладнана мікропроцесорною системою формування керуючих імпульсних сигналів, а також пневматичними висівними апаратами, які включають бункери для насіння, забірні та робочі камери, насіннєпроводи і повітропроводи, що під’єднані до виконавчих механізмів. Пневматична система приводу висівних апаратів є інтегрованою з електронною системою управління. Мікропроцесорна частина містить два незалежні генератори імпульсів Г₁ і Г₂, а також багатоканальний підсилювач

АМ, кількість каналів якого відповідає числу встановлених висівних апаратів. Робота системи може здійснюватися у двох режимах: «Звичайний» і «ГСП», де другий адаптований під технології точного землеробства.

Запропонована пневматична імпульсна система з електронним керуванням забезпечує можливість програмованої зміни норми висіву з оперативним регулюванням безпосередньо під час руху посівного агрегату. Регулювання може здійснюватися як у поздовжньому напрямку — за траєкторією руху сівалки, так і в поперечному — по всій ширині її захвату. Це відбувається відповідно до місцевизначених даних про стан ґрунту та інші агрофізичні параметри поля. Важливо, що конструкція імпульсних висівних апаратів практично не містить механічних рухомих елементів, які контактують із насіннєвим матеріалом. Відсутність зон стискання і защемлення насіння дає змогу суттєво знизити ступінь його механічного пошкодження.

Застосування двох незалежних генераторів імпульсів підвищує універсальність системи, забезпечуючи роботу як у стандартному режимі, так і в режимі точного позиціонування «ГСП». За результатами досліджень запропонована система дозволяє скоротити витрати посівного матеріалу на 10...25%, а розрахункове зростання урожайності становить у середньому 5...7 ц/га.

Подібну конструкцію пневмоімпульсного висівного апарата для сівалок точного землеробства розроблено й подано у роботі [2].

Окрім наведених комплексів і технологічних рішень, для реалізації диференційованих норм висіву зернових культур пропонуються й інші системи аналогічного призначення — зокрема, пристрої автоматичного регулювання технологічного процесу машини, системи керування дозуючим механізмом сівалки, а також висівні апарати з регульованими дозуючими пристроями, описані у роботі [4]. Використання таких систем спрямоване на підвищення експлуатаційних характеристик посівних агрегатів, збільшення швидкодії та точності регулювання, скорочення строків сівби та підвищення продуктивності та врожайності вирощуваних культур.

Висновки до розділу

1. Встановлено, що ефективність функціонування зернових сівалок визначається низкою ключових понять і категорій, серед яких: показники ефективності, критерії ефективності, оптимальна система, системний підхід та системний аналіз, а також синтез технічних рішень. Саме ці поняття формують методологічну основу оцінювання та вдосконалення технічних засобів для сівби.

2. З'ясовано, що значна частина культур і нині висівається за допомогою конструктивно застарілих посівних машин, які відзначаються високою матеріало- та енергоємністю. Технологія висіву такими сівалками не відповідає сучасним агротехнічним вимогам: спостерігається 10...30% перевитрати насіння, підвищене травмування посівного матеріалу та нерівномірний його розподіл по сошниках. Незважаючи на те, що чинні норми рівномірності висіву недостатньо обґрунтовані агротехнічно і значною мірою визначаються біологічними властивостями насіння, при розробленні нових конструкцій висівних пристроїв важливо дотримуватися показників якості висіву та одночасно підвищувати їх за рахунок зменшення пульсації потоків насіння внаслідок нерівномірності дозування й транспортування по насіннєпроводах.

3. Виявлено, що перспективним шляхом збільшення продуктивності посівних машинно-тракторних агрегатів є інтенсивний напрям — підвищення робочої швидкості до 15 км/год і більше. Реалізація такого підходу потребує обов'язкового зниження енерговитрат, пов'язаних зі зростанням швидкісних навантажень, що може бути досягнуто завдяки використанню нових типів робочих органів з оптимізованими параметрами енергоспоживання.

4. Доведено, що одним із найперспективніших напрямів підвищення ефективності технологічного процесу висіву є принципова структурна зміна роботи висівного апарата шляхом переходу до дискретного принципу дії. Використання пневматичних дискретних дозуючих елементів або імпульсних висівних апаратів, синхронізованих із переміщенням агрегату, дозволяє суттєво

спростити автоматизацію, на відміну від апаратів з аналоговою схемою роботи. Реалізація крокового алгоритмізованого циклу відбору, транспортування та видачі насіння забезпечує більш точне керування процесом.

5. Установлено, що можливості екстенсивного підвищення продуктивності шляхом подальшого збільшення ширини захвату фактично вичерпані. У зв'язку з цим зростає роль упровадження інтелектуальних систем керування, автоматизації, роботизації, застосування електронних засобів та технологій точного інформаційного землеробства, а також удосконалення конструкцій робочих органів. Надмірні витрати на модернізацію традиційних механічних систем уже не дають очікуваного ефекту, оскільки темпи зростання їхніх технічних і функціональних параметрів істотно сповільнилися. Натомість використання електроніки дозволяє суттєво розширити функціональні можливості посівних машин і створити технічні засоби нового покоління з принципово новими технологічними характеристиками.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНОГО ВИСІВНОГО АПАРАТА

2.1. Функціонально-структурний аналіз систем автоматизації та управління нормою висіву

2.1.1. Структурний синтез мехатронного модуля управління висівом.

Структурна складність системи в загальному випадку визначається кількістю її елементів, характером їхнього поєднання та інтенсивністю взаємодій між ними. Тому задачу формування структурної схеми та побудови мехатронного модуля можна розглядати як вирішення проблеми інтерфейсів і як оптимізаційну задачу мінімізації структурної складності шляхом виключення надлишкових ланок.

Основною ідеєю методу інтеграції є усунення проміжних перетворювачів. У порівнянні з традиційними структурами, з інтегрованої схеми виключаються принаймні один зайвий проміжний блок та відповідні інтерфейсні елементи. При цьому зберігаються всі необхідні функції системи: реалізується те саме функціональне перетворення, а вхідні та вихідні змінні залишаються ідентичними. Такої інтеграції можна досягти на етапі синтезу структури мехатронних модулів системи керування.

Метод ґрунтується на фундаментальних положеннях теорії системного проектування складних технічних об'єктів, а саме:

- функціонально-структурному аналізі та еволюційному синтезі технічних систем;
- структурному синтезі й оптимізації за критеріями структурної складності.

Метою функціонально-структурного аналізу систем керування процесом висіву є пошук таких мехатронних структур, які забезпечують виконання потрібних функціональних перетворень з мінімальною кількістю структурних елементів, але з максимальною ефективністю за обраними критеріями якості.

Завдання полягає у визначенні оптимальної конфігурації, що дозволить системі точно та надійно реалізовувати функції керування висівом.

Як вихідну модель для подальшого аналізу розглянемо теоретичну структурну схему, подану на рис. 2.1. Саме така схема характерна для традиційних електричних або гідравлічних приводів із комп'ютерним керуванням, описаних у розділі 1, і слугує базою для подальшої інтеграції та формування мехатронних модулів.

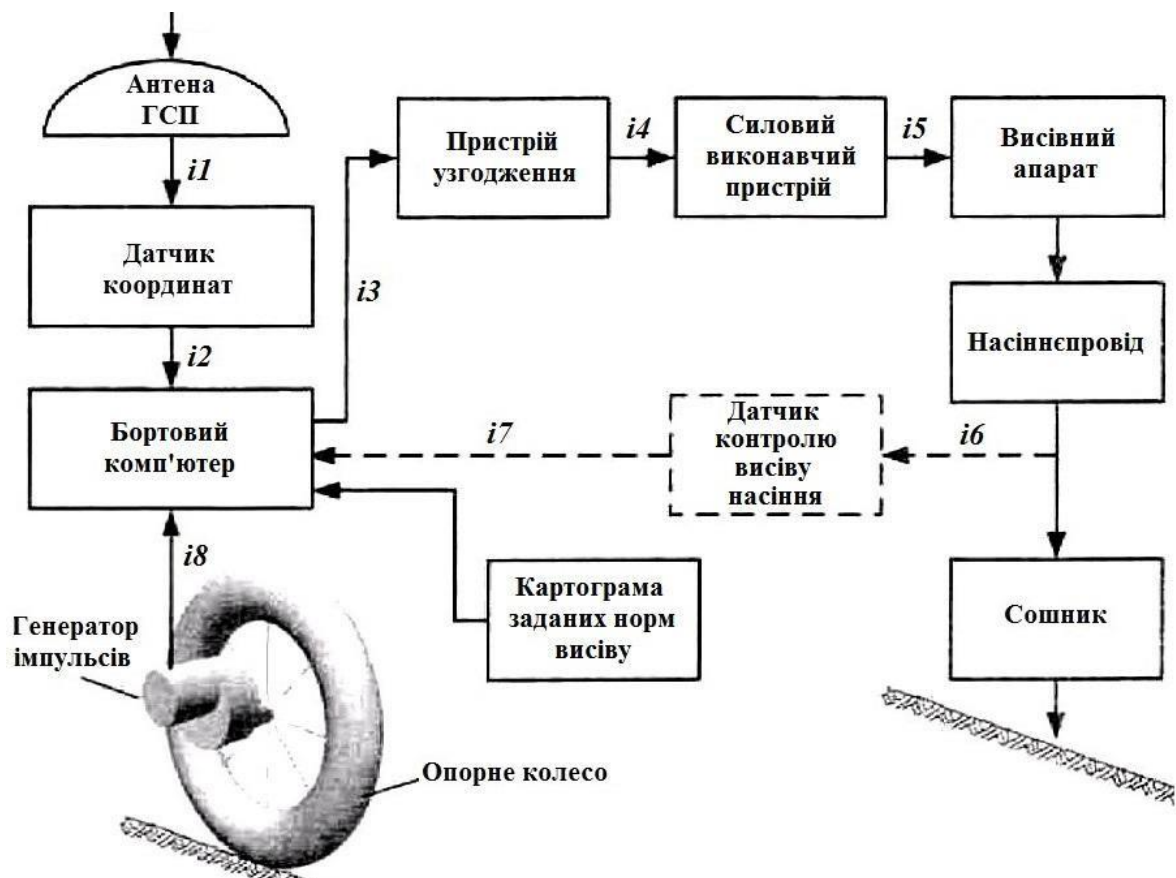


Рисунок 2.1 – Базова структурна модель системи місцевизначеного посіву.

Вихідна структурна модель містить такі основні елементи:

- датчик координат з антеною ГСП, який забезпечує отримання просторової інформації про фактичне місцезнаходження посівного агрегату на полі;
- бортовий комп'ютер, завданням якого є регулювання норми висіву на основі координатної інформації та значень норми висіву, що надходять із

картограми-завдання для конкретної точки поля;

- узгоджувальний пристрій у вигляді цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), який реалізує інформаційно-електричне перетворення та формує керуючий сигнал для силового виконавчого механізму;

- силовий виконавчий механізм, представлений електродвигуном із приводним механічним вузлом, що здійснює електромеханічне перетворення та забезпечує технологічний режим роботи висівного апарата;

- виконавчий пристрій робочого процесу — висівний апарат зернової сівалки, який безпосередньо взаємодіє з посівним матеріалом і виконує відбір та подачу насіння;

- датчик зворотного зв'язку або датчик контролю висіву, що фіксує фактичну інтенсивність потоку насіння в реальному часі;

- інтерфейсні елементи, позначені на схемі як і1–і8, що забезпечують взаємодію структурних блоків.

Оскільки інтерфейси є окремими пристроями, їх виготовлення, інтеграція та налагодження створюють значні труднощі для розробників, особливо у випадку поєднання спеціалізованих компонентів різних виробників, які можуть мати несумісні технічні характеристики.

У вихідній моделі реалізовано шість типів функціональних перетворень:

- моноенергетичні інформаційне та механічне (вхідні та вихідні змінні мають однакову фізичну природу);

- дуальні інформаційно-електричне, електромеханічне, електроінформаційне та механікоінформаційне перетворення, які реалізуються у каналах прямого та зворотного зв'язку.

На основі вихідної схеми запропоновано структурну модель із мехатронним модулем (рис. 2.2). Мехатронні модулі характеризуються високим рівнем інтеграції елементів, причому така інтеграція закладається вже під час проєктування та виготовлення.

У вдосконаленій моделі датчик координат з антеною ГСП та бортовий комп'ютер разом із необхідними інтерфейсами об'єднані в єдиний модуль, що

функціонує як мобільний обчислювальний пристрій – смартфон або планшет із відповідною операційною системою. Узгоджувальний пристрій, силовий виконавчий механізм і блок керування висівною системою об'єднуються у єдиний мехатронний модуль, що забезпечує виконання як функцій перетворення, так і функцій керування.

Датчик контролю висіву може передавати дані не через провідний інтерфейс, а за допомогою бездротового зв'язку, наприклад через протокол Bluetooth. Основні технологічні елементи – висівний апарат – залишаються без змін, а кількість інтерфейсних пристроїв у моделі скорочується з восьми до трьох ($i1-i3$), що істотно зменшує структурну складність системи.

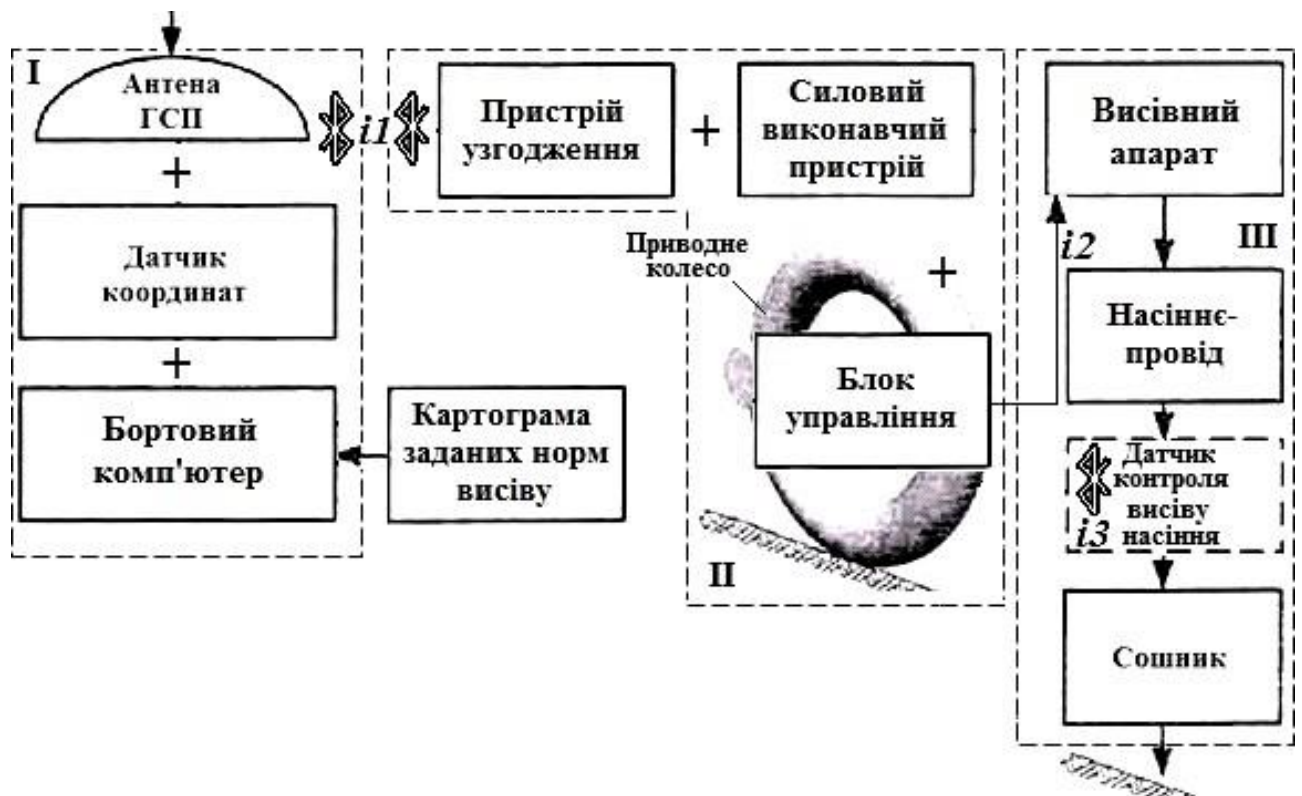


Рисунок 2.2 – Структурна модель системи місцевизначеного посіву з інтегрованим мехатронним модулем у складі пневматичних висівних апаратів та систем:

I – обчислювальний модуль; II – мехатронний модуль; III – висівна система.

У моделі з інтегрованим мехатронним модулем реалізується сім типів

функціональних перетворень: два моноенергетичні — інформаційне та пневматичне, де вхідні та вихідні величини мають однакову фізичну природу, а також п'ять дуальних перетворень: інформаційно-електричне, електромеханічне, механіко-пневматичне, електроінформаційне та механіко-інформаційне. Така структурна побудова дозволяє значно спростити логіку взаємодії між елементами системи.

Порівняння структурної моделі з мехатронним модулем із вихідною моделлю місцевизначеного посіву демонструє, що в останній сумарна кількість як основних (8), так і інтерфейсних (8) блоків істотно перевищує число необхідних функціональних перетворень (6). Це свідчить про структурну надлишковість вихідної системи. Наявність зайвих елементів знижує загальну надійність і точність роботи технічного комплексу, погіршує його масогабаритні характеристики та підвищує собівартість.

У вдосконаленому функціональному поданні мехатронна модель має два інформаційні входи:

- програмне забезпечення робочого процесу;
- канал інформаційного зворотного зв'язку;

та один вихід — керуючий вплив на висівну систему. Це дозволяє розглядати модель як інформаційно-пневмомеханічний перетворювач, який у загальному вигляді формує цілеспрямовану дію на робочий орган з високою швидкістю та точністю.

2.1.2. Метод функціонально-структурної інтеграції систем регулювання норми висіву

Аналіз функціонально-структурної інтеграції (ФСІ) розглянутих структурних схем доцільно виконувати на основі спеціального показника ФСІ, який забезпечує кількісну оцінку ступеня інтегрованості елементів системи. У процесі розроблення систем керування необхідно прагнути до максимального підвищення цього показника, тобто досягати виконання максимальної кількості

функціональних перетворень за мінімально можливою кількістю структурних компонентів. Відповідно, показник ФСІ можна представити у вигляді співвідношення:

$$I^{FS} = \frac{N_F}{N_S} - 1, \quad (2.1)$$

де N_F – кількість функціональних перетворень у відповідному структурному варіанті: для вихідної моделі $N_F = 6$, тоді як для моделі з мехатронним модулем $N_F = 6$;

N_S – сумарна кількість основних та інтерфейсних блоків, задіяних у структурі: для вихідної моделі $N_S = 16$, а для мехатронної моделі – лише $N_S = 6$.

За цих умов для вихідної структурної схеми показник інтеграції становитиме $I^{FS} = 0,625$, тоді як для моделі з мехатронним модулем — $I^{FS} = 0,167$.

Таким чином, у загальному випадку від’ємне значення показника IFSIFSIFS характерне для структур із надмірною кількістю елементів, тобто тоді, коли число структурних блоків перевищує кількість необхідних функціональних перетворень. Нульовий рівень інтеграції ($I^{FS} = 0$) досягається за умови рівності кількості функціональних перетворень та структурних елементів, що їх реалізують.

У даному дослідженні позитивне значення $I^{FS} = 0,167$ для моделі з мехатронним модулем свідчить про підвищений рівень інтеграції та можливість подальшого вдосконалення шляхом вибору оптимальних апаратних і програмних рішень для інтелектуального мехатронного модуля, у якому максимальна кількість функціональних перетворень зосереджується в одному структурному компоненті (див. розділ 4).

2.2. Дослідження показників робочого процесу пневматичної висівної системи дискретної дії з елементами пневмоніки

Теоретичні дослідження конструктивних параметрів пневматичних висівних апаратів та систем дискретної дії з елементами пневмоніки для рядового висіву наведено у роботі [2].

У межах цієї магістерської роботи необхідно також проаналізувати енергетичні та технологічні характеристики робочого процесу висівних систем групового висіву, що містять пневматичні елементи. Для цього доцільно розглянути відповідні показники на прикладі висівної системи, оснащеної маятниковим висівним апаратом.

2.3.1. Визначення діапазону норм висіву зернових культур висівним апаратом маятникового типу

Норма висіву визначається кількістю порцій насіння, що припадають на один гектар посівної площі, й обчислюється за наступною залежністю:

$$n = \frac{10000 \cdot f}{b \cdot V}, \quad (2.2)$$

V – швидкість руху сівалки, м/с;

b – ширина міжряддя. Для зернових культур приймаємо $b = 0,15$ м.

Для рівномірного розподілення насіння необхідно не менш, ніж три його порції, подані апаратом на погонний метр. При швидкості сівалки $V = 3$ м/с, мінімальна частота дозування висівним апаратом складе 9 Гц.

$$N = \frac{m_{cp} \cdot n}{1000}, \quad (2.3)$$

де m_{cp} – середня маса порції насіння на даній частоті дозування, г.

В остаточному вигляді норма висіву при швидкості руху $V = 3$ м/с складе:

$$N = \frac{10 \cdot m_{cp} \cdot f}{0,15 \cdot 3} = 22,22 \cdot m_{cp} \cdot f. \quad (2.4)$$

Згідно виразу (2.4), отриману залежність норми висіву насіння пшениці від частоти дозування представлено на рис. 2.4.

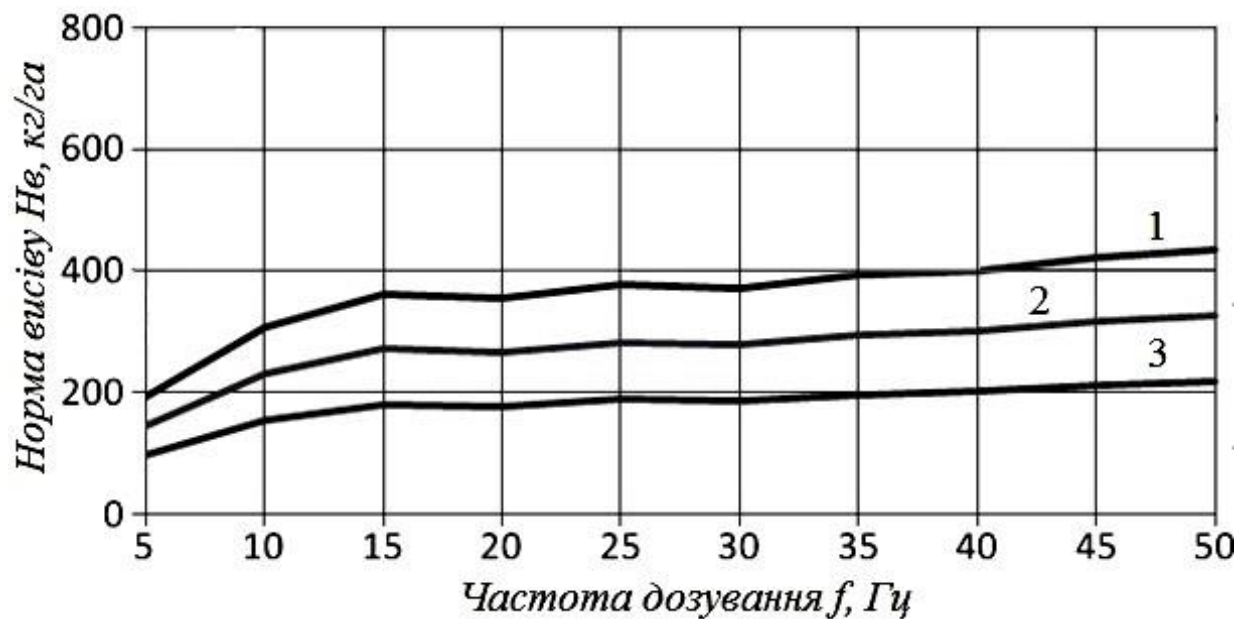


Рисунок 2.4 – Залежність норми висіву насіння пшениці від частоти дозування за умов тиску живильного струминного елемента $P_{ж} = 7$ кПа та швидкості руху сівалки $V=3$ м/с:

1 – висівний апарат АВМ-1М; 2 – апарат АВМ-1МА; 3 – апарат АВМ-1МА, оснащений дільником потоку насіння.

Аналіз отриманих графічних залежностей свідчить, що досліджувані висівні апарати доцільно експлуатувати в частотному діапазоні до 20 Гц за умови швидкості руху сівалки $V=3$ м/с. У цих режимах забезпечується зміна норми висіву насіння пшениці в межах від 100 до 440 кг/га, що істотно перевищує робочий діапазон норм висіву сівалки СЗ-3,6А (60...300 кг/га).

2.3.2. Визначення енергетичних показників роботи висівного апарату.

Розрахунок витрати повітря, необхідної для роботи одного дозувального елемента, здійснюємо за такою залежністю:

$$Q_n = \varepsilon f_c \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\gamma}}, \quad (2.5)$$

де ε – коефіцієнт витрати;

f_c – площа живильного сопла струминного елемента для одного дозатора, м²;

$P_{ж}$ – тиск живлення, Па;

γ – щільність повітря, кг/м³.

Обчислюємо потужність, що підводиться до дозувального апарата, за наступною залежністю:

$$N_{\partial} = P_{ж} \cdot Q_n. \quad (2.6)$$

Приймаючи чисельні значення складових $\varepsilon = 0,9$; $f_c = 3,8 \cdot 10^{-6}$ м²; $P_{ж} = 7000$ Па; $\gamma = 1,22$ кг/м³, отримаємо $Q_n = 0,00036$ м³/с, $N_{\partial} = 2,5$ Вт.

Розрахунок витрати повітря, що споживається струминним блоком керування процесом висіву, виконуємо за наступною формулою:

$$Q_{\partial} = \varepsilon (f_{\partial} + f_{c\partial}) \sqrt{\frac{2P_{ж}}{\gamma}}, \quad (2.7)$$

де f_{∂} – площа сопла датчика швидкості, м²;

$f_{c\partial}$ – загальна площа сопел струминних елементів блока управління, м².

Приймаючи чисельні значення складових $\varepsilon = 0,9$; $f_{\partial} = 10^{-6}$ м²; $f_{c\partial} = 4 \cdot 10^{-6}$ м²; $P_{ж} = 7000$ Па; $\gamma = 1,2$ кг/м³, отримаємо $Q_{\partial} = 0,00049$ м³/с.

Згідно з формулою (2.7) визначаємо потужність, що підводиться до блоку керування:

$$N_{\partial} = 7000 \cdot 0,00049 = 3,4 \text{ Вт.}$$

Потужність приводу вентилятора, що забезпечує подачу повітря до висівних апаратів сівалки, визначається за формулою:

$$N_{\partial a} = \frac{\zeta (kN_{\partial} + N_{\partial})}{\eta_{\partial} \eta_n \eta_{nn}}, \quad (2.8)$$

де k – кількість дозаторів на сівалці;

ζ – коефіцієнт урахування втрат тиску;

η_{∂} – ККД відцентрового вентилятора;

η_n – ККД підшипників;

η_{nn} – ККД пасової передачі.

Приймаючи ширину захвату зернової сівалки $B = 6$ м, з кількістю сошників $n_c = 48$, підставляючи чисельні значення складових – $k = 48$; $\zeta = 1,05$; $\eta_{\partial} = 0,75$; $\eta_n = 0,99$; $\eta_{nn} = 0,95$, отримаємо $N_{\partial a} = 184$ Вт.

2.3.3. Визначення енергетичних показників роботи насіннєпроводів

З урахуванням сучасної тенденції збільшення робочих швидкостей посівних агрегатів, спрямованої на підвищення їх продуктивності, виникає необхідність подавати насіння до сошників із відповідно зростаючою швидкістю. Реалізувати це можливо шляхом формування керованого повітряного потоку, який забезпечує прискорене транспортування насіннєвого матеріалу.

У дисертаційній роботі одним із напрямів підвищення ефективності зернових сівалок запропоновано використання роздільно-агрегатної компоновальної схеми з дискретними груповими висівними апаратами, що включають елементи пневмоніки. На відміну від традиційних шеренгових моноблочних схем, де переміщення насіння до борозни відбувається переважно під дією сили тяжіння, у разі групового висіву подача насіння здійснюється активним пневмотранспортуванням. За таких умов важливо забезпечити максимальну стабільність потоку насіння, мінімальне енергоспоживання системи, зниження травмування зерна та надходження його до борозни з попередньо встановленою швидкістю.

Проблематика енергоємності насіннєпроводів під час активної пневматичної подачі насіння досліджена недостатньо глибоко. При переміщенні насіння в насіннєпроводах на відносно незначних відстанях витрати енергії визначаються гідравлічним опором каналу, який чинить опір руху зерна разом із повітряним потоком.

У наукових джерелах описані дослідження транспортування посівного матеріалу та мінеральних добрив у пневмотрактах пневмодискових висівних систем (ПЦВС), де для оцінки енергетичних витрат застосовується відома методика поділу втрат тиску на місцеві втрати та втрати по довжині пневмотракту. При цьому враховуються впливи розподільчої головки та її колонок, що є характерними для ПЦВС. Однак цей підхід має відмінності від роботи дискретних пневматичних систем, що розглядаються в даному

дослідженні, оскільки такі системи мають іншу структуру потоків, інший характер взаємодії насіння з повітрям та інші закономірності процесу дозування.

Тому доцільно розглянути методику визначення сумарних (комплексних) втрат тиску в насіннєпроводі пневматичної системи $P_{\text{вт}}$:

$$P_{\text{вт}} = P_{\text{см}} - P_n, \quad (2.9)$$

де $P_{\text{см}}$ – сумарні втрати тиску при транспортуванні насіння, Па;

P_n – втрати тиску повітря, Па.

Втрати тиску $P_{\text{вт}}$ доцільно подати у вигляді узагальнених параметрів, що дозволяють уникнути окремого визначення складових, які використовуються в традиційному методі поділу втрат. Для цього введемо поняття коефіцієнта корисної дії процесу транспортування насіння по насіннєпроводу η_m . Під цим коефіцієнтом розуміємо відношення корисної роботи, яку виконує повітряний потік при переміщенні насіннєвого матеріалу за певний проміжок часу, до загальної витраченої роботи.

У рамках такого підходу корисною вважається лише робота, безпосередньо спрямована на переміщення насіння. Енерговитрати, пов'язані з переміщенням повітряного середовища в каналі, до корисної складової не включаються. Це дозволяє подати коефіцієнт корисної дії транспортування насіння у вигляді:

$$\eta_m = \frac{gGl}{v\omega P_{\text{вт}}}, \quad (2.10)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

G – масова витрата посівного матеріалу, кг/с;

l – довжина ділянки транспортування, м;

v – швидкість повітряного потоку в поперечному перерізі насіннєпроводу, м/с;

ω – площа поперечного перерізу насіннєпроводу, м².

У більш загальному вигляді коефіцієнт корисної дії процесу транспортування посівного матеріалу в насіннєпроводі являє собою функцію

багатьох змінних: швидкості v повітряного потоку, швидкості руху насіння v_m , продуктивності висівної системи G , довжини траси транспортування l , фізико-механічних характеристик насіння та матеріалу насіннєпроводу, ступеня травмування насіння під час транспортування та низки інших параметрів. Формально це можна подати у вигляді:

$$\eta_m = f(v, v_m, G, l, \dots). \quad (2.11)$$

Функціональну залежність (2.52) доцільно подати у такому вигляді:

$$\eta_m = A / Fr^n, \quad (2.12)$$

де A і n – відповідно коефіцієнт та показник степеня, значення яких визначаються фізико-механічними характеристиками насіннєпроводу, властивостями переміщуваного посівного матеріалу, його аеродинамічними параметрами та ступенем пошкодження під час транспортування;

Fr – критерій Фруда, визначений за швидкістю повітряного потоку.

Цю залежність можна також подати в іншій формі:

$$\frac{gGl}{v\omega P_{sm}} = \frac{A(gl)^{0,5n}}{v^n}, \quad (2.13)$$

звідси:

$$P_{sm} = \frac{1}{A} \frac{G}{\omega} v^{n-1} (gl)^{1-0,5n}. \quad (2.14)$$

У такому разі сумарні втрати тиску можуть бути визначені за наступною залежністю:

$$P_{cm} = P_n + \frac{1}{A} \frac{G}{\omega} v^{n-1} (gl)^{1-0,5n}. \quad (2.15)$$

Таким чином, за наведеним методом розрахунків гідравлічного опору при транспортуванні насіння в насіннєпроводі висівної системи з елементами пневмоніки фактично зводиться до визначення величини P_{cm} .

Для подальших розрахунків гідравлічного опору насіннєпроводу скористаємося отриманими виразами. При цьому слід враховувати важливу умову: швидкість поступального руху сівалки має дорівнювати швидкості переміщення насіння в насіннєпроводі, що дає змогу компенсувати його

розкочування по дну борозни.

Виберемо числові значення параметрів, необхідних для підстановки у формулу (2.15). Приймаємо:

$$P_n = 100 \text{ Па} \text{ — згідно [47];}$$

$$A = 0,26 \dots 0,36 \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$G = 0,009 \text{ кг/с}$ — масова витрата на один висівний канал при нормі 200 кг/га та швидкості руху агрегату $v_c = 3 \text{ м/с}$;

$$\omega = 0,0005 \text{ м}^2 \text{ — для акрилової трубки діаметром 25 мм [47];}$$

$v \approx 18,5 \text{ м/с}$ — за умов мінімізації травмування насіння та рекомендацій [47] для компенсації розкочування;

$$n = 1,25 \dots 1,36;$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$l = 1 \text{ м} \text{ — довжина насіннєпроводу [47].}$$

У результаті одержуємо числове значення втрат тиску в насіннєпроводі:

$$N_{tn1} = P_{cm} \cdot Q_n, \quad (2.16)$$

де Q_n — витрата повітря, необхідна для транспортування насіння, $\text{м}^3/\text{с}$.

Використовуючи значення швидкості повітря $v \approx 18,5 \text{ м/с}$ та площі поперечного перерізу насіннєпроводу $\omega = 0,0005 \text{ м}^2$, на основі рівняння нерозривності потоку отримаємо:

$$Q_n = v \cdot \omega = 0,00925 \text{ м}^3/\text{с}$$

За цього значення витрати повітря потужність, потрібна для переміщення насіння в одному насіннєпроводі, становить: $N_{tn1} = 4 \text{ Вт}$.

Далі, скориставшись формулою (2.8), визначимо підведену потужність вентилятора, що забезпечує роботу пневматичних насіннєпроводів висівної системи сівалки із шириною захвату $B = 6 \text{ м}$: $N_{tn} = 286 \text{ Вт}$.

Отже, сумарна потужність, яку необхідно передати вентилятору для функціонування пневматичної висівної системи дискретної дії з елементами пневмоніки, становить: $N_{сп} = N_{ва} + N_{tn} = 470 \text{ Вт}$.

Порівняльна оцінка показує, що за енергетичними витратами така

система суттєво вигідніша за інші типи висівних механізмів. Зокрема:

- вібродискретна висівна система сівалки «Клен» потребує приблизно $N_{\text{сд}} = 250$ Вт (для агрегату з шириною захвату 6 м, $n_c=48$) [35];

- котушкові висівні апарати споживають орієнтовно $N_{\text{ск}} \approx 700$ Вт (за тих самих умов);

- пневмотранспортна висівна система ПЦВС характеризується значно вищим рівнем енергоспоживання – $N_{\text{сц}} = 8400$ Вт (для $B=6$ м, $n_c=48$).

Висновки до розділу

1. На основі порівняння фізико-технічних розмірностей критеріїв та показників роботи технічних засобів механізації обґрунтовано узагальнений комплексний критерій оцінювання ефективності застосування різних видів сільськогосподарської техніки. Запропонований критерій дозволяє оцінювати як результативність і оптимальність прийнятих технічних рішень, так і екологічну доцільність їх використання, а також може виконувати роль параметричного співвідношення в системах автоматичного регулювання для підтримання оптимальних режимів роботи органів машин. Як орієнтир оптимального значення комплексного критерію запропоновано використовувати «золоту» пропорцію зі значенням 1,62.

2. Встановлено, що значна частина наявних технічних систем автоматизації та регулювання норми висіву має надлишкову структуру, що підтверджується негативним значенням показника функціонально-структурної інтеграції ($I^{FS} = -0,625$). Структурна надмірність спричинює зменшення надійності, точності, а також погіршує масогабаритні та економічні параметри технічних засобів. Обґрунтовано, що ефективним шляхом підвищення функціональності таких систем є впровадження мехатронного підходу, який передбачає інтеграцію ключових елементів у єдині модулі вже на етапі проєктування. Для мехатронної моделі отримано позитивний показник $I^{FS} = 0,167$, а розподіл функціонального навантаження системи вирівнюється (РФН = 33,3) порівняно з традиційною

моделлю ($R_{FH} = 12,5$).

3. Встановлено, що розрахунковий коефіцієнт корисної дії силового струминного елемента за тиском становить 38%. Теоретичний аналіз процесу передавання механічної енергії плоскими струменями свідчить про необхідність застосування аеродинамічного або імітаційного моделювання для опису взаємодії струменя з приймальною частиною силового елемента. Це зумовлено виникненням складних вторинних течій — зворотних потоків, обумовлених неоднорідністю профілю швидкості в струмені. Такі явища помітно впливають на параметри тиску та витрати в приймальному каналі.

4. Теоретичні дослідження окреслили перспективний напрямок підвищення ефективності роботи зернових сівалок — впровадження нових принципів дії висівних систем та удосконалення робочих органів, спрямоване на зменшення енерго- та матеріалоємності процесу висіву. Найбільш доцільним визначено поєднання роздільно-агрегатної компоновки групового висіву, що характеризується низькою матеріаломісткістю, із пневматичною висівною системою вепольної дискретної дії, побудованою на базі елементів пневмоніки.

3. ПРОГРАМА І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма та методи досліджень

Загальна програма експериментальних досліджень та оцінювання енергетичної, технічної й економічної результативності роботи зернових сівалок, висівних апаратів і систем охоплює вирішення п'яти основних блоків завдань, які формують структурно послідовний підхід до проведення досліджень:

1. Визначення реологічних характеристик технологічних матеріалів, що взаємодіють із посівною машиною, зокрема початкового опору зрушенню підготовленого до сівби ґрунтового шару.

2. Дослідження пневмострумінних елементів — силового бістабільного елемента та елемента-ежектора — з метою встановлення їх раціональних геометричних параметрів і оптимальних режимів функціонування.

3. Проведення агротехнічної оцінки роботи розроблених висівних апаратів, включаючи визначення якісних показників процесу висіву.

4. Дослідження систем автоматизації та управління висівом, зокрема алгоритмів регулювання та ефективності функціонування в розроблених висівних пристроях.

5. Оцінювання техніко-економічної ефективності зернових сівалок, що забезпечує обґрунтування доцільності впровадження нових технічних рішень.

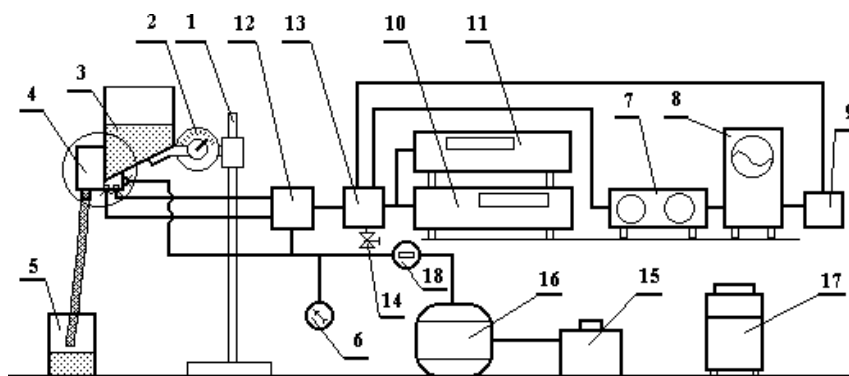
Комплекс експериментальних досліджень спрямований на уточнення, розвиток та підтвердження результатів теоретичного аналізу, вибір оптимальних параметрів конструкцій, режимів роботи та перевірку працездатності висівних пристроїв на базі елементів пневмоніки. Показники їх робочого процесу зіставлялися з агротехнічними вимогами.

Під час проведення досліджень застосовували методики, регламентовані для випробування посівних машин [2], а також сертифіковану експериментальну техніку, вимірювальні прилади та інструменти. Використано методичні підходи, розроблені для аналізу робочих процесів висівних апаратів і

систем з елементами пневмоніки.

Дослідження впливу конструктивних, аеродинамічних, геометричних і кінематичних параметрів на процес висіву, а також випробування створених висівних пристроїв здійснювалися на лабораторній установці, схема та зовнішній вигляд якої наведені на рис. 3.2.

Техніка проведення експерименту включала такі етапи: підготовка та перевірка обладнання і вимірювальних засобів, налаштування необхідних параметрів, виконання контрольних вимірювань, проведення серії дослідів і подальшу обробку отриманих даних.



а



б

Рисунок 3.2 – Схема (а) та загальний вигляд (б) лабораторної установки: 1 – штатив; 2 – поворотний кронштейн; 3 – бункер для насіння; 4 – висівний апарат із насіннепроводом; 5 – мірна ємність; 6 – манометр МЗМ (напоромір або

тягомір); 7 – генератор сигналів спеціальної форми Г6-26; 8 – осцилограф С1-54; 9 – індуктивний датчик тиску ДМІ-0,1; 10 – генератор імпульсів Г5-53; 11 – частотомір Ф5041; 12 – струминний підсилювач на базі елементів «Волга»; 13 – пневмоелектроклапан; 14 – дросель-регулятор; 15 – лабораторний автотрансформатор (ЛАТР); 16 – джерело робочого тиску; 17 – ваги ВЛКТ-500М; 18 – об’ємний газовий лічильник G4PL; 19 – блок живлення постійного струму «Агат».

Дані експериментів заносили до відповідних таблиць, на основі яких проводили подальший аналіз та будували графічні залежності. Кількість повторних вимірювань визначали з урахуванням теоретичних передумов протікання досліджуваного процесу. За умов лінійного характеру зміни вихідних параметрів процесу кількість повторень встановлювали на рівні трьох–п’яти. У випадках, коли процес має нелінійний перебіг, число повторностей збільшували щонайменше до п’яти.

Кількість потрібних повторних вимірювань визначали за формулою [6]:

$$N > \frac{t^2 V^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.1)$$

де t – гарантійний коефіцієнт, який для довірчої ймовірності $\alpha = 0,95$, приймається рівним $t = 1,96$;

V – прогнозований коефіцієнт варіації, %;

ε – максимально допустима відносна похибка середнього значення, при $\alpha = 0,95$, становить $\varepsilon = 5\%$.

Після проведення експериментальних вимірювань результати перевіряли на наявність грубих похибок. Дані, що виходили за межі припустимих значень, вилучали із подальшої обробки. Межі вибраковування визначали за формулами для $\lim x_{max}$ та $\lim x_{min}$, наведеними у джерелі [5]:

$$\lim x_{max} = x + k(x_{max} - x_{min}); \quad (3.2)$$

$$\lim x_{min} = x - k(x_{max} - x_{min}), \quad (3.3)$$

де $\lim x_{max}$ і $\lim x_{min}$ – відповідно максимально допустимі та мінімально допустимі значення вимірювань у вибіркового ряду;

x – середнє арифметичне значення ряду після вилучення результатів, що класифіковані як грубі помилки;

x_{max} і x_{min} – фактичні максимальне та мінімальне значення вимірювань у ряду;

k – коефіцієнт, величина якого залежить від кількості спостережень m ; у дослідженні приймалося значення $k = 0,9$.

Подальший аналіз експериментальних даних здійснювали з використанням методів математичної статистики [3], які застосовуються для побудови довірчих інтервалів та оцінки точності результатів вимірювань.

Для перевірки відтворюваності серій вимірювань використовували критерій Кохрена, числове значення якого визначали за формулою:

$$K_o = \frac{D_{\max}}{\sum_1^N D_i}, \quad (3.4)$$

де $D_{\max}$ – найбільше значення дисперсії серед усіх рядів вимірювань;

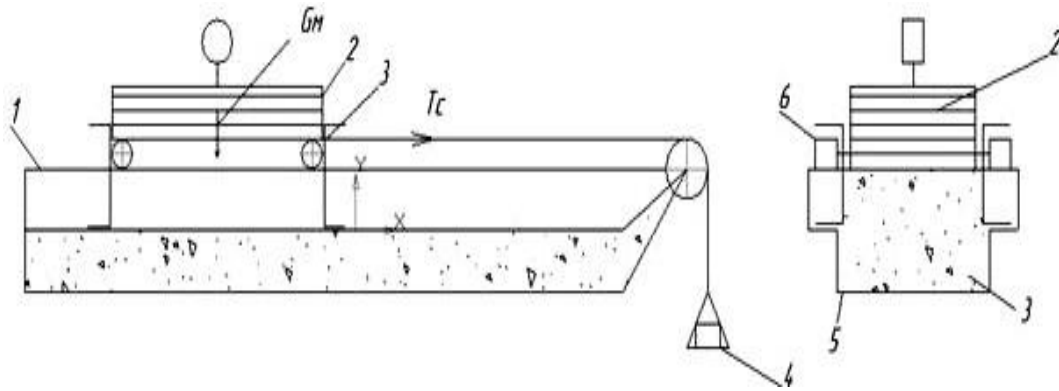
$\sum D_i$ – сумарна дисперсія, обчислена за всіма рядами.

Якщо розраховане значення коефіцієнта Кохрена K_o є меншим за табличне значення K_m , визначене для довірчої імовірності $\alpha = 0,95$ та відповідної кількості ступенів свободи f , то серії вимірювань вважаються відтворюваними, а прийнята кількість повторностей – достатньою для забезпечення статистичної надійності експерименту.

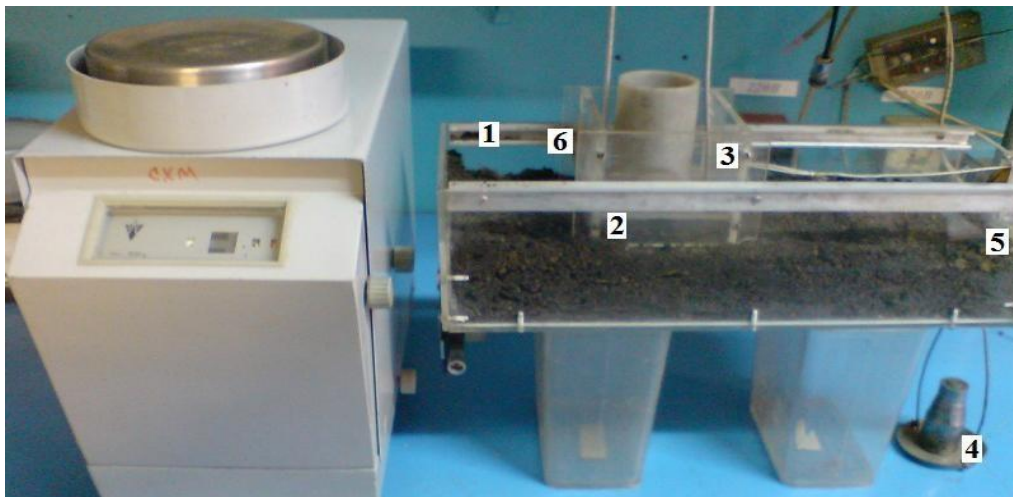
3.2. Методика досліджень реологічних властивостей технологічних матеріалів

Відповідно до прийнятої моделі сипкого середовища (п. 2.11) виконано дослідження реологічних характеристик технологічних матеріалів, що взаємодіють з робочими органами посівної машини. Одним із ключових показників є початковий опір зрушенню τ_0 , який відображає ступінь зв'язності частинок у шарі ґрунту, підготовленому до проведення сівби.

Зв'язність визначають шляхом встановлення залежності між граничними дотичними напруженнями та нормальним навантаженням у ґрунтовому шарі. Таку залежність отримують на основі результатів випробувань ґрунту на трибометрі, конструктивна схема та загальний вигляд якого наведені на рис. 3.3.



а



б

Рисунок 3.3 – Трибометр: а – принципова схема роботи приладу; б – зовнішній вигляд експериментальної установки.

Проведення випробувань здійснювали у такій послідовності. Жолоб 5 та рамку 3 заповнювали ґрунтом із щільністю, що відповідає стану ґрунту після передпосівного обробітку, після чого поверхню ретельно вирівнювали. Шар ґрунту в рамці 3 притискали до ґрунту, розташованого в жолобі 5, за допомогою притискних пластин 2. Рамка через опорні ролики 6 взаємодіє з напрямними 1 та

з'єднана зі шнуром, який перекинутий через блок і приєднаний до вантажної чашки 4.

На чашку послідовно встановлювали гири, збільшуючи навантаження доти, доки рамка 3 не починала переміщуватися, здійснюючи зрізання ґрунту. Момент початку руху відповідає напруженням зсуву в шарі ґрунту.

За отриманими експериментальними даними будували залежність граничних дотичних напружень від нормального тиску в ґрунтовому шарі (рис. 3.4), що дозволяє оцінити зв'язність, структурність та сипучість ґрунту.

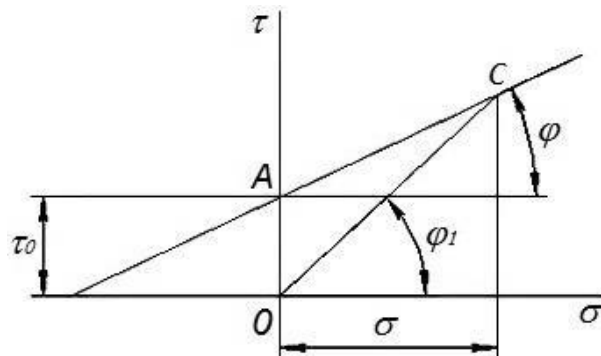


Рисунок 3.4 – Графік залежності граничних дотичних напружень від величини нормального тиску: σ – нормальний тиск у ґрунтовому шарі; τ – відповідні дотичні напруження; τ_0 – початковий опір зсуву, що характеризує зв'язність ґрунту; φ – кут внутрішнього тертя досліджуваного матеріалу.

Величини нормальних σ та дотичних τ напружень, що використовуються для побудови графічної залежності, визначають за такими розрахунковими формулами:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{G_M}{F_3}; \\ \tau &= \frac{T_3 - T_p}{F_3},\end{aligned}\tag{3.5}$$

де G_M – сумарна вага притискних пластин і матеріалу у рамці;

T_3 – сила зрушення;

T_p – опір рухомої рамки і блоку. $T_p = 0,054$ Н;

F_3 – площа зрізання, $F_3 = 0,006$ м².

Побудовану серію експериментальних значень наносили на координатну

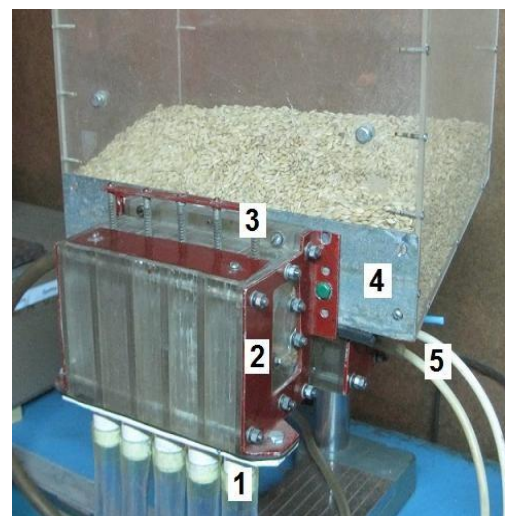
площину залежності τ – σ (рис. 3.5). Після цього через отримані точки проводили лінію АС, що відображає граничні дотичні напруження. У загальному випадку ця лінія перетинає вісь ординат вище початку координат О, що свідчить про наявність внутрішньої зв'язності ґрунту. Величина відрізка ОА відповідає початковому опору зрушенню τ_0 ґрунту, який пройшов передпосівну підготовку.

3.4. Методика стендових досліджень розроблених струминних висівних пристроїв з елементами пневмоніки

Висівні апарати мають забезпечувати формування сталого та рівномірного потоку насіння, гарантувати стабільність процесу висіву та виключати травмування посівного матеріалу [10]. Конструктивні особливості та принцип роботи розроблених струминних висівних пристроїв на базі елементів пневмоніки (рис. 3.5...3.9) детально проаналізовані у розділі 4.



а



б

Рисунок 3.5 – Макет (а) і зовнішній вигляд (б) універсального висівного апарата, розробленого з використанням елементів пневмоніки:

- 1 – насіннепроводи; 2 – висівний модуль; 3 – регулювальна заслінка;
4 – бункер для насіння; 5 – сигнальні канали.

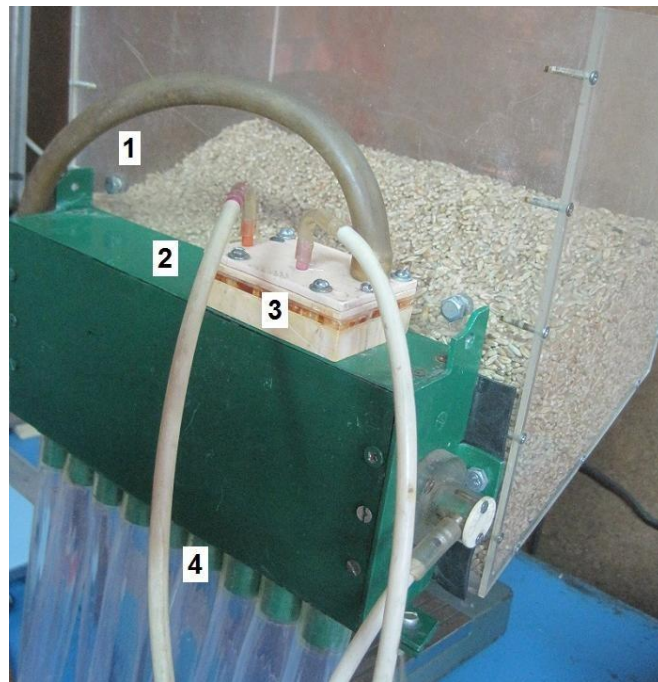


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд розробленого струминного висівного апарата, оснащеного пневматичним підсилювачем:

1 – бункер для подачі насіння; 2 – корпус висівного апарата; 3 – пневматичний підсилювальний елемент; 4 – насіннєпроводи.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд запропонованого висівного апарата з вихровим клапаном для висіву зернових культур: 1 – насіннєпроводи; 2 – корпус висівного апарата; 4 – вихровий клапан; 5 – керуючі повітряні лінії; 6 – живильний

повітропровід.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд запропонованого маятникового висівного апарата:

1 – бункер для насіння; 2 – робочий вузол висівного апарата; 3 – приводний механізм; 4 – насіннепровід.

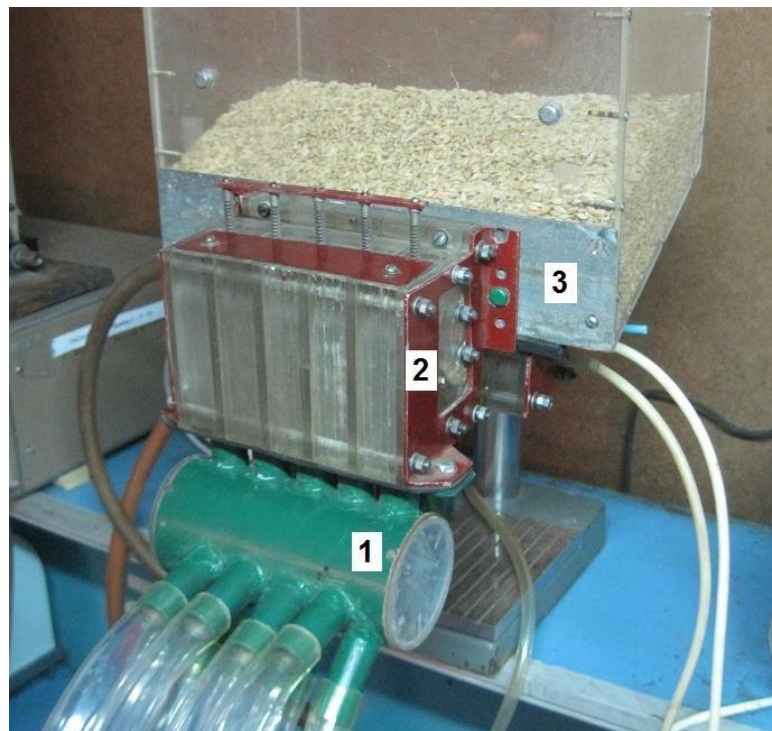


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд запропонованої пневматичної висівної системи

для зернових культур, оснащеної вихровим розподільником насіння:

1 – розподільний вузол; 2 – висівний апарат; 3 – бункер для подачі насіння.

Робочий режим будь-якого висівного механізму повинен відповідати встановленим агротехнічним нормам. З позиції кількісної оцінки його функціонування ключовими показниками виступають: коефіцієнт середньої нерівномірності висіву H , % між окремими апаратами (або патрубками у блочних конструкціях) та коефіцієнт нестійкості висіву H_v , % для кожного висівного каналу. Для зернових культур допустимі значення цих параметрів не повинні перевищувати відповідно 5% та 3%.

Виходячи з наведених вимог та прийнятих методик лабораторних випробувань висівних механізмів [1], сформульовано задачу проведення експериментальних досліджень із визначення агротехнічних характеристик, раціональних параметрів і режимів роботи створених висівних пристроїв, що використовують елементи пневмоніки. Оцінювання рівномірності вихідного потоку насіння здійснювали такими методами [10]:

- спрямовували зерновий потік на рухому стрічку з липким покриттям, яка переміщується зі швидкістю, еквівалентною робочій швидкості агрегату;
- визначали масу насіння, висіяного апаратом за фіксовану кількість обертів привода або за визначений проміжок часу.

Експериментальні випробування висівних пристроїв проводили на лабораторній установці, структурно зображеній на рис. 3.3.

Штатив 1 і поворотний кронштейн 2 забезпечували фіксацію ємності з насінням 3 та висівного апарата 4, а також дозволяли регулювати кут їх нахилу у вертикальних повздовжній і поперечній площинах.

Функціонування висівних апаратів та систем керування забезпечувалося від пневматичної мережі надлишкового тиску, яка включала джерело тиску 16, регульоване ЛАТР 15, та дросель 14. Контроль параметрів тиску здійснювали приладами 6.

Для моделювання роботи дискретної системи синхронізації, яка керує циклічною подачею насіння, застосовували генератор імпульсів 10, блок

живлення 19, пневмоелектроклапан 13 та струминний підсилювач 12. Контроль параметрів пневмоімпульсів виконували за допомогою частотоміра 11, генератора сигналів спеціальної форми 7, осцилографа 8 та індуктивного датчика 9.

Генератор імпульсів задавав частоту та тривалість електричних сигналів, які надходили на пневмоелектроклапан. Останній перетворював електричний імпульс у пневматичний шляхом зворотно-поступального переміщення заслінки, що перекривала вхідний штуцер з частотою подання електричних сигналів. Пневмоімпульс, підсилений блоком на елементах струминної автоматики типу «Волга» (рис. 3.2), спрямовували на висівний апарат. Поточні значення параметрів імпульсів відображалися на цифровому індикаторі частотоміра.

Висновки до розділу

1. Сформовано та обґрунтовано загальну структуру, методологію та методики проведення експериментальних досліджень, які охоплюють повний цикл випробувань. Цей комплекс включає дослідження силових пневмоструминних елементів з метою встановлення їх раціональних геометричних параметрів та режимів роботи, агротехнічну оцінку параметрів створених висівних пристроїв, а також експерименти з автоматизації та керування процесом висіву у розроблених системах.

2. Виявлено, що для коректного аналізу результатів експериментів та прийняття інженерних рішень необхідно орієнтуватися на енергетичні показники функціонування висівних апаратів і систем. Доцільно також оцінювати ефективність розробок за критерієм мінімальних приведених витрат для різних варіантів посівних агрегатів. Показано, що при визначенні приведених витрат більш обґрунтованим є використання *енергетичних еквівалентів* капітальних вкладень і оборотних ресурсів, оскільки саме така форма оцінювання дозволяє більш об'єктивно та логічно порівнювати технології та технічні засоби за їх енергетичною доцільністю.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗРОБЛЕНИХ СТРУМИННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ВИСІВНИХ СИСТЕМ

4.1. Результати визначення початкового опору зсуву ґрунту, підготовленого до сівби

За підсумками випробувань ґрунту на трибометричній установці були отримані значення нормальних та дотичних напружень у посівному горизонті (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Розрахункові значення напруженого стану ґрунту в посівному шарі

Номер експерименту	1	2	3	4
Нормальні напруження σ , Па	347	544	672	802
Дотичні напруження τ , Па	345	491	751	998

На основі отриманих експериментальних даних сформовано графічну залежність граничних дотичних напружень τ від величини нормального тиску σ (рис. 4.1), яка відображає початковий опір зрушенню ґрунту в шарі, підготовленому до висіву.

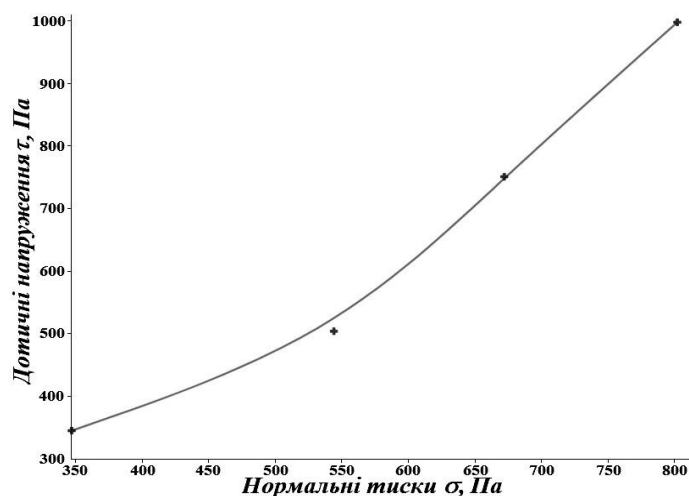


Рисунок 4.1 – Графік зміни граничних дотичних напружень у підготовленому посівному шарі залежно від величини нормального тиску.

У результаті апроксимації отриманих експериментальних точок встановлено, що найточніше зміну дотичних напружень τ від нормального тиску σ описує квадратична регресійна залежність:

$$\tau = 0,00194\sigma^2 - 10,574\sigma + 2085,7221. \quad (4.1)$$

Проведена оцінка точності апроксимації показала, що похибка становить $\Delta A = 2,8\%$. Фактичне значення критерію Фішера дорівнює $F_x = 199$, тоді як критичне табличне значення складає $F_t = 84$. Оскільки F_x перевищує F_t , побудована регресійна модель є статистично достовірною.

Отже, початковий опір зрушенню ґрунту, підготовленого до висіву, становить приблизно $\tau_0 \approx 334$ Па.

4.2. Результати імітаційного моделювання функціонування силового струминного елемента

У результаті імітаційного моделювання газодинаміки протягом повного циклу перемикання струминного елемента було виокремлено ключові фази зміни траєкторії силового струменя та поширення хвиль тиску.

На рисунку 4.5 показано процес формування та стабілізації струменя у робочій камері після подачі живильного тиску. По обидва боки від основного потоку спостерігається виникнення вихрових структур, що формуються хаотично. Частина робочого середовища при цьому ежектується через канали керування. На початковій стадії подачі повітря живильний струмінь частково виходить у атмосферні вікна та частково прямує у вихідні канали.

Залежно від миттєвих локальних опорів у вихідних та атмосферних каналах, струмінь живлення самовстановлюється вздовж лівої стінки робочої камери. На зображенні (рис. 4.2), змодельованому у середовищі ANSYS Fluent, чітко виділяється ядро струменя та його основна траєкторія.

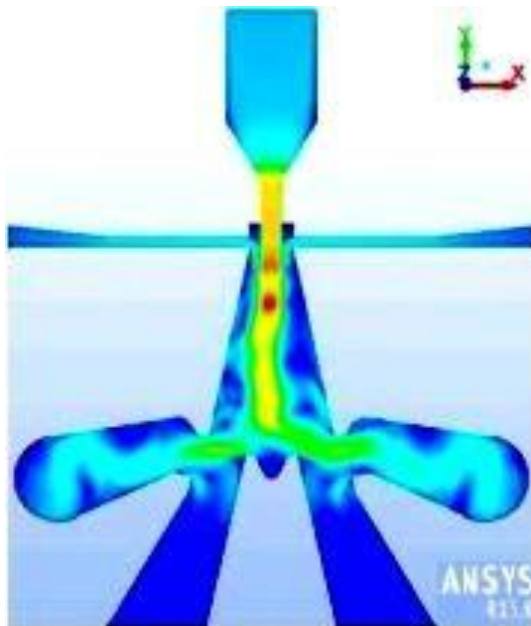


Рисунок 4.2 – Візуалізація формування та стабілізації повітряного струменя в робочій камері струминного елемента після подачі живильного потоку (моделювання в середовищі Ansys Fluent)

На рисунку 4.3 проілюстровано процес зростання тиску у лівому вихідному каналі елемента.

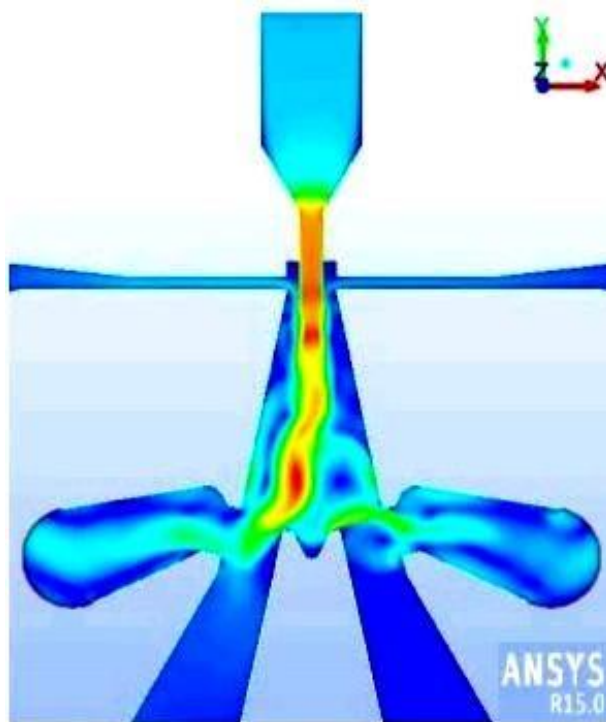


Рисунок 4.3 – Епізод моделювання, що демонструє наростання тиску у лівому вихідному каналі силового струминного елемента.

За результатами моделювання встановлено появу тиску керування у лівому керуючому каналі. У відповідь на це силовий струмінь починає зміщуватися у правий бік. При цьому частина робочого середовища потрапляє з основного потоку до правого каналу керування, що спричиняє поширення хвилі тиску назустріч формуванню струменя у верхньому вихідному каналі. Спостережувана нестабільність траєкторії струменя пояснюється тим, що в цей момент у робочій камері елемента ще не встановився усталений режим течії.

Як видно з моделі процесу (рис. 4.4), майже повністю відхилений у правий бік струмінь частково втрачається через ліве атмосферне вікно, оскільки на цьому етапі він ще не здатен подолати вихрову зону зворотного потоку, що формується праворуч від нього.

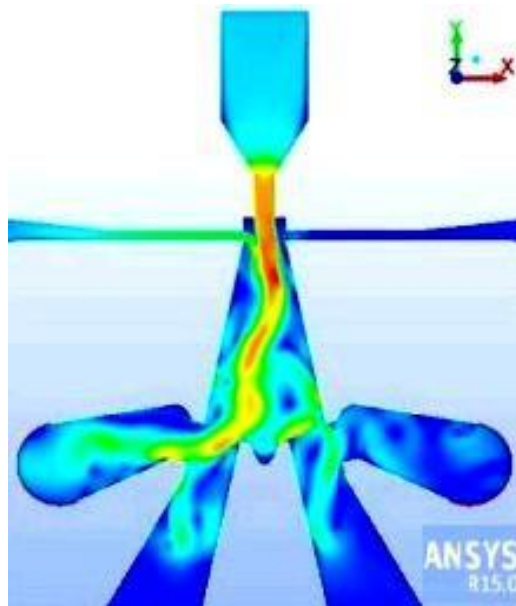


Рисунок 4.4 – Епізод моделювання, що демонструє скидання силового струменя в ліве атмосферне вікно струминного елемента.

Слід відзначити, що під час появи у правому вихідному каналі пульсацій тиску та витрати, спричинених пульсуючим потоком відбитого робочого середовища, ці коливання можуть провокувати хибні спрацьовування струминного елемента. На моделі процесу цей ефект чітко простежується (рис. 4.8), де у верхньому вихідному каналі формується характерна «петля» пульсацій.

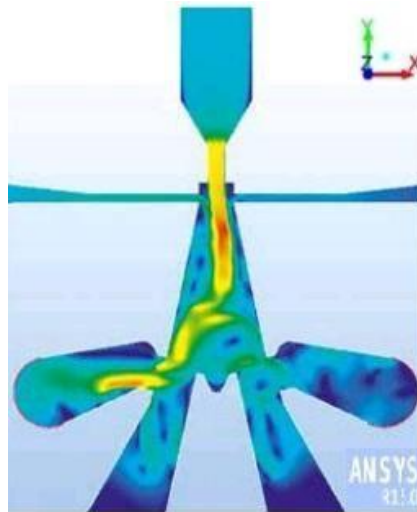


Рисунок 4.4 – Візуалізація появи «паразитних» пульсацій тиску та витрати у правому вихідному каналі силового струминного елемента (фрагмент моделі процесу).

На фрагменті моделювання (рис. 4.6) простежується момент, коли силовий струмінь після попередніх коливань займає проміжне, «нейтральне» положення, зміщуючись від лівої стінки робочої камери.

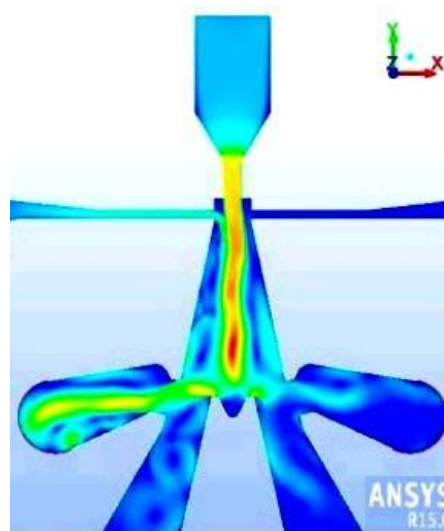


Рисунок 4.6 – Момент стабілізації струменя у проміжному положенні всередині силового струминного елемента (фрагмент моделі процесу)

У ході моделювання встановлено, що основний повітряний струмінь у цей момент скидається в лівий атмосферний канал, тоді як по обидва боки від нього формуються потужні відбиті потоки. В обох вихідних каналах

спостерігаються пульсації тиску, причому у верхньому каналі їх амплітуда є більшою. Саме це зумовлює появу керуючого тиску та витрати в лівому керуючому каналі, що спрямовує силовий струмінь до правої стінки робочої камери.

Встановлено, що сформований зліва від основного струменя зворотний потік має потужність, співставну з потужністю самого силового струменя. У момент формування він, відбиваючись від лівої стінки, рухається проти напрямку основного потоку, притискаючи його до правої стінки, а згодом частково руйнуючи його структуру. Лише подальше зміщення силового струменя до правої стінки призводить до ослаблення зворотного потоку, після чого він поступово ежектується основним струменем.

Після цього силовий струмінь відновлює свою цілісність. Пульсації тиску в лівому вихідному каналі викликають аналогічні коливання в лівому керуючому каналі, що знову дестабілізує положення струменя та генерує первинні коливання тиску в правому вихідному каналі. Під впливом зростаючого тиску в лівому каналі керування силовий струмінь остаточно переходить до правої стінки робочої камери, що і показано на рисунку 4.7.

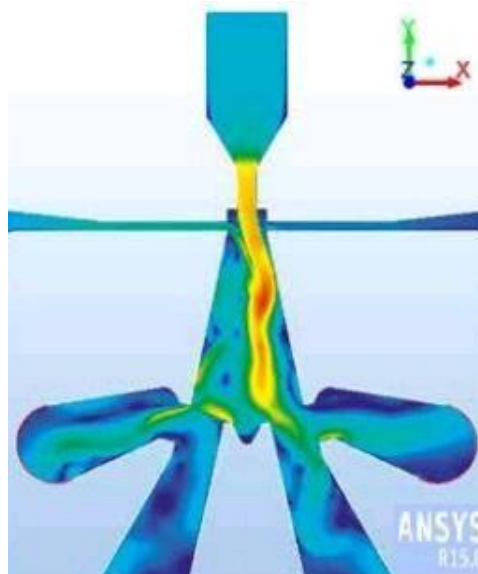


Рисунок 4.7 – Момент переходу силового струменя до правої стінки робочої камери струминного елемента (фрагмент моделювання процесу)

Після цього у правому вихідному каналі починає формуватися потік робочого середовища, який знову спрямовує силовий струмінь у бік лівої стінки робочої камери. У цей момент утворюється правий відбитий потік, характерний для даного етапу перемикавання (рис. 4.8).

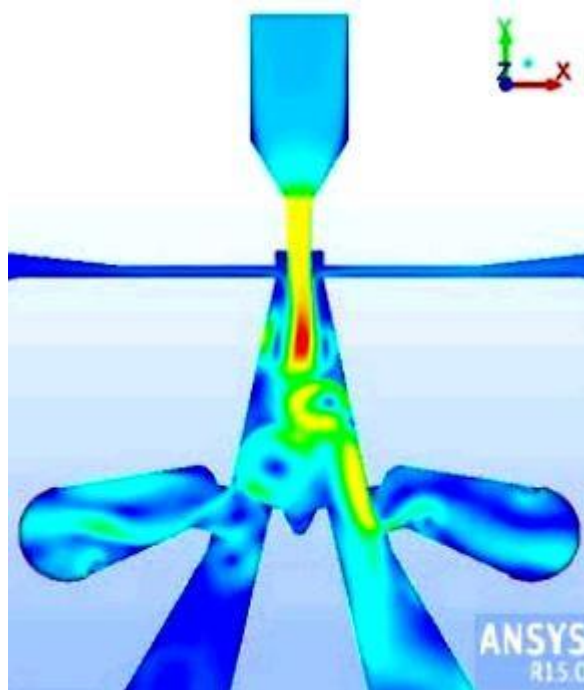


Рисунок 4.8 – Фрагмент моделі процесу, що ілюструє початкову фазу повторного перемикавання силового струменя у напрямку до лівої стінки робочої камери струминного елемента.

У процесі формування цього режиму спостерігається розрив силового струменя, який відходить від правої стінки робочої камери. Проведені дослідження показали появу характерних пульсацій тиску в правому вихідному каналі. Встановлено, що одночасно з цим у лівий канал керування починає надходити частина витрати, тоді як основне ядро потоку зміщується у лівий бік.

Перемикання струменя знову переходить у повторювану циклічну фазу. Додатково зафіксовано розриви силового струменя та формування «паразитних» хвиль тиску, які можуть спричиняти хибні спрацьовування елемента.

Висновки до розділу

1. Установлено, що ґрунт у стані, придатному для сівби, поводить ся як зв'язне сипуче середовище, для якого початковий опір зрушенню становить приблизно $\tau_0 \approx 334$ Па.

2. З'ясовано, що геометричні параметри силового струминного елемента, визначені лише за теоретичними залежностями або рекомендовані для типових керуючих елементів пневмоніки, не забезпечують стабільної та якісної його роботи. Це свідчить про необхідність урахування явищ гідродинамічної подібності та масштабного фактора, параметри яких доцільно уточнювати на основі чисельного та фізичного моделювання.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Дослідження та оцінка стану з охорони праці

Науково-технічний прогрес висуває нові вимоги до організації безпечних умов праці. Із розширенням масштабів механізації та автоматизації процесів підготовки, зберігання та переробки зернової продукції особливої актуальності набувають питання охорони праці та захисту працюючих від потенційно небезпечних виробничих факторів.

Зростання енергоозброєності обладнання та підвищення складності виробничих систем потребує своєчасного виявлення, запобігання та прогнозування можливих небезпечних зон на технологічних лініях, у складських комплексах та інших виробничих приміщеннях. Для мінімізації ризиків необхідно систематично проводити профілактичні заходи, спрямовані на недопущення травматизму та аварійних ситуацій. У своїй діяльності служби охорони праці мають керуватися такими нормативними документами:

1. Законом України «Про охорону праці» (редакція від 21 листопада 2002 року).
2. «Типовим положенням» про порядок навчання з питань охорони праці.
3. Діючими інструкціями — нормативними актами, що встановлюють обов'язкові вимоги безпеки під час виконання робіт на робочих місцях.

Відповідальність за загальний стан охорони праці на підприємстві несе директор, якому підпорядковується інженер з охорони праці.

До основних завдань директора входить:

- формування та підтримання ефективної системи управління охороною праці;
- забезпечення координації та підвищення ефективності діяльності структурних підрозділів у сфері безпеки праці.

Спеціаліст з охорони праці здійснює контроль за:

- дотриманням вимог законодавства та нормативних документів, а також виконанням працівниками посадових інструкцій з безпеки праці;
- реалізацією приписів органів державного нагляду, а також пропозицій профспілок і уповноважених трудових колективів;
- проведенням навчання, інструктажів, атестації та переатестації працівників щодо охорони праці, особливо тих, хто виконує роботи підвищеної небезпеки.

Безпека на робочих місцях безпосередньо контролюється начальниками цехів, майстрами та бригадами, які відповідають за:

- безпечний стан технологічних процесів, обладнання та виробничих приміщень;
- забезпечення персоналу засобами індивідуального й колективного захисту;
- організацію професійної підготовки та підвищення кваліфікації працівників;
- раціональний розподіл режимів праці та відпочинку;
- підбір кваліфікованих виконавців для виконання спеціалізованих видів робіт.

Вступний інструктаж для нових працівників проводить інженер з охорони праці підприємства.

На підприємстві виявлено недоліки у функціонуванні пожежно-сторожової служби: її робота організована недостатньо ефективно, відсутнє повноцінне забезпечення зв'язком із підрозділами господарства, а графік чергувань, хоча й складений, нерідко порушується. Організація навчання персоналу правилам пожежної та виробничої безпеки практично не здійснюється.

5.2. Заходи по поліпшенню умов праці

Для підвищення рівня безпеки праці на підприємстві, створення сприятливих і безпечних умов роботи, зменшення виробничого травматизму та професійної захворюваності, що в перспективі сприятиме підвищенню

продуктивності й ефективності виробництва, рекомендується реалізувати комплекс організаційних та технічних заходів:

- організувати спеціалізований кабінет охорони праці;
- забезпечити його необхідним технічним оснащенням і навчально-методичними матеріалами;
- придбати тематичні навчальні плакати та розмістити їх у всіх виробничих приміщеннях;
- регулярно демонструвати навчальні фільми з охорони праці та пожежної безпеки;
- проводити лекції, бесіди та профілактичні заняття для персоналу;
- установити практику щомісячного проведення Дня охорони праці;
- посилити інформаційно-роз'яснювальну роботу щодо безпечних умов праці;
- підтримувати належний стан та чистоту площ майданчиків для зберігання техніки;
- перевірити стан повітряних ліній електропередач та введів у приміщення (висота нижнього проводу має бути не менше 6 м, введів — не менше 2,5 м);
- здійснити огляд та за потреби ремонт системи блискавкозахисту;
- перевірити контури заземлення електрообладнання та встановити захисні екрани й огорожі;
- забезпечити об'єкти протипожежним інвентарем, запасами води та вогнегасниками;
- провести озеленення території для покращення санітарно-гігієнічних умов;
- укомплектувати кожний агрегат аптечкою першої медичної допомоги;
- систематично проводити інструктажі з безпеки праці;
- оснастити виробничі приміщення актуальними стендами та плакатами з охорони праці.

У разі виникнення пожежі на стаціонарних об'єктах необхідно негайно повідомити пожежну службу, сповістити керівництво та розпочати ліквідацію осередку займання відповідно до інструкцій із пожежної безпеки.

При загорянні електроустановок першочергово слід повідомити пожежну охорону, відповідального за електрогосподарство та керівника робіт.

У випадку займання зерна необхідно вимкнути топку, зупинити вентилятори та обладнання для вивантаження, закрити випускні заслінки. Не припиняючи подачу вологого зерна, відкрити люки дифузорів, виявити осередок займання та спробувати видалити його через оглядові вікна. Якщо це неможливо, переключити систему на максимальне розвантаження, одночасно гасити вогнище водою та відокремлювати пошкоджене зерно з потоку. Після повного звільнення камери необхідно ретельно очистити її стінки та елементи від нагару.

Рекомендації щодо вдосконалення системи охорони праці:

1. Посилити підготовку та навчання працівників, а також підвищити рівень обізнаності керівництва і фахівця з охорони праці.
2. Перевірити ефективність роботи вентиляційних систем у виробничих приміщеннях.
3. Виділити та облаштувати спеціально визначені місця для куріння на всіх дільницях.
4. Приділити особливу увагу якості проведення інструктажів, навчити працівників методам надання першої медичної допомоги; організувати атестацію робочих місць, особливо для персоналу та студентів-практикантів.

Висновки

У цьому розділі подано оцінку стану охорони праці на підприємстві та визначено обов'язки посадових осіб, відповідальних за безпеку праці. Проведено аналіз умов праці у виробничому цеху та виявлено основні недоліки в організації безпеки персоналу. На основі отриманих результатів сформовано комплекс заходів і рекомендацій, спрямованих на поліпшення виробничих умов, підвищення рівня безпеки.

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Основними експлуатаційними характеристиками роботи сільськогосподарських агрегатів є продуктивність, витрати робочого часу, споживання паливно-мастильних матеріалів, а також питомі експлуатаційні та приведені витрати. Продуктивність агрегату (га/зм) та витрати палива (л/га, кг/га) визначають відповідно до типових норм виробітку й норм витрат палива на механізовані польові роботи або згідно з нормативами, затвердженими у конкретному господарстві.

Економічна результативність запропонованого технічного рішення оцінюється шляхом порівняння техніко-економічних показників базового (існуючого) агрегату та проектного варіанта.

Для обчислення річного економічного ефекту використано вихідні дані, наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні показники проекту щодо застосування модернізованого складу агрегату

Показники	Варіанти	
	базовий	проектний
Вид роботи, що виконується	Сівба	
Склад агрегату	Case MX 285+ VEGA 16 PROFI	Case MX 285+ VEGA 16 PROFI Composite
Обсяг роботи (річне навантаження), га	$Q^{\delta} = 3024$	$Q^n = 3150$
Продуктивність агрегату за годину робочої зміни (середньозважена), га/год.	$W_{год}^{\delta} = 7,2$	$W_{год}^n = 7,5$
Витрата палива, л/га	$g_n = 4,9$	$g_n = 4,6$
Балансова вартість сівалки, грн.	$B^{\delta} = 1100000$	$B^n = 1048000$
Тривалість зміни, год.	$T_{зм}^{\delta} = 7$	$T_{зм}^n = 7$
Кількість обслуговуючого персоналу, осіб	$K_{np}^{\delta} = 1$	$K_{np}^n = 1$
Комплексна ціна 1 кг пального, грн.	$\Pi_k^{\delta} = 32$	$\Pi_k^n = 32$

Для визначення ефективності модернізованої посівної машини VEGA 16

PROFI, агрегатованої з трактором Case MX 285, виконуємо розрахунок її експлуатаційних витрат як у базовій комплектації, так і з використанням запропонованих модернізованих елементів.

Повний розрахунок техніко-економічних показників подано у додатку А.

Отримані результати зведено у таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Техніко-економічні показники функціонування агрегату

Показник	Одиниця виміру	Варіант	
		Базовий	Проектний
Склад агрегату	-	Case MX 285 VEGA 16 PROFi	Case MX 285 VEGA 16 PROFi Composite
1	2	3	4
Продуктивність агрегату	га/год	7,2	7,5
Балансова вартість сівалки:	грн.	1100000	1148000
Сума витрат на реновацію, ремонт та ТО	грн./га	31,59	20,70
Вартість ПММ	грн./га	130,88	122,17
Оплата праці	грн./га	7,24	6,95
Експлуатаційні витрати	грн./га	169,71	149,82
Величина капітальних вкладень	грн./га	36,37	36,44
Приведені витрати	грн./га	175,17	155,29
Питомий економічний ефект	грн./га	-	19,88
Річний економічний ефект	грн.	-	62622
Термін окупності капітальних вкладень:	років	-	0,76

Техніко-економічні розрахунки показали, що використання модернізованих експлуатаційних вузлів тертя у складі посівної машини VEGA 16 PROFi, агрегатованої з трактором Case MX 285, забезпечує економічний ефект у розмірі 62 622 грн на рік. Витрати на модернізацію посівного комплексу в умовах спеціалізованого підприємства становлять 48 000 грн.

За таких умов строк окупності додаткових інвестицій становить лише 0,76 року, що свідчить про високу ефективність оновленої конструкції.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності роботи зернових сівалок шляхом упровадження пневматичних висівних апаратів та дискретних систем на базі елементів пневмоніки, забезпечених автоматизованим керуванням робочим процесом.

1. Проведений аналіз проблеми показав, що результативність функціонування зернових сівалок визначається сукупністю взаємопов'язаних груп показників: витратної частини (С), якості висіву ($\wedge$), техніко-експлуатаційного рівня машини (Т) та рівня автоматизації (А). Обґрунтовано, що удосконалення цих підсистем повинно здійснюватися на основі системного підходу та методів системного аналізу й синтезу, що гарантує вибір оптимальних конструктивно-технологічних рішень.

2. Застосування генетичних алгоритмів дозволило встановити, що сучасну динаміку розвитку зернових сівалок із традиційними висівними механізмами можна описати S-подібною кривою. Доведено, що параметри інтенсивного розвитку – робоча швидкість і продуктивність – досягають межі зростання, тоді як екстенсивні параметри – ширина захвату, маса та матеріаломісткість – продовжують зростати непропорційно, збільшуючи витрати та знижуючи ефективність застосування.

3. Встановлено перспективність “вепольного” напряму розвитку висівних систем. Показано перехід від аналогових механічних впливів до дискретних імпульсних та електромагнітних принципів дії, що дозволило обґрунтувати створення нового покоління пневматичних дискретних висівних пристроїв зі зниженою енергоємністю та високим потенціалом для автоматизації.

4. Запропоновано комплексний критерій ефективності, що визначається відношенням тягового опору (у вигляді витрат енергії) до продуктивності. Цей критерій дає можливість об'єктивно порівнювати конструкції посівних машин та обґрунтовувати доцільність роботи сівалок на підвищених швидкостях. Фізичний зміст критерію полягає у здатності техніки забезпечувати

максимальну ефективність роботи при мінімальних енергетичних витратах.

5. Експериментально підтверджено, що розроблені пневматичні дискретні висівні пристрої відповідають агротехнічним вимогам: коефіцієнт варіації нерівномірності між виходами не перевищує 5%, а показник нестійкості по кожному виходу – 3%. Встановлено вплив фізико-механічних властивостей насіння та положення вихрового розподільника: при його нахилі понад 12° показники рівномірності погіршуються.

6. Обґрунтовано конструктивні та енергетичні переваги сівалки з роздільно-агрегатною компоувальною схемою та пневматичною дискретною висівною системою. Доведено, що така компоновка забезпечує зменшення матеріаломісткості конструкції, зниження тягового опору на 12% і зменшення енергоємності в середньому на 13% — до рівня 14,5 кВт/м ефективної потужності енергозасобу. Крім того, зниження експлуатаційних і приведених витрат становить до 16% порівняно з іншими типами висівних систем.

7. Техніко-економічні розрахунки показали, що застосування запропонованого матеріалу у конструкції рухомих з'єднань механізму копіювання забезпечує річний економічний ефект 62 622 грн, а строк окупності додаткових капіталовкладень становить 0,76 року, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко М. Г., Деменчук В. А. Комплектування і використання машинно-тракторного парку в рослинництві: Підручник. - К.: Вища школа. 2015. 237 с.
2. Гарькавий А.Д. Конкурентоспроможність технології машин: навчальний посібник / А.Д. Гарькавий, В.Ф. Петриненко, А.В. Спірін. - Вінниця: ВДАУ - „Тірас”. - 2023. 68 с.
3. Глуховський В. С. Комплексна механізація вирощування цукрових буряків. - К.: Урожай, 2006. 245 с.
4. Дубчак В.М. Вища математика в прикладах та задачах. Навчальний посібник / В.М. Дубчак, В.М. Пришляк, Л.І. Новицька. – Вінниця: ВНАУ, 2018. 254 с.
5. Іванов М.І., Гунько І.В., Ковальова І.М., Худолій О.І. Аналіз технологічних систем. Навчальний посібник. Частина 1. Вінниця.2010. 113с.
6. Ільченко В. Д. Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / В. Д. Ільченко, П. І. Карасьов, А. С. Лімонт та ін.: За ред. В.Д. Ільченка. - К.: Урожай, 2013. 288 с.
7. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість [Текст] : підручник / Г. М. Калетнік, М. Г. Чаусов, В. М. Швайко *[та ін.] ... М-во аграр. політики України , Вінниц. держ. аграр. ун-т; . - Київ : Хай-Тек Прес, 2011. 616 с.
8. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість [Текст] : підручник. ... за ред. Г. М. Калетніка, М. Г. Чаусова. - Київ : Хай-Тек Прес, 2013. 528 с.
9. Калетнік Г.М. Технічна механіка. Підручник. Калетнік Г.М., Булгаков В.М., Черниш О.М., Кравченко І.Є., Солоня О.В., Цуркан О.В. – К.: «Хай-Тек-Прес», 2011. 340 с.
10. Ковбаса В. П. Пришляк В.М., Ярошук Р. О. Визначення впливу сільськогосподарської техніки на ґрунт. Всеукраїнський науково–технічний

журнал «Вібрації в техніці та технологіях», Вінниця: 2019. №4 (95). С. 76-81.

11. Методика навчання і наукових досліджень у вищій школі: Навчальний посібник /С.У. Гончаренко, П.М. Олійник, В.К. Федорченко та ін.; За ред. СУ. Гончаренка, П.М. Олійника. - К.: Вища шк., 2013. 323 с.

12. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: підруч. У 2 т: Т. 1 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. А.В. Рудя. - К.: Агроосвіта, 2012. 584 с.

13. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва: підруч. У 2 т: Т. 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін.; за ред. А.В. Рудя. - К.: Агроосвіта, 2016. - 434 с.

14. Павленко В.С., Цуркан О.В., Кравченко І.Є., Любін М.В. Пасові передачі. Теорія, розрахунки, конструювання: Навчальний посібник / За ред...В.С. Павленка. – К.: «Хай-Тек Прес», 2021. 140 с.

15. Павленко В.С. З'єднання в машинобудуванні: Навч. Посібник / В.С. Павленко, І.П. Паламарчук, О.В. Цуркан, Ю.А. Полєвода / За ред.. В.С. Павленка. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 2015. 110 с.

16. Пат. № 6280. Україна, АОІС 7/08. Пристрій для визначення рівномірності розподілення насіння / А.В. Рудь, І.О. Мошенко, Ю.Ф. Павельчук, В.М. Жалоба, Л.М. Михайлова. № 2003119972; Заяв. 5 листопада 2003 р. Опубліковано 16. 05. 2015. Бюл. № 5.

17. Практикум із машиновикористання в рослинництві: Навч. Посібник / За ред. Мельника. - К.: Кондор. - 2014. 284 с.

18. Практикум по сільськогосподарських машинах і знарядь А. В. Рудь, О. М. Коноваленко, І. О. Мошенко, В. В. Іванишин - К.: Урожай, 2006. 208 с.

19. Пришляк В.М. Грунтово-регіональні особливості сівби та розробка стенду сівалки Міжн. наук. журн. Випуск 28. Кам'янець-Подільський-Тернопіль: СМП «ТАЙП» 2018. С.183 - 190.

20. Рудь А.В., Павельчук Ю.Ф., Жалоба В.М., Михайлова Л.М. Патент на корисну модель №18854 Україна. А01С7/08 Пристрій для визначення рівномірності розподілу насіння. Опубліковано 15.11.2016. Бюл. №11.

21. Рудь А.В. Деклараційний патент 51400 A01B 49/06. „Сівалка”. - №2002032028; Заяв. 13.03.2002, Опубліковано 15.11. 2012. Бюл. № 11.
22. Рудь А. В., Мошенко І. О. Методичні вказівки для підготовки даних на дипломне проектування з механізації вирощування сільськогосподарських культур (програма переддипломної практики) - Кам'янець-Подільський, ПДАТА, 2019. 11 с.
23. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. - К.: Вища освіта, 2014 544 с.
24. Спірін А.В., Твердохліб І.В., Борисюк Д.В., Омелянов О.М. Охорона праці в галузі. Практикум.— Вінниця: РВВ ВНАУ, 2015. 127 с.
25. Українська інтенсивна технологія вирощування сільськогосподарських культур // За ред. О. М. Ткаченка, М. В. Роїка. - Київ "Академпрес", 2011. 140 с.
26. Bastow G. Drill unit testing service. - Brit Lugar Beet Rev., 2016, № 49(4) . P. 59-61.