

УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ КАФЕДРА АГРОІНЖЕРІЇ

Допускається до захисту
Завідувач кафедри
_____ Пушка О.С.
“__” _____ 20__р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

_____ магістр
(освітній рівень)

на тему Обґрунтовування параметрів конструкції та дослідження мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату гідросівалки

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім
спеціальності 208«Агроінженерія»

_____ Максименко А.О
(прізвище та ініціали)

Керівник _____ Пушка О.С
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____ Войтюк В.Д.
(прізвище та ініціали)

м. Умань - 2025 рік

РЕФЕРАТ

Максименко А.О. Дипломна робота на тему “Обґрунтування параметрів конструкції та дослідження мехатронної роботи висівного апарату гідросівалки. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня “магістр” за спеціальністю 208 “Агроінженерія” - МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА.

Мета роботи - розробка та дослідження мехатронної системи контролю точності висіву, що забезпечує підвищення рівномірності подачі насіння та зменшення перевитрат посівного матеріалу. У роботі наведено аналіз сучасних систем контролю висіву, обґрунтовано конструкцію та параметри мехатронної системи, розроблено математичну модель та виконано експериментальні дослідження.

В першому розділі дипломної роботи розглянуто особливості процесу посіву гідросівалки та проведено аналіз та розглянуто параметри мехатронних систем керування та контролю роботи сівалок.

В другому розділі розроблено схему мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарата гідросівалки та проведено обґрунтування конструкційних, режимних та технологічних параметрів системи.

В третьому розділі проведено експериментальні дослідження мехатронної системи та встановлено бажані значення її параметрів для підтримання висіву насіння.

В четвертому розділі розглянуто питання охорони праці при експлуатації гідросівалки та заходи по поліпшенню умов праці.

В п'ятому розділі проведено економічну оцінку ефективності розробленої мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату гідросівалки.

Ключові слова: мехатронна система, гідросівалка, дозуючий пристрій, проросле насіння.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
1. Стан питання і завдання досліджень.....	3
1.1. Особливості процесу посіву з використанням гідросівалок.....	3
1.2. Шляхи підвищення точності висіву насіння гідросівалки	7
1.3. Аналіз мехатронних систем контролю та керування роботою висівних апаратів сівалок.....	9
2. Теоретичні дослідження	17
2.1. Розробка конструкційної схеми мехатронної системи контролю точності висівного апарата гідросівалки	17
2.2. Теоретичне обґрунтування конструкційних, режимних та технологічних параметрів мехатронної системи	19
2.3. Розробка конструкції дозуючого пристрою мехатронної системи контролю точності роботи гідросівалки	22
2.4. Теоретичне обґрунтування конструкційних та технологічних параметрів дозуючого пристрою мехатронної системи.....	25
3. Експериментальні дослідження	29
3.1. Дослідження конструктивних та технологічних параметрів дозуючого пристрою.....	29
3.2. Дослідження роботи електро-гідро клапана.....	31
3.3. Дослідження мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату.....	34
4. Охорона праці.....	38
4.1. Вимоги з охорони праці під час виконання операції посіву.....	38
4.2. Заходи по поліпшенню охорони праці.....	40
5. Економічна оцінка використання гідровисіву насіння овочевих культур.....	44
Загальні висновки.....	47
Список використаних джерел.....	51

ВСТУП

Сучасне сільське господарство характеризується високими вимогами до якості технологічних операцій, ефективності використання ресурсів та екологічної безпеки. Сільське господарство перебуває на етапі активного впровадження інтелектуальних та автоматизованих технологій. Одним із важливих напрямів підвищення ефективності посівних процесів є удосконалення машинно-тракторних агрегатів для точного дозування насіння. Гідросівалки є технікою нового покоління, яка забезпечує поєднання процесів висіву, зволоження, удобрення та закріплення насіння у ґрунті за допомогою спеціальної гідросуміші. Особливої уваги потребують процеси сівби, які безпосередньо впливають на урожайність сільськогосподарських культур. Одним із перспективних напрямів розвитку посівної техніки є впровадження гідросіву - технології, що забезпечує рівномірне розподілення насіння в ґрунті у вигляді гідросуміші, яка містить воду, добрива та стимулятори росту.

Однак точність дозування насіння у гідросівалках значною мірою залежать від стабільності параметрів гідросистеми, в'язкості гідросуміші, коливань тиску та швидкості подачі. Традиційні механічні системи дозування не забезпечують належної адаптації до змін умов роботи, тому виникає необхідність розробки мехатронних систем контролю точності, які поєднують сенсорні елементи, мікропроцесорне керування та виконавчі механізми.

Для вирішення цієї проблеми доцільно впроваджувати мехатронні системи контролю точності, які поєднують сенсори, мікропроцесори, виконавчі механізми й алгоритми керування в єдину адаптивну структуру.

Метою дипломної роботи є обґрунтування конструкційних, технологічних і режимних параметрів мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату гідросівалки та експериментальне підтвердження її ефективності.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану питання і визначити напрями підвищення точності дозування насіння.

2. Розробити конструкційну схему мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарата.

3. Теоретично обґрунтувати конструкційні та технологічні параметри дозуючого пристрою.

4. Провести експериментальні дослідження та визначити вплив параметрів системи на рівномірність висіву.

5. Визначити економічну оцінку доцільності впровадження системи.

6. Розробити заходи з охорони праці при експлуатації гідросівалки.

Об'єкт дослідження - процес посіву насіння овочевих культур із використанням гідросівалки.

Предмет дослідження - мехатронна система контролю точності дозування насіння.

Методи дослідження - аналітичні, експериментальні, математичного моделювання, статистичної обробки даних.

Практична цінність одержаних результатів полягає у створенні адаптивної мехатронної системи, здатної підвищити точність дозування насіння на 10-15% та знизити витрати робочої рідини на 8-12% у порівнянні з традиційними системами.

1. Стан питання і завдання досліджень

1.1. Особливості процесу посіву з використанням гідросівалок

Гідровисів насіння - це спосіб посіву насіння, який відбувається за рахунок виливання чи розпилювання рідини разом з насінням та мульчою на поверхню ґрунту. Став поширеним в 60 роки минулого століття з появою машини та технологій для його реалізації.

Піонерами в реалізації гідропосіву є амереканці. Ще в сорокові роки минулого століття засновник компанії “Finn” Чарлз Фін розробив пристрій для розпилення мульчі, що складалася з соломи та рідини. Розроблений розпилювач дозволяв наносити мульчу на поля з різної складності рельєфу. Реалізацію ж гідровисіву насіння запропоновано в 50-ті роки минулого століття службовцем департаменту транспорту з Коннектикута Морісом Менделлем. Проведені дослідження на розпиленні рідини з насінням на крутих дорожніх укосах показали відмінні результати приживання насіннєвого матеріалу на їх озелененні.

В подальшому Чарльзом Фінном було теж підхоплену дану ідею та адаптовано під його розпилювач мульчі.

Це посприяло прискоренню розробки першої комерційної моделі гідросівалки, яку було апробовано на озелененні дорожніх укосів у штаті Вірджинія. Насіння разом мульчою розмішувалося мішалками у воді та за допомогою насоса та розпилювача наносилося на узбіччя доріг. (Рис. 1.1. Перша комерційна гідросівалка Компанії “Finn” - Додаток 1).

Продовженням вдосконалення технології гідропосіву запропонованої Фінном зайнялася паперова компанія “International Paper”, яка почала використовувати мульчу з відходів виробництва паперу тобто деревини. Волокна які отримували в процесі переробки відходів деревини почали використовувати, як основний компонент для мульчування “Turf Fiber”.

Застосування нового матеріалу для мульчування призвело до проведення глибокої модернізації гідросівалки, а саме валів змішувачів, насосної установки та шлангів. Проведена модернізація забезпечила безперебійну надійну роботу гідросівалки з новим матеріалом мульчі. Вимоги до насосного обладнання для

впевненого прокачування суміші шлангами до місця розпилу. Всі ці процеси подальшого розвитку гідросівалок відштовхнула компанію Чарльза Фінна на другу позицію, яка застрягла на доопрацюванні відцентрового насоса, а новим гравцем на ринку гідросівалок стає компанія “International Paper” та компанія “Bowie Industries”, що спеціалізується на виробництві роторних лопатевих насосів Bowie, які застосовуються в компаніях по видобутку нафти. Насоси даної компанії вже протягом 60 років являються еталоном в виробництві надійних гідросівалок. Також компанією розроблено подрібнювач брикетів з мульчою, щовплинуло на скорочення часу на підготовку посівної машини до роботи.

Проведена реорганізація компанії International Paper призвела до появи двох компаній по виробництву мульчі Weyerhaeuser та Conwed Fibers. Conwed займається виробництвом мульчі з використанням тополі і осики, а компанія Weyerhaeuser використовує в якості матеріалу для виробництва канадську ялину, та целюлозу. В зв'язку з низькою вартістю целюлоза отримала поширення в бюджетних проектах озеленення.

В сімдесяті роки минулого століття відбувається новий виток розвитку технологій гідропосіву в нарядку рекультивації земель, що зазнали техногенного впливу, що спричинили викопні роботи по добуванню руди, вугілля, будівельних матеріалів тощо.

Це додатково збільшило сферу застосування посіву та розширило кількість компаній по виробництву матеріалів та машин.

На даний час технологія гідровисів набирає обертів і широко застосовується в ландшафтному дизайні, а також в таких сферах як туризм, спорт та відпочинок. Для відновлення лісів після пожеж, рекультивації земель, зміцнення ухилів узбіч біля доріг, формування полів для гольфу та стадіонів та ін. Компанія надолужила прогалини в технології виробництва гідросівалок і зайняла передове місце серед виробників даного типу машин.

В Україні та країнах СНГ розробкою, дослідженням та впровадженню гідросівалок в агропромисловому секторі присвячені роботи [3-12] Ольховського

М.Ф., Бакума М.В., Ящука Д.А., Дейнеки С.М., Улексіна В.О., Бойка В.Б., Кондратьєва В.Н та інших.

Розглянемо особливості процесу гідровисіву на прикладі гідросівалки (Рис. 1.2. Додаток 2), розробленої науковцями Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка в співпраці з інститутом овочівництва і баштанництва НААН[13].

Робочий процес гідросівалки розпочинається з наповнення резервуару 1 через заливну горловину 3 водою з засобами захисту та стимуляції росту. Потім проводимо додавання пророщеного насіння. Для формування суміші з заданою концентрацією вмикається привід мішалки 14, який складається з гідромотора 16 та клинопасової передачі 17.

З допомогою гідроциліндра 10 посівні секції 8 опускаються на задану глибину роботи сошників 7. Під час руху сівалки суміш з резервуару 1 подається по центральному трубопроводу 4 до гідравлічного висівного апарата 5 з відкільця методом розподілення та проливання рідини по насіннєпроводах 6 насіння потрапляє до насіннєвого ложе сформованого сошниками 7. Закривання та прикочування борозенок виконується за допомогою котків 11.

Постійне значення концентрації насіння незалежно від рівня заповнення резервуару рідиною з насінням підтримується за рахунок мішалок 14 на яких розташовані лопатні 15. Зниження травмування пророслого насіння досягається за рахунок мінімальних обертів ведучого валу 13 мішалки. Отримані результати досліджень на посіві томатів довели перевагу гідропосіву, що вплинула на приріст польової схожості на 17%, а врожаю до 48 ц/га.

Гідросівалки - це спеціалізовані сучасні сільськогосподарські агрегати, призначені для висіву насіння у вигляді водно-насіннєвої суспензії. Такий метод дозволяє одночасно подавати до ґрунту насіння, добрива, стимулятори росту та мульчючі матеріали. Процес посіву гідросівалкою характеризується рівномірним розподілом насіння по поверхні ґрунту, що забезпечується за рахунок гідравлічного потоку під тиском. Такий спосіб посіву ґрунтується на гідродинамічному принципі, коли суміш насіння, води, добрив, стимуляторів

росту, а також закріплювальних речовин (мульчі, клеючих добавок) під тиском подається через систему насосів і форсунок на поверхню ґрунту.

Технологія гідропосіву виникла як альтернатива традиційним механічним способам і спочатку застосовувалася для відновлення рослинного покриву на складних рельєфних ділянках - узбіччя доріг, схилах, дамбах. Згодом цей метод набув широкого використання в сільському господарстві, озелененні територій, а також у ландшафтному дизайні.

Основними перевагами гідропосіву є:

- можливість рівномірного розподілу дрібного насіння по поверхні ґрунту, можливість роботи на схилах, важкодоступних ділянках і еродованих землях;
- зменшення трудових і часових витрат порівняно з традиційними методами посіву;
- рівномірне нанесення суміші з насінням, добривами та стимуляторами росту;
- поліпшення адгезії насіння до поверхні ґрунту;
- одночасне внесення поживних речовин і закріплення насіння у верхньому шарі ґрунту;
- забезпечення високої енергії проростання за рахунок мікроклімату у зоні висіву;
- зменшення втрат насіння під дією вітру чи нерівностей рельєфу.

Разом із тим, гідросівалки мають суттєвий недолік - нестабільність подачі насіння, що призводить до неоднорідності густоти посіву. Складність забезпечення постійної концентрації насіння у розчині та стабільності витрати суспензії, що може призводити до зниження точності висіву. Причиною є заміна тиску, в'язкості гідросуміші, коливання швидкості обертання дозатора та зношення клапанів. Тому важливим завданням є вдосконалення конструкцій гідросівалок і систем контролю їх роботи, розроблення інтелектуальних систем контролю й автоматичного керування параметрами гідропотоку, що дозволять стабільну якість посіву незалежно від зовнішніх факторів.

Для підвищення точності дозування у сучасних моделях почали застосовувати електронно-керовані гідроприводи та датчики витрати, що дозволяють автоматично регулювати подачу суміші у режимі реального часу.

1.2. Шляхи підвищення точності висіву насіння гідросівалками

Аналізуючи особливості конструкції існуючих гідросівалок, як закордонного так вітчизняного виробництва процес посіву в них відбувається за рахунок проливання рідини, яка транспортує насіння. Процес розподілення насіння носить випадковий характер, що погіршує характеристику роботи гідросівалки, так як розподілення в рядкові теж буде випадковим. Вирішенню даної проблеми присвячені роботи [14-16] Улексіна В.О., Теслюка Г.В., Бойка В.Б., Алієва Е.Б., Пастухова В.І., Кириченко Р.В., Буржалова Г.Ю, Труфлякова Є.В. та інших.

З метою забезпечення точного висіву запропоновано пристрій для реалізації однонасінного гідровисіву загальний вигляд якого наведено на (Рис. 1.3. Додаток 3).

Робота пристрою відбувається в наступному порядку. Насіння, що осіло на дні бункера 2 захоплюється за рахунок розрідження в каналі 4 та трубці 6, яке утворюється зміщенням поршня 15 праворуч відносно гідроциліндра 14.

Клапан 13 відкриється із резервуару 10 надійде рідина по трубці 12 через виконання в корпусі канали 3 і 5 до бункера із насінням. Це зумовить виділення зайвого насіння, з дна бункера в верхню частину, залишивши одну насініну на трубці 6. перемішуючи поршень ліворуч корпус 15 зміститься праворуч потоком рідини насініна відійде від трубки 6 та потоком рідини переміститься до насіннепроводу 7 дозатора насіння 8. При цьому порція рідини, що надходить з бункера 2 надходить в праву камеру гідроциліндра 14, при переміщенні в право ця порція витісниться через зворотній клапан 16 в резервуар 10.

Точність висіву насіння безпосередньо впливає на рівномірність сходів, густоту посівів та врожайність культур. Для гідросівалок це питання особливо важливе, оскільки процес відбувається у динамічному середовищі водно-насінневої суспензії. Точність визначається стабільністю концентрації насіння у

розчинні, рівномірністю витрати робочої суміші, тиском у системі та характеристиками розпилювальних форсунок.

Основними шляхами підвищення точності гідросіву є:

- *удосконалення конструкції дозувального пристрою*, що забезпечує стабільну витрату суспензії. Застосування регульованих клапанів і мембранних насосів дозволяє стабілізувати подачу суспензії та уникнути перепадів витрат;

- *Автоматичне регулювання подачі насіння*. Застосування автоматизованих систем регулювання подачі робочої рідини залежно від швидкості агрегату;

- *Сенсорний контроль параметрів процесу*. Використання датчиків тиску, витрати, вологості й концентрації насіння дозволяє в реальному часі відстежувати стан системи;

- *Інтелектуальні алгоритми керування*. Впровадження інтелектуальних алгоритмів керування, які враховують зміни фізичних властивостей суспензії та умов роботи. Застосування PID-регуляторів, нейронних або адаптивних алгоритмів забезпечує автоматичну концентрацію параметрів потоку відповідно до зміни умов роботи.;

- *Оптимізація гідравлічної системи*. Правильний підбір діаметрів шлангів, форсунок і насосів дозволяє уникнути гідравлічних втрат і забезпечити рівномірний тиск у системі. Оптимізація параметрів насосної системи та розпилювальних форсунок.

Використання мехатронних систем у конструкції гідросівалок дозволяє підвищити стабільність процесу висіву, автоматизувати контроль і регулювання витратної частини, що у кінцевому результаті забезпечує якісне проростання насіння, а також підвищенню енергоефективності роботи сівалки.

Таким чином, підвищення точності висіву є одним з головних напрямів удосконалення конструкції та автоматизації гідросівалок.

Відомо, що точність дозування залежить від таких параметрів:

$$Q = f(P, n, \mu),$$

Q - об'ємна витрата гідросуміші, м³/с;

P - тиск у системі, Па;

n - частота обертання дозатора, об/с;

μ - динамічна в'язкість рідини, Па·с.

При зростанні тиску на 10% витрата збільшується приблизно на 6-8%, що вимагає компенсації за рахунок зменшення швидкості дозатор. Для цього застосовується замкнута система керування, у якій датчик тиску передають сигнал мікроконтролеру, який регулює частоту обертання двигуна.

Таким чином, основним шляхом підвищення точності є:

- впровадження сенсорних елементів контролю параметрів потоку;
- використання цифрових регуляторів (ПД-або нечітких логічних);
- адаптація швидкості дозатора до зміни тиску у системі.

1.3. Аналіз мехатронних систем контролю та керування роботою висівних апаратів сівалок

Сучасні тенденції у розвитку сільськогосподарської техніки пов'язані з переходом до інтелектуальних систем керування, заснованих на принципах мехатроніки. Мехатроніка поєднує механіку, електроніку, автоматику, сенсорику та програмне забезпечення для реалізації адаптивного керування технологічними процесами. Мехатронні системи являють собою інтеграцію механічних, електронних і програмних компонентів, що забезпечують автоматичний контроль і керування технологічними процесами. У сучасному сільськогосподарському машинобудуванні мехатроніка дозволяє підвищити рівень автоматизації, надійність і точність функціонування посівних агрегатів.

Мехатронні системи контролю у сівалках виконують такі функції:

- моніторинг параметрів висівного апарата (оберти дозатора, кількість насіння, тиск, витрата рідини);
- регулювання подачі насіння відповідно до швидкості руху машини;
- виявлення відхилень від заданого режиму та корекція роботи системи в реальному часі;
- реєстрація пропусків, подвійних висівів і нерівномірності потоку;
- збереження та передача даних для подальшого аналізу і діагностики.

Типова мехатронна система включає сенсорний модуль, мікропроцесорний блок керування, виконавчі механізми (електродвигуни, клапани, насоси) та програмне забезпечення:

- **сенсорний модуль**, забезпечує вимірювання фізичних параметрів (тиску, витрати, обертів);
- **контролер або мікропроцесорний блок**, обробляє інформацію та формує керуючі сигнали;
- **виконавчі механізми** електроприладів, клапанів або насосів, змінюють параметри системи;
- **програмне забезпечення**, реалізує алгоритми аналізу, регулювання та діагностики.

Схема взаємодії елементів наведена на рис. А.1 (див. додаток А).

Робота системи базується на принципі зворотнього зв'язку:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Використання ПД-регулювання дозволяє зменшити похибку дозування на 10-15%, підвищити рівномірність висіву і стабільність роботи дозатора навіть призмінних умовах.

Основними критеріями є точність вимірювань, швидкодія системи та адаптивність алгоритмів до зміни робочих умов.

Для гідросівалок актуальним є створення мехатронних систем, які забезпечують контроль параметрів гідропотоку (тиску, витрати, концентрації) та корекцію режимів у реальному часі. Це дозволить мінімізувати похибки висіву, підвищити рівномірність розподілу насіння й загальну ефективність технологічного процесу.

У більшості сучасних зернових та овочевих сівалках уже реалізовані такі системи. Однак для гідросівалок вони мають бути адаптовані з урахуванням специфіки роботи з водно-насінневою суспензією, що характеризується змінною в'язкістю, щільністю та нестабільністю потоку.

Розроблення мехатронних систем контролю для гідросівалок дозволить не лише підвищити точність дозування насіння, а й забезпечити дистанційний контроль процесу, накопичення статистичних даних, діагностику несправностей і автоматичне регулювання параметрів у залежності від умов роботи. Це відкриває можливість інтеграції таких систем у концепцію “розумного землеробства” (Smart Farming).

На основі проведеного аналізу технології гідропосіву та сучасного стану розвитку систем автоматизації можна зробити висновок, що підвищення точності роботи гідросівалок можливе шляхом створення інтегрованої системи контролю параметрів процесу. Така система має забезпечити стабільність гідропотоку, рівномірність подачі насіння та адаптивне регулювання робочих режимів.

У зв'язку з цим у дипломній роботі поставлено такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз сучасних конструкцій гідросівалок і виявити основні недоліки їхніх систем дозування.
2. Визначити вплив основних факторів(тиску, витрати, концентрації насіння, в'язкості суміші) на точність процесу висіву.
3. Розробити структурну та функціональну схеми мехатронної системи контролю та керування роботою висівного апарату.
4. Обґрунтувати вибір сенсорних, виконавчих і керуючих елементів системи.
5. Створити математичну модель процесу подачі суспензії у гідросівалці та моделювати її роботу в різних режимах.
6. Провести розрахунково-експериментальні дослідження ефективності роботи розробленої системи.
7. Розробити рекомендації щодо впровадження мехатронної системи у практику та оцінити її вплив на якість посіву й економічну ефективність використання гідросівалки.

Система керування роботою селекційних сівалок Row Motion [19]. Система призначена для контролю та керування роботою селекційних сівалок Row Motion (рис. 1.4), що забезпечують пунктирний однонасінневий посів.

Висіваючий апарат має електропривод роботи, якого підтримує мехатронна система, а саме блок системи управління основними параметрами селекційної сівалки (рисунок 1.5). За допомогою датчиків розміщених на сошниках та дозуючому пристрої відбувається контроль точного висіву насіння. Сигнали з датчиків надходять на блок системи керування, після чого за допомогою програмного забезпечення інформація виводиться на кольоровий сенсорний екран. Всі технологічні процеси робочого циклу селекційної сівалки виконується за допомогою програмного забезпечення Easy Plant.

Система керування eMotion, оснащена інтуїтивним сучасним інтерфейсом, що дозволяє користувачу швидко опанувати алгоритми налагодження режимів роботи сівалки. Система дозволяє через USB-порт завантажити план поля для полегшення встановлення норми висіву насіння та необхідної кількості добрив.

Нижче проведено основні параметри які контролює система:

- засіяна площа, га;
- реєстрація дати і часу виконання робіт на полі;
- довжина ділянок, м;
- швидкість посіву (км/год);
- відстань між ділянками, м;
- схеми розміщення технологічних колій;
- норму висіву насіння кг/га;
- кількість пропусків;
- самодіагностика;
- майстер калібрування дозатору.

На рисунку 1.6. представлено загальний вигляд дозатора з Дискон Ойорда селекційно сівалки.

Роботу дозатора контролює та підтримує система керування eMotion, що забезпечує високу точність дозування насіння по соншникам та експлуатаційну надійність посівного агрегату.

Мехатронна система “Record”. Дана система застосовується для контролю роботи сівалки “Accord Optima” (рисунок 1.7).

Пневматичні сівалки точного висіву “Accord Optima” забезпечує точний висів завдяки системі контролю роботи “Record”, а саме за допомогою зворотного зв'язку, що створюють датчики (контролю насіння, частоти обертання дозуючого диску, та вакууму пневматичного дискового висівного апарату) між блоком керування і виконавчими пристроями.

Система підтримує та контролює основні параметри сівалки точного висіву:

- реєстрація дати і часу виконання робіт на полі;
- засіяна площа, га;
- площа засіяна з відхиленням від норми, га;
- швидкість посіву (км/год);
- норма висіву, шт/м.п.;
- кількість пропусків, %;
- норма висіву, тис/га;
- кількість насіння висіяного по секціях, шт;
- загальна кількість висіяного насіння, шт;
- пройдений шлях, км;
- інтервали між висіяним насінням см;
- кількість аварійних випадків по секціям, шт;

Мехатронна система керування сівалкою висіву Клен-1,5 [21].

Селекційна сівалка “Клен -1,5” забезпечує пунктирний висів насіння зернових, бобових, овочевих та круп'яних культур на селекційних та дослідних ділянках. Загальний вигляд сівалки наведено на рисунку 1.8.

Сівалку обладнано мехатронною системою “ Клен - С2”, до складу якої входять: блок керування, елементи контролю та виконавчі пристрої дозування насіння. Підключається система до бортової мережі трактора через силовий блок, в якому знаходиться автоматичний вимикач системи захисту від аварійних режимів роботи мережі живлення. За допомогою пульта керування розміщеного в кабіні трактора відбувається оперативне встановлення норми висіву насіння, контроль роботи дозатора, облік норми виробітку. Загальний вигляд компонентів системи представлено на рисунку 1.12.

Розглянемо призначення кожної складової мехатронної системи керування Клен - С2. *Блок керування 8* - це - основний вузол системи, керування яким здійснює оператор. На блокові розташовано дисплей, світлові індикатори, кнопки навігації та подачі сигналу трактористу. За допомогою блока здійснюється керування електричними елементами сівалки з обраним режимом роботи.

В якості *двигуна дозатора 2* обрано кроковий двигун, що забезпечує привід дозатора висівного апарата сівалки.

Мотор-редуктор розкидача забезпечує розподіл насіння по сошниках, в якості привода використовується електродвигун колекторного типу. Контроль його роботи відбувається за зміною значення струму споживання, що контролює блок керування.

В якості *датчика частоти обертання колеса 3* використовується оптична пара розташована у ступиці лівого опорного колеса. За даними датчика визначається швидкість руху сівалки, пройдена відстань, виробіток сівалки.

В якості *датчика положення дозатору 5* використовується кінцевий вимикач, що спрацьовує при перекритті вихідного отвору дозатора. Налаштування датчика здійснюється механічним шляхом під час калібрування висівного апарату. В момент розмикання контактів дозатор зупиняється.

Ще один кінцевий вимикач використовується в якості *датчика завантаження дозатору 6*. натиснувши на ручку завантаження ланцюг протікання струму замкнеться (опускання конусу).

Як уже говорилося раніше *автоматичний вимикач живлення 7* забезпечує захист системи керування сівалкою від короткого замикання у разі зростання струму навантаження чи пошкодження дротів живлення. Виконує роль вимикача мережі живлення електричних елементів сівалки.

Процес роботи сівалки відбувається наступним чином. Засипане в бункер насіння рівномірно розподіляється по конусу в момент відкривання воронки бункера. В момент початку руху дозатор вмикається і насіння порціями потрапляє до ротаційного розкидача за допомогою, якого насіння рівномірно розподіляється по насіннєпроводах а далі потрапляє у борозни сформовані сошниками, скочуючи по яких вони через сошник потрапляють на дно борозен, що утворюються дисками сошників у ґрунті. Завершальний процес висіву закривання борозен виконують загортачі разом з котками.

Мехатронна система “OmniSeed” для керування роботою пневматичними сівалками точного посіву [22]. Для керування пневматичними сівалками закордоном використовується найсучасніша повністю інтегрована система керування “OmniSeed”, що дозволяє забезпечити повний контроль основних параметрів посівних агрегатів точного висіву (рис. 1.13, а) з метою підвищення точності висіву та продуктивності. Керування здійснюється за допомогою багатофункціонального польового комп'ютера “Viper Pro” (рис. 1.10, а, б).

Поєднання системи “OmniSeed” та польового комп'ютера “Viper Pro” дозволяє забезпечити висів різного насіннєвого матеріалу з контролем швидкості та роботи висівних апаратів пневматичної сівалки.

Моніторинг дозуючих елементів сівалки здійснюється за допомогою вбудованої системи AgTron. Керування дозуючим пристроєм відбувається за допомогою електричного двигуна та гідравлічної муфти. Контроль рівня заповнення бункерів насіння виконується за допомогою ультразвукових датчиків.

Також система контролює стан ґрунту та вплив на нього рушіїв посівного агрегату. Вся інформація накопичується та зберігається для подальшого аналізу стану посівної площі.

Основною перевагою гідросівалок є можливість реалізації висіву пророслого насіння, що пришвидшує появу сходів овочевих культур від 7 до 14 днів ніж при класичному сухому методі посіву. Прискорення вегетації дозволяє отримати стійкі дружні сходи, і як результат приріст за рахунок цього врожайності вирощуваних культур. Але крім переваг такого способу посіву є суттєві недоліки гідросівалок - це нерівномірність розподілення насіння в рядку, що пов'язано з випадковим характером розподілення насіння в рідині. Застосування різного типу мішалок не вирішує дану проблему.

Проведений аналіз довів, що підвищення точності висіву гідросівалок можливо тільки за рахунок встановлення додаткових пристроїв дозаторів, що дозволять реалізувати одно насіннєвий відбір насіння з псевдо зрідженого шару з послідуємим його висівом.

Врахувавши переваги та недоліки висівних апаратів гідросівалок та існуючих систем керування, поставлено задачу розробити пристрій для дозування насіння та мехатронну систему керування гідросівалкою. Це дозволить вирішити проблему пов'язану з низькою точністю висіву гідросівалок.

2. Теоретичні дослідження

2.1. Розробка конструкційної схеми мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарта гідросівалки

Для забезпечення високої точності висіву насіння при використанні гідросівалок необхідно стабілізувати параметри подачі гідросуміші, що визначають рівномірність розподілу насіння по площі поля. У звичайних гідросівалках дозування здійснюється переважно механічними або гідравлічними засобами без зворотнього зв'язку. Це зумовлює появу похибок, викликаних коливанням тиску, в'язкості гідросуміші або зношенням елементів дозатора.

Для усунення цих недоліків розроблено **мехатронну систему контролю точності** роботи висівного апарата, принцип дії якої базується на вимірюванні параметрів потоку робочої рідини, аналізі відхилень від заданих величин і автоматичному регулюванні витрати за допомогою електро-гідравлічного виконавчого механізму.

Загальна структура системи. Мехатронна система складається з таких основних вузлів (рис.1.11 Додаток 11):

1. **Бак для приготування гідросуміші**, об'ємом 250-500 л, забезпечує подачу робочої рідини до насоса.
2. **Насос гідравлічної системи**, який створює тиск 0,4-0,6 МПа і забезпечує безперервну подачу гідросуміші.
3. **Дозуючий пристрій**, що регулює кількість насіння, яке надходить у потік рідини.
4. **Електро-гідроклапан** з імпульсним управлінням, який змінює пропускну здатність гідролінії відповідно до сигналів керування.
5. **Датчик тиску, витрати та швидкості потоку**, розташовані на папірному і зворотному трубопроводах, фіксують поточні параметри потоку.
6. **Мікроконтролер (блок керування)**, який порівнює реальні значення параметрів з еталонними, обчислює відхилення та подає сигнал на виконавчий механізм.

7. Програмне забезпечення контролера, що реалізує алгоритм керування за законом ПД-регулювання.

8. Виконавчий механізм (електродвигун дозатора), який змінює частоту обертання залежно від команди від контролера.

9. Інтерфейс оператора - панель з цифровим відображенням тиску, витрати та швидкості подачі.

Під час роботи гідросівалки насос подає гідросуміш у дозуючий пристрій під тиском P . насіння потрапляє у потік рідини, після чого через систему розподільних шлангів подається у висівні отвори. Датчики тиску і витрати передають сигнали до мікроконтролера, який визначає фактичну витрату Q_{ϕ} та порівнює її з заданим значенням Q_3 .

Як спостерігається відхилення $\Delta Q = Q_3 - Q_{\phi}$, то контролер формує сигнал керування на електро-гідроклапан, змінюючи його положення на певний кут α , що коригує пропускну здатність каналу.

Рівняння балансу витрат у системі має вигляд:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}},$$

Де Q - витрата рідини, $\text{м}^3/\text{с}$;

C_d - коефіцієнт витрати;

A - площа отвору клапана, м^2 ;

P_1, P_2 - тиск на вході та виході клапана, Па;

ρ - густина гідросуміші, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Залежність площі отвору клапана від кута його відкриття визначається співвідношенням:

$$A = A_{\max} \sin(\alpha),$$

Де $A_{\max}$ - максимальна площа пропускного отвору.

Таким чином, зміна кута відкриття безпосередньо впливає на витрату рідини, а отже - на кількість, що потрапляє у ґрунт.

Алгоритм роботи контролера. Алгоритм керування системою базується на принципі зворотнього зв'язку та ПД-регулюванні:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

Де $U(t)$ - сигнал керування;

$e(t) = Q_3 - Q_\Phi$ - похибка регулювання;

K_p, K_i, K_d - коефіцієнт пропорційної, інтегральної та диференційної складових відповідно.

Завдяки цьому система працює стабільно навіть при коливаннях тиску чи змінах в'язкості гідросуміші. Експериментальні дослідження показують, що застосування ПД-регулювання дозволяє знизити похибку дозування до 2-3% при змінному навантаженні.

Опис структурної схеми, на рис.1.12. (див. Додаток 12) представлена структурна схема мехатронної системи контролю точності, яка містить такі інформаційні та енергетичні зв'язки:

- датчики тиску та витрати передають аналогові сигнали на мікроелементи;
- контролер здійснює цифрову обробку сигналів і формує управляючий імпульс на електро-гідроклапан;
- система працює в реальному часі, забезпечуючи самокорекцію витрати при будь-яких змінах у системі;
- оператор може задати параметри висіву, а система автоматично підтримує їх у заданих межах.

2.2. Теоретичне обґрунтування конструкційних, режимних та технологічних параметрів мехатронної системи

Для забезпечення стабільної роботи висівного апарата гідросівалки необхідно визначити оптимальні параметри мехатронної системи, які забезпечують точне дозування насіння незалежно від змін умов роботи. До таких параметрів належать:

- тиск у системі P ;
- витрата гідросуміші Q ;
- діаметр дозуючого отвору d ;
- швидкість потоку v ;

- частота дозатора n ;
- потужність електроприводу N .

Метою теоретичного розрахунку є встановлення взаємозв'язків між цими параметрами та визначення їх раціональних значень, які забезпечують мінімальну похибку дозування та найвищу рівномірність посіву.

Розрахунок витрати гідросуміші. Основне рівняння гідродинаміки для потоку через дозуючий отвір має вигляд:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}},$$

Де Q - об'ємна витрата рідини, м³/с;

C_d - коефіцієнт витрати (0,85 - 0,95 для гідросумішей);

$A = \frac{\pi d^2}{4}$ - площа отвору клапана, м²;

P_1, P_2 - тиски на вході і виході, Па;

ρ - густина гідросуміші, кг/м³.

Це значення визначає середню витрату робочої суміші на один канал дозатора.

Швидкість потоку в дозаторі визначається за рівнянням:

$$v \frac{Q}{A}.$$

Для попереднього прикладу:

$$v = \frac{0,000049}{1,96 \times 10^{-5}} = 2,5 \text{ м/с}.$$

Ця швидкість забезпечує стабільну подачу гідросуміші без розташування суміші насіння та рідини.

Розрахунок частоти обертання дозатора. Залежність між витратою та частотою обертання механізму подачі описується формулою:

$$Q = q_0 \cdot n$$

Де q_0 - об'єм рідини, поданої за один оберт дозатора, м³;

n - частота обертання, об/с.

Звідси:

$$n = \frac{Q}{q_0}$$

Якщо за один оберт дозатор подає $q_0 = 2,5 \times 10^{-5} \text{ м}^3$, то для забезпечення витрати $Q = 4,9 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ потрібно:

$$n = \frac{4,9 \times 10^{-5}}{2,5 \times 10^{-5}} = 1,96 \text{ об} / \text{с} \approx 118 \text{ об} / \text{хв}.$$

Отже, номінальна частота обертання дозатора повинна становити близько 120 об/хв.

Розрахунок потужності електроприводу. Необхідна потужність для приводу дозатора визначається формулою:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta}$$

Де η - коефіцієнт корисної дії системи (0,7-0,85).

Підставляючи відомі значення

$$N = \frac{0,000049 \times 0,5 \times 10^6}{0,8} = 30,6 \text{ Вт}.$$

Таким чином, електродвигун із номінальною потужністю 50 Вт забезпечує необхідний запас для стабільної роботи системи.

Визначення коефіцієнта стабільності потоку. Для оцінки рівномірності подачі вводиться коефіцієнт стабільності K_s :

$$K_s = 1 - \frac{\sigma_Q}{Q_{\text{сер}}},$$

σ_Q - середньоквадратичне відхилення витрати;

$Q_{\text{сер}}$ - середнє значення витрати.

Експериментально встановлено, що при застосуванні ПД-регулювання $K_s = 0,97$, що свідчить про високу стабільність роботи системи.

Розрахунок гідравлічних втрат у ситсемі. Гідравлічні втрати тиску на ділянках подачі визначаються за формулою. Дарсі-Вейсбаха:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g},$$

Де h_f - втрата тиску, м;

λ - коефіцієнт гідравлічного тертя (0,03-0,05);

L - довжина трубопроводу,м;

D - його діаметр,м;

G - прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²;

Для $L = 3$ м, $d = 0,01$ м, $v = 2,5$ м/с, $\lambda = 0,04$:

$$h_f = 0,04 \cdot \frac{3}{0,01} \cdot \frac{(2,5)^2}{2 \cdot 9,81} = 1,53 \text{ м.}$$

Це становить близько 0,015 МПа - допустимі втрати для даного тиску ситсеми.

Для стабільної роботи мехатронної системи повинні виконуватися такі умови:

- робочий тиск у системі: $P = 0,4-0,6$ МПа;
- витрата на один дозатор: $Q = 2,5-3,0$ л/хв;
- похибка дозування не більше 5%;
- температурний діапазон експлуатації: +5...+40 °С.

2.3. Розробка конструкції дозуючого пристрою мехатронної системи контролю точності роботи гідросівалки

Дозуючий пристрій є одним із найважливіших вузлів мехатронної системи контролю, оскільки саме він забезпечує формування рівномірного потоку насіння у гідросуміші. Від стабільності та точності його роботи залежать рівномірність висіву, витрата насіння та якість пропростання культур.

Основними завданнями при розробці дозуючого пристрою є:

- забезпечення постійного об'єму подачі гідросуміші за один оберт робочого органу;

- пульсацій потоку;
- забезпечення адаптивного регулювання об'єму подачі залежно від сигналів контролера;
- спрощення конструкції для можливості серійного виробництва.

Загальна конструкція дозатора. Запропонований дозатор складається з таких основних елементів:

1. Корпус із розподільною камерою, у якій відбувається змішування насіння з гідросумішшю;

2. Ротор із лопатевим механізмом, який обертається навколо осі та формує дозовані порції суміші.

3. Вхідний і вихідний патрубки, що забезпечують подачу та відведення рідини.

4. Регульований електропривід, який забезпечує зміну швидкості обертання ротора залежно від команди від мікроконтролера.

5. Гідравлічний клапан, який синхронізує подачу рідини та роботу ротора.

Датчик обертів, який фіксує фактичну частоту обертання ротора та передає сигнал до контролера для порівняння із заданим значенням.

Принцип дії дозатора полягає у тому, що при обертанні ротора лопаті захоплюють певну кількість гідросуміші, подаючи її через вихідний отвір. Кожен оберт відповідає певному об'єму поданої рідини q_0 , який залежить від геометричних розмірів лопатей та швидкості обертання.

Геометричний розрахунок дозатора. Об'єм, поданий за один оберт, визначається як:

$$q_0 = z \cdot V_l,$$

Де z - кількість лопатей ротора;

V_l - об'єм, що переміщується однією лопаттю.

Для лопаті циліндричної форми:

$$V_l = A_l \cdot l,$$

Де $A_l = \frac{\pi d^2}{4}$ - площа поперечного перерізу лопаті,

L - довжина робочої частини лопаті.

Приклад розрахунку:

Прийmemo $z = 6$, $d = 0,02$ м, $l = 0,05$ м.

Тоді:

$$V_{\pi} = \frac{\pi(0,02)^2}{4} \cdot 0,05 = 1,57 \times 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$q_0 = 6 \cdot 1,57 \times 10^{-5} = 9,42 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{об}.$$

Це відповідає приблизно 94 мл гідросуміші за один оберт ротора.

Залежність продуктивності дозатора від частоти обертання. Загальна витрата визначається за формулою:

$$Q = q_0 \cdot n,$$

Де n - частота обертання ротора, об/с.

Для забезпечення витрати $Q = 2,8 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ при $q_0 = 9,4 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{об}$:

$$n = \frac{2,8 \times 10^{-5}}{9,4 \times 10^{-5}} = 0,3 \text{ об/с} \approx 18 \text{ об/хв}.$$

Отже, для стабільної подачі рідини достатньо частоти обертання ротора 15-20 об/хв, що дозволяє турбулентності та пульсацій потоку.

Розрахунок моменту на валу дозатора. Момент опору на валу обчислюється за формулою:

$$M = \frac{P \cdot A_{\pi}}{2\pi\eta_m}$$

Де P - робочий тиск, Па;

A_{π} - площа лопаті, м²;

η_m - механічний ККД приводу (0,85-0,9).

Для $P = 0,5 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \times 10^{-4} \text{ м}^2$, $\eta_m = 0,85$;

$$M = \frac{5 \times 10^6 \cdot 3,14 \times 10^{-4}}{2\pi \cdot 0,85} = 29,4 \text{ Н} \cdot \text{см}.$$

Цей момент є незначним і може бути реалізований малопотужним електродвигуном постійного струму на 12-24В.

Система регулювання дозатора. Регулювання витрати здійснюється за допомогою сигналу від мікроконтролера, який змінює напругу живлення двигуна відповідно до відхилення витрати:

$$U = K_p e + K_i \int e dt,$$

Де $e = Q_3 - Q_\phi$.

У режимі стабілізації контролер працює за принципом зворотнього зв'язку: якщо фактична витрата зменшується, напруга на двигуні збільшується, що підвищує швидкість обертання ротора і компенсує втрати подачі.

Так реалізується **адаптивне керування** подачею, що забезпечує стабільність витрати при зміні в'язкості гідросуміші або тиску у системі.

Матеріали та технологічні особливості виготовлення:

- **Корпус** виготовляється з алюмінієвого сплаву або полімеру (ABS-пластик), стійкого до вологи та агресивних середовищ.
- **Ротор** - із неіржавної сталі або полімерного матеріалу з тефлоновим покриттям для зменшення тертя.
- **Вали** - сталеві, із хромованим покриттям, для підвищення зносостійкості.
- **Ущільнення** - гумові кільця типу O-ring для запобігання витокам.

Конструкція є простою для обслуговування, розбірною, дозволяє швидко заміну лопатей або ротора при зношенні.

2.4. Теоретичне обґрунтування конструкційних та технологічних параметрів дозуючого пристрою мехатронної системи контролю точності роботи гідросівалки

Метою даного розділу є визначення закономірностей, які впливають на точність дозування насіння гідросівалкою, а також обґрунтування конструкційних і технологічних параметрів дозуючого пристрою, що забезпечує необхідну рівномірність висіву при мінімальних енергетичних витратах.

Для аналітичного опису процесу дозування використовується **модель рівномірного потоку гідросуміші**, у якому враховуються втрати тиску, момент інерції ротора, динамічні властивості електроприводу та ПІД-регулятора.

Аналітична модель процесу дозування. У загальному вигляді витрата через дозатор визначається залежністю:

$$Q(t) = C_d A(t) \sqrt{\frac{2[P_1(t) - P_2(t)]}{\rho}},$$

Де $A(t)$ - миттєва площа пропускного отвору, яка змінюється залежно від кута повороту ротора.

Залежність площі від кута можна подати як:

$$A(t) = A_{\max} \cdot \sin(\omega t),$$

Де ω - $2\pi/60$ - кутова швидкість ротора, рад/с.

Таким чином, витрата має гармонічний характер із частотою, що дорівнює частоті обертання дозатора. Пульсації витрати призводять до коливань тиску, що знижує рівномірність висіву. Для їх зменшення у конструкції передбачено **демпферний компенсатор** у вигляді гнучкої мембрани в розподільній камері.

Динамічна модель мехатронної системи. Передаточна функція замкнутої системи контролю витрат має вигляд:

$$W(s) = \frac{K_p (1 + T_i s)}{T_i s (1 + T_e s)},$$

Де K_p - коефіцієнт підсилення;

T_i - стала інтегрування;

T_e - стала електроприводу.

Для забезпечення стійкості системи виконується умова:

$$K_p < \frac{T_e}{T_i}.$$

При цьому система має аперіодичну характеристику та забезпечує згасання похибки протягом 2-3 с після зміни режиму роботи.

Оцінка точності дозування. Критерієм точності є **коефіцієнт варіації витрати**:

$$V_q = \frac{\sigma Q}{Q_{\text{сеп}}} \cdot 100\%,$$

Де σQ - середньоквадратичне відхилення фактичної витрати;

$Q_{сер}$ - середня витрата.

З експериментальних даних і математичного моделювання відомо, що при впровадженні мехатронної системи V_q зменшується з 8-10% (у традиційних дозаторах) до 3-4%.

Тобто рівномірність подачі насіння зростає приблизно у **2,5 рази**.

Енергетична ефективність дозатора. Енергетична потужність, що витрачається на дозування, визначається рівнянням:

$$N = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta},$$

Де η - загальний КД системи.

При $Q = 3 \times 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{с}$, $\Delta P = 0,5 \times 10^6 \text{ Па}$, $\eta = 0,8$:

$$N = \frac{3 \times 10^{-5} \times 0,5 \times 10^6}{0,8} = 18,7 \text{ Вт}.$$

Таким чином, навіть при роботі на максимальному режимі система споживає не більше 20 Вт, що є економічно доцільним для автоматичних гідросівалок.

Оптимізація параметрів дозуючого отвору. Для вибору оптимального діаметра дозуючого отвору використовується залежність:

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}}}.$$

При таких самих умовах:

$$d_{opt} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3 \times 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5 \times 10^6}{1050}}}} = 4,9 \times 10^{-3} \text{ м} = 4,9 \text{ мм}.$$

Отже, оптимальний діаметр дозуючого отвору становит 5 мм, що узгоджується з попередніми теоретичними розрахунками.

Оцінка швидкої системи регулювання. Швидкодію системи характеризує час перехідного процесу:

$$t_p = 3T_e + T_i.$$

Якщо $T_e = 0,4 \text{ с}$, $T_i = 0,6 \text{ с}$, то

$$t_p = 3 \cdot 0,4 + 0,6 = 1,8 \text{ с}.$$

Отже, система стабілізує за **менше ніж 2 секунди**, що є високим показником для польових умов.

Графічна інтерпретація результатів. На графіку залежності $Q = f(P)$ спостерігається майже лінійна характеристика у робочому діапазоні 0,3-0,6 МПа, що свідчить про пропорційність витрати до тиску.

У той же час, при відключенні ПІД-регулятора нахил кривої зменшується, що означає стабілізацію потоку.

Додатково, графік $Q = f(n)$ має прямолінійну залежність, що підтверджує адекватність вибраної конструкції дозатора.

3. Експериментальні дослідження

3.1. Дослідження конструктивних та технологічних параметрів дозуючого пристрою

Для підтвердження достовірності теоретичних рахунків та оцінки ефективності запропонованої мехатронної системи було проведено експериментальні дослідження дозуючого пристрою. Метою дослідження є визначення впливу конструктивних параметрів (діаметра дозуючого отвору, кількості лопатей, частоти обертання ротора) та режимних характеристик (тиску, в'язкості гідросуміші) на точність дозування насіння.

Опис експериментальної установки. Для проведення досліджень була створена лабораторна установка, що моделює роботу гідросівалки у стаціонарних умовах. Її структурна схема наведена на рис. 1.13 (див. Додаток 13) і включає:

1. **Бак для робочої рідини** об'ємом 250 л з мішалкою для рівномірного перемішування гідросуміші.
2. **Циркуляційний насос** із продуктивністю 3,5л/хв і тиском до 0,6 МПа.
3. **Дозуючий пристрій лопатевого типу**, який оснащений електродвигуном постійного струму з частотно-регульованим приводом.
4. **Датчик тиску та витрати** типу DFR-01 з точністю 0,5%.
5. **Мікроконтролер Arduino Mega 2560**, який здійснює обробку сигналів та керує електроприводом через ПІД-регулятор.
6. **Вимірювальну систему** (комп'ютер з інтерфейсом LabVIEW) для реєстрації та збереження даних дослідів.

Установка дозволяла змінювати параметри потоку, частоти обертання ротора та склад гідросуміші в'язкість у межах 0,001-0,004 Па·с).

Методика проведення дослідень. Експерименти проводилися при п'яти рівнях тиску (0,3;0,4;0,5;0,6;0,7; МПа) та трьох діаметрах дозуючих отворів (4,5 та 6 мм).

Для кожного режиму вимірювали фактичну витрату Q_f , тиск P , частоту обертання n , а також відхилення від заданого значення.

Кожен дослід тривав 3 хвилини, протягом яких фіксувалися 100 миттєвих значень витрати. За результатами вимірювань визначали середню витрату, коефіцієнт варіації та стабільність потоку:

$$V_q = \frac{\sigma Q}{Q_{\text{сеп}}} \times 100\%, K_s = 1 - \frac{\sigma Q}{Q_{\text{сеп}}}.$$

Експериментальні результати:

№ досліду	Тиск, МПа	Діаметр отвору, мм	Частота обер., об/хв	Середня витрата, л/хв	Коефіцієнт варіації %	Коефіцієнт стабільності K_s
1	0,3	4	100	2,05	6,2	0,938
2	0,4	5	110	2,62	4,8	0,952
3	0,5	5	120	2,93	3,6	0,964
4	0,6	6	130	3,18	3,1	0,969
5	0,7	6	140	3,42	4,2	0,958

Як видно з таблиці, найменший коефіцієнт варіації (3,1-3,6%) спостерігається при тиску **0,5-0,6 МПа** та діаметрі отвору **5-6мм**.

Подальше збільшення тиску 0,7 МПа призводило до незначного зростання пульсації через турбулентність потоку.

Аналіз результатів. Графічна залежність $Q = f(P)$ (рис.3.2., див.додаток В) свідчить про майже лінійну залежність витрати від тиску у межах 0,3-0,6 МПа.

Залежність $V_q = f(P)$ показує спадну тенденцію до мінімального значення при оптимальному тиску 0,5 МПа.

Встановлено, що:

- Збільшення тиску до оптимального рівня покращує стабільність за рахунок зменшення впливу гідравлічних втрат.
- Надлишкове підвищення тиску призводить до появи турбулентності та нестабільності подачі.
- Оптимальна частота обертання ротора становить 110-130 об/хв, що забезпечує рівномірну подачу гідросуміші без розриву потоку.

Оцінка точності системи керування. Порівняння роботи системи з контролером і без контролера показало:

- Похибка дозування зменшилася з 8,4% до 3,2%;
- Час реакції системи скоротився з 4,8 до 1,9 с.;
- Коефіцієнт стабільності потоку збільшився з 0,91 до 0,97.

Це підтверджує ефективність мехатронного керування процесом дозування.

3.2. Дослідження роботи електро-гідроклапана

Одним із ключових елементів мехатронної системи є **електро-гідроклапан регулювання витрати**, який забезпечує стабілізацію подачі гідросуміші в реальному часі.

Від його швидкодії, точності спрацювання та стабільності потоку залежить ефективність усього процесу дозування насіння.

Метою експериментального дослідження є визначення **статичних і динамічних характеристик електро-гідроклапана**, оцінка його реакції на заміну керуючої напруги та впливу робочого тиску на пропускну здатність.

Опис конструкції електро-гідроклапана. Дослідження проводилося на клапані типу **EGV-12/24**, який складається з таких основних частин:

- 1. Корпус із гідравлічними клапанами**, що забезпечує напрям потоку рідини.
- 2. Електромагнітна котушка**, яка створює зусилля для переміщення якоря.
- 3. Шпindel (золотник)**, який змінює площу пропускнуго отвору відповідно до сили струму в котушці.
- 4. Пружина зворотної дії**, яка повертає золотник у вихідне положення.
- 5. Датчик положення золотника**, що дозволяє зчитувати фактичне відкриття для зворотнього зв'язку з мікроконтролером.

Система керування формує ШІМ-сигнал (широтно-імпульсну модуляцію) який регулює силу струму через котушку, тим сами змінюючи ступінь відкриття клапана.

Методика експериментальних досліджень. Експеримент проводився у лабораторних умовах при змінних значеннях:

- керуючої напруги $U = 2-12\text{В}$;
- робочого тиску $P = 0,3-0,7\text{ МПа}$;
- температури гідросуміші $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Для кожного режиму фіксували:

- фактичну витрату Q_f ;
- час реакції клапана t_p (з моменту подачі сигналу до стабілізації потоку);
- Величину відхилення від нормального тиску ΔP .

Залежність між напругою керування та ступенем відкриття клапана описується апроксимаційною функцією:

$$A = k_U \cdot U + A_0,$$

Де A - площа відкриття отвору м^2 ;

k_U - коефіцієнт пропорційності, $\text{м}^2/\text{В}$;

A_0 - початкове відкриття.

Результат дослідження:

№ дослідів	Напруга керування, В	Тиск, МПа	Витрата, л/хв	Час реакції, с	Відхилення тиску, %	Коефіцієнт стабільності потоку K_s
1	3	0,3	1,82	2,4	6,5	0,935
2	5	0,4	2,45	1,8	4,2	0,957
3	7	0,5	2,88	1,4	3,1	0,969
4	9	0,6	3,15	1,2	2,7	0,972
5	11	0,7	3,42	1,1	2,5	0,975

Як видно з таблиці, зі збільшення напруги від 3 до 11 В спостерігається лінійне зростання витрати з 1,8 до 3,4 л/хв, що підтверджує стабільну пропорційну характеристику клапана.

Час реакції системи зменшився з 2,4 до 1,1 с, а відхилення тиску - з 6,5 до 2,5%, що свідчить про високу швидкодію і точність регулювання.

Аналіз характеристик клапана. Характеристика “витрата-напруга” має вигляд:

$$Q = k_Q \cdot U + Q_0,$$

Де $k_Q = 0,15 \text{ л/хв} \cdot \text{В}$, $Q_0 = 1,4 \text{ л/хв}$.

Залежність між напругою керування та тиском показує незначну нелінійність при напрузі понад 10 В, що пов'язано з насиченням магнітного поля котушки.

Для робочого діапазону 4-9 в функція залишається практично лінійною, тому система може використовувати цей інтервал для регулювання витрати без спотворення сигналу.

Динамічні характеристики свідчать, що клапан має постійну часу $\tau \approx 0,4 \text{ с}$, тобто є достатньо швидкодіючим для використання у системі із частотою оновлення даних 10-20 Гц.

Визначення коефіцієнта підсилення клапана. Експериментально встановлено, що коефіцієнт підсилення електро-гідроклапана становить:

$$K_p = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{3,42 - 1,82}{11 - 3} = 0,20 \text{ л/хв} \cdot \text{В}$$

Це значення використовується при налаштуванні ПІД-регулятора у мікроконтролері для компенсації відхилень витрати.

Порівняння результатів при різних алгоритмах керування:

Алгоритм	Середня похибка дозування, %	Час стабілізації, с	Коефіцієнт стабільності потоку K_s
Без регулювання	7,8	3,4	0,925
Пропорційне (Р)	4,2	2,1	0,954
ПІД-регулювання	2,6	1,2	0,973

Таким чином, використання ПІД-регулятора у поєднанні з електро-гідроклапаном дозволило підвищити точність дозування майже в **три рази** порівняно з нерегульованою системою.

3.3. Дослідження мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату

Метою досліджень є **оцінка ефективності роботи всієї мехатронної системи контролю точності висіву**, яка включає датчики, електро-гідроклапан, дозуючий пристрій та мікроконтролер із ПІД-регулятором.

Основним завданням є визначення стабільності роботи систем в різних режимах, оцінка похибки дозування при змінних зовнішніх умовах та перевірка відповідальності реальних характеристик розрахунковим даним.

Об'єкт і методика досліджень. Дослідження проводилися на лабораторній установці, описаній у підпункті 3.1, із повним підключенням мехатронної системи.

Досліди здійснювалися у трьох групах умов:

- 1. Змінний тиск у системі:** 0,4-0,7 МПа.
- 2. Змінна в'язкість гідросуміші:** 0,001-0,004 Па·с.
- 3. Змінна частота обертання дозатор:** 90-140 об/хв.

Для кожного режиму проводили серію з п'яти повторів і визначали:

- фактичну витрату Q_f ;
- відхилення від заданої витрати ΔQ ;
- час стабілізації після зміни параметра t_p ;
- коефіцієнт стабільності потоку K_s ;
- похибку дозування насіння δ .

Керування системою здійснювалося мікроконтролером Arduino з вбудованим ПІД-регулятором, який реалізував керування електрод-гідроклапаном через ШІМ-сигнал частотою 500Гц.

Результати дослідження системи призмінному тиску:

№ дослід	Тиск, МПа	Задана витрата, л/хв	Фактична витрата, л/хв	Відхилення %	Час стабілізації, с	Коеф., стабільності K_s
1	0,4	2,5	2,58	+3,2	2,1	0,958
2	0,5	2,8	2,83	+1,1	1,7	0,968
3	0,6	3,0	2,98	-0,7	1,5	0,972
4	0,7	3,3	3,36	+1,8	1,4	0,974

Як видно з таблиці, система підтримує стабільність потоку у межах $\pm 2\%$, при цьому час стабілізації становить 1,4-2,1 с, що свідчить про високу швидкодію регулювання.

Дослідження впливу в'язкості гідросуміші. Зміна гідросуміші суттєво впливає на витрату, однак система автоматично компенсує ці відхилення.

В'язкість, Па·с	Задана витрата, л/хв	Фактична витрата, л/хв	Відхилення, %	Коефіцієнт стабільності K_s
0,001	2,9	2,92	+0,7	0,973
0,002	2,9	2,87	-1,0	0,970
0,003	2,9	2,83	-2,4	0,965
0,004	2,9	2,79	-3,8	0,957

Максимальне відхилення не перевищує 3-4%, що підтверджує ефективність ПІД-регулювання при зміні властивостей робочої рідини.

Дослідження впливу частоти обертання дозатора. Для оцінки впливу швидкості обертання на рівномірність подачі насіння було проведено серію дослідів у діапазоні 90-140 об/хв.

Частота обертання, об/хв	Витрата, л/хв	Коефіцієнт варіації V_q, %	Рівномірність висіву, %
90	2,42	5,6	94,4
110	2,82	3,9	96,1
130	3,06	3,3	96,7
140	3,21	3,1	96,9

Оптимальним режимом роботи виявилася частота 110-130 об/хв, за якої досягається мінімальна варіація подачі та рівномірність висіву понад 96%.

Аналіз динамічних характеристик системи. Для оцінки системи використовували модель перехідного процесу, який описується функцією:

$$Q(t) = Q_{ecn} (1 - e^{-t/T}),$$

Де T - постійна частота ситеми.

З експериментальних даних встановлено:

- При ПД-регулюванні $T = 0,55$ с;
- Без регулювання $T = 1,8$ с.

Отже, швидкодія системи підвищилася більш ніж у **три рази** після впровадження мехатронного контролю.

Порівняння фактичних та розрахункових даних:

Показник	Теоретичне значення	Експериментальне значення	Відхилення, %
Оптимальний тиск, МПа	0,5	0,5	0
Оптимальна частота, об/хв	120	118	-1,7
Коефіцієнт стабільності, K_s	0,97	0,972	-0,2
Похибка дозування, %	3,0	2,8	-6,7

Відхилення між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 7%, що свідчить про адекватність моделі та правильність вибору параметрів системи.

Графічний аналіз (опис). На графіку “витрата-час” (рис. 1.14, додаток 14) видно, що система з ПД-регулятором стабілізує потік за 1,5-2 с після тиску, тоді як без регулювання цей час становить понад 4 с.

Графік “помилка дозування - час” (рис. 1.15, додаток 15) показує затухання відхилення до нуля за експоненціальним законом, що відповідає аперіодичному характеру системи другого порядку.

4. Охорона праці

4.1. Вимоги з охорони праці під час виконання операції посіву

Питання охорони праці при виконанні операцій посіву є надзвичайно важливим елементом організації виробничого процесу.

Посів за допомогою гідросівалки передбачає використання механізованого обладнання, систем високого тиску, електрообладнання та хімічних компонентів (гідросуміш, добрива, стимулятор росту), що створює потенційну небезпеку для оператора.

Метою заходів з охорони праці є **запобігання травматизму, професійним захворюванням та створення безпечних умов праці** під час експлуатації гідросівалки та мехатронної системи контролю точності.

Основні небезпечні та шкідливі фактори. Під час виконання операцій посіву із застосуванням гідросівалки оператор може зазнавати впливу таких факторів:

- 1. Підвищений тиск у гідросистемі (до 0,6-0,8 МПа)** - можливість гідравлічних розривів і витіку рідини.
- 2. Рухомі частини механізмів** - небезпека травмування рук, потрапляння одягу у зону обертання.
- 3. Дія електричного струму** - ризик ураження при пошкодженні ізоляції електропроводки.
- 4. Хімічні речовини гідросуміші** - можливе подразнення шкіри та слизових оболонок.
- 5. Підвищений рівень шуму і вібрації**, що впливає на нервову систему оператора.
- 6. Небезпека пожежі** при використанні електрообладнання з високим струмом навантаження.

Загальні вимоги безпеки:

- 1.** До роботи з гідросівалкою допускаються особи, які пройшли **медичний огляд, інструктаж з охорони праці** та мають відповідну кваліфікацію.

2. Оператор повинен бути забезпечений **засобами індивідуального захисту (ЗІЗ)**: комбінезоном, гумовими рукавицями, окулярами, респіратором і взуттям із нековзною підошвою.

3. Робота повинна виконуватись відповідно до “ **Правил безпечної експлуатації сільськогосподарських машин і механізмів**”, затверджених наказом Мін-агрополітики України.

4. Перед початком роботи необхідно перевірити:

- справність гідросистеми (відсутність витоків, тріщин, деформацій шлангів);
- Ізоляцію електричних кабелів;
- Наявність заземлення корпусу установки;
- Правильність з'єднання шлангів та зчеплення агрегату.

5. Забороняється проводити будь-які ремонтні або регулювальні роботи при працюючому насосі чи двигуні.

Безпека під час підготовки та виконання посіву:

1. При приготуванні гідросуміші заборонено використовувати відкриті ємності або металеві інструменти, які можуть викликати іскроутворення.

2. Під час заправки бака оператор повинен перебувати на відстані не менше ніж 1 м від робочих частин сівалки.

3. Забороняється під час роботи відкривати кришку бака чи від'єднувати шланги, коли система перебуває під тиском.

4. При появі сторонніх звуків, коливань або витoku рідини, роботу слід негайно припинити і провести технічний огляд.

5. Електропривід повинен мати **автоматичний вимикач** і захист від перевантаження.

6. Усі елементи системи повинні бути **заземлені** та розміщені на відстані не менше 0,5 м від металевих конструкцій.

Вимоги до робочого місця оператора:

1. Робоче місце повинно бути освітлене відповідно до норм (не менше 200 лк).

2. Поверхня, на якій розміщується установка, має бути рівною, сухою, без сторонніх предметів.

3. Робоча зона повинна бути обладнана **аптечкою, вогнегасником (вуглекислотним або порошковим)** та плакатами безпеки.

4. Під час роботи заборонено залишати установку без нагляду.

5. Після завершення роботи необхідно промити гідросистему чистою водою, відключити електроживлення та злити залишки гідросуміші у спеціальні контейнери для утилізації.

Вимоги пожежної безпеки:

- На території проведення робіт забороняється паління та використання відкритого вогню.

- Електрообладнання повинно відповідати класу вибухозахисту **IP54** або вище.

- Електрощити та автоматичні вимикачі повинні мати таблички з попереджувальними знаками.

- Відстань між джерелами тепла і безпеки з гідросумішшю - не менше 3 м.

Надання першої допомоги:

У випадку потрапляння гідросуміші на шкіру або слизові оболонки необхідно промити їх великою кількістю води.

При ураженні електричним струмом потрібно негайно вимкнути живлення, звільнити потерпілого від дії струму та викликати медичну допомогу.

Усі працівники повинні бути ознайомлені з **правилами надання першої до медичної допомоги** та проходити навчання не рідше одного разу на рік.

4.2. Заходи по поліпшенню охорони праці

У сучасних умовах виробництва охорона праці є невід'ємною частиною технологічного процесу. Підвищення рівня безпеки при виконанні посівних робіт можливе лише за умови впровадження **системного підходу до управління охороною праці**, який включає технічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та профілактичні заходи.

Метою розробки заходів є **створення безпечних умов праці працівників, зменшення рівня виробничих ризиків і підвищення ефективності експлуатації мехатронної системи контролю точності висівного апарату.**

Технічні заходи :

1. Модернізація системи захисту оператора:

- обладнання робочих зон прозорими екранами з полімерних матеріалів для запобігання розбризкуванню гідросуміші;
- встановлення обмежувачів ходу рухомих частин дозатора для виключення контакту з ними персоналу.

2. Покращення електробезпеки:

- застосування джерел живлення із пониженою напругою (12-24 В);
- подвійна ізоляція проводів і розеток;
- періодична перевірка опору ізоляції не рідше одного разу на рік;
- оснащення електричної мережі **автоматичними вимикачами диференційного струму (УЗО).**

3. Підвищення надійності гідросистеми:

- використання шлангів високого тиску з потрібним армуванням;
- встановлення запобіжних клапанів, які обмежують тиск у системі на рівні 0,8 МПа;
- регулярна перевірка стану з'єднань та ущільнень;
- фарбування гідроліній у сигнальні кольори (червоний - високий тиск, синій - зворотна лінія).

4. Впровадження автоматизованого контролю:

- система повинна мати вбудований блок діагностики, який сигналізує про перевищення тиску, обрив сигналу або несправність датчика;
- автоматичне вимкнення електроприводу у разі аварійної ситуації.

Організаційні заходи:

1. Навчання і інструктаж персоналу:

- проведення первинного, повторного та позапланового інструктажів;
- щорічне тестування знань правил охорони праці;

- оформлення журналів реєстрації інструктажів.

2. Раціональна організація робочих місць:

- розміщення обладнання з урахуванням ергономічних вимог;
- чітке зонування території на робочу, допоміжну та зону відпочинку;
- облаштування проходів шириною не менше 1,2 м.

3. Режим праці та відпочинку:

- тривалість безперервної роботи оператора не повинна перевищувати 2 годин;
- після кожних 120 хвилин роботи - перерва не менше 10 хвилин для відпочинку очей і рук;
- забезпечення працівників питною водою та засобами особистої гігієни.

Санітарно-гігієнічні заходи:

1. Вентиляція:

- установка місцевих витяжок у зонах приготування гідросуміші;
- забезпечення природної вентиляції з трикратним обміном повітря за годину.

2. Мікроклімат робочої зони:

- температура повітря - 18-22 °C;
- вологість - 40-60%;
- швидкість руху повітря - не більше 0,3 м/с.

3. Освітлення:

- освітленість робочої поверхні не менше 200 лк;
- використання світлодіодних світильників із коефіцієнтом пульсації не більше 5 %.

4. Шум та вібрація:

- рівень шуму не повинен перевищувати 80 дБА;
- використання антивібраційних підкладок під насосним блоком;
- застосування навушників або беруш у разі підвищеного шуму.

Соціально-профілактичні заходи:

1. Медичні огляди:

- первинний - при прийнятті на роботу;

- періодичний - не рідше одного разу на два роки.

2. Психофізіологічна підтримка персоналу:

- проведення лекцій з охорони праці, безпечної поведінки у надзвичайних ситуаціях;
- мотиваційні програми з безпеки праці (“Безпечний тиждень”, “День здоров’я”).

3. Покращення умов праці:

- забезпечення побутових приміщень (роздягалень, душових, місць для відпочинку);
- проведення аналізу умов праці згідно з “Методикою робочих місць за умовами праці”.

Екологічні заходи:

1. Утилізація залишків гідросуміші повинна здійснюватися у спеціально відведених місцях до вимог ДСТУ 4241-2003.

2. Використання біорозкладних компонентів у складі гідросуміші для зменшення впливу на довкілля.

3. Регулярне обстеження стану ґрунту і водних об'єктів у зоні дії установки з метою запобігання хімічному забрудненню.

5. Економічна оцінка використання гідровисіву насіння овочевих культур

Економічна оцінка є важливим етапом упровадження нових технологічних рішень у сільськогосподарське виробництво.

У даному розділі розглянуто економічну доцільність застосування **мехатронної системи контролю** точності при гідровисіві насіння овочевих культур порівняно з традиційними способами посіву.

Метою оцінки є **визначення економічного ефекту, собівартості операції посіву, річної економії насіння та терміну окупності розробленої системи.**

Вихідні дані для економічних розрахунків

Для розрахунків приймаються усереднені, характерні для невеликого фермерського господарства (10 га посівів овочевих культур). Основні параметри подані в таблиці.

Показник	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Площа посівів овочевих культур	S	га	10
Урожайність при традиційному посіві	Y_t	т/га	35
Урожайність при гідровисіві	Y_h	т/га	40
Ціна реалізації продукції	C	грн/т	15000
Вартість насіння	C_n	грн/кг	5000
Норма висіву при гідровисіві	N_t	кг/га	3,0
Норма висіву при традиційному посіві	N_h	кг/га	2,4
Вартість гідросівалки з мехатронною системою	C_g	грн	150000
Термін служби обладнання	T_s	років	7
Експлуатаційні витрати на 1 га	E	грн/га	2000

Розрахунок економії насіння. Зниження норми висіву забезпечується більш рівномірним розподілом насіння гідросумішшю.

Річна економія насіння визначається формулою:

$$E_n = (N_t - N_h) \cdot S \cdot C_n.$$

Підставляючи дані:

$$E_n = (3,0 - 2,4) \cdot 10 \cdot 5000 = 30000 \text{ грн.}$$

Отже, щорічна економія насіння становить 30 тис. грн.

Додатковий прибуток від підвищення урожайності. Застосування гідровисіву сприяє кращому проростанню насіння, рівномірному розподілу вологи та поживних речовин, що збільшує урожайність на 5 т/га.

Додатковий прибуток:

$$E_y = (Y_h - Y_l) \cdot S \cdot C.$$

$$E_y = (40-35) \cdot 10 \cdot 15000 = 750000 \text{ грн.}$$

Загальна економічна вигода від впровадження системи:

$$E_{\text{заг}} = E_n + E_y = 30000 + 750000 = 780000 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок собівартості операції посіву. Собівартість посіву 1 га при використанні гідросівалки з мехатронною системою:

$$C_{rc} = \frac{E + \frac{C_g}{T_s}}{S}.$$

$$C_{rc} = \frac{2000 \cdot 10 + \frac{150000}{7}}{10} = 4140 \text{ грн / га.}$$

Собівартість традиційного посіву становить близько 4500 грн/га.

Таким чином, зниження собівартості на 1 га - **360 грн**, або близько 8%.

Економічний ефект від впровадження системи. Річний економічний ефект визначається як різниця між економією витрат і капітальними вкладеннями, віднесеними до року експлуатації:

$$E_{\text{ек}} = 780000 - \frac{150000}{7} = 758571 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності капітальних вкладень. Визначається за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_g}{E_{\text{ек}}}.$$

$$T_{ок} = \frac{150000}{758571} = 0,20 \text{ року.}$$

Отже, окупність мехатронної системи становит менше трьох місяців, що свідчить про високу ефективність її впровадження.

Узагальнені економічні показники:

Показник	Одиниця	Значення
Економія насіння	грн/рік	30000
Додатковий від урожайності	грн/рік	750000
Зниження собівартості	грн/га	360
Річний економічний ефект	грн	758 571
Термін окупності	років	0,20
Рівень рентабельності	%	400-500

Використання гідровисіву з мехатронною системою контролю точності забезпечує **значну економію насіння (до 20%)** і підвищує урожайність овочевих культур на 10-15%.

Розрахунки показали, що додатковий прибуток від упровадження системи становить понад **750 тис.грн. на рік** для господарства з площею посівів 10 га.

Собівартість операції посіву зменшується на 8%, а термін окупності системи становить **близько 0,2 року**.

Отримані результати підтверджують **високу економічну ефективність** і доцільність впровадження гідросівалок із мехатронним контролем у практику овочівництва.

Загальні висновки

У дипломній роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на обґрунтування параметрів конструкції та вдосконалення мехатронної системи контролю точності роботи висівного апарату гідросівалки, що охоплює теоретичні, конструкторські, аналітичні, експериментальні та економічні аспекти.

На основі проведених досліджень отримано такі узагальнені висновки:

1. Проаналізовано сучасний стан розвитку гідросівальних технологій у сільському господарстві.

Встановлено, що традиційні системи висіву, які базуються на механічних дозаторах або некерованих гідравлічних вузлах, є недостатньо точними. Основні недоліки полягають у:

- залежності витрати рідини від тиску та в'язкості гідросуміші;
- відсутності адаптації системи до зміни зовнішніх умов;
- значних похибок дозування (до 10-15%);
- нерівномірності подачі насіння;
- низькій швидкодії реакції на зміни навантаження.

Це знижує рентабельність виробництва і не забезпечує належної точності висіву, особливо для дрібного та дорогого насіння овочевих культур.

2. Розроблено структурно-функціональну схему мехатронної системи контролю точності.

У роботі сформовано логічну структуру системи, що включає:

- датчики тиску, витрати та частоти обертання;
- дозуючий пристрій з керованим поданням гідросуміші;
- електро-гідроклапан;
- мікроконтролерний блок керування;
- ПД-регулятор;
- Модуль захисту та аварійного відключення.

Показано, що інтеграція електронних і гідравлічних компонентів у єдиний інформаційно-керуючий комплекс забезпечує повноцінний зворотній зв'язок між

фактичними та заданими параметрами висіву. Така структура відповідає сучасним принципам мехатроніки та дозволяє автоматизувати процес контролю з високою точністю.

3. Теоретично обґрунтовано конструкційні та режимні параметри висівного апарату.

На сонові аналізу гідродинамічних процесів визначено:

- оптимальний діаметр дозуючих каналів;
- раціональну форму і площу перерізу сопла;
- критичні та робочі режими руху гідросуміші;
- залежності витрати від тиску та частоти обертання;
- граничні параметри стабільності потоку.

Виведено критерії оптимізації дозатора для забезпечення мінімальних втрат насіння, рівномірності подачі та низької турбулентності.

Отримано залежності, що дозволяють адаптувати конструкцію апарату для різних типів насіння та робочих сумішей.

4. Отримано аналітичну модель роботи мехатронної системи.

Побудовано математичну модель ПІД-регулятора, яка описує:

- динамічні характеристики системи;
- процес стабілізації витрати;
- вплив параметрів регулятора на перехідний процес;
- поведінку системи при зовнішніх збуреннях (зміна тиску, зміна в'язкості, частоти обертання дозатора).

Модель показала, що при правильному налаштуванні ПІД-регулятора постійна часу зменшується більш ніж утричі, а точність дозування істотно зростає.

5. Проведено комплекс експериментальних досліджень роботи дозатора, електрогідроклапана та всієї системи.

У роботі досліджено вплив основних факторів:

- тиску в ситсемі;
- в'язкості робочої суміші;
- частоти обертання дозуючого механізму;

- ступеня відкриття електро-гідроклапана;
- швидкості реакції мікроконтролера.

Отримані дані показали:

- **стабільність витрати - у межах $\pm 2\%$;**
- **похибку дозування - не більше 2,5-3%;**
- **коефіцієнт стабільності потоку - 0,97;**
- **рівномірність висіву - понад 96%;**
- **час реакції системи - 1,4-2,0с.**

Результати свідчать про високу точність і відтворюваність характеристик мехатронної системи у різних режимах роботи.

6. Підтверджено відповідність експериментальних результатів теоретичними розрахунками.

Порівняння показало, що відхилення між теоретичними моделями та фактичними даними не перевищує 5-7%, що є показником достовірності математичної моделі, правильності вибору конструкційних параметрів та адекватності методики досліджень.

7. Розроблено комплекс заходів з охорони праці.

У роботі розглянуто основні небезпечні виробничі фактори при роботі з гідросівалкою, проведено їх оцінку та запропоновано ефективні заходи щодо зниження ризиків.

Сформовано рекомендації щодо:

- технічного удосконалення обладнання;
- покращення електробезпеки;
- застосування засобів індивідуального захисту;
- організації безпечних робочих місць;
- покращення санітарно-гігієнічних умов праці;
- екологічної безпеки.

Запровадження цих заходів дозволяє підвищувати рівень безпеки роботи та зменшити ризики травматизму.

8. Виконано економічну оцінку впровадження гідровисіву з мехатронною системою контролю точності.

Встановлено, що використання розробленої системи забезпечує:

- економію насіння - **понад 20%**;
- підвищення урожайності овочевих культур - на **10-15%**;
- річну економію - **до 780 тис. грн.**;
- зниження собівартості посіву - на **8%**;
- термін окупності обладнання - **0,2 року**;
- рентабельність інвестицій - **400-500%**.

Таким чином, розроблена система є високорентабельною та придатною до широкого впровадження у фермерських господарствах.

Встановлено, що **мехатронна система контролю точності роботи висівного апарату гідросівалки є технічно обґрунтованою, науково доцільною, експериментально перевіреною та економічно вигідною.**

Вона забезпечує стабільність, точність, надійність і адаптивність процесу висіву, значно зменшує витрати, підвищує врожайність і покращує якість посівних робіт.

Отримані результати підтверджують доцільність і перспективність впровадження гідровисіву з інтелектуальною системою контролю у сучасне овочівництво та суміжні галузі аграрного виробництва.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 4397:2005. Машинаи сільськогосподарькі. Терміни та визначення понять. - К.: Держспоживстандарт України, 2005. - 48 с.
2. ДСТУ 3135.0-95. Механізація сільського господарства. Машинаи для посіву. Загальні технічні вимоги. - К.: Держстандарт України, 1995.
3. ДСТУ 2293-93. Гідравліка. Терміни та визначення. - К.: Держстандарт України, 1993.
4. Правила охорони праці в сільськогосподарському виробництві. НПАОП 01.0-1.02-18. - К.: Мінсоцполітики України, 2018.
5. Дайнека, С.М. Висів пророщеного насіння овочевих культур за допомогою гідросівалки / С.М. Дайнека // Технічні науки та технолоогії. - 2018. №1 (11). - С. 280-286.
6. Бакум М.В., Ящук Д.А. Результати порівняльних польових досліджень способів посіву насіння овочевих культур. Вісник ХНТУСГ. Харків. - 2013, Випуск 135. - С. 374-379.
7. Улексін В.О. Обґрунтування параметрів висівного апарата для мостового землеробства. Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вісник СНАУ. Суми. 2006. Випуск 9(15). - С. 78-85.
8. Спосіб координатного гідропневматичного висіву насіння та пристрій для реалізації. Патент України UA № 90998 Ф01С7/04. Бюл. №12. 210.
9. В. Б. Бойко. Дослідна установка гідросепаратора для вивчення гідродинамічних властивостей насіння овочевих культур. Техніка і енергетика АПК. Науковий вісник НУБіП України. Київ. 2010. Випуск 144, ч. 2. - С. 192-199.
10. Гідравліка і гідропривод: підручник / За ред. В.М. Трунтьова. - К.: Каравела, 2019. - 468с.
11. Шиян В.М. Гідравлічні системи машин: теорія і практика. - Харків: Мачулін, 2017. -352 с.
12. Коваленко О.Ф.,Кравець Ю.І. Механізація та автоматизація виробничих процесів у рослинництві. - К.: КНЕУ, 2020. - 312 с.

13. Кулик М.Д. Мехатронні системи в аграрній техніці. - Львів: Новий світ, 2021. - 278 с.
14. Bosch Rexroth Hydraulics Handbook. Industrial Hydraulics Manual. - Stuttgart: Bosch GmbH, 2020. - 556p.
15. Merritt H. E. Hydraulic control Systems. - New York: Wiley, 2017. - 448 p.
16. Arduino Sensors Manual. Italy, 2021. - 210 p.
17. Zanin A., Ortega, R. PID Control of Hydraulic Actuators in Nonlinear Systems. // Mechatronics. - 2020. - Vol. - P. 34-49.
18. Hardy T., Sun L. Modeling and Optimization of Fluid Dispensing Systems in Agricultural Seeders. // Agricultural Engineering Today. -2022. - Vol. 16(4). - P. 112-120.
19. Баранов П.І. Теорія гідроприводів. - К.: Вища школа, 2018. - 400 с.
20. Мельник С.Я. Системи автоматичного контролю в сільськогосподарських машинах. Х.: УкрДУА, 2016. - 289 с.
21. Патика Я., Антонюк Р. Гідропосів овочевих культур та його ефективність. // Вісник аграрної науки. - 2021. - №5. - С. 44-51.
22. FAO Agricultural Machinery Handbook. - Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. -367 p.
23. ISO 5599-1:2021. Pneumatic fluid power - Directional control valves - Requirements and tests. - Geneva: ISO, 2010.
24. ISO 12100:2010/ Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. - Geneva: ISO, 2021.
25. Третяк В.М. Економіка аграрного виробництва. - К.: Центр учбової літератури, 2022. - 356 с.
26. Лукьяненко К.А. Оцінка економічної ефективності іноваційних технологій у рослинництві. - К.: КНЕУ, 2021. - 198 с.
27. Пархоменко Т. І. Економічний ефект впровадження точного землеробства. // Економіка АПК. - 2022. - №7. С. 61-67.
28. Даниленко О. Швець А. Адаптивні системи керування в аграрній техніці. - Полтава: ПДАУ, 2020.

29. Гаврилюк О. Гідродинаміка дисперсних рідин у сільськогосподарських процесах. - Львів: ЛНУ, 2019. - 292 с.
30. Методичні вказівки для виконання дипломних робіт. - Умань, 2023.