

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр" на тему:

**Обґрунтування параметрів та дослідження
конструкції плуга з пружно-демфуючими
елементами**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-3-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____Іжаковський Володимир Валерійович

Керівник: _____Пугач Андрій Миколайович

Рецензент: _____

Дніпро 2025

1. Мета і задачі досліджень. 2. Аналіз літературних і патентних джерел. 3. Теоретичні дослідження. 4. Програма і методика досліджень 5. Результати досліджень. 6. Економічні показники. 7. Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Пугач А.М., професор		
2	Пугач А.М., професор		
3	Пугач А.М., професор		
4	Пугач А.М., професор		
5	Пугач А.М., професор		
6	Пугач А.М., професор		
нормоконтроль	Теслюк Г.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 18.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 18.04.2025 р.	Виконав
2	Теоретичний	до 20.06.2025 р.	Виконав
3	Експериментальний	до 12.09.2025 р.	Виконав
4	Охорона праці	до 07.11.2025 р.	Виконав
5	Економічний	до 14.11.2025 р.	Виконав
6	Демонстраційна частина	до 8.12.2025 р.	Виконав

Студент

_____ .
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ .
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Іжаковський В.В. Обґрунтуванням параметрів та дослідження конструкції плуга з пружно-демпфуючими елементами / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» - ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

У 1 розділі представлено огляд літературних джерел за темою досліджень.

У 2 розділі Обґрунтовано модель агрегату

У 3 розділі представлено програму та методику експериментальних досліджень.

У 4 розділі представлено результати досліджень.

У 5 розділі приведено аналіз стану охорони праці.

У 6 розділі приведено розрахунок техніко-економічних показників.

Машинописного тексту____, малюнків____, таблиць____, містить джерел використаної літератури_____ і має графічної частини____ листів

Іжаковський В.В. Огляд існуючих способів основного обробітку ґрунту / В.В. Іжаковський // The 4th International scientific and practical conference «Modern science: trends, challenges, solution» (13-15,2025), Liverpool, United Kingdom. 31-34 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ПІДХОДІВ ДО МЕХАНІЧНОЇ ДІЇ ВІБРАЦІЙНИХ ЗНАРЯДЬ ПІД ЧАС ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ	13
1.1. Застосування коливальних режимів для підвищення ефективності ґрунтообробних операцій.....	13
1.2. Ґрунтообробних машин методи моделювання.....	24
Висновки.....	28
2 МЕТОДИКА РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ «КОРПУС ПЛУГА НА ПРУЖНІЙ ПІДВІСЦІ».....	29
2.1. Динамічна система «корпус плуга – ґрунт».....	29
2.2. Методика проведення симуляційного моделювання плужного корпусу, закріпленого на пружній підвісці.....	31
2.3. Моделювання вхідного впливу системи.....	37
2.4. Обґрунтування критерію оптимізації.....	40
Висновки.....	41
3 КОМПЛЕКС ПРОГРАМНИХ І МЕТОДИЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИПРОБУВАННЯ КОРПУСА ПЛУГА.....	43
3.1. Порядок проведення експерименту та методичні положення щодо оцінювання роботи корпусу плуга при нормальних експлуатаційних умовах	43
3.2. Прилади і обладнання.....	45
3.3. Задачі і програма лабораторного дослідження.....	47
3.4. Методика визначення коефіцієнтів дисипації.....	48
3.5. Квізіпружних кефіцієнтів методика визначення.....	49
3.6. Методичні засади аналізу отриманих експериментальних результатів.....	49
Висновки.....	54

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ КОРПУСА ПЛУГА НА ПРУЖНІЙ ПІДВІСЦІ.....	55
4.1. Експерименту умови проведення.....	55
4.2. Аналіз результатів дослідження опору ґрунту.....	57
4.3. Аналіз нелінійності зв'язків.....	60
4.4. Результати експериментального визначення квазіпружних коєфіцієнтів рівняння руху.....	61
4.5. Результати експериментального визначення коєфіцієнтів дисипації..	63
4.6. Визначення раціональних параметрів.....	64
Висновки.....	72
5 ОСНОВНІ ВИМОГИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ ОРАНКИ.....	74
Висновки	79
6 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКОНОМІЧНА	80
Висновки.....	84
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
ДОДАТКИ.....	91

ВСТУП

Ефективність сучасних агротехнологій у вирощуванні сільськогосподарських культур значною мірою визначається раціональністю та науковим обґрунтуванням системи обробітку ґрунту. У структурі технологічних процесів саме основний обробіток ґрунту є ключовою операцією, що забезпечує створення сприятливого водно-повітряного, поживного та фітосанітарного режимів для наступних етапів вирощування рослин. Традиційно в Україні та інших країнах з розвиненим землеробством базовою машинно-технологічною ланкою цього процесу виступає плуг загального призначення, який протягом тривалого часу залишається найбільш універсальним та дієвим засобом глибокого механічного впливу на ґрунт.

Попри активне впровадження мінімального, поверхневого та безполицевого обробітку, класична оранка плугом з полицевими корпусами продовжує застосовуватися у більшості господарств, оскільки забезпечує повне підрізання й загортання рослинних решток, знищення бур'янів, руйнування ущільнених горизонтів, формування розпушеного орного шару та створення оптимальних умов для накопичення і збереження вологи. Особливо важливою роль оранки залишається в регіонах із важкими ґрунтами, високою забур'яненістю, значним ураженням шкідниками та хворобами, а також у сівозмінах, де накопичення рослинних решток може заважати рівномірному розподілу насіння.

Наукові дослідження останніх десятиліть підтверджують, що основний обробіток плугом є не лише механічною операцією, а комплексним біофізичним процесом, що впливає на ґрунтові мікробіологічні системи, динаміку гумусу та структуру орного шару. Під дією полицевого обернення формується контрастність агрофізичних властивостей різних шарів ґрунту, що сприяє активізації мікрофлори, мінералізації частини органічної речовини та переведенню елементів живлення у форму, доступну рослинам. Разом з тим, занадто інтенсивне й систематичне застосування оранки може призводити до

деградаційних явищ – ерозії, ущільнення підорного горизонту, зниження вмісту гумусу, що потребує оптимізації конструкції плугів, режимів їх роботи та інтеграції із сучасними технологіями точного землеробства.

Плуг загального призначення – це технічний засіб, що поєднує функції розпушення, перемішування та обертання ґрунтового шару. Він складається з рами, корпусів, передплужників, польових дошок, опорних коліс та додаткових елементів, що забезпечують стабільність роботи і регулювання глибини та якості оранки. Конструкційна еволюція плугів спрямована на зменшення тягового опору, підвищення інтенсивності кришення пласта та зменшення енергетичної витратності процесу. Значну увагу приділено вдосконаленню робочих органів: формі полиць, геометрії лемеша, схемі розміщення корпусів, параметрам передплужників, що визначають ступінь обертання й подрібнення ґрунту.

Сучасні дослідження дозволяють стверджувати, що геометрія полицевої поверхні є критичним чинником, що впливає на інтенсивність кришення, рівномірність загортання рослинних решток, формування мікрорельєфу поверхні поля та опір переміщення корпусу у ґрунті. Розробка нових типів полиць, таких як культурна, напівгвинтова, гвинтова та комбінована, орієнтована на забезпечення ефективної роботи на ґрунтах різної щільності, вологості та структурності. Відповідно, наукове обґрунтування вибору плуга загального призначення для певних ґрунтово-кліматичних умов полягає у визначенні оптимального співвідношення робочої ширини, глибини обробітку, кількості корпусів та їх конструктивних характеристик.

Система оранки впливає не лише на фізичний стан ґрунту, але й на продуктивність культур у коротко- та довгостроковій перспективі. Механічне знищення бур'янів, покращення інфільтрації опадів, посилення аерації та забезпечення просторової однорідності орного шару формують умови для рівномірного розвитку кореневої системи рослин і підвищують ефективність використання добрив. У цьому контексті дослідження взаємодії робочих органів плуга з ґрунтом набуває ключового значення, оскільки дозволяє

визначати режими роботи, які забезпечують найменшу енергозатратність і найвищу агротехнічну якість обробітку.

Не менш важливою є проблема енергетичних витрат при основному обробітку ґрунту плугом. У структурі витрат пально-мастильних матеріалів на технологічні процеси в рослинництві оранка займає значну частку, оскільки потребує високої тягової потужності та значних енерговитрат на подолання опору ґрунту. У зв'язку з цим у науковій літературі велика увага приділяється оптимізації процесу оранки шляхом зміни робочої швидкості, кута атаки корпусів, ступеня подрібнення рослинних решток, застосування комбінованих агрегатів та впровадження інтелектуальних систем контролю глибини й рівномірності обробітку. Використання сучасних датчиків, GPS-навігації та енергетичного моніторингу дозволяє адаптувати роботу плуга до просторової неоднорідності ґрунтових характеристик, що сприяє зменшенню тягового опору та підвищенню ефективності процесу.

Важливим напрямом удосконалення плугів загального призначення є застосування високоякісних зносостійких матеріалів і поверхневих зміцнювальних технологій для виготовлення лемешів, доліт та полиць. Збільшення ресурсу робочих органів без втрати якості їх роботи знижує експлуатаційні витрати й забезпечує стабільність агротехнічних показників протягом тривалого періоду. Водночас питання сумісності конструкції плуга зі сучасними енергетичними засобами, зокрема тракторами різних потужностей, також є актуальними, оскільки від правильного агрегування залежить баланс тягових навантажень і якість виконання технологічної операції.

З огляду на тенденції розвитку світового землеробства, спостерігається прагнення до зменшення інтенсивності обробітку ґрунту та переходу до ресурсозберігаючих технологій. Проте в умовах України, де ґрунти характеризуються значною щільністю, схильністю до утворення плужної підшви та необхідністю контролю забур'яненості, повна відмова від оранки є недоцільною. Тому актуальним є пошук компромісних рішень, які б

поєднували переваги класичного полицевого обробітку та адаптивних технологій, що забезпечують збереження ґрунту і зниження енерговитрат.

Загалом, основний обробіток ґрунту плугом загального призначення є складним багатофакторним процесом, що поєднує інженерні, агрохімічні та екологічні аспекти. Вивчення закономірностей взаємодії робочих органів плуга з ґрунтовим середовищем, оптимізація конструктивно-технологічних параметрів, удосконалення методів проектування та розрахунку тягового опору є важливими складовими підвищення ефективності та конкурентоспроможності сучасного землеробства.

Також актуальним є виклад методології вибору раціональних конструктивних та технологічних режимів роботи плуга з урахуванням сучасних вимог до енергозбереження, екологічної безпеки та стабільного рослинництва.

Мета роботи полягає у визначенні оптимальних параметрів пружної підвіски корпусу плуга, що дозволяють знизити енергоємність обробітку ґрунту без втрати якості технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних **завдань**:

- створити математичну модель динаміки взаємодії корпусу плуга на пружній підвісці з ґрунтом;
- провести імітаційне моделювання динамічної системи «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт», що дає змогу досліджувати поведінку системи на ПЕОМ із широким варіюванням конструктивних та технологічних параметрів;
- обґрунтувати оптимальну жорсткість пружного елемента підвіски, яка забезпечує раціональний режим роботи корпусу плуга, мінімізуючи тяговий опір у різних ґрунтових і технологічних умовах.

Об'єкт досліджень: процес взаємодії корпусу плуга з ґрунтом під час роботи агрегату, зокрема динаміка системи «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт».

Предмет досліджень: закономірності впливу параметрів пружної підвіски на енергоємність обробітку ґрунту та тяговий опір корпусу плуга, а також оптимальні значення жорсткості пружного елемента, що забезпечують раціональний режим роботи агрегату.

Методи досліджень. Теоретичне вивчення виконано з використанням методів теоретичної механіки, диференціювання та інтегрування, а також шляхом розв'язання диференціальних рівнянь. Лабораторні експерименти проводилися на основі експериментального планування, для чого були створені дві лабораторні установки: гравітаційний приймально-розподільний пристрій зерноочисної машини та шнековий приймально-розподільний пристрій.

1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ПІДХОДІВ ДО МЕХАНІЧНОЇ ДІЇ ВІБРАЦІЙНИХ ЗНАРЯДЬ ПІД ЧАС ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

1.1. Застосування коливальних режимів для підвищення ефективності ґрунтообробних операцій

Ефективність механічного обробітку ґрунту значною мірою визначається характером взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтовим середовищем. Класичні знаряддя – плуги, культиватори, дискові борони – здійснюють переважно статичну та квазістатичну дію, що потребує значних енергетичних витрат і не завжди забезпечує необхідний рівень кришення, особливо на ґрунтах із підвищеною щільністю та міцністю. Одним із напрямів підвищення якості та зменшення енергоємності обробітку є застосування вібраційних робочих органів, принцип роботи яких базується на примусових або самозбуджуваних коливаннях елементів, що контактують із ґрунтом.

Вібраційна дія здатна суттєво змінити механіку руйнування ґрунту. На відміну від статичного навантаження, яке формує зону напружень навколо робочого органу на основі повільного зсуву частинок, вібраційні коливання приводять до циклічного навантаження, зниження внутрішнього тертя та тимчасового розущільнення ґрунтової маси. У результаті ґрунт проявляє так званий ефект псевдозрідження, що сприяє його легшому розпушенню та зменшенню опору переміщенню робочого органу.

Дослідження у галузі механіки ґрунтів свідчать, що періодичні коливальні рухи викликають зміну структурних зв'язків між агрегатами ґрунту, послаблюють капілярні сили та дозволяють здійснювати обробіток із набагато меншими тяговими витратами. Застосування вібрації сприяє інтенсифікації процесу кришення, підвищує вирівнювальну здатність знаряддя та забезпечує більш рівномірне формування обробленого шару.

Важливою особливістю вібраційних знарядь є те, що ефект від їх застосування залежить від частоти та амплітуди коливань, форми траєкторії руху робочого органу, кутових параметрів атаки, а також від фізико-механічних властивостей ґрунту — вологості, щільності, гранулометричного складу та структурної стійкості. При оптимальному підборі параметрів робочі органи, що здійснюють вібраційні коливання, можуть виконувати такі технологічні операції, як дрібне та середнє розпушення, підрізання бур'янів, кришення поверхнево ущільнених горизонтів, передпосівний обробіток і локальне руйнування грудок у зоні рядків.

Одним із ключових напрямів застосування вібрації в сільськогосподарському машинобудуванні є зменшення тягового опору ґрунтообробних агрегатів. При роботі класичних культиваторних лап чи плоскорізів частина енергії витрачається на подолання сил зчеплення ґрунтових частинок. У випадку ж вібраційного впливу вдається тимчасово зменшити ці сили, що на практиці приводить до зниження тягових навантажень на 15–35 %, залежно від типу ґрунту та параметрів машин.

Теоретично доведено, що при прикладанні до робочого органу вертикальних або горизонтальних гармонічних коливань у ґрунтовій товщі виникає хвиля розущільнення, що зменшує статичний опір переміщенню. Чим більш структурований і важкий ґрунт, тим відчутнішим є ефект застосування вібрації. У легких піщаних ґрунтах ефект виражений слабше, проте забезпечує покращення кришення та вирівнювання поверхні поля.

Суттєвий інтерес становлять вібраційні лапи культиваторів, які застосовують як для поверхневого, так і для передпосівного обробітку ґрунту. Конструктивно такі лапи складаються з еластичного або пружинного елемента, що забезпечує необхідну частоту коливань під дією збудника або через самозбудження під час руху агрегату. Дослідження показують, що вібраційні лапи здатні підвищувати ступінь подрібнення грудок на 20–40 % порівняно зі звичайними жорсткими лапами.

Важливим є також застосування вібраційних підкопувальних та підрізальних робочих органів, які дозволяють ефективно руйнувати ущільнені горизонти та підорні шари без значного обертання пласта. Це забезпечує переваги для зон, схильних до ерозії, оскільки структура ґрунтового профілю порушується меншою мірою, ніж при традиційній оранці.

Процеси взаємодії робочого органу вібраційної дії з ґрунтом є складними та нелінійними. Для їхнього дослідження використовують аналітичні та експериментальні методи, включаючи частотний аналіз, методи кінцевих елементів, лабораторне моделювання з використанням макетів і динамічних стендів, а також польові випробування. При аналітичному моделюванні ґрунт розглядають як пружно-пластичне середовище з параметрами, що змінюються у часі під впливом коливань. У більшості моделей застосовують рівняння динаміки робочого органу з урахуванням маси, жорсткості, демпфуючих елементів і зовнішніх зусиль, що виникають у зоні контакту з ґрунтом.

Експериментальні дослідження підтверджують, що при частотах коливань від 10 до 40 Гц спостерігається оптимальне поєднання інтенсивності розущільнення та енергетичної ефективності. Надмірно високі частоти можуть викликати передчасне зношення елементів машин та надлишкову витрату енергії, а низькі частоти — не забезпечують достатньої інтенсивності процесу розпушення. Амплітуда коливань, залежно від призначення знаряддя, може становити 5–25 мм, що дозволяє змінювати характер взаємодії з ґрунтом у широкому діапазоні.

Особливу увагу привертає питання енергетичних витрат при використанні вібраційних знарядь. Незважаючи на додаткову витрату енергії на створення коливань, загальна потреба у тязі часто зменшується, що в підсумку забезпечує економічність. Крім того, застосування вібраційних знарядь дає змогу виконувати обробіток на підвищених швидкостях і покращувати продуктивність агрегату.

З агрономічної точки зору, обробіток ґрунту вібраційними знаряддями сприяє формуванню дрібногрудкуватої структури, вирівнюванню поверхні, зменшенню забур'яненості та покращенню умов для проростання насіння. Розуцільнення у зоні рядка полегшує розвиток кореневої системи, сприяє аерації ґрунту та забезпечує кращу інфільтрацію вологи.

Таким чином, аналіз численних досліджень свідчить, що застосування знарядь вібраційної дії є перспективним напрямом удосконалення технологій механічного обробітку ґрунту. Вібраційний вплив дозволяє оптимізувати енергетичні витрати, підвищити якість кришення, зменшити ущільнення ґрунтового профілю і створити сприятливі умови для росту сільськогосподарських культур. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із удосконаленням конструкцій знарядь, точним вибором частотно-амплітудних характеристик коливань та впровадженням систем моніторингу й адаптивного керування в реальних польових умовах.

Подальше вивчення специфіки взаємодії вібраційних робочих органів із ґрунтом показує, що характер руйнування ґрунтового середовища залежить не лише від параметрів коливань, але й від конструктивних особливостей знаряддя. Зокрема, форма леза або лапи, геометрична конфігурація стояка, наявність пружинного елемента, спосіб кріплення та тип збудника коливань визначають інтенсивність дії на ґрунт та розподіл сил у зоні контакту.

Вібраційні знаряддя можуть бути класифіковані за видом коливального руху:

- лінійні коливання (горизонтальні або вертикальні),
- коливання крутного типу,
- просторові коливання складної форми.

Кожен із типів впливає на ґрунт по-різному. Вертикальні коливання сприяють глибшому проникненню робочого органу у шар ґрунту за рахунок ударних імпульсів, тоді як горизонтальні — підсилюють процес зрізання та зрушення частинок, знижуючи зусилля тяги. Комбіновані коливання

забезпечують одночасне розпушення та кришення, що особливо ефективно в умовах підвищеної міцності ґрунту.

Однією з характерних властивостей роботи вібраційних знарядь є виникнення самозбуджуваних коливань, коли робочий орган під дією реактивних сил ґрунту самостійно переходить у режим періодичних переміщень без зовнішнього приводу. Такий ефект особливо притаманний лапам культиваторів із пружинними стояками. Самозбудження дозволяє зменшити енерговитрати на привід коливань, але водночас ускладнює керування параметрами обробітку та потребує врахування в конструктивних розрахунках.

Важливим фактором є вплив швидкості руху агрегату на ефективність вібраційної дії. При збільшенні швидкості транспортний рух починає взаємодіяти з власними коливаннями робочого органу, утворюючи складний динамічний процес. Дослідження показують, що при швидкостях 8–12 км/год інтенсивність коливань зростає, а якість розпушення та кришення покращується. Однак надмірне підвищення швидкості може викликати нерівномірність обробітку та збільшення зносу.

Також слід враховувати структурний стан ґрунту перед обробітком. Вологий або липкий ґрунт демонструє іншу реакцію на коливання порівняно з сухим або злежаним. При підвищеній вологості вібраційна дія частково нівелюється за рахунок збільшення пластичності ґрунтових агрегатів. У сухих ґрунтах вібрація, навпаки, забезпечує високу інтенсивність руйнування грудок, проте виникає ризик надмірного подрібнення, що негативно впливає на стійкість структури.

Значний інтерес має аналіз взаємодії вібраційних органів із рослинними рештками, особливо за умов мінімального обробітку ґрунту. Звичайні лапи часто забиваються рослинними рештками, що знижує продуктивність агрегату. Вібраційні коливання зменшують площу контакту робочого органу з рештками, викликаючи їх самостійне зміщення та прослизання. Це дозволяє

підвищити пропускну здатність агрегату і забезпечити стабільну роботу в умовах значного рослинного покриву.

Важливо відзначити, що робота знарядь вібраційної дії має не лише механічний, але й агротехнічний ефект. Вібрація сприяє руйнуванню ґрунтових корок, покращує аерацію, зменшує поверхневе ущільнення та полегшує доступ вологи до кореневого шару. Це особливо актуально в регіонах із недостатнім зволоженням, де створення сприятливої структури посівного шару є визначальним фактором урожайності.

Знаряддя з вібраційною дією мають і певні обмеження. Одним із них є підвищений рівень динамічних навантажень на раму агрегату, з'єднувальні вузли та тяговий засіб. При неправильному виборі частоти коливань виникають резонансні явища, що можуть призвести до передчасного зношення елементів конструкції. Тому важливо проводити детальний динамічний аналіз при проектуванні машин та визначати безпечні і ефективні режими їх роботи.

Удосконалення конструкцій сучасних ґрунтообробних агрегатів із вібраційними робочими органами пов'язане з впровадженням електромеханічних та гідравлічних приводів коливань, які забезпечують точне регулювання параметрів. Сучасні технології дозволяють автоматично змінювати частоту та амплітуду залежно від стану ґрунту, що підвищує адаптивність машин та зменшує витрати енергії.

Крім того, усе більшого поширення набувають цифрові моделі ґрунтообробних процесів, включаючи методи комп'ютерного моделювання, CFD-аналіз та 3D-візуалізацію процесів руйнування ґрунту. Такі моделі дозволяють прогнозувати ефективність роботи знарядь, оптимізувати конструктивні параметри, зменшувати витрати на натурні випробування та скорочувати терміни створення нових машин.

У контексті інновацій важливо зазначити застосування вібраційно-імпульсних робочих органів, у яких поєднуються гармонічні та ударні режими впливу на ґрунт. Імпульсні дії дозволяють досягати значної інтенсивності

руйнування щільних шарів без збільшення тягового опору. Перспективним є також напрям локальної вібрації – коли коливання передаються лише на певну частину робочого органу, наприклад, на ніж або лезо. Це дозволяє зменшити механічні навантаження на раму і водночас підвищити ефективність обробітку.

Таким чином, аналіз процесів взаємодії вібраційних робочих органів із ґрунтом свідчить про широкі можливості застосування вібраційної дії для підвищення якості та ефективності механічного обробітку. Вібраційні знаряддя дозволяють інтенсифікувати процеси кришення і розпушення, зменшувати тяговий опір, покращувати агрофізичні властивості ґрунту та знижувати енергетичні витрати машинно-тракторних агрегатів.

Подальший розвиток технологій обробітку ґрунту з використанням вібраційної дії є перспективним напрямом, який потребує комплексних досліджень. Особливо актуальними є питання оптимізації динамічних параметрів, підвищення надійності робочих органів, впровадження інтелектуальних систем керування та створення універсальних агрегатів, здатних працювати в різних ґрунтово-кліматичних умовах. Отримані результати мають важливе значення для аграрного виробництва та спрямовані на підвищення продуктивності та сталості землеробських технологій.

Вібраційні технології займають одне з провідних місць серед сучасних методів механічного впливу на ґрунт, забезпечуючи зниження енерговитрат та підвищення якісних показників обробітку. У структурі машинобудування для сільського господарства застосування вібрацій ґрунтується на здатності коливальних рухів зменшувати опір середовища, руйнувати агломерати ґрунтових часток і забезпечувати більш рівномірне кришення та переміщення ґрунтової маси. Використання вібрації відкриває можливість створення ефективніших робочих органів, здатних інтенсифікувати технологічний процес за рахунок раціонального поєднання статичних і динамічних навантажень.

Фізична сутність вібраційного впливу на ґрунт

Ґрунт є дисперсним середовищем, механічні властивості якого змінюються під дією зовнішніх сил. Вібраційне збудження спричиняє появу періодичних деформацій у ґрунтовій масі, що призводить до руйнування міжчасткових зв'язків та зменшення внутрішнього тертя. Як наслідок, робочі органи легше проникають у ґрунт і переміщують його з меншим тяговим опором.

У період вібраційної дії ґрунт переходить у так званий стан структурного розушільнення, що є аналогом короткочасного зниження міцності ґрунтових структур. Це явище широко використовується у гірничій промисловості, але останніми роками активно адаптується і до агротехнічних процесів.

Однією з ключових особливостей такого впливу є залежність ефективності від параметрів коливань:

- частота визначає швидкість повторення циклів навантаження;
- амплітуда впливає на величину миттєвих переміщень;
- форма коливань (гармонічні, імпульсні, стохастичні) визначає характер передачі енергії ґрунту.

Агрофізичні властивості ґрунту – вологість, щільність, структурність – суттєво змінюють реакцію масиву на вібрацію, що потребує попереднього моделювання та експериментального визначення ефективних параметрів.

Переваги застосування вібраційних знарядь

Використання вібрацій як додаткового фактора механічної дії дає змогу суттєво інтенсифікувати процес обробітку ґрунту. До основних переваг належать:

Зниження тягового опору робочого органу. При вібраційному збудженні сила опору може зменшуватися на 20–40 %, а іноді й більше, залежно від ваги та характеристик робочого органу.

Підвищення якості крихлення ґрунту. Динамічні навантаження руйнують грудочки ґрунту ефективніше, ніж статичні, забезпечуючи одноріднішу структуру орного шару.

Зменшення ґрунтозлипання. Вібраційний рух запобігає налипанню ґрунту на поверхню робочих органів, що особливо важливо при роботі на вологих ділянках.

Підвищення продуктивності. Оскільки опір зменшується, зростає робоча швидкість агрегатів або ж знижується потреба в потужності тягового засобу.

Розширення можливостей роботи в складних ґрунтових умовах. Вібраційні знаряддя здатні працювати на перезволожених, ущільнених і важких ґрунтах, де традиційні плуги та культиватори демонструють низьку ефективність.

Види та конструктивні схеми вібраційних робочих органів

Вібраційний вплив може реалізовуватися різними шляхами, серед яких:

1. Робочі органи з вимушеними коливаннями

У таких знаряддях встановлюють механічні, електромеханічні або гідравлічні вібратори, які генерують коливання у заданому діапазоні частот. Часто використовують ексцентрикові механізми, балансирні вібратори чи системи з пружними елементами.

2. Робочі органи з автоколиваннями

Колівання виникають за рахунок зміни сили опору ґрунту під час руху агрегату. Конструкції цього типу простіші, проте мають складніший характер коливань, що потребує точного розрахунку резонансних умов.

3. Комбіновані системи

Поєднання коливальних і статичних навантажень дозволяє оптимізувати роботу знаряддя в умовах зміни властивостей ґрунту. Такі системи застосовують у глибокорозпушувачах, ротаційних плугах і комбінованих культиваторах.

Вплив параметрів вібрації на енергетичні та якісні показники

Дослідження багатьох авторів засвідчили, що інтенсивність крихлення ґрунту має чітку залежність від частоти та амплітуди коливань. Зі збільшенням частоти відбувається зростання кількості деформацій за одиницю часу, що

прискорює руйнування структур ґрунту. Однак надмірні частоти призводять до зниження ефективності через недостатню амплітуду переміщень.

Оптимальні параметри коливань залежать від:

- механічного складу ґрунту;
- його вологості;
- глибини обробітку;
- маси робочого органу;
- швидкості руху агрегату.

У важких суглинках ефективні коливання з більшими амплітудами, тоді як у легких ґрунтах достатньо малих амплітуд і високих частот.

Енергетична доцільність застосування вібраційних знарядь

Попри додаткові витрати енергії на генерування вібрацій, загальні енергетичні витрати агрегату часто скорочуються. Це пояснюється зменшенням тягового опору та підвищенням продуктивності. Балансові розрахунки показують, що сумарний енергетичний ефект може досягати 10–25 %, а в окремих операціях – навіть більше.

Крім того, зменшення навантаження на тягові механізми сприяє підвищенню довговічності техніки та зниженню експлуатаційних витрат.

Проблеми та напрями подальших досліджень

Попри значні переваги, застосування вібраційних знарядь супроводжується низкою технічних та експлуатаційних проблем:

- складність конструкцій, що потребує надійних матеріалів і систем амортизації;
- підвищений рівень шуму та вібраційного впливу на оператора;
- необхідність оптимізації параметрів під конкретні ґрунтові умови;
- ризик появи резонансних явищ, що можуть призвести до пошкоджень.

Перспективними напрямками досліджень є:

- удосконалення систем керування коливаннями;
- створення адаптивних електромеханічних вібраторів;

- дослідження взаємодії робочих органів з ґрунтом на основі цифрових моделей;

- впровадження енергоощадних та малошумних конструкцій.

В роботі С.П. Сокола проведено дослідження конструктивних і кінематичних параметрів робочого органу для викопування коренеплодів.

На початковому етапі, коли відпрацьовувались конструктивні параметри корпусу в пасивному режимі, копач віброприводом не оснащувався. Після визначення раціональних параметрів корпусу був виготовлений зразок з віброприводом. На відміну від натурального зразка привод був механічної дії, тобто ексцентриковому валу надавався рух від електродвигуна пасовою передачею з можливістю зміни передаточного числа, що дозволяло змінювати частоти коливань. Зміна амплітуди виконувалася шляхом заміни вала. Всього виготовлено 3 вали з ексцентриситетами 2,0–4–6 мм, що відповідало амплітуді коливань 2–4–6 мм.

Принцип дії робочого органу побудований на тому, що у міжстояковому просторі корпусу копача підкидається масив ґрунту по нормалі до поверхні лемеша. Під час польоту сам леміш, здійснюючи одне коливання, просувається вперед і знову підштовхує ґрунт. Якщо нехтувати переміщенням під час поштовху, то можна дійти гіпотези про відсутність сил тертя на поверхні клина, що відповідає мінімальному значенню тягового опору. Дослідження полягали в тому, що робочий орган протягувався в модельному середовищі для визначення мінімального тягового опору. Експеримент виконано відповідно до аналітично обґрунтованих значень амплітуди коливань 2–4–6 мм та частоти в межах 16–20–24 Гц.

Польові дослідження проводили за результатами аналітичних та лабораторних досліджень, для яких була розроблена конструкція експериментальної установки. Особливість конструкції полягає в тому, що частота коливань залежить від тиску оливи в системі і твердості ґрунту. При проведенні досліджень виникала необхідність встановлювати необхідну частоту коливань зміною тиску оливи

1.2. Грунтообробних машин методи моделювання

Моделювання грунтообробних машин є однією з ключових складових сучасного машинобудування та агроінженерії, оскільки дозволяє досліджувати процеси взаємодії робочих органів із ґрунтом, оптимізувати конструктивні параметри, прогнозувати експлуатаційні характеристики і підвищувати ефективність технологічних операцій. Завдяки методам моделювання можливо значно зменшити обсяг дорогих та тривалих польових випробувань, отримавши точні та узагальнені результати на основі розрахункових і лабораторних досліджень. У сучасних умовах моделювання є міждисциплінарним процесом, який включає використання апарату теоретичної механіки, ґрунтознавства, комп'ютерного моделювання, математичної статистики та експериментальної механіки.

1. Теоретичні методи моделювання

Теоретичні моделі грунтообробних машин будуються на основі фундаментальних закономірностей механіки ґрунтів та взаємодії твердих тіл із дисперсними середовищами. Теоретичне моделювання передбачає використання рівнянь рівноваги, кінематики, гідродинаміки гранульованих матеріалів та теорії пластичності.

Аналітичні моделі взаємодії робочих органів з ґрунтом

Одним із базових підходів є створення аналітичних залежностей між зусиллями, що виникають на робочому органі, та параметрами ґрунту.

Основними елементами таких моделей є:

- теорії Кулона-Мора про зсув ґрунту;
- теорії пластичного середовища Прандтля;
- моделі пружнопластичної деформації ґрунту;
- розрахунки сил опору з урахуванням форми, кута атаки та швидкості руху робочих органів.

Аналітичні моделі дозволяють визначити тяговий опір, енергетичні витрати, глибину проникнення та інші показники, проте потребують спрощень щодо властивостей ґрунту, який часто розглядається як однорідне середовище.

Розрахунок параметрів руху робочих органів

Теоретичні моделі також використовують при розрахунку кінематичних параметрів, включаючи:

- траєкторію руху ножів, лап і лемешів;
- швидкість та прискорення робочих елементів;
- оптимальний кут різання та кривизну поверхні робочого органу;
- динаміку сил при коливальних чи комбінованих навантаженнях.

Результати цих розрахунків потрібні для створення геометрично раціональних форм робочих органів, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати.

2. Математичне моделювання

Математичні моделі дозволяють описувати складні процеси взаємодії машини з ґрунтовим середовищем у вигляді рівнянь або алгоритмів, які можуть бути реалізовані на комп'ютері.

Побудова математичних моделей на основі експериментальних даних

Цей метод полягає у використанні статистичних моделей, зокрема:

- регресійного аналізу,
- кореляційних залежностей,
- методів планування експерименту,
- ідентифікаційних моделей.

На основі експериментальних даних створюються функції, що пов'язують вхідні параметри (вологість, щільність ґрунту, швидкість руху, глибину обробітку) з вихідними показниками (тяговий опір, ступінь крихлення, енергетичні витрати).

Імітаційне моделювання відтворює технологічний процес шляхом аналізу багатьох взаємопов'язаних факторів. Найчастіше використовують:

- стохастичні моделі, що враховують випадковість структури ґрунту;

- дискретно-елементні моделі (DEM), які описують ґрунт як сукупність окремих частинок;
- кінематичні моделі, що відтворюють рух ґрунту під дією робочого органу.

Методи DEM стали особливо поширеними, оскільки вони дозволяють враховувати форму, тертя, пружність і зв'язки між частками ґрунту.

3. Комп'ютерне моделювання

Комп'ютерне моделювання є найбільш сучасним і точним методом дослідження взаємодії ґрунтообробних машин з ґрунтовим середовищем.

Моделювання методом кінцевих елементів (FEM)

FEM використовується для аналізу напружено-деформованого стану як робочих органів, так і ґрунту. Моделі будуються з урахуванням:

- нелінійних характеристик ґрунту;
- впливу вібрації та динамічних навантажень;
- розподілу контактних сил;
- можливого зносу поверхонь.

Програмні комплекси, такі як ANSYS, Abaqus, SolidWorks Simulation, дозволяють моделювати широкий спектр технологічних процесів.

Динамічне моделювання системи «агрегат–ґрунт»

Для розрахунків динаміки використовуються:

- многомасові моделі;
- моделі пружних і демпфувальних характеристик;
- системи рівнянь руху з урахуванням збурень;
- моделі вібраційних впливів.

Такі моделі дозволяють визначати оптимальні параметри вібрації, оцінювати навантаження на елементи конструкції та прогнозувати поведінку агрегату в різних ґрунтових умовах.

CFD-моделі для аналізу переміщення ґрунтових потоків

Метод обчислювальної гідродинаміки (CFD) використовується для аналізу руху ґрунту як в'язкопластичного середовища. Він дозволяє:

- моделювати переміщення ґрунтової маси у реальному масштабі часу;
- оцінювати вплив форми робочого органу на потік частинок;
- визначати області підвищеного опору.

4. Експериментальні методи моделювання

Експериментальні методи залишаються необхідними для перевірки та уточнення теоретичних і математичних моделей.

У лабораторних умовах використовують:

- ґрунтові канали;
- тривимірні стенди для дослідження сил опору;
- вібраційні установки;
- вимірювальні комплекси для аналізу переміщень і деформацій.

Такі дослідження використовуються для визначення параметрів взаємодії робочих органів із ґрунтом, включаючи кут різання, швидкість руйнування грудок, зносостійкість.

Моделювання на фізичних аналогах

Фізичне моделювання ґрунту може виконуватися з використанням:

- штучних ґрунтових сумішей;
- гранульованих матеріалів;
- легких моделей робочих органів із масштабуванням параметрів.

Ці методи дозволяють досліджувати процеси, які важко виміряти в реальних умовах.

Польові експерименти

Польові випробування є заключним етапом моделювання, забезпечуючи:

- підтвердження точності моделей;
- оцінку продуктивності;
- визначення енергетичних витрат;
- аналіз впливу різних факторів середовища.

5. Комбіновані методи моделювання

Останнім часом найбільш ефективними є комбіновані дослідження, що включають:

- поєднання DEM і FEM;
- комплексне моделювання у CAD/CAE-системах;
- використання цифрових двійників ґрунтообробних машин;
- застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації параметрів.

Такі методи дозволяють скорочувати час проектування і підвищувати точність прогнозів.

Висновки

Моделювання ґрунтообробних машин є невід'ємним етапом їх проектування і вдосконалення. Використання теоретичних, математичних, комп'ютерних та експериментальних методів забезпечує комплексний підхід до вивчення процесу взаємодії робочих органів з ґрунтом. Сучасні моделі дозволяють визначати оптимальні режими роботи, прогнозувати продуктивність та енергетичну ефективність, скорочувати обсяги випробувань та прискорювати створення нових видів ґрунтообробної техніки. Перспективним напрямом є інтеграція цифрових технологій, штучного інтелекту та дискретно-елементного моделювання для створення точних цифрових прототипів машин.

2 МЕТОДИКА РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ «КОРПУС ПЛУГА НА ПРУЖНІЙ ПІДВІСЦІ»

2.1. Динамічна система «корпус плуга – ґрунт»

$$Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_n(t)$$

$$z(t) = \psi[x, y(t), z(0)] \quad (2.1)$$

$$F[x, y(t), \ddot{z}(t), \dot{z}(0), z(0)] = 0 \quad (2.2)$$

$$W = \Phi[x, \dot{z}] \rightarrow \text{extr} \quad (2.3)$$

$$f(x, z) \leq 0 \quad (2.4)$$

Представимо математичну модель коливальної системи як динамічну систему характеристик з вхідною функцією – опором ґрунту і вихідною функцією – тяговим опором корпусу плуга. Розглянемо в загальному вигляді механічну систему «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт» обмежену зв'язками (рис. 2.1).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.5)$$

$$Q_i = Q_i^n + Q_i^\phi + Q_i^* \quad (2.6)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=l}^k \sum_{s=l}^k A_{is} \cdot \dot{q}_i \cdot \dot{q}_s \quad (2.7)$$

$$\sum \delta A_i = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \dots + Q_s \cdot \delta q_s \quad (2.8)$$

$$n(\tau) = \sqrt{D_{yx}^2(\tau) - K_{yx}^2(\tau)} \quad (2.9)$$

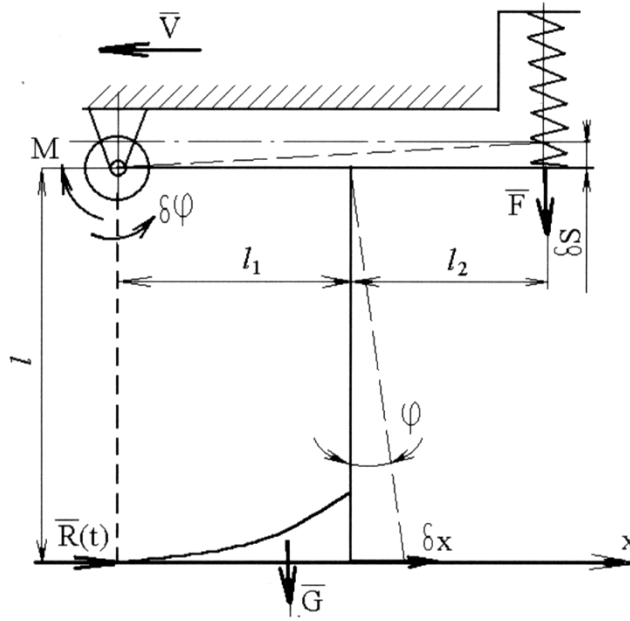


Рисунок 2.1. Схема конструкції

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q \quad (2.10)$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}^2 \quad (2.11)$$

$$\sum \delta A_i = \delta A(\bar{R}) + \delta A(\bar{F}) + \delta A(M) \quad (2.12)$$

$$\sum \delta A_i = R(t) \cdot \delta x - F \cdot \delta S - M \cdot \delta \phi \quad (2.13)$$

де

$$F = c(\lambda_{CT} + S) = c \left[\lambda_{CT} + \frac{l_1 + l_2}{l} x \right]$$

$$Q = R(t) - c \cdot \lambda_{CT} \cdot L - c \cdot L^2 \cdot x - \frac{M}{l} \quad (2.14)$$

$$Q = R(t) - c \cdot L^2 \cdot x - \frac{M}{l} \quad (2.15)$$

$$m\ddot{x} = R(t) - c \cdot L^2 \cdot x - \frac{M}{l} \quad (2.16)$$

$$M = \frac{\mu}{l} \dot{x} \quad (2.17)$$

$$\ddot{x} + f(\dot{x}) + k^2 x = 0 \quad (2.18)$$

$$\ddot{x} + 2 \cdot b \cdot \dot{x} + f(x) = F(t) \quad (2.19)$$

$$\ddot{x} + 2b \cdot \dot{x} + \psi(t)x = 0 \quad (2.20)$$

2.2. Методика проведення симуляційного моделювання плужного корпусу, закріпленого на пружній підвісці

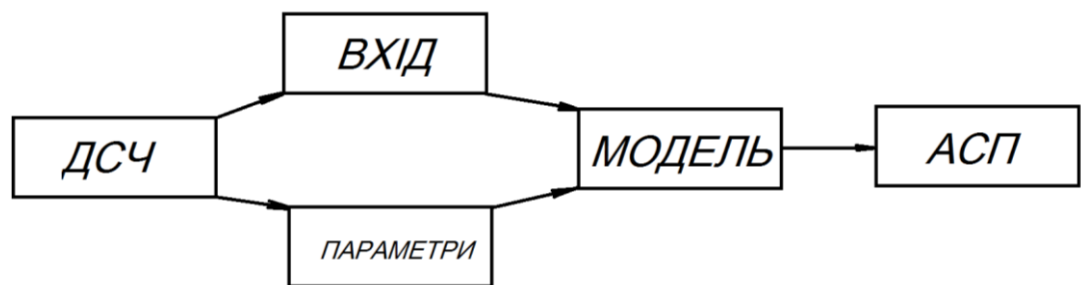


Рисунок 2.2 - Імітаційного моделювання методу

Імітаційне моделювання корпусів плуга, встановлених на пружній підвісці, є одним із ключових напрямів сучасного інженерного аналізу

грунтообробних машин. Застосування цього підходу дозволяє дослідити поведінку робочих органів у різних ґрунтових умовах, визначити динамічні навантаження, оптимізувати параметри підвіски та забезпечити підвищення надійності агрегату загалом. Методика охоплює комплекс теоретичних, математичних і розрахункових процедур, що відображають роботу плуга у режимах, максимально наближених до реальних виробничих умов.

У цьому розділі наведено методику імітаційного моделювання корпусу плуга на пружній підвісці, що включає формування фізичної моделі, вибір математичного апарату, розробку імітаційної схеми, комп'ютерну реалізацію та аналіз параметрів моделі.

1. Загальні принципи імітаційного моделювання плужних корпусів

Імітаційне моделювання є процесом відтворення роботи плуга за допомогою числових алгоритмів, які дозволяють оцінити вплив різних чинників без проведення значної кількості польових випробувань. У разі моделювання корпусів плуга на пружній підвісці особливу увагу приділяють:

- динамічній взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем;
- деформаціям і зміщенням корпусу;
- характеристикам пружної підвіски;
- впливу нерівномірності ґрунту на навантаження;
- аналізу силових факторів, що діють на раму, тяговий пристрій та окремі елементи агрегату.

Динамічний характер роботи плуга зумовлює необхідність моделювання у часі, оскільки під час руху агрегат зазнає постійних змін навантажень, вібрацій і коливань, що не можуть бути враховані статичними методами.

2. Фізична модель корпусу плуга на пружній підвісці

Фізична модель є основою імітаційного моделювання та включає опис конструкції, взаємодії з середовищем і характеристик підвіски.

Основні елементи конструкції

Фізична модель складається з таких основних елементів:

- Корпус плуга - різальний, підрізний і відвальний елементи;

- Стійка корпусу, яка передає навантаження на раму;
- Пружна підвіска - еластичний елемент (пружина або пакет пружних елементів), амортизатор, шарніри;
- Рама плуга, яка забезпечує зв'язок із тяговим засобом;
- Ґрунтове середовище, яке діє на робочі поверхні корпусу.

Корпус на пружній підвісці здатний переміщуватися у вертикальному та частково горизонтальному напрямках, змінюючи положення відносно рами та завдяки цьому знижуючи ударні навантаження.

Ґрунтове середовище

Ґрунт моделюється як дискретно-елементне або як в'язкопластичне середовище, залежно від типу моделі. У загальному випадку для імітаційних моделей беруть до уваги:

- щільність ґрунту;
- середню твердість та опір різанню;
- коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя;
- вологість;
- неоднорідність структури та наявність включень (каміння, тверді шари).

3. Математичний опис системи

Математична модель імітаційного процесу повинна описувати динаміку руху корпусу відносно рами, реакції пружної підвіски та дію ґрунту.

Корпус плуга на підвісці описується як маса, закріплена на пружному та демпфувальному елементах. Рівняння руху формулюються у вигляді:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_{\text{гр}}(t)$$

де:

m - приведена маса корпусу;

c - коефіцієнт демпфування;

k - жорсткість підвіски;

y - переміщення корпусу відносно рами;

$F_{гр}(t)$ - ґрунтовий опір, що залежить від часу.

Ґрунтовий опір змінюється залежно від глибини, вологості та структури ґрунту. Він може бути представлений як:

$$F_{гр}(t) = F_0 + \Delta F(\omega t)$$

$$F_{гр}(t) = F_0 + \Delta F(\omega t)$$

де F_0 - середнє значення,

ΔF - флуктуаційна складова, що описує нерівномірність ґрунту.

Часто використовують:

- стохастичні моделі нерівностей;
- гармонійні сигнали для моделювання періодичних коливань;
- дискретно-елементні моделі (DEM), що генерують контактні сили.

Модель пружної підвіски

Підвіска описується залежністю:

$$F_{пруж} = ky$$

Також враховують:

- лінійні та нелінійні характеристики пружин;
- обмежувачі ходу;
- пружні деформації стійки та рами.

4. Етапи імітаційного моделювання

Геометрію корпусу та стійки створюють у CAD-системах: SolidWorks; Autodesk Inventor; Siemens NX

Важливо забезпечити:

- реалістичність форм лемеша і полиці;
- можливість змінювати кут атаки;
- правильне представлення шарнірів і підвіски.

До моделі вводять:

- масу та положення центру ваги корпусу;
- жорсткість пружних елементів;
- межі переміщення;
- точки прикладення сил ґрунту.

Вхідні параметри моделювання включають:

- швидкість руху плуга;
- глибину обробітку;
- тип ґрунту;
- профіль поля;
- статистичні характеристики сили опору.

Імітаційна схема включає: блок динаміки корпусу; блок роботи пружної підвіски; модуль генерації ґрунтового опору; модуль інтеграції рівнянь руху; блок вихідних оцінок.

Схема реалізується у MATLAB/Simulink, Scilab Xcos або Python.

Для розв'язання рівнянь руху використовують:

- метод Рунге–Кутта 4-го порядку;
- метод Ньюмарка;
- центрально-різницеву схему.

Тривалість моделювання зазвичай становить 5–20 секунд реального часу роботи плуга.

5. Реалізація комп'ютерного моделювання

Для комп'ютерного моделювання використовують:

- MATLAB/Simulink - для побудови моделей із блоками динаміки;
- Abaqus або ANSYS - для аналізу напружень;
- EDEM - для моделювання ґрунту методом DEM;
- SolidWorks Motion - для визначення траєкторій і сил у шарнірах.

Інтегрований підхід:

CAD-модель → FEM-модель → DEM-модель ґрунту → динамічний розрахунок у Simulink.

6. Аналіз результатів моделювання

Результати імітаційного дослідження дозволяють отримати:

На графіку показують: максимальні просідання; відскок; стабілізацію у часі.

Силові навантаження. Розраховують: пікові сили опору; сили, передані на раму; роботу амортизатора.

Енергетичні характеристики. Оцінюють: роботу деформації пружин; втрати через демпфування; вплив параметрів підвіски на тяговий опір.

Оптимізація параметрів. На основі моделювання визначають: оптимальну жорсткість пружини; необхідний рівень демпфування; допустимі переміщення корпусу; вплив швидкості руху на динаміку системи.

Методика імітаційного моделювання включає такі ключові етапи:

1. Формування фізичної моделі системи «корпус – підвіска – ґрунт».
2. Побудова математичного апарату з описом динаміки руху.
3. Розроблення комп'ютерної моделі у середовищі імітаційного моделювання.
4. Проведення чисельних експериментів.
5. Аналіз отриманих результатів і формування рекомендацій.

$$P(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n R_0}} \exp \left\{ - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij}(t_i, t_j) * [x_i - m_x(t_i)] * - [x_j - m_x(t_j)] \right\} \quad (2.21)$$

$$m_x(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \quad (2.22)$$

$$K_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{x}(t) \dot{x}(t + \tau) dt \quad (2.23)$$

$$K_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{x}(t) \dot{y}(t + \tau) dt \quad (2.24)$$

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (2.25)$$

Взаємна спектральна щільність $S_{xy}(\omega)$ визначається як пряме перетворення Фур'є взаємної кореляційної функції:

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2.26)$$

2.3. Моделювання вхідного впливу системи

:

$$K_y(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \quad (2.27)$$

$$K_y(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \beta\tau \quad (2.28)$$

$$K_y(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta\tau \right) \quad (2.29)$$

$$K_y(\tau) = D \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \beta_i\tau \quad (2.30)$$

В роботі А.Ф. Крюкова доведено, що опір ґрунту достатньо добре описується кореляційною функцією, якій відповідає спектральна щільність:

$$S_y(\omega) = \frac{2D\alpha}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2\omega^2} \quad (2.31)$$

При виборі для апроксимації виразу виду (2.28) значення коефіцієнтів α і β можуть бути підібрані наступними формулами:

$$\alpha = \frac{2\nu_0}{T_0} \quad (2.32)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.33)$$

де $T_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ - середній період функцій $R(\tau)$

Вісь τ розбивається на n ділянок T_i між максимумами кривої $R(\tau)$ і вираховується затухання:

$$v_i = \ln \left| \frac{R(\tau_i)}{R(\tau_i + 1)} \right| \quad (2.34)$$

$$v_0 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} v_i \quad (2.35)$$

Діючі на систему випадкові збурення можуть виявитись не білим шумом. При апроксимації спектральних щільностей вхідних впливів дробно-раціональними функціями частоти, збурюючу дію $\eta(t)$ можна трактувати, як результат проходження процесу білого шуму через деяку лінійну систему з постійними параметрами, яка називається формуючим фільтром впливу.

Через $y(t)$ позначено вектор змінних складових стану фільтрів, компонентами якого є випадкові збурення та їх похідні. На практиці бажано використовувати формуючі фільтри, що описують рівняннями можливо більш низького порядку, інакше розширена система рівнянь може вийти складною. Якщо процес $\zeta_i(t)$ є вузько смуговим з відмінною від нуля центральною частотою, то фільтр такого процесу повинен бути не менше другого порядку:

$$\ddot{y} + 2\beta\dot{y} + \lambda^2 y = \zeta(t) \quad (2.36)$$

Якщо процес $\zeta_i(t)$ є широкосмуговим, але для нього приймається модель з кінцевою дисперсією, то можливо обмежитись фільтром першого порядку:

$$\frac{dy}{dS} + dy = \sigma_y \sqrt{2\alpha} \zeta(S) \quad (2.37)$$

Переходимо до змінної $t = \frac{S}{V_0}$, отримаємо рівняння формуючого фільтра впливу при переміщенні агрегату з постійною швидкістю V_0 .

$$\dot{y} + \alpha V_0 y = \sigma_y \sqrt{2\alpha V_0} \eta(t) \quad (2.38)$$

де $\eta(t)$ - білий шум.

Моделювання на ПЕОМ білого шуму проводиться апроксимацією його ступінчастим абсолютно випадковим процесом $y(t)$ реалізація якого вираховується в наступній послідовності:

1 – аргумент процесу – час t змінюється дискретно з кроком Δt . В межах кожного кроку Δt значення реалізації задається знову за допомогою датчика гаусових псевдовипадкових чисел.

$$y^l(t \in \Delta t_l) = B y_r^l, l = 1, 2, \dots \quad (2.39)$$

де B – постійний множник;

2 – на всьому інтервалі Δt значення y_1 залишається постійним.

Псевдовипадкові числа, отримані за допомогою датчика попарно некорельовані один з одним. Відповідно, кореляція між значеннями ступінчастого процесу $y(t)$ в різних варіантах Δt_1 і Δt_k , $k \neq 1$, відсутнє. Тому кореляційна функція даного процесу рівна:

$$R_y(\tau) = \begin{cases} B^2, & 0 < \tau \leq \Delta t, \\ 0, & \tau > \Delta t \end{cases} \quad (2.40)$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ відношення $\frac{B^2}{\Delta t} \rightarrow \infty$, відповідно, при достатньо малій величині інтервалу Δt процес $y(t)$ з кореляційною функцією $R_y(t)$ розглядаємо як наближену апроксимацію білого шуму $\eta(t)$ з інтенсивністю $N_\eta = B^2 \Delta t$. Точність апроксимації виявляється тим вища, чим інтервал Δt .

З – при численному інтегруванні стохастичних диференціальних рівнянь на ПЕОМ величина інтервалу Δt не повинна бути менше кроку інтегрування Δt_{min} . Відповідно, крок інтегрування визначається із умови:

$$\Delta t_{\text{min}} = \min(\Delta t_1, \Delta t_2) \quad (2.41)$$

де Δt_1 – інтервал, при якому ступінчастий абсолютно випадковий процес достатньо точно апроксимує білий шум;

Δt_2 – крок числового інтегрування, що забезпечує достатню точність розрахунків при вибірковому методі числового інтегрування системи. Оскільки при всіх методах числового інтегрування $\Delta t_1 < \Delta t_2$, для забезпечення апроксимації білого шуму ступінчастим процесом інтегрування системи ведеться з кроком $\Delta t_{\text{min}} = \Delta t_1$.

2.4 Обґрунтування критерію оптимізації

Для оптимізації параметрів пружної підвіски необхідно вибрати цільову функцію. Академік П.М. Василенко вивчаючи вібраційні процеси, відмітив, що розповсюдження імпульсів в середовищі, що обробляється має хвильовий характер, і опір зсуву грає таку ж роль, як і опір стиску. При цьому руйнування носить інший характер, ніж руйнування при статично діючих силах. Відмінність пояснюється тим, що швидкість носить інший характер, ніж руйнування при статично діючих силах. Відмінність пояснюється тим, що швидкість протікання імпульсу перевищує швидкість протікання, тому вони

не встигають розвинути, а імпульс вже проходить і напруження знижується. Відношення η частоти хвилі на напруження λ_1 до частоти збурюючої впливів λ_2 може мати менше одиниці, рівне одиниці або більше одиниці. Найбільш ефективно руйнування можна очікувати, коли процеси, що викликаються вібрацією лежать в області резонансу, тобто частота впливу повинна бути рівна і близька до частоти хвиль напруження.

З виразу спектральної щільності тягового опору видно, що спектральна щільність досягає максимуму при $\omega = \beta$,

$$S_x(\omega) = \frac{2D\alpha}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2\omega^2} \quad (2.42)$$

Відповідно в якості цільової функції вибираємо максимум спектральної щільності вихідного показника системи, тобто

$$S_x(\omega) \rightarrow \max \quad (2.43)$$

Висновки

Методика імітаційного моделювання корпусу плуга на пружній підвісці дозволяє комплексно оцінити динамічну взаємодію робочого органу з ґрунтовим середовищем, визначити величини змінних сил опору й оптимізувати конструкцію підвіски. Такий підхід значно скорочує потребу в польових випробуваннях, підвищує точність прогнозів і сприяє створенню плужних конструкцій нового покоління з покращеними енергетичними та експлуатаційними характеристиками.

Сформовано формалізований опис процесу взаємодії плужного корпусу, встановленого на пружній підвісці, з ґрунтовим середовищем, у якому враховано нелінійні властивості еластичного елемента, стохастичний характер зовнішнього впливу, а також динамічні, кінематичні та технологічні параметри функціонування системи.

Створено підхід до побудови математичної моделі коливань системи «корпус плуга – ґрунт» на основі методів ідентифікації. Тип системи – автоколивальна, система з випадковим зовнішнім збуренням або система з випадковою параметричною дією – визначається шляхом статистичного аналізу експериментальних даних.

Розроблено методику опису вхідного збурення у вигляді ґрунтового опору, який інтерпретується як результат пропускання випадкового процесу типу «білий шум» через лінійну систему зі сталими параметрами. Як формуючий фільтр пропонується використовувати математичну модель, параметри якої обирають на основі випробувань у реальних умовах роботи, коли корпус плуга зазнає природних збурень.

Для визначення оптимальних характеристик пружної підвіски, що зводиться до встановлення таких коефіцієнтів диференціального рівняння силової взаємодії, за яких мінімізується тяговий опір робочого органу, запропоновано використовувати як цільову функцію максимальне значення спектральної щільності тягового опору плужного корпусу.

Створено методику імітаційного моделювання коливальної системи «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт», що передбачає виконання статистичних комп'ютерних експериментів, які відтворюють роботу системи під дією випадкових чинників. Це дозволяє у широкому діапазоні змінювати параметри та режими роботи плуга й, відповідно до обраного критерію оптимізації, визначати раціональні режими функціонування для ґрунтів різної щільності.

3 КОМПЛЕКС ПРОГРАМНИХ І МЕТОДИЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИПРОБОВУВАННЯ КОРПУСА ПЛУГА

3.1. Порядок проведення експерименту та методичні положення щодо оцінювання роботи корпусу плуга при нормальних експлуатаційних умовах

Експериментальні дослідження є ключовим етапом у вивченні поведінки корпусів плуга під час роботи в реальних умовах. Вони дозволяють оцінити фактичні показники тягового опору, глибину обробітку, ступінь кришення ґрунту, динамічні навантаження на раму та підвіску, а також перевірити результати, отримані за допомогою теоретичних і імітаційних моделей. Програма експериментальних досліджень повинна забезпечувати систематичне та комплексне отримання даних про роботу плуга на різних типах ґрунту та при різних режимах обробітку.

Мета експериментального дослідження полягає у визначенні ефективності роботи корпусу плуга на пружній підвісці за умов нормального функціонування, тобто під час звичайного обробітку орного шару ґрунту без перевантажень або форсованих режимів.

Визначення силових характеристик корпусу плуга: тяговий опір, вертикальні та горизонтальні компоненти навантаження. Оцінка глибини та якості обробітку ґрунту. Дослідження впливу пружної підвіски на динамічні коливання корпусу. Виявлення параметрів, що забезпечують оптимальну енергоефективність та якість обробітку.

Порівняння результатів експерименту з даними імітаційного моделювання для верифікації моделей.

Програма експериментального дослідження передбачає проведення серії польових випробувань із систематичною зміною параметрів роботи плуга.

Вибір випробувального поля та ґрунтових умов

Для забезпечення репрезентативності результатів обирають: ділянки з різними типами ґрунту (суглинки, чорноземи, супіски); рівень вологості, близький до оптимального для оранки; відсутність великих каменів та сторонніх включень; рівномірність попереднього обробітку.

Параметри, що варіюються під час випробувань. Випробування проводяться із зміною таких параметрів: Глибина обробітку - наприклад, 15, 20, 25 см; швидкість руху агрегату - 4, 6, 8 км/год; жорсткість пружної підвіски - різні значення, щоб оцінити вплив на коливання корпусу; кут атаки корпусу - зміна нахилу для оптимізації крихлення ґрунту; вага корпусу або додаткове навантаження - для перевірки стійкості конструкції.

Для підвищення достовірності даних: кожна комбінація параметрів випробовується не менше трьох разів; середні значення використовуються для оцінки основних показників; обчислюються дисперсія та коефіцієнт варіації для оцінки однорідності результатів.

Методика проведення експерименту

Підготовка плуга. Перевіряють справність корпусу та стан пружної підвіски. Встановлюють датчики для вимірювання сил і переміщень: тензометричні датчики для тягового опору, акселерометри для вимірювання коливань, датчики глибини обробітку. Виконують калібрування вимірювальних приладів перед початком випробувань.

Проведення польових випробувань

Плуг агрегується з трактором і встановлюється на задану глибину. Трактор рухається по прямолінійних ділянках із заданою швидкістю.

Вимірюються: сила тяги та її компоненти; вертикальні коливання корпусу; глибина обробітку; якість крихлення ґрунту (визначається за ступенем подрібнення грудок та рівномірністю розподілу).

Дані записуються у цифровому вигляді для подальшої обробки.

Якість обробітку оцінюють за такими показниками: середній розмір грудок ґрунту після оранки; рівномірність розподілу ґрунту; наявність ущільнених прошарків; висота гребеня після проходу плуга.

Використовують як візуальні методи, так і цифрові знімки з подальшим аналізом у програмних комплексах.

Обчислення середніх значень - для кожного параметру визначають середнє арифметичне та стандартне відхилення. Побудова діаграм та графіків - залежність тягового опору, коливань та глибини обробітку від параметрів плуга. Статистичний аналіз - ANOVA, кореляційний аналіз для оцінки впливу кожного чинника. Порівняння з результатами моделювання - верифікація імітаційної моделі та уточнення параметрів.

Використання трактора та плуга згідно з інструкцією з безпеки. Використання захисних засобів для операторів і персоналу. Контроль технічного стану агрегату перед випробуваннями. Забезпечення відстані між трактором і сторонніми особами під час експерименту.

Визначення оптимальних параметрів пружної підвіски для мінімізації коливань та тягового опору. Виявлення залежності якості обробітку від глибини, швидкості та кута атаки корпусу. Оцінка впливу динамічних навантажень на раму та стійкість конструкції. Підготовка рекомендацій для подальшої оптимізації плужних корпусів.

$$T = (200...500) \cdot t \quad (3.1)$$

$$W = a \cdot 100 / b \quad (3.2)$$

$$P = h_{CP} \cdot q / S \quad (3.3)$$

3.2 Прилади і обладнання

Для вимірювання тягового опору плужного корпусу була сконструйована тензометрична стійка (рис. 3.1), на поверхню якої за мостовою схемою встановлено тензорезистори. Вони фіксують величину згинального

моменту, що є пропорційною горизонтальній складовій тягового опору корпусу плуга (рис. 3.2).

Процедуру наклеювання тензорезисторів виконували відповідно до основних технологічних вимог і стандартних методичних рекомендацій.



Рисунок 3.1 - Тензометрична стійка плуга

$$y = \alpha + \mu_R \cdot x \quad (3.4)$$

де μ_R - масштабний коефіцієнт, Н/мм.

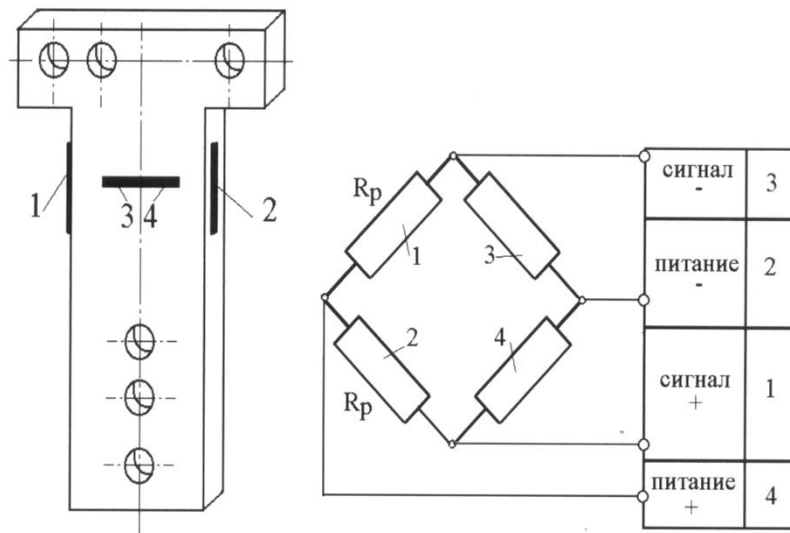


Рисунок 3.2 - Позиціонування на стійку тензорезисторів

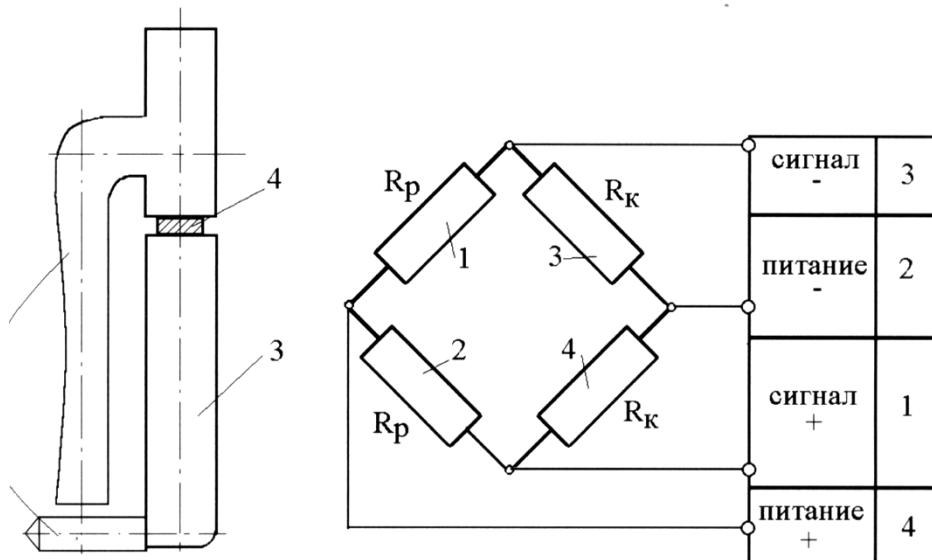


Рисунок 3.3 - Схема приладу для виміру повздовжньої твердості ґрунту

3.3 Задачі і програма лабораторного дослідження

Враховуючи поставлені в першому розділі задачі дослідження, програма лабораторного експериментального дослідження передбачає:

- а) визначення коефіцієнтів дисипації;
- б) визначення квазіупружних коефіцієнтів.

У відповідності до програми дослідження передбачається виконати:

- запис переміщення носка леміша плуга в залежності від величини прикладеного навантаження;
- запис вільних коливань корпусу плуга, виведеного із стану рівноваги;
- апроксимація експериментальних даних емпіричними залежностями по методу найменших квадратів.

3.4 Методика визначення коефіцієнтів дисипації

В цьому випадку енергія системи, яку вона отримала в початковий момент часу, буде розсіюватись, тому амплітуда коливань буде зменшуватись і з часом коливання згаснуть. Для диференційного рівняння

$$\ddot{x} + 2b\dot{x} + k^2x = 0 \quad (3.5)$$

при $b < k$ загальним розв'язком буде

$$x = a \cdot \exp(-bt) \cdot \sin(k_1t + \alpha) \quad (3.6)$$

де b - відносний коефіцієнт демпфірування коливань.

Амплітуда коливань зменшується за законом

$$A = a \cdot \exp(-b \cdot t) \quad (3.7)$$

відповідно, коефіцієнт дисипації можна отримати, апроксимуючи експериментальні данні експоненціальною залежністю

$$y = b_0 \cdot \exp(b_1x) \quad (3.8)$$

Послідовність проведення експерименту наступна:

- встановлюємо корпус плуга на пружній підвісці на тарувальний стенд;
- виводимо систему із стану рівноваги;
- проводимо запис вільних згасаючих коливань корпусу плуга;

- апроксимуємо амплітуду коливань експоненціальною залежністю, отримуємо значення коефіцієнту дисипації, в якому враховані втрати енергії на тертя в системі.

3.5 Квазіпружних коефіцієнтів методика визначення

Для визначення граничної жорсткості необхідно експериментальним шляхом встановити залежність переміщення носка леміша від величини прикладеного зусилля.

Послідовність експерименту наступна:

- встановлюємо корпус плуга на тарувальний стенд;
- прикладаючи до носка леміша горизонтальну силу, і збільшуючи її, замірюємо величину проекції від першопочаткового положення. Навантаження проводиться ступінчасто від 0 до 1000 Н з кроком 100 Н. Відхилення носка леміша фіксується на координатній сітці. Запис проводиться при навантаженні і розвантаженні корпуса плуга, в трикратній повторності:
- апроксимуємо результати експерименту

$$y(x) = a_1x + a_3x^3 \quad (3.9)$$

3.6 Методичні засади аналізу отриманих експериментальних результатів

Обробка результатів експериментального дослідження є невід'ємною частиною наукової роботи, оскільки дозволяє систематизувати отримані дані, провести їх аналіз та зробити обґрунтовані висновки щодо ефективності та функціональних характеристик досліджуваних машин. Методика обробки результатів визначає порядок підготовки, первинного опрацювання, статистичної обробки та графічного відображення даних. Вона дозволяє

мінімізувати похибки, оцінити достовірність результатів та забезпечити їх порівнянність.

Перед початком обробки необхідно: перевірити повноту даних, отриманих під час польових випробувань; видалити очевидні аномалії та несправності, що виникли через технічні або зовнішні фактори (наприклад, падіння датчика, неправильне кріплення плуга); організувати дані у структуровану таблицю, де враховуються: глибина обробітку; швидкість руху агрегату; кут атаки корпусу; величина тягового опору; вертикальні та горизонтальні коливання корпусу; інші параметри залежно від мети дослідження.

Перевести дані до однакових одиниць вимірювання та округлити до точності, необхідної для статистичної обробки.

Первинна обробка включає обчислення середніх значень для кожного показника при повторних вимірюваннях. Для оцінки впливу різних факторів на результати експерименту використовуються статистичні методи: дисперсійний аналіз (ANOVA)- дозволяє визначити, які фактори суттєво впливають на тяговий опір, коливання корпусу або якість обробітку ґрунту; кореляційний аналіз - встановлює залежність між параметрами, наприклад, між глибиною обробітку і величиною тягового опору; регресійний аналіз - для побудови емпіричних залежностей між змінними.

Візуалізація даних допомагає наочно оцінити закономірності та тенденції. Найчастіше використовуються: діаграми розсіювання - для оцінки кореляції між параметрами; гістограми - для аналізу розподілу величини тягового опору або глибини обробітку; динамограми - для відображення коливань корпусу плуга у часі; контурні графіки та поверхневі діаграми - для оцінки впливу двох і більше факторів одночасно.

Графічне представлення дозволяє швидко виявляти аномалії та робити порівняння між різними режимами роботи.

Отримані експериментальні дані порівнюють із результатами імітаційного або теоретичного моделювання. Це дозволяє: виявити похибки та

уточнити моделі; оцінити відповідність математичних залежностей реальному процесу; оптимізувати конструкцію плуга та параметри пружної підвіски.

На основі обробки результатів експерименту формують: оптимальні режими роботи плуга (глибина, швидкість, кут атаки); параметри підвіски для зниження коливань і підвищення енергоефективності.

$$T = \Delta t \cdot N \quad (3.10)$$

$$x(t) = m_x(t) + \dot{x}(t) \quad (3.11)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{нпу } |t| \leq 1, \\ 0, & \text{нпу } |t| > 1 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0.75(1-t^2), & \text{нпу } |t| \leq 1, \\ 0, & \text{нпу } |t| > 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\Delta\omega = \frac{3\pi}{T_\varphi} \quad (3.14)$$

$$\omega_\varphi = \frac{20 \cdot \pi}{T} \quad (3.15)$$

$$T_\varphi = 0.1 \cdot T \quad (3.16)$$

$$n_\varphi = 0.1 \cdot N \quad (3.17)$$

$$m_x = \mu \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.18)$$

- центруються ординати відносно середнього

$$\dot{x}_i = x_i - m_x \quad (3.19)$$

- визначається не фільтрована дисперсія

$$D_{1x} = \mu^2 \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2 \quad (3.20)$$

- фільтрується вихідний масив, і центруються ординати процесу відносно поточного середнього процесу:

$$m_{xi} = \sum_{-0.5n_\varphi}^{+0.5n_\varphi} f(n_i) x_{i+n} \quad (3.21)$$

Де

$$f(n_i) = \begin{cases} 0.75 \left[1 - \left(\frac{n_i}{n_\varphi} \right)^2 \right], & \text{при } n_i \leq 0.5 * n_\varphi \\ 0, & \text{при } n_i > 0.5 * n_\varphi \end{cases}, \quad (3.22)$$

Для центрованих ординат після фільтрації маємо:

$$D_{2x} = \mu^2 \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^2 \quad (3.23)$$

- кореляційна функція розраховується за формулою:

$$K_x(\tau) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \dot{x}_k \cdot \dot{x}_{k+m} \quad (3.24)$$

- визначаємо нормовану кореляційну функцію:

$$\rho_x(\tau) = \frac{K_x(\tau)}{D_x} \quad (3.25)$$

$$S_x(\omega_j) = \frac{\Delta\tau}{\pi} \left[K_x(0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} K_x(i\Delta\tau) \cos \omega_j(i\Delta\tau) + K_x(n\Delta\tau) \cos \omega_j(n\Delta\tau) \right], j = 0, 1, 2, \dots, m$$

$$S_x(0) = \frac{\Delta\tau}{\pi} \{ K_x(0) + 2 [K_x(1\Delta\tau) + K_x(2\Delta\tau)] + \dots + K_x(n\Delta\tau) \} \quad (3.26)$$

$$S_x(0) = \frac{\Delta\tau}{\pi} \left\{ \begin{aligned} &K_x(0) + 2[K_x(1\Delta\tau)\cos(\Delta\omega\Delta\tau) + K_x(2\Delta\tau)]\cos(2\Delta\omega\Delta\tau) \\ &+ \dots K_x(n\Delta\tau)\cos(n\Delta\omega\Delta\tau) \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

$$f_c(t) = 0.5 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi t}{\tau_{\max}}\right) \right] \quad (3.28)$$

Для точки $j = 0$:

$$S_x^*(\omega_0) = 0.5S_x(0) + 0.5S_x(\omega_j) \quad (3.29)$$

Для точки $j = 1, 2, \dots, k-1$:

$$S_x^*(\omega_j) = 0.25S_x(\omega_{j-1}) + 0.5S_x(\omega_j) + 0.25S_x(\omega_{j+1}) \quad (3.30)$$

Для точки $j = k$:

$$S_x^*(\omega_k) = 0.5S_x(\omega_{k-1}) + 0.5S_x(\omega_k) \quad (3.31)$$

$$K_{xy}(m\Delta t) = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \dot{x}_k \cdot \dot{y}_{k+m} \quad (3.32)$$

$$\rho_{xy}(m\Delta t) = K_{xy}(m\Delta t) \sigma_x \sigma_y \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} K_1(m\Delta\tau) &= \frac{1}{2} [K_{xy}(-m\Delta\tau) + K_{xy}(m\Delta\tau)], \\ K_2(m\Delta\tau) &= \frac{1}{2} [K_{xy}(-m\Delta\tau) - K_{xy}(m\Delta\tau)] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Для визначення ступеня нелінійності взаємна дисперсійна функція процесів $x(t)$ і $y(t)$ визначається за формулою.

$$D_{yx}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^\circ y_k^\circ \quad (3.35)$$

Висновки

Проведення систематичних польових випробувань дозволяє отримати достовірні дані про динамічні навантаження, якість обробітку ґрунту та енергетичні характеристики, що є основою для вдосконалення конструкції плуга та підвищення його ефективності в виробничих умовах.

Сформовано методику та програму експериментального дослідження корпусу плуга на пружній підвісці в умовах стандартного функціонування, що включає отримання реалізацій випадкових процесів на вході та виході динамічної системи з подальшим статистичним аналізом досліджуваних процесів.

Рекомендовано визначати тяговий опір плужного корпусу за допомогою тензометричної стійки, яка фіксує згинальний момент, пропорційний горизонтальній складовій тягового опору.

Пропонується оцінювати опір ґрунту за допомогою пристрою для безперервного вимірювання поздовжньої твердості ґрунту.

Розроблено методику та програму лабораторного експерименту для визначення коефіцієнтів дисипації та квазіупругих коефіцієнтів у рівнянні руху корпусу плуга.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ КОРПУСА ПЛУГА НА ПРУЖНІЙ ПІДВІСЦІ

4.1 Експерименту умови проведення

Об'єктом дослідження обрана пружно-шарнірна конструкція корпусу плуга, де в ролі пружного елемента застосована циліндрична пружина з лінійною характеристикою. Для проведення експериментальних випробувань виготовлено пружини з різним ступенем жорсткості.

В додатку 1 приведено експерименту проведення умови

Польові випробування проводилися на агрегаті, що складався з трактора МТЗ-82 та плуга ПЛН-3-35. На основі результатів експериментального дослідження корпусу плуга необхідно визначити рівняння формуючого фільтра впливу, проаналізувати нелінійність взаємозв'язку плужного корпусу та здійснити ідентифікацію динамічної системи.

Ефективність експериментального дослідження корпусу плуга на пружній підвісці значною мірою залежить від створення відповідних умов випробувань, що максимально наближені до реальних виробничих ситуацій. Правильне визначення умов експерименту дозволяє отримати достовірні та репрезентативні дані щодо роботи робочого органу, динаміки корпусу та взаємодії з ґрунтом. У цьому розділі розглядаються ключові аспекти підготовки та проведення випробувань, включаючи вибір полігону, параметри робочого середовища, технічне оснащення та організаційні заходи.

Для проведення експериментів обирають поле з наступними характеристиками: площа достатня для проведення повторних проходів плуга без перетинів траєкторій; рівномірний рельєф, відсутність значних ухилів, щоб уникнути додаткових динамічних навантажень; стабільна структура ґрунту на глибині обробітку; відсутність сторонніх включень (каміння, залишки рослинності, великі грудки).

Ґрунт має бути представником типових умов експлуатації плуга: супіски, суглинки або чорноземи; вологість у межах оптимальної для оранки (зазвичай 12–18% для чорнозему); однорідність фізико-механічних властивостей по всій площі полігону.

Вибір різних типів ґрунту дозволяє дослідити поведінку корпусу при різних механічних опорах і визначити універсальні параметри підвіски.

Для забезпечення точності та надійності результатів використовуються сучасні вимірювальні та реєструючі пристрої.

Тензометричні датчики - для вимірювання тягового опору та вертикальних сил на корпус; Акселерометри та гіроскопи — для оцінки коливань корпусу у вертикальному та горизонтальному напрямках; Датчики глибини обробітку - для контролю фактичної глибини оранки; Системи збору даних - цифрові реєстратори з частотою зчитування не менше 50 Гц, що забезпечують фіксацію динаміки процесу; Камери або фотозйомка - для візуального аналізу якості обробітку ґрунту та формування статистичних даних.

Плуг встановлюється на трактор відповідної потужності; контроль за швидкістю руху та стабільністю курсу; перевірка стану пружної підвіски, наявності деформацій і вільного ходу; забезпечення правильного кріплення датчиків на корпусі; попереднє вирівнювання та розмітка траєкторій проходу; визначення зон для повторних вимірювань;

Для отримання достовірних даних необхідно встановити: стабільну швидкість руху - для кожного експериментального проходу; постійну глибину обробітку - контрольована механічними або цифровими датчиками; фіксацію коливань та силових характеристик - з частотою, що дозволяє відтворити динамічні процеси; повторність проходів - для зменшення випадкових похибок.

Важливо враховувати вплив погодних умов - дощ, висока вологість або сухість ґрунту можуть значно впливати на результати експерименту.

Для комплексного оцінювання корпусу плуга на пружній підвісці передбачають різні режими: нормальний режим - стандартна швидкість та глибина оранки, оптимальні умови ґрунту; підвищене навантаження - збільшена глибина обробітку або швидкість руху; зміна кута атаки корпусу - для виявлення впливу геометрії на ефективність та динаміку; робота на різних типах ґрунту - для перевірки універсальності підвіски та стабільності роботи.

Всі вимірювання реєструються у журнал експерименту; використовуються фотографії та відеозаписи для візуальної перевірки якості обробітку; проводиться попередня оцінка однорідності результатів перед їх обробкою та аналізом.

4.2 Аналіз результатів дослідження опору ґрунту

При дослідженні опору ґрунту вирішувались наступні задачі: визначались кореляційні зв'язки між процесами, отриманими при замірі твердості ґрунту статичним і динамічним способами, визначались значення коефіцієнтів кореляційного зв'язку, аналізувалась спектральна щільність процесу з метою вибору рівняння формуючого фільтра.

Твердість ґрунту, що замірювалась твердоміром статичної дії можна розглядати, як випадкову стаціонарну послідовність, з властивостями відносно математичного очікування і дисперсії.

Другий спосіб передбачає безперервне визначення повздовжньої щільності ґрунту, початковою інформацією, для визначення оцінок ймовірнісних характеристик є осцилограми записів зміни повздовжньої твердості ґрунту, отримані при роботі агрегату в польових умовах (рис. 4.1).

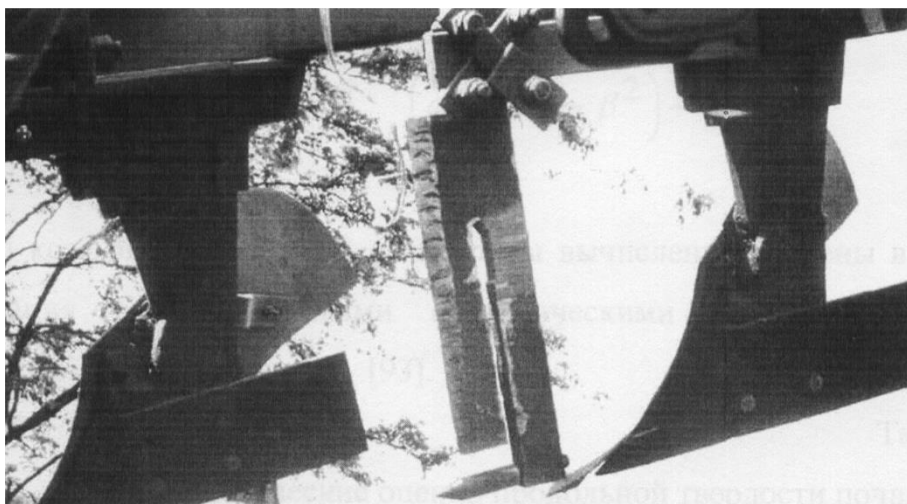


Рисунок 4.1 - Повздовжньої твердості ґрунту визначення

В додатку 2 приведена твердість ґрунту на глибині 20 см, що виміряна твердоміром статичної дії.

Коефіцієнти кореляції між цими двома процесами знаходяться в межах 0,91–0,93, що свідчить про досить тісний кореляційний зв'язок між ними. Це дозволяє досліджувати збурюючий вплив за допомогою пристрою для безперервного вимірювання поздовжньої твердості ґрунту.

При обчисленні статистичних характеристик інтеграли замінюються на кінцеві суми. Отримані кореляційні функції та спектральні щільності ґрунтового опору представлені на графіку 4.2. Апроксимація кривих кореляційної функції дає змогу визначити коефіцієнти кореляційного зв'язку, значною мірою залежні від фізико-механічних властивостей ґрунту та швидкості оранки.

Графіки кореляційної функції вказують на ергодичність процесу, так як $K_y(\tau)$ наближається до нуля при $\tau \rightarrow \infty$. Затухання кривих свідчить про наявність скритих періодичних складових порід із випадковими.

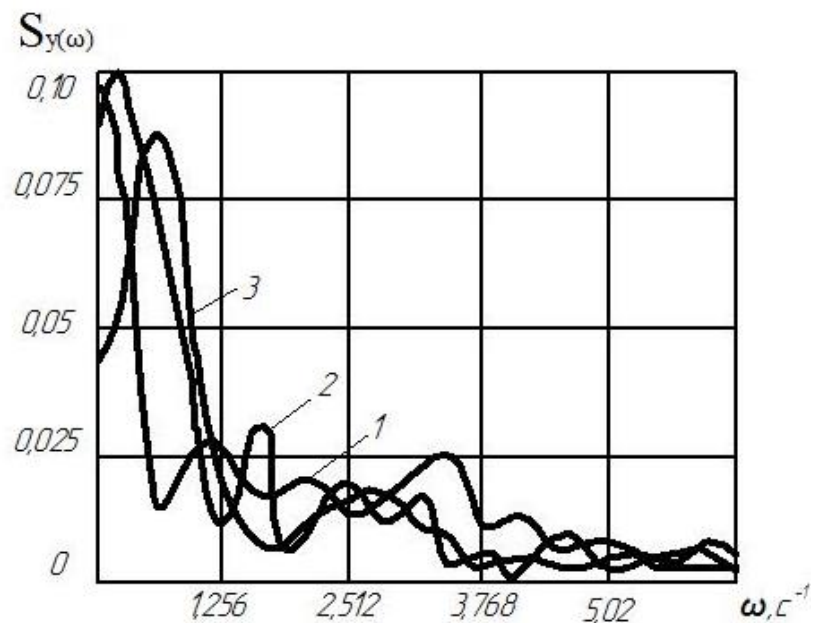
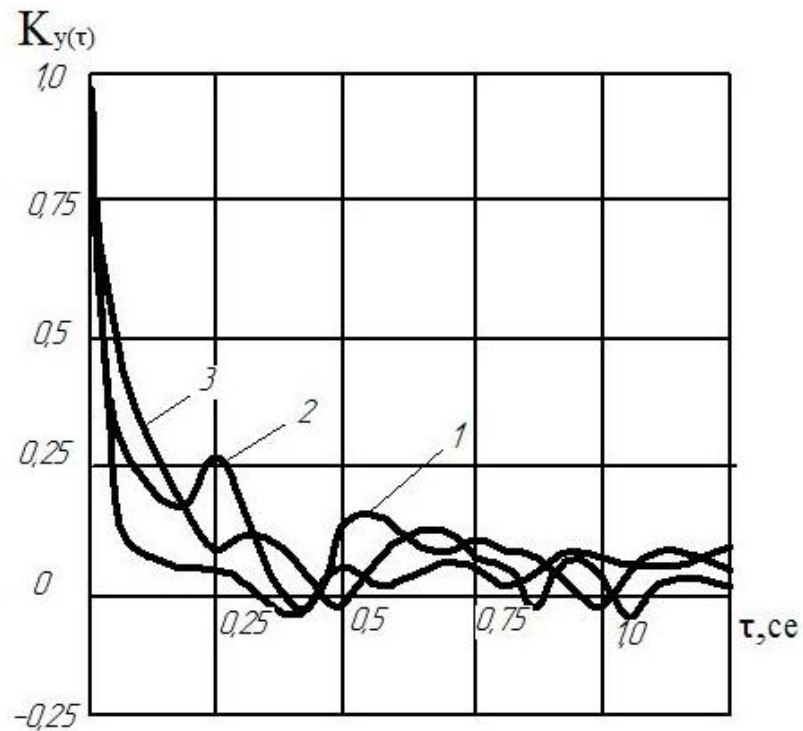


Рисунок 4.2 - Кореляційна функція $K_y(\tau)$ і спектральна щільність $S_y(\omega)$ повздожньої щільності ґрунту

З графіків на рис. 4.2 видно, що процес зміни опору ґрунту характеризується різномірним низькочастотним спектром дисперсії з частотою зрізу до $5,03 \text{ c}^{-1}$. Через відносно великі коефіцієнти варіації (9,1–9,8 %) амплітуди коливань опору ґрунту також значні, що свідчить про

порівняну нерівномірність твердості ґрунту. При збільшенні швидкості руху від 1,5 до 1,96 м/с середнє значення ґрунтового опору дещо зростає (рис. 4.3), а спектри дисперсії зміщуються в бік підвищення величини.

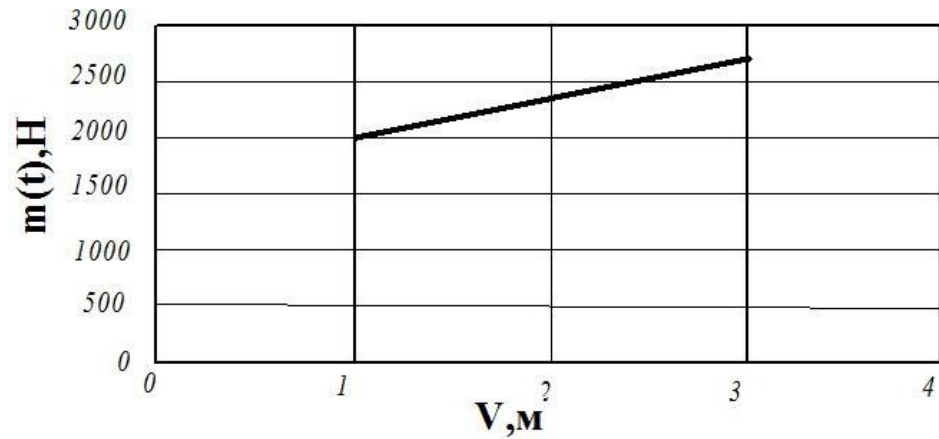


Рисунок 4.3 - Твердість повздожня

4.3 Аналіз нелінійності зв'язків

Аналіз нелінійності зв'язків корпусу плуга на пружно-шарнірній підвісці виконаний по результатам експериментального дослідження в умовах нормального функціонування. Ступінь нелінійності визначена з виразу

$$n(\tau) = \sqrt{D_{yx}^2(\tau) - K_{yx}^2(\tau)} \quad (4.1)$$

Реалізація до методики (розділ 3) отримані взаємна дисперсійна функція $D_{yx}(\tau)$ і взаємна кореляційна функція $K_{yx}(\tau)$ вхідного $y(t)$ і вихідного $x(t)$ стаціонарних випадкових процесів приведені в таблиці 4.4. і зображені графічно на рис. 4.4.

Очевидно, що ступінь не лінійності процесу $n(\tau) \neq 0$, можна з достатньою впевненістю вважати процес взаємодії корпусу плуга на пружно-шарнірній підвісці нелінійним і описати його нелінійним диференціальним рівнянням.

Таблиця 4.1.

Ступінь нелінійності процесу взаємодії корпусу плуга з ґрунтом

№	$R_{yx}(\tau)$		$D_{yx}(\tau)$		$n(\tau)$	
	лівий зсув	правий зсув	лівий зсув	правий зсув	лівий зсув	правий зсув
1	0,01	0,01	0,204	0,204	0,204	0,204
2	0,019	0,0124	0,273	0,18	0,27	0,13
3	0,055	0,072	0,189	0,182	0,181	0,167
4	-0,009	0,036	0,15	0,156	0,15	0,152
5	0,076	0,055	0,209	0,135	0,196	0,122
6	0,092	0,052	0,194	0,156	0,171	0,148
7	0,111	0,045	0,221	0,215	0,191	0,21
8	0,177	-0,038	0,245	0,196	0,17	0,19
9	0,22	0,006	0,243	0,125	0,102	0,125
10	0,228	0,004	0,228	0,162	0,177	0,162
11	0,295	-0,061	0,364	0,214	0,213	0,205
12	0,311	-0,032	0,344	0,222	0,148	0,219
13	0,344	-0,105	0,38	0,272	0,182	0,251
14	0,246	-0,056	0,279	0,231	0,131	0,224
15	0,226	-0,067	0,312	0,210	0,216	0,199
16	0,139	-0,119	0,181	0,229	0,115	0,196
17	0,105	-0,059	0,186	0,177	0,154	0,167
18	0,164	-0,05	0,249	0,169	0,187	0,162
19	0,187	-0,014	0,261	0,157	0,183	0,157
20	0,143	-0,017	0,233	0,204	0,184	0,203

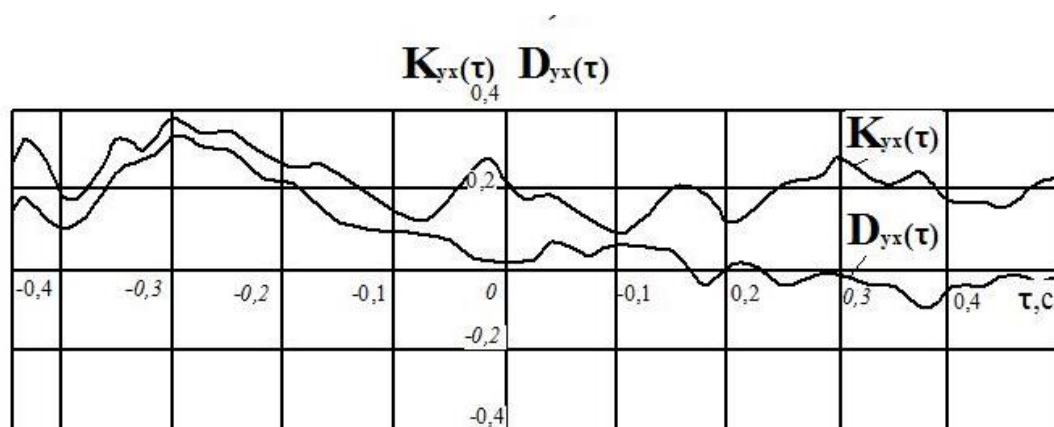


Рисунок 4.4 - Дисперсійної взаємодії графіки

4.4 Результати експериментального визначення квазіпружних коефіцієнтів рівняння руху

Відновлююча сила в цьому випадку задається нелінійною залежністю з жорсткою кубічною характеристикою.

$$f(x) = k^2(x + \gamma x^3) \quad (4.2)$$

Яку апроксимуємо кубічною параболою виду:

$$y(x) = a_1x + a_3x^3 \quad (4.3)$$

Результати експериментального визначення переміщення носка леміша від величини прикладеного навантаження горизонтального навантаження

Таблиця 4.1

Значення відхилення носка леміша корпусу плуга при різній жорсткості пружного елемента

Горизонтальне навантаження, Р, Н	Відхилення носка леміша, L, м		
	C=103·10 ³ Н/м	C=180·10 ³ Н/м	C=240·10 ³ Н/м
0	0	0	0
1000	0,008	0,006	0,005
2000	0,017	0,012	0,010
3000	0,028	0,020	0,015
4000	0,035	0,028	0,024
5000	0,044	0,036	0,030
6000	0,055	0,051	0,043

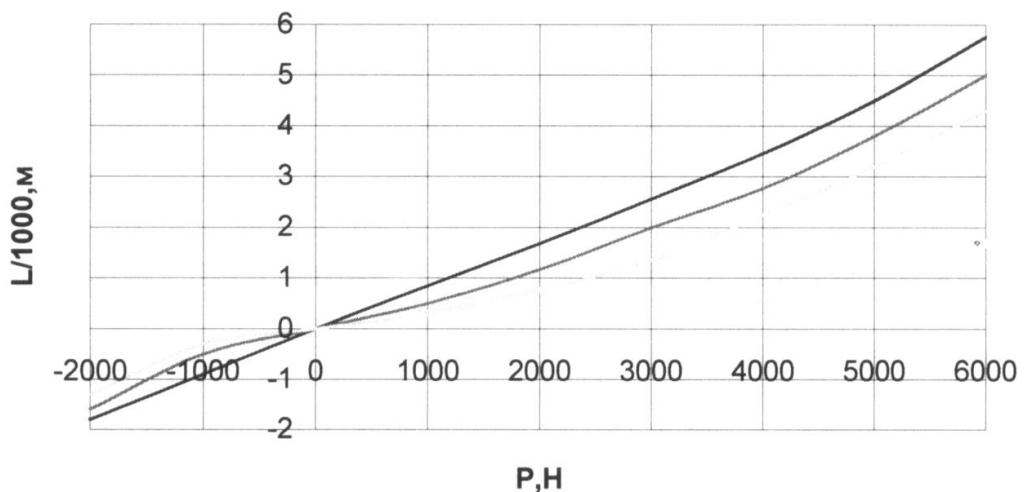


Рисунок 4.5 - Залежність переміщення носка леміша від величини прикладеного навантаження: 1 – дослід 1 (C=103·10³ Н/м); 2 – дослід 2 (C=180·10³ Н/м); 3 – дослід 3 (C=240·10³ Н/м);

Для моделювання динамічної системи «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт» нам необхідно мати значення коефіцієнта γ , який отримуємо апроксимацією залежності відхилення носка лемеша від прикладеного навантаження. Значення коефіцієнта γ , що визначенні для пружних елементів різної жорсткості приведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Значення коефіцієнта γ

Жорсткість пружного елемента, С, Н/м	Коефіцієнт γ
$103 \cdot 10^3$	$0,152 \cdot 10^{-3}$
$180 \cdot 10^3$	$0,180 \cdot 10^{-3}$
$240 \cdot 10^3$	$0,188 \cdot 10^{-3}$

В результатах параметрів пружної підвіски корпуса плуга приймаємо середнє значення коефіцієнта $\gamma = 0,173 \cdot 10^{-3}$

4.5 Результати експериментального визначення коефіцієнтів дисипації

У вимушених коливаннях корпуса плуга на пружній підвісці необхідно обов'язково враховувати сили тертя в системі, якими б малими вони не були, так як при налаштуванні підвіски на оптимальний режим роботи система працює в стані резонансу. Якщо при цьому не враховувати сили тертя в системі, похибка моделювання може сягати 20%. В даному випадку в якості дисипативних сил будемо враховувати момент сил опору, приведений до носка лемеша. Опір у вузлах конструкції приймаємо лінійно-в'язким. Виконуємо запис вільних коливань корпуса плуга в трикратній повторності. Апроксимуючи отримані амплітуди коливань залежністю

$$A = a \cdot \exp(bx) \quad (4.4)$$

визначаємо значення коефіцієнта дисипації b , результати розрахунків зводимо в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Параметр	Значення коефіцієнта b			Середнє значення
	повторність 1	повторність 2	повторність 3	
b	0,085	0,082	0,086	0,084

4.6 Визначення раціональних параметрів

Рівняння руху системи має вид:

$$\ddot{x} + 2b\dot{x} + \omega^2(x + \gamma x^3) = y(t) \quad (4.5)$$

При цьому кореляційна функція опору ґрунту апроксимувалась

$$K(\tau) = D \cdot \exp(-\alpha|\tau|) \cos \beta\tau \quad (4.6)$$

якому відповідає спектральна щільність

$$S_y(\tau) \frac{2D_y \alpha}{\pi} \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2) + 4\alpha^2 \omega^2} \quad (4.7)$$

і формуючий фільтр впливу при переміщенні плуга з постійною швидкістю V_0 .

$$\dot{y} + \alpha V_0 y = \sigma y \sqrt{2\alpha V_0} \cdot \eta(t) \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = U_2 \\ \dot{U}_2 = -2bU_2 - \omega^2(U_1 + \gamma U_1^3) + U_3 \\ \dot{U}_3 = -\alpha V_0 U_3 + \sigma_y \sqrt{2\alpha V_0} \cdot \eta(t) \end{cases} \quad (4.9)$$

За результатами розрахунків складена номограма, приведена на рис. 4.6, яка дає можливість визначити, пружину якої жорсткості необхідно встановити на пружну підвіску для заданої швидкості руху і відомої твердості ґрунту.

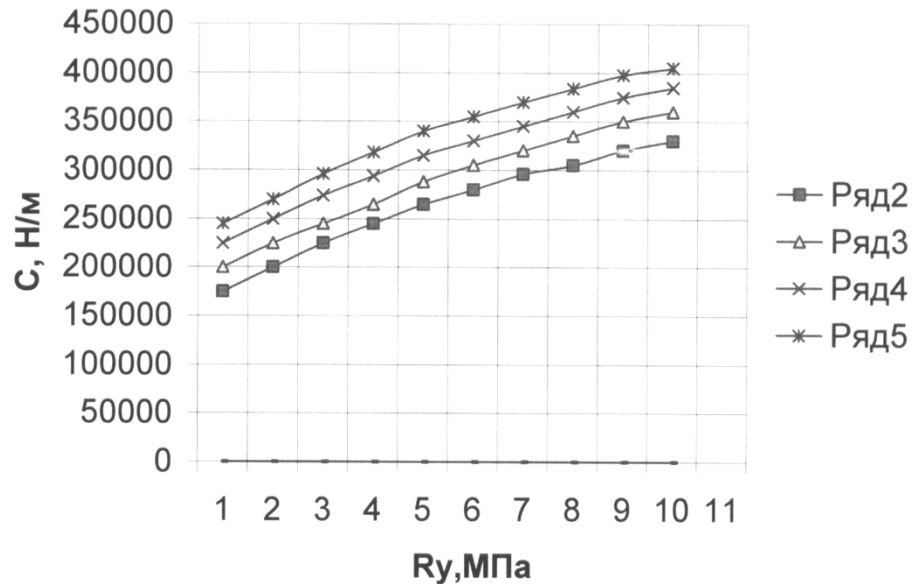


Рисунок 4.6 - Жорсткостість пружного елемента в залежності від твердості ґрунту

Графіки кореляційних функцій всіх процесів підтверджують посилення на ергодичність процесів, так як $K(\tau)$ наближається до нуля при $\tau \rightarrow \infty$.

Аналіз графіків 4.7 та 4.8 показав, що коливання тягового опору корпусу плуга на пружній підвісці характеризуються однорідним низькочастотним спектром дисперсії з частотою зрізу до $5,02 \text{ с}^{-1}$. У випадку жорстко закріпленого корпусу плуга (рис. 4.9) процес зміни тягового опору має різномірний низькочастотний спектр дисперсії з частотою зрізу до $0,08 \text{ с}^{-1}$. Коливання поздовжньої твердості ґрунту демонструють порівняно однорідний низькочастотний спектр дисперсії з частотою зрізу до $4,4 \text{ с}^{-1}$.

Порівняння частот, що відповідають максимуму спектральної щільності пружно закріпленого корпусу плуга та частоті поздовжньої твердості ґрунту, показало, що вони знаходяться в межах $0,942-1,57 \text{ с}^{-1}$. Це свідчить про збіг

частоти зовнішнього впливу з власною частотою коливальної системи, що вказує на роботу у режимі резонансу або режимі биття.

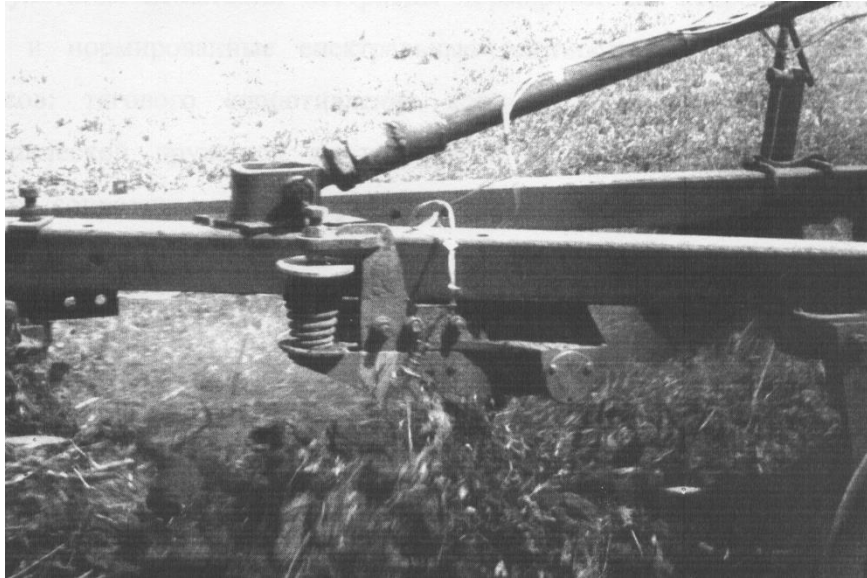


Рисунок 4.6 - Пружна підвіска

Графіки кореляційних функцій всіх процесів підтверджують посилення на ергодичність процесів, так як $K(\tau)$ наближається до нуля при $\tau \rightarrow \infty$

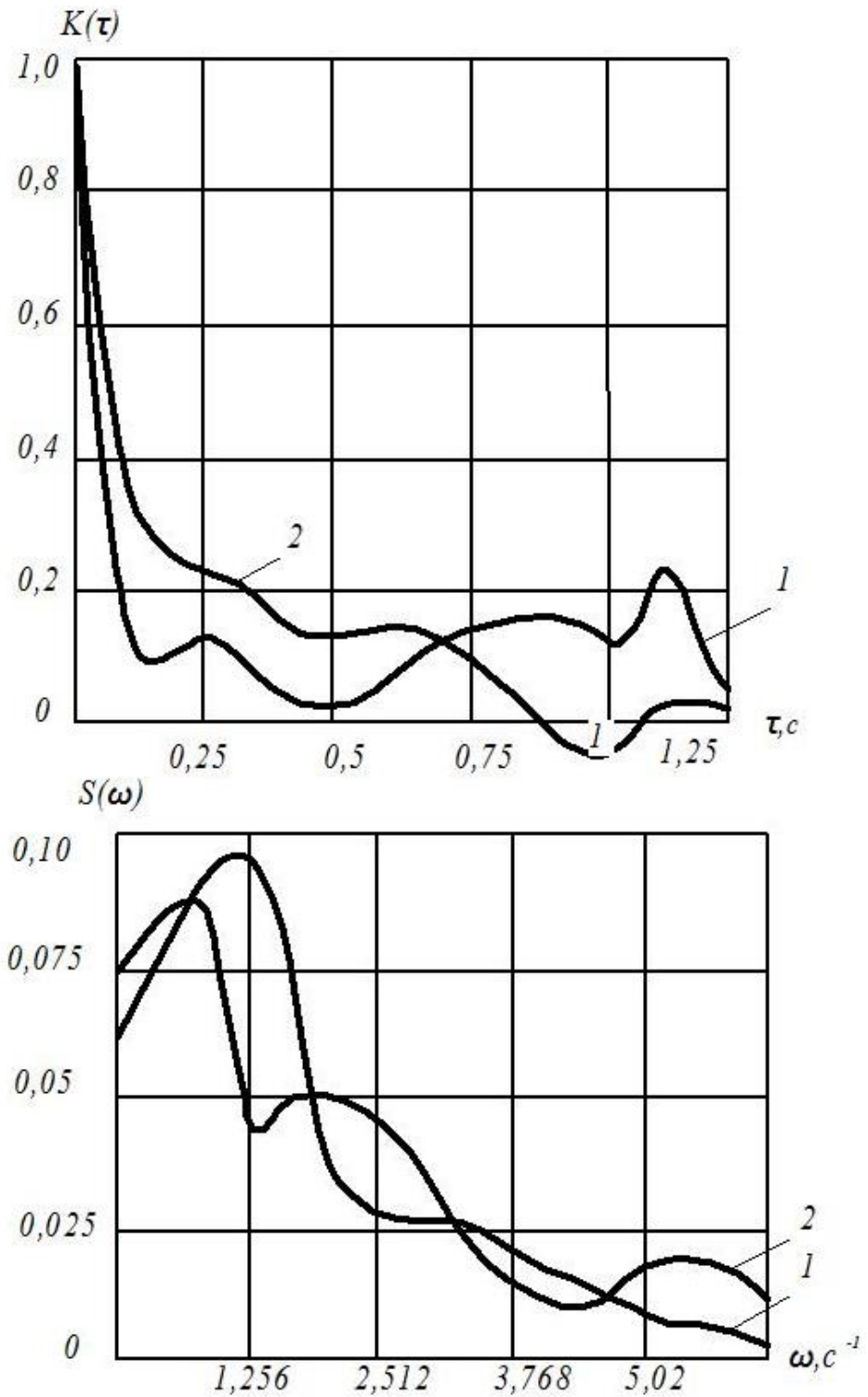


Рис. 4.7. Кореляційна функція $K_x(\tau)$ і спектральна щільність $S_x(\omega)$ тягового опору корпусу плуга з циліндричною пружиною: 1 – дослід 1, 2 – дослід 2.

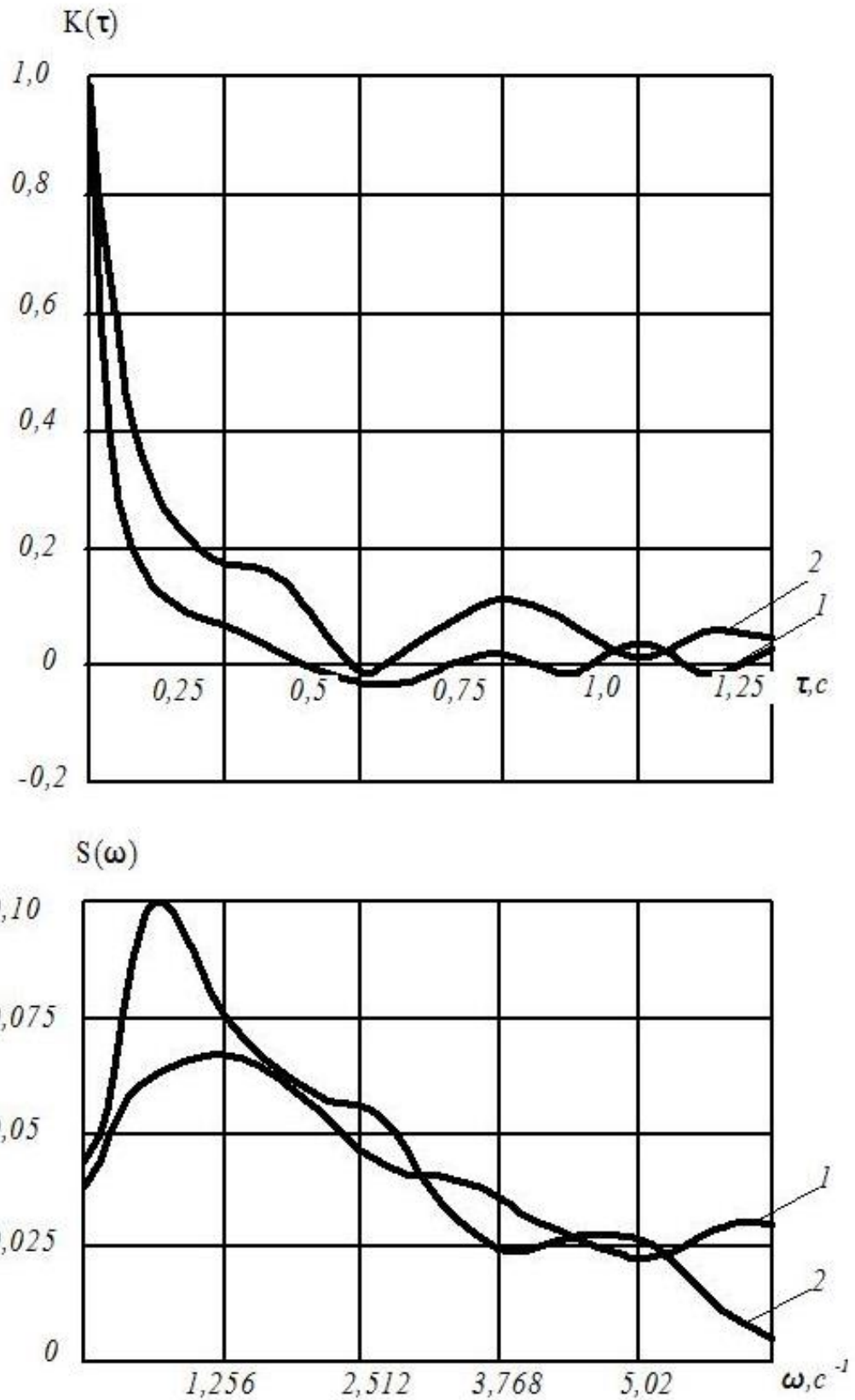


Рис. 4.8. Кореляційна функція $K_x(\tau)$ і спектральна щільність $S_x(\omega)$ тягового опору корпуса плуга з кінчною пружиною: 1 – дослід 1, 2 – дослід 2.

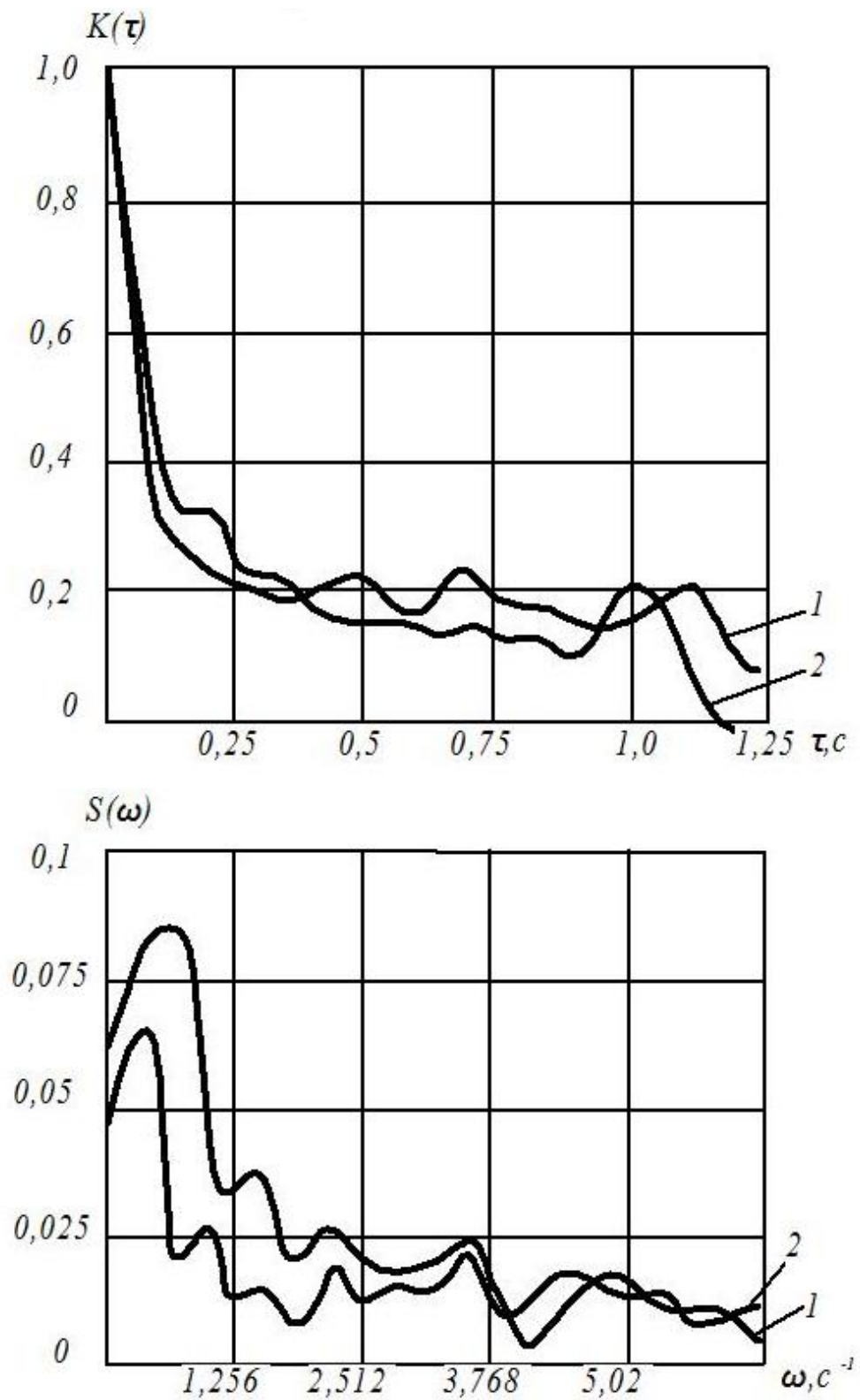
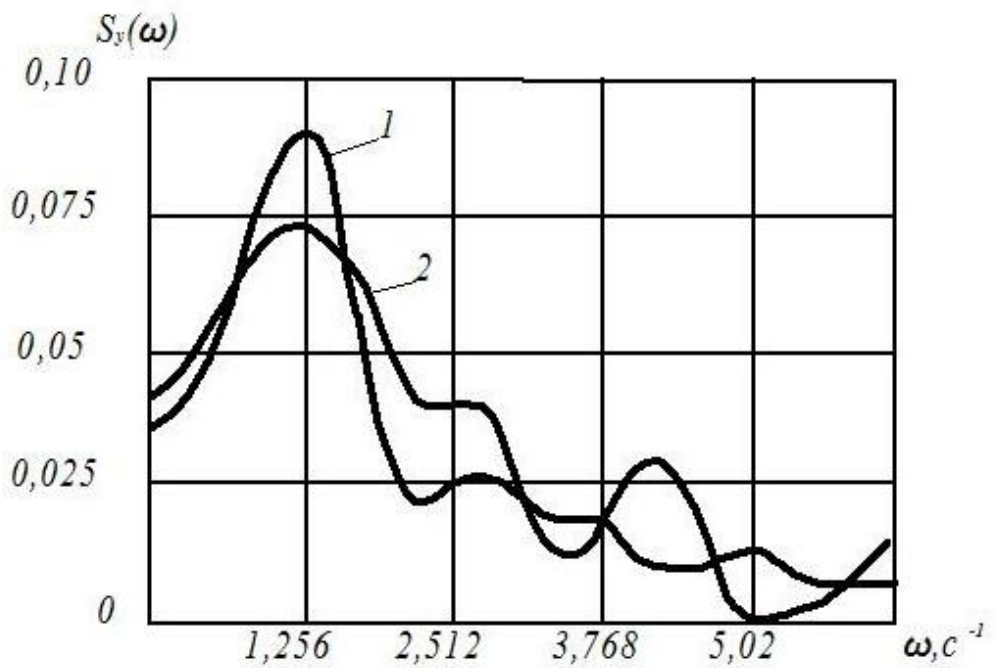
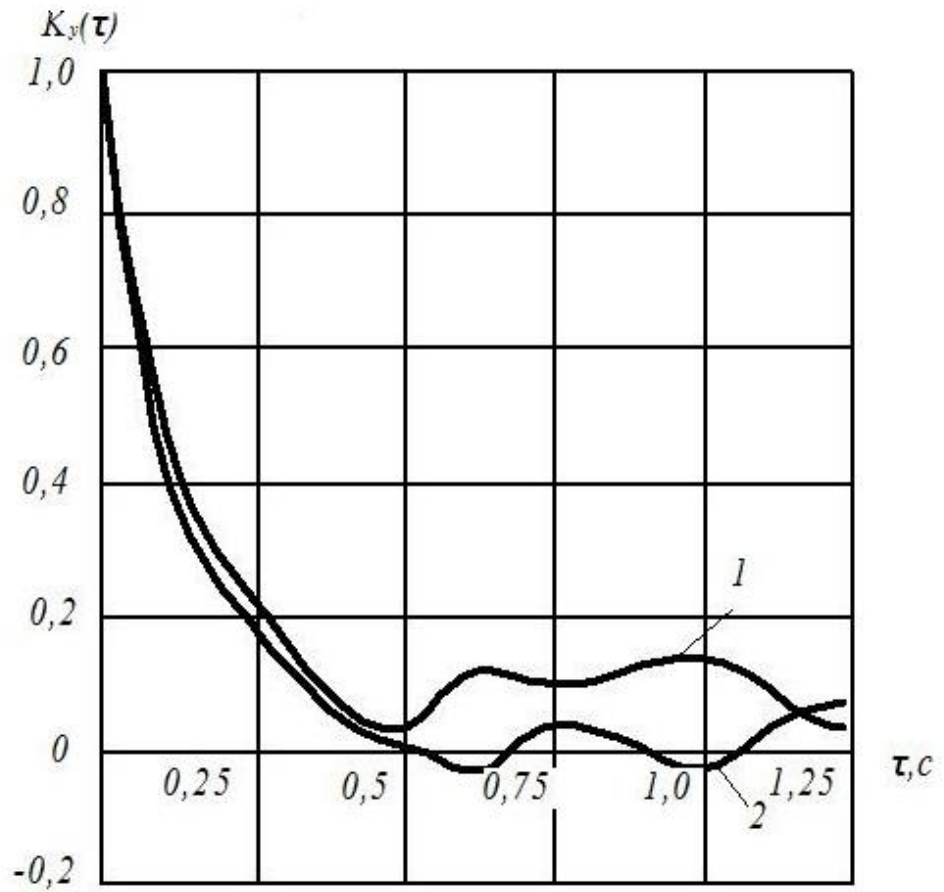


Рис. 4.9. Кореляційна функція $K_x(\tau)$ і спектральна щільність $S_x(\omega)$ тягового опору жорстко закріпленого корпусу плуга: 1 – дослід 1, 2 – дослід 2.



4.10. Кореляційна функція $K_y(\tau)$ і спектральна щільність $S_y(\omega)$ повздожньої твердості ґрунту: 1 – дослід 1, 2 – дослід 2.

Аналіз графіків 4.7 та 4.8 показав, що коливання тягового опору корпусу плуга на пружній підвісці характеризуються однорідним низькочастотним спектром дисперсії з частотою зрізу до $5,02 \text{ с}^{-1}$. У випадку жорстко закріпленого корпусу плуга (рис. 4.9) процес зміни тягового опору має різнорідний низькочастотний спектр дисперсії з частотою зрізу до $0,08 \text{ с}^{-1}$. Коливання поздовжньої твердості ґрунту демонструють порівняно однорідний низькочастотний спектр дисперсії з частотою зрізу до $4,4 \text{ с}^{-1}$.

Порівняння частот, що відповідають максимуму спектральної щільності пружно закріпленого корпусу плуга та частоті поздовжньої твердості ґрунту, показало, що вони знаходяться в межах $0,942\text{--}1,57 \text{ с}^{-1}$. Це свідчить про збіг частоти зовнішнього впливу з власною частотою коливальної системи, що вказує на роботу у режимі резонансу або режимі биття.

перефразувати

Оцінку кореляційного зв'язку між двома процесами розраховуємо за формулою:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{m}_x)(y_i - \bar{m}_y)}{(N-1) \cdot \bar{\sigma}_x \cdot \bar{\sigma}_y} \quad (4.10)$$

де x_i, y_i - поточні значення тягового опору $x(t_i)$ і опір ґрунту $y(t_i)$;

m_x, m_y - математичне очікування процесів $x(t_i)$ і $y(t_i)$;

σ_x, σ_y - середньоквадратичне відхилення процесів $x(t_i)$ і $y(t_i)$.

Після розрахунків отримуємо значення коефіцієнта кореляції $\rho_{xy} = 0,86$, відповідно ступінь ідентичності моделі $\xi = 0,74$. Це говорить про те, що для вирішення поставлених задач динаміки достатньо врахувати один вхідний фактор – опір ґрунту, який з високим ступенем ідентичності впливає на вхідну змінну – тяговий опір корпусу плуга на пружній підвісці.

Для визначення адекватності моделі, при великій вибірці замірів застосовуємо критерій Пірсона.

Значення частот по експериментальним і теоретичним даним приведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Значення частот по експериментальним і теоретичним даним

$y_{\varepsilon i}$	0,001	0,002	0,007	0,009	0,012	0,010	0,006	0,003	0,001
y_{Ti}	0,000001	0,00013	0,0014	0,0072	0,016	0,016	0,0072	0,0014	0,00013

Визначаємо критерій згоди $\chi^2 = 0.25$. По кількості рядів $m = 9$, ступенів вільності $q = 7$, визначаємо табличне значення критерію згоди $P(0,25; 7)$. Отримуємо значення $\chi^2 = 0.994$. Оскільки табличне значення критерію згоди більше рівня впливу ($0,994 > 0,1$), адекватність задовольняється.

Висновки

Доведено, що при апроксимації спектральних щільностей вхідного впливу дробно-раціональними функціями частоти зовнішню дію можна інтерпретувати як результат пропускання процесу типу «білий шум» через формуючий фільтр першого порядку з постійними параметрами.

Встановлено значення коефіцієнтів кореляційного зв'язку, які значною мірою визначаються фізико-механічними властивостями ґрунту та швидкістю оранки.

Показано, що процес взаємодії корпусу плуга на пружній підвісці з ґрунтом має нелінійний характер, оскільки експериментально визначена ступінь його нелінійності свідчить про відхилення від лінійної моделі.

Визначено коефіцієнти диференційного рівняння системи: коефіцієнт дисипації складає 0,084, а коефіцієнт жорсткості дорівнює $0,173 \cdot 10^{-3}$.

Підтверджено, що динаміку взаємодії корпусу плуга з ґрунтом можна описати за допомогою нелінійного стохастичного диференційного рівняння з випадковим зовнішнім збудженням.

Визначено оптимальні параметри жорсткості пружного елемента для ґрунтів із твердостями від 0,98 до 7,84 МПа та швидкостей руху агрегату від 1,25 до 2,25 м/с, що дозволяє підбирати пружину необхідної жорсткості для заданих умов експлуатації.

Апробація результатів моделювання, виконана для рекомендованих параметрів роботи плуга при швидкості 2 м/с із циліндричною пружиною постійної жорсткості $C = 240 \cdot 10^3$ Н/м та конічною пружиною змінної жорсткості, підтвердила адекватність математичної моделі досліджуваного об'єкта. При оптимальній жорсткості пружного елемента тяговий опір пружно закріпленого корпусу плуга на 12–15 % нижчий, ніж у жорстко закріпленого корпусу. Адекватність моделі підтверджена критерієм Пірсона, оскільки табличне значення критерію перевищує рівень значимості.

Кількісна оцінка ідентичності моделі показала, що ступінь її відповідності дає право враховувати як основний фактор лише опір ґрунту, який визначає більшість впливу на тяговий опір корпусу плуга.

5 ОСНОВНІ ВИМОГИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ ОРАНКИ

Оранка є однією з основних і найбільш енергоємних операцій у технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур. Її виконання пов'язане з використанням потужних тракторів, складних ґрунтообробних агрегатів, високими навантаженнями на механізми та значним впливом шкідливих виробничих факторів на працівників. Тому дотримання правил охорони праці та техніки безпеки під час проведення оранки є обов'язковою умовою безпечної експлуатації техніки, збереження життя і здоров'я механізаторів, а також підвищення ефективності виробничого процесу.

Сучасна система охорони праці при виконанні польових робіт базується на положеннях Закону України “Про охорону праці”, Правил охорони праці у сільськогосподарському виробництві, Правил дорожнього руху України, ДСТУ та галузевих стандартів безпечної експлуатації техніки. Дотримання цих норм забезпечує створення безпечних умов праці, запобігає виникненню аварійних ситуацій, нещасних випадків і професійних захворювань.

1. Загальні вимоги безпеки під час підготовки до оранки

Перед початком оранки працівники повинні пройти інструктаж з охорони праці, перевірку знань правил безпечної експлуатації тракторів і плугів, а також пройти медичний огляд. До виконання оранки допускаються лише особи, які досягли 18-річного віку, мають відповідну кваліфікацію та посвідчення тракториста-машиніста.

Перед виїздом у поле механізатор зобов'язаний провести ретельний технічний огляд агрегату:

- перевірити справність гальм, рульового керування, зчпного пристрою, освітлювальних приладів;
- переконатися у герметичності паливної, мастильної та гідравлічної систем;

- перевірити тиск у шинах, наявність захисних кожухів на обертових валах, карданах, ремінних передачах;
- перевірити справність сигнальних пристроїв, дзеркал заднього виду, аптечки та вогнегасника.

Особливу увагу слід приділити регулюванню плуга — він має бути надійно приєднаний до трактора, всі з'єднання мають бути законтрені, а робочі органи – правильно виставлені за глибиною і кутом атаки. Забороняється виконувати будь-які регульовальні або ремонтні роботи при працюючому двигуні чи піднятих робочих органах без упорів.

Перед початком роботи керівник підрозділу проводить інструктаж на робочому місці, де уточнюються:

- технологічна схема руху агрегату;
- порядок виїзду, розворотів і зупинок;
- межі ділянки;
- можливі небезпечні зони (канави, лінії електропередач, кам'янисті ділянки тощо).

2. Вимоги безпеки під час руху та виконання оранки

Робота агрегату на полі повинна здійснюватися у суворій відповідності до технологічної карти та інструкцій з експлуатації машин. Основні вимоги безпеки включають:

- Рух агрегату.

Тракторист повинен забезпечувати рівномірну швидкість руху, уникати різких поворотів, гальмувань і розворотів на схилах. Під час руху по нерівному рельєфу заборонено з'їжджати під кутом, що перевищує допустимий для конкретної моделі трактора (як правило, 8–12° для колісних і до 15° для гусеничних).

- Розвороти на краях поля.

Виконуються тільки після повного підняття плуга у транспортне положення. Повороти при заглиблених корпусах неприпустимі, оскільки це

може призвести до поломки механізмів, викидання частин ґрунту, розриву зчіпних вузлів.

- Безпечна відстань між агрегатами.

Відстань між одночасно працюючими тракторами на паралельних гонах має становити не менше 30–50 м, щоб уникнути зіткнень або закидання грудок ґрунту в бік іншого агрегату.

- Робота на схилах.

При оранці схилів агрегат рухається тільки вздовж горизонталей (уперек схилу). Заборонено рух униз або вгору при заглиблених робочих органах. Розвороти дозволено лише на рівних площадках.

- Погодні умови.

Не дозволяється виконувати оранку під час туману, зливи, ожеледиці чи сильної запиленості, коли видимість менша ніж 50 м. Робота вночі допускається лише за умови справного освітлення та наявності світловідбивних елементів на агрегаті.

- Перевезення людей.

Категорично заборонено перевозити людей на тракторі, плузі, крилах чи причепах, не призначених для цього. У кабіні трактора може перебувати лише тракторист.

3. Безпечна експлуатація плугів та знарядь

Плуги й агрегати для оранки становлять підвищену небезпеку через наявність обертових і ріжучих елементів. Тому під час їх експлуатації необхідно дотримуватися таких правил:

- усі робочі органи повинні мати захисні кожухи або огороження;
- заборонено очищати робочі органи від ґрунту або рослинних решток руками чи ногами при працюючому агрегаті;
- під час підйому або опускання плуга тракторист має впевнитися у відсутності людей поблизу;
- при зупинці двигуна робочі органи мають бути опущені на землю;

- регулювальні роботи проводяться лише після повної зупинки двигуна і вимикання передачі;
- у разі поломки механізатор повинен негайно зупинити агрегат і повідомити керівника робіт.

Особливу увагу необхідно звертати на надійність зчеплення плуга з трактором, оскільки розрив зчіпного пристрою під час руху може призвести до перекидання або травмування. Перед початком оранки необхідно перевірити затяжку болтів, шплінтів, пальців і ланцюгів.

4. Організація робочого місця тракториста

Робоче місце тракториста має бути обладнане з урахуванням ергономічних вимог. Сидіння повинно регулюватися по висоті та відстані, мати пружну підвіску для зменшення вібрацій. У кабіні не допускається накопичення пилу, палива або мастил. Скло має бути чистим, а вентиляція — справною.

Під час роботи тракторист повинен використовувати засоби індивідуального захисту:

- спецодяг (комбінезон, куртку, штани);
- захисне взуття з металевим носком;
- рукавиці;
- головний убір або каску при роботі поза кабіною;
- при значному рівні шуму – протишумні навушники.

Під час тривалої роботи необхідно дотримуватись режиму праці та відпочинку. Тривалість безперервної роботи не повинна перевищувати 2–3 годин, після чого необхідна перерва не менше 10–15 хвилин. У спекотну погоду слід забезпечити доступ питної води.

5. Вимоги безпеки після закінчення оранки

Після завершення робіт тракторист повинен:

- очистити плуг і трактор від ґрунту, рослинних решток, не використовуючи для цього руки при працюючому двигуні;
- перевірити стан кріплень, змастити необхідні вузли;

- встановити агрегат на рівному майданчику, загальмувати трактор, вимкнути передачу, вимкнути акумулятор;
- здати техніку на стоянку відповідно до вимог інструкції з експлуатації;
- повідомити керівника про всі виявлені несправності.

Вогнебезпечні матеріали, мастила та паливо слід зберігати у спеціально відведених місцях, подалі від джерел відкритого вогню. Паливні баки повинні бути щільно закриті, а залишки паливно-мастильних матеріалів – здані на склад.

6. Пожежна безпека під час оранки

Під час виконання оранки існує ризик виникнення пожежі через перегрів двигуна, витіки палива або іскри з вихлопної системи. Для запобігання пожежам необхідно:

- підтримувати чистоту двигуна і агрегату, регулярно очищати його від залишків соломи, мастила, пилу;
- мати справний вогнегасник, бажано порошковий;
- не палити поблизу паливних баків і не використовувати відкритий вогонь для перевірки герметичності;
- при заправці двигуна забороняється працювати при ввімкненому двигуні;
- не залишати агрегат із працюючим двигуном без нагляду.

У разі виникнення займання тракторист зобов'язаний негайно вимкнути двигун, скористатися вогнегасником або засипати осередок пожежі ґрунтом.

7. Додаткові вимоги безпеки в особливих умовах

- При оранці в умовах обмеженої видимості, поблизу доріг або ліній електропередач трактор повинен мати справні проблискові маячки.
- Забороняється наближатися до ліній електропередач ближче ніж на 30 м при роботі із піднятими робочими органами.

- При роботі на заболочених або вологих ґрунтах необхідно використовувати гусеничні трактори чи колісні з системою зниження тиску в шинах.

- У разі виявлення предметів, схожих на вибухонебезпечні, роботу слід негайно припинити та повідомити відповідні служби.

8. Вимоги екологічної безпеки

Під час оранки необхідно дотримуватися заходів щодо охорони навколишнього середовища: уникати втрат палива і мастил, не допускати їх потрапляння у ґрунт; не допускати знищення межових смуг, полезахисних лісосмуг, водоохоронних зон; застосовувати раціональні глибини оранки, щоб не призводити до ерозії ґрунту; не залишати на полі відходів технічного обслуговування (фільтри, мастила, тара тощо).

Висновки

Дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки при виконанні оранки є ключовим чинником стабільного функціонування аграрного виробництва. Безпечна організація праці сприяє зниженню виробничого травматизму, продовженню строку служби техніки та підвищенню продуктивності праці механізаторів.

Ефективна профілактика травматизму забезпечується комплексним підходом: систематичним навчанням працівників, постійним технічним контролем стану машин, дотриманням правил експлуатації, належним рівнем медичного та побутового обслуговування.

Впровадження сучасних засобів безпеки, автоматизованого контролю та систем моніторингу технічного стану агрегатів дозволяє знизити ризики виникнення аварійних ситуацій і гарантує дотримання високих стандартів охорони праці на сільськогосподарських підприємствах.

6. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКОНОМІЧНА

Основний обробіток ґрунту є однією з ключових агротехнічних операцій у сільському господарстві, що впливає на структуру ґрунту, його водо- та повітропроникність, збереження вологи, знищення бур'янів та підготовку ґрунту під посів культур. В умовах сучасного господарства, яке прагне до підвищення продуктивності та зниження витрат, особливо важливим є економічне обґрунтування застосування механізованих засобів обробітку, таких як плуги різних конструкцій.

Плуг - базовий агрегат для основного обробітку, здатний формувати борозни, перемішувати поверхневий шар ґрунту, подрібнювати рослинні рештки та покращувати фізичні властивості ґрунту. Вибір типу плуга, глибини оранки та способу агрегування з трактором визначає продуктивність роботи, витрати палива та енергії, а також довговічність техніки.

Економічна ефективність застосування плуга оцінюється як співвідношення витрат на виконання роботи та результату у вигляді обробленої площі, продуктивності культури та збереження родючості ґрунту. Розуміння цих показників дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору техніки, організації робіт та планування ресурсів.

Метою цього розділу є оцінювання економічної ефективності основного обробітку ґрунту плугом, аналіз факторів, що впливають на продуктивність та витрати, а також визначення окупності капітальних вкладень і рівня рентабельності при застосуванні механізованих технологій.

Економічна ефективність основного обробітку ґрунту визначається співвідношенням витрат на проведення робіт та отриманого результату. Вона формується під впливом низки факторів:

Тип плуга та його конструкція: одно- чи багатокорпусний, оборотний, прямої дії або плуг-рыхлювач. Кожний тип характеризується своєю продуктивністю, глибиною обробітку та витратою енергії.

Продуктивність агрегату, га/год або га/зміну, що визначається робочою шириною, швидкістю руху та ефективністю використання техніки.

Витрати палива та енергії на одиницю площі, кВт·год/га або л/га.

Заробітна плата оператора та супутніх робітників, що обслуговують агрегат.

Вартість техніки та амортизаційні відрахування.

Витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Вплив на родючість ґрунту та довгострокові економічні наслідки збереження продуктивності культур.

Економічна ефективність може оцінюватися за двома основними напрямками:

Прямий економічний ефект - зниження собівартості обробітку 1 га ґрунту за рахунок підвищення продуктивності та зменшення витрат палива й праці.

Комплексний ефект - врахування непрямих вигод, таких як підвищення врожайності культур, збереження родючості ґрунту, зниження зносу техніки та зменшення втрат від бур'янів.

Ефективність можна підвищити через оптимізацію глибини обробітку, швидкості руху, кількості проходів та агрегування з відповідною тяговою силою трактора. Зменшення витрат на одиницю площі досягається при правильному поєднанні конструктивних параметрів плуга з технічними характеристиками трактора.

Для оцінки економічної ефективності основного обробітку ґрунту використовують класичні економіко-технічні показники:

Собівартість обробітку 1 га

Собівартість визначається за формулою:

$$C = S_{p1} + V_{p1} \cdot C, \quad (6.1)$$

де:

C - собівартість обробітку 1 га, грн/га;

Вріч - річні експлуатаційні витрати, грн;

Сріч - річна площа обробітку, га.

$$Вріч=Вп+Взп+Вам+ВТО \quad (6.2)$$

де:

Вп - витрати на паливо;

Взп- заробітна плата оператора;

Вам - амортизація плуга та трактора;

ВТО - технічне обслуговування та ремонт.

Річний економічний ефект. Економічний ефект від застосування плуга визначають як різницю витрат між базовим та новим способом обробітку:

$$Еріч=(Сб-Сн) \cdot Сріч \quad (6.3)$$

де:

Сб - собівартість базового способу;

Сн - собівартість обробітку плугом.

Термін окупності

$$Токуп=Еріч/К$$

Де

К - капітальні вкладення у придбання плуга та агрегування з трактором.

Рівень рентабельності

$$R=КЕріч \cdot 100\%. \quad (6.4)$$

Для повної оцінки економічної ефективності враховують:

- зміни врожайності культур;
- зменшення втрат ґрунту та родючості;
- зниження затрат на ручну працю та додаткові операції (внесення добрив, боротьба з бур'янами).
-

Продуктивність: 1,2 га/год;

Тривалість роботи в сезон: 250 год;

Площа обробітку за сезон:

$$S_{річ}=1,2 \cdot 250=300 \text{ га.}$$

Потужність трактора: 110 кВт;

Витрати палива: 15 л/га;

Ціна дизпалива: 62 грн/л;

Заробітна плата оператора: 22 000 грн/міс, сезон 3 міс;

Вартість плуга: 420 000 грн;

Амортизація трактора та плуга: 10 %;

ТО та ремонт: 5 % від вартості машини;

Собівартість обробітку традиційним методом: 1,1 т/га трудомісткості + 20 л/га пального.

Розрахунок витрат на сезон

Паливо

$$V_{п}=15 \cdot 300 \cdot 62=279000 \text{ грн.}$$

Заробітна плата

$$V_{зп}=22000 \cdot 3=66000 \text{ грн.}$$

Амортизація

$$V_{ам}=(420000+1200000) \cdot 0.10=162000 \text{ грн(трактор + плуг)}$$

ТО та ремонт

$$V_{то}=0.05 \cdot (420000+1200000)=81000 \text{ грн.}$$

Разом витрати

$$Вріч=279000+66000+162000+81000=588000 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект

$$Еріч=(2,500-1,960) \cdot 300=162000 \text{ грн.}$$

Термін окупності та рентабельність

Капітальні вкладення:

$$К=420000+1200000=1620000 \text{ грн.}$$

$$R=10\%.$$

Висновки

Застосування сучасного плуга у механізованому основному обробітку ґрунту є ефективним з точки зору економіки, технології та збереження родючості ґрунту. Це забезпечує підвищення рентабельності виробництва та стабільність урожайності у середньо- та довгостроковій перспективі.

Проведене дослідження підтверджує доцільність впровадження сучасних плугів у технологію основного обробітку ґрунту. Економічна доцільність: використання 4-корпусного оборотного плуга дозволяє знизити витрати на 1 га на 20–25 % та отримати прямий економічний ефект понад 160 тис. грн/сезон. Технічна ефективність: сучасні плуги забезпечують більшу продуктивність при однакових енергетичних витратах, зменшують трудомісткість робіт та витрати пального. Комплексний ефект: оптимальна обробка ґрунту покращує водо- та повітропроникність, сприяє збереженню вологи, підвищує врожайність культур на 3–5 %, що є додатковим джерелом доходу. Вплив на організацію виробництва: скорочується час виконання технологічного циклу, зменшується зношення трактора та плуга, підвищується логістична ефективність.

Термін окупності: для середніх господарств - 10 років, для - 6–7 років, що робить впровадження плуга економічно обґрунтованим.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Моделювання ґрунтообробних машин є невід'ємним етапом їх проєктування і вдосконалення. Використання теоретичних, математичних, комп'ютерних та експериментальних методів забезпечує комплексний підхід до вивчення процесу взаємодії робочих органів з ґрунтом. Сучасні моделі дозволяють визначати оптимальні режими роботи, прогнозувати продуктивність та енергетичну ефективність, скорочувати обсяги випробувань та прискорювати створення нових видів ґрунтообробної техніки. Перспективним напрямом є інтеграція цифрових технологій, штучного інтелекту та дискретно-елементного моделювання для створення точних цифрових прототипів машин.

2. Методика імітаційного моделювання корпусу плуга на пружній підвісці дозволяє комплексно оцінити динамічну взаємодію робочого органу з ґрунтовим середовищем, визначити величини змінних сил опору й оптимізувати конструкцію підвіски. Такий підхід значно скорочує потребу в польових випробуваннях, підвищує точність прогнозів і сприяє створенню плужних конструкцій нового покоління з покращеними енергетичними та експлуатаційними характеристиками. Сформовано формалізований опис процесу взаємодії плужного корпусу, встановленого на пружній підвісці, з ґрунтовим середовищем, у якому враховано нелінійні властивості еластичного елемента, стохастичний характер зовнішнього впливу, а також динамічні, кінематичні та технологічні параметри функціонування системи.

Створено підхід до побудови математичної моделі коливань системи «корпус плуга – ґрунт» на основі методів ідентифікації. Тип системи – автоколивальна, система з випадковим зовнішнім збуренням або система з випадковою параметричною дією – визначається шляхом статистичного аналізу експериментальних даних. Розроблено методику опису вхідного збурення у вигляді ґрунтового опору, який інтерпретується як результат пропускання випадкового процесу типу «білий шум» через лінійну систему зі

сталими параметрами. Як формуючий фільтр пропонується використовувати математичну модель, параметри якої обирають на основі випробувань у реальних умовах роботи, коли корпус плуга зазнає природних збурень.

Для визначення оптимальних характеристик пружної підвіски, що зводиться до встановлення таких коефіцієнтів диференціального рівняння силової взаємодії, за яких мінімізується тяговий опір робочого органу, запропоновано використовувати як цільову функцію максимальне значення спектральної щільності тягового опору плужного корпусу. Створено методику імітаційного моделювання коливальної системи «корпус плуга на пружній підвісці – ґрунт», що передбачає виконання статистичних комп'ютерних експериментів, які відтворюють роботу системи під дією випадкових чинників. Це дозволяє у широкому діапазоні змінювати параметри та режими роботи плуга й, відповідно до обраного критерію оптимізації, визначати раціональні режими функціонування для ґрунтів різної щільності.

3. Проведення систематичних польових випробувань дозволяє отримати достовірні дані про динамічні навантаження, якість обробітку ґрунту та енергетичні характеристики, що є основою для вдосконалення конструкції плуга та підвищення його ефективності в виробничих умовах.

Сформовано методику та програму експериментального дослідження корпусу плуга на пружній підвісці в умовах стандартного функціонування, що включає отримання реалізацій випадкових процесів на вході та виході динамічної системи з подальшим статистичним аналізом досліджуваних процесів. Рекомендовано визначати тяговий опір плужного корпусу за допомогою тензометричної стійки, яка фіксує згинальний момент, пропорційний горизонтальній складовій тягового опору. Пропонується оцінювати опір ґрунту за допомогою пристрою для безперервного вимірювання поздовжньої твердості ґрунту. Розроблено методику та програму лабораторного експерименту для визначення коефіцієнтів дисипації та квазіпружних коефіцієнтів у рівнянні руху корпусу плуга.

4. Доведено, що при апроксимації спектральних щільностей вхідного впливу дробно-раціональними функціями частоти зовнішню дію можна інтерпретувати як результат пропускання процесу типу «білий шум» через формуючий фільтр першого порядку з постійними параметрами. Встановлено значення коефіцієнтів кореляційного зв'язку, які значною мірою визначаються фізико-механічними властивостями ґрунту та швидкістю оранки. Показано, що процес взаємодії корпусу плуга на пружній підвісці з ґрунтом має нелінійний характер, оскільки експериментально визначена ступінь його нелінійності свідчить про відхилення від лінійної моделі. Визначено коефіцієнти диференційного рівняння системи: коефіцієнт дисипації складає 0,084, а коефіцієнт жорсткості дорівнює $0,173 \cdot 10^{-3}$. Підтверджено, що динаміку взаємодії корпусу плуга з ґрунтом можна описати за допомогою нелінійного стохастичного диференційного рівняння з випадковим зовнішнім збудженням.

Визначено оптимальні параметри жорсткості пружного елемента для ґрунтів із твердостями від 0,98 до 7,84 МПа та швидкостей руху агрегату від 1,25 до 2,25 м/с, що дозволяє підбирати пружину необхідної жорсткості для заданих умов експлуатації.

Апробація результатів моделювання, виконана для рекомендованих параметрів роботи плуга при швидкості 2 м/с із циліндричною пружиною постійної жорсткості $C = 240 \cdot 10^3$ Н/м та конічною пружиною змінної жорсткості, підтвердила адекватність математичної моделі досліджуваного об'єкта. При оптимальній жорсткості пружного елемента тяговий опір пружно закріпленого корпусу плуга на 12–15 % нижчий, ніж у жорстко закріпленого корпусу. Адекватність моделі підтверджена критерієм Пірсона, оскільки табличне значення критерію перевищує рівень значимості.

Кількісна оцінка ідентичності моделі показала, що ступінь її відповідності дає право враховувати як основний фактор лише опір ґрунту, який визначає більшість впливу на тяговий опір корпусу плуга.

5. Дотримання вимог охорони праці та техніки безпеки при виконанні оранки є ключовим чинником стабільного функціонування аграрного виробництва. Безпечна організація праці сприяє зниженню виробничого травматизму, продовженню строку служби техніки та підвищенню продуктивності праці механізаторів. Ефективна профілактика травматизму забезпечується комплексним підходом: систематичним навчанням працівників, постійним технічним контролем стану машин, дотриманням правил експлуатації, належним рівнем медичного та побутового обслуговування. Впровадження сучасних засобів безпеки, автоматизованого контролю та систем моніторингу технічного стану агрегатів дозволяє знизити ризики виникнення аварійних ситуацій і гарантує дотримання високих стандартів охорони праці на сільськогосподарських підприємствах.

6. Застосування сучасного плуга у механізованому основному обробітку ґрунту є ефективним з точки зору економіки, технології та збереження родючості ґрунту. Це забезпечує підвищення рентабельності виробництва та стабільність урожайності у середньо- та довгостроковій перспективі. Проведене дослідження підтверджує доцільність впровадження сучасних плугів у технологію основного обробітку ґрунту. Економічна доцільність: використання 4-корпусного оборотного плуга дозволяє знизити витрати на 1 га на 20–25 % та отримати прямий економічний ефект понад 160 тис. грн/сезон. Технічна ефективність: сучасні плуги забезпечують більшу продуктивність при однакових енергетичних витратах, зменшують трудомісткість робіт та витрати пального. Комплексний ефект: оптимальна обробка ґрунту покращує водо- та повітропроникність, сприяє збереженню вологи, підвищує врожайність культур на 3–5 %, що є додатковим джерелом доходу. Вплив на організацію виробництва: скорочується час виконання технологічного циклу, зменшується зношення трактора та плуга, підвищується логістична ефективність. Термін окупності: для середніх господарств - 10 років, для - 6–7 років, що робить впровадження плуга економічно обґрунтованим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адамчук, В. В., Рудик, І. І. Основний та поверхневий обробіток ґрунту. -Київ: Аграрна наука, 2018. 256 с.
2. Баха, С. М., Каленська, С. М. Технології обробітку ґрунту в сучасному землеробстві. -Харків: Магістр, 2017. 212 с.
3. Барановський, В. І. Системи та знаряддя для основного обробітку ґрунту. -Київ: Урожай, 2015. 284 с.
4. Бойко, О. І., Ковальов, О. М. Землеробство: технології обробітку ґрунту та догляд за посівами. -Полтава: ПДАА, 2020. 340 с.
5. Векленко, Ю. А., Шемет, Н. О. Ефективність мінімального обробітку ґрунту в умовах України. -Дніпро: ДДАЕУ, 2019. 158 с.
6. Глухов, В. М. Технології ґрунтообробітку: класичні та ресурсозберігаючі. -Київ: НУБіП, 2014. 296 с.
7. Грицаєнко, З. М., Карпук, Л. С. Ґрунтозахисні системи землеробства. -Київ: Центр учбової літератури, 2013. 244 с.
8. Дегодюк, Е. Г., Малік, М. Й. Основи інтенсивного землеробства. -Київ: Аграрна освіта, 2016. 200 с.
9. Євтушенко, О. П. Механізація основного та передпосівного обробітку ґрунту. -Полтава: Астрєя, 2021. 180 с.
10. Іваненко, П. І. Сучасні комбіновані ґрунтообробні агрегати. -Харків: ХНАУ, 2018. 132 с.
11. Кардаш, В. М. Обробіток ґрунту в системі адаптивного землеробства. -Вінниця: Нілан-ЛТД, 2017. 220 с.
12. Кириченко, В. В. Енергозберігаючі технології основного обробітку ґрунту. -Одеса: ОДАУ, 2016. 150 с.
13. Коваленко, Л. П., Дьяків, В. С. Вплив системи обробітку ґрунту на родючість чорноземів. -Харків: Міська друкарня, 2014. 176 с.
14. Кушнір, В. М. Виробнича ефективність оранки та безполицевого обробітку. -Львів: ЛНАУ, 2020. 145 с.

15. Лобода, В. О. Техніка для глибокого та чизельного обробітку ґрунту. -Київ: Аграрна наука, 2021. 164 с.
16. Мазур, Т. В. Ґрунтообробні машини: конструкції, теорія, практика. - Київ: АграрМедіа, 2019. 218 с.
17. Мірошниченко, О. І. Ресурсозбереження в обробітку ґрунту: досвід та перспективи. -Дніпро: НГУ, 2016. 190 с.
18. Писаренко, П. В., Писаренко, В. М. Системи обробітку ґрунту в агроландшафтах України. -Полтава: ПДАУ, 2015. 208 с.
19. Романенко, В. А. Ґрунтозахисний обробіток: біологічні та технічні аспекти. -Черкаси: ЧДТУ, 2018. 140 с.
20. Шевченко, М. С. Мульчувальний та нульовий обробіток як елемент сталого землеробства. -Київ: Центр учбової літератури, 2021. 172 с.

ДОДАТКИ

Умови проведення експерименту

Агрофон		Люцерна
Твердість ґрунту, МПа, на глибині	0-10 см	5,50
	10-20 см	5,584
	20-30 см	5,719
Щільність ґрунту, г/см ³ , на глибині	0-10 см	1,42
	10-20 см	1,39
	20-30 см	1,36
Вологість ґрунту, % на глибині	0-10 см	15,1
	10-20 см	15,9
	20-30 см	14,9

Твердість ґрунту на глибині 20 см, що виміряна твердоміром статичної дії

Статистичний параметр	Позначення	Значення
Середнє арифметичне, МПа	\bar{R}	5,719
Середнє квадратичне, МПа	σ_R	0,71
Похибка середнього арифметичного, МПа	$\square \bar{R}$	0,1
Точність дослід, %	P	3,3%
Коефіцієнт варіації, %	Y	12,4%