

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – МКР.2223 «С» 2023.12.07.51 ПЗ**

**Власенко Аркадій Андрійович**

**2024**

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – МКР.2223 «С» 2023.12.07.51 ПЗ**

**Власенко Аркадій Андрійович**

**2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 629.35.042.2

ПОГОДЖЕНО  
Декан факультету (Директор ННІ)  
механіко – технологічний факультет  
(назва факультету (ННІ))

\_\_\_\_\_  
(підпис) Братішко В.В.  
" " \_\_\_\_\_ 2024 р.  
(ПІБ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
тракторів і автомобілів  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Калінін Є.І.  
" " \_\_\_\_\_ 2024 р.  
(ПІБ)

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Вдосконалення підвіски сидіння сільськогосподарського колісного  
трактора»

Спеціальність \_\_\_\_\_ 208 «Агроінженерія»  
(код і назва)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Агроінженерія  
(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_ д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Братішко В.В. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник дипломного проекту бакалавра

\_\_\_\_\_ д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Степанов О.В. \_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

\_\_\_\_\_ Власенко Аркадій Андрійович \_\_\_\_\_  
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Тракторів і автомобілів

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ **Калінін Є.І.**

(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

**Власенко Аркадію Андрійовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_ **208 «Агроінженерія»**

(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Вдосконалення підвіски сидіння сільськогосподарського колісного трактора»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «07» грудня 2023р. №22223 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру: \_\_\_\_\_ **10.11.2024**

(рік, місяць, число)

**Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:** несучі системи тракторів (схеми, елементи); вимоги до ергономіки та безпеки роботи оператора; сучасні методи аналізу роботи підвіски тракторів

**Перелік питань які потрібно розробити** \_\_\_\_\_

Вступ. Аналіз методів вдосконалення підвіски сидіння трактора. Теоретичне обґрунтування методу вдосконалення підвіски сидіння. Оптимізація жорсткості, демпфування та покращення конструкції підвіски. Висновки.

**Перелік графічного матеріалу:** загальні принципи класифікації МТЗ; антропометричні схеми; посадкова схема (загальна); посадкова схема МТЗ (запропонована); визначення центру ваги компоновальних рішень МТЗ автомобільного типу; проєктні роботи (макетування та прототипування); проєктні роботи (аналіз поверхонь); висновки.

Дата видачі завдання «09» січня 2024 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра \_\_\_\_\_

( підпис )

**Степанов О.В.**

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

( підпис )

**Власенко А.А.**

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Основна частина кваліфікаційної роботи викладена на 68 сторінках і 15 слайдах презентації та ілюстрована 18 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Вдосконалення підвіски сидіння сільськогосподарського колісного трактора».

Об'єктом дослідження є підвіска сидіння сільськогосподарського колісного трактора.

Метою роботи є підвищення комфорту, безпеки та продуктивності роботи оператора.

В роботі проведено аналіз існуючих методів зменшення вібрацій на тракторних підвісках: Проаналізовано пасивні, напівактивні та активні системи підвіски, їхню ефективність, конструктивні особливості та обмеження. Розроблено теоретичну модель для оптимізації характеристик підвіски: За допомогою математичного моделювання обґрунтовано необхідність адаптивного контролю жорсткості та демпфування підвіски. Модель дозволяє враховувати частотний спектр коливань, а також налаштовувати підвіску для різних умов рельєфу, що було досягнуто завдяки застосуванню методів оптимізації (модель прогнозного управління). Порівняльний аналіз між стандартною та вдосконаленою підвісками підтвердив, що нова система значно знижує рівень вібрацій, що впливають на оператора, тим самим підвищуючи комфорт і безпеку під час роботи.

Ключові слова: підвіска сидіння, сільськогосподарський трактор, вібраційні навантаження, комфорт оператора, адаптивний контроль, оптимізація демпфування

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДВІСКИ СІДІННЯ ТРАКТОРА .....	8
1.1. Основні проблеми при розробці підвіски для сільськогосподарських тракторів.....	9
1.2. Існуючі конструктивні рішення та їх недоліки.....	18
1.3 Сучасні тенденції та перспективні підходи.....	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДВІСКИ СІДІННЯ.....	25
2.1. Визначення необхідних характеристик підвіски для польових умов.....	26
2.2. Використання багатокomпонентної моделі підвіски.....	37
2.3. Математичне моделювання системи підвіски .....	40
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ЖОРСТКОСТІ, ДЕМПФУВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСКИ .....	46
3.1. Експериментальна перевірка моделі.....	47
3.2. Моделювання системи підвіски сидіння трактора в ANSYS .....	54
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТКИ.....	69

## ВСТУП

Сільськогосподарські трактори є основними машинами для обробки ґрунту та догляду за посівами, і ефективність їх роботи безпосередньо впливає на продуктивність аграрного сектору. Однак у процесі виконання польових робіт трактори піддаються значним динамічним навантаженням, викликаним нерівностями рельєфу, що створює високий рівень вібрацій. Ці вібрації передаються на оператора, знижуючи його комфорт та продуктивність, а також створюючи ризики для здоров'я при тривалому впливі. За даними багатьох досліджень, вібраційні навантаження можуть спричинити втомлюваність, біль у спині та хронічні захворювання опорно-рухового апарату, що робить питання зниження вібрацій на сидінні оператора критично важливим для сучасної інженерії сільськогосподарських машин.

В останні роки значний прогрес у вдосконаленні підвіски тракторних сидінь досягнуто завдяки застосуванню різних технологій підвіски: пасивної, напівактивної та активної. Кожен тип підвіски має свої переваги та недоліки: пасивні системи є надійними та простими, але не завжди забезпечують необхідний рівень захисту від вібрацій; напівактивні системи мають здатність адаптуватися до змінних умов, але залежать від зовнішнього управління; активні підвіски пропонують найвищий рівень амортизації завдяки використанню сенсорних і керуючих систем, але є більш дорогими та енергоємними. Розробка таких систем підвищує надійність і комфорт експлуатації тракторів, а також покращує здоров'я операторів, знижуючи ризики впливу вібрацій.

Мета цього дослідження полягає у розробці і обґрунтуванні методу вдосконалення підвіски сидіння для сільськогосподарських тракторів з метою підвищення комфорту, безпеки та продуктивності роботи оператора. Дослідження буде спрямовано на вивчення ефективності різних типів підвісок (пасивної, напівактивної та активної) в умовах високих вібраційних навантажень, характерних для польових робіт.

Завдяки детальному аналізу, математичному моделюванню та експериментальному підтвердженню, це дослідження має на меті запропонувати оптимальну конструкцію підвіски, яка знижує рівень переданих вібрацій на водія та зменшує втомлюваність, тим самим сприяючи покращенню умов праці та загальному збільшенню ефективності роботи в сільському господарстві.

*Мета дослідження* – підвищення комфорту, безпеки та продуктивності роботи оператора.

*Об'єкт дослідження* – підвіска сидіння сільськогосподарського колісного трактора.

*Предмет дослідження* – методи вдосконалення підвіски сидіння, включаючи пасивні, напівактивні та активні системи, а також інженерні рішення для зменшення вібрацій, що передаються на оператора.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі *завдання*:

- 1) Вивчити та класифікувати різні типи підвісок (пасивні, напівактивні, активні), що використовуються у сільськогосподарських тракторах, зокрема їх конструктивні особливості, переваги та недоліки.
- 2) Розробити математичні моделі для оцінки рівня вібрацій, що передаються на сидіння трактора, та проаналізувати вплив різних підвісок на комфорт оператора в залежності від дорожніх умов.
- 3) Запропонувати конструктивні зміни або нові підходи до проектування підвісок, спрямовані на зменшення вібрацій і підвищення комфорту.
- 4) Провести лабораторні випробування для порівняння ефективності нових рішень з традиційними методами підвіски, оцінити рівень вібрацій та комфорту для оператора.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДВІСКИ СИДІННЯ ТРАКТОРА

Аналіз наявних досліджень показує, що підвіски тракторів зазнали значного вдосконалення за останні роки з метою зменшення вібрацій та підвищення комфорту оператора. Гідропневматична підвіска є одним з найпоширеніших методів, що забезпечує стабільність та знижує вертикальні коливання вібрацій, які передаються на кабінку трактора. Однак, хоча такі підвіски є ефективними для зменшення вібрацій під час руху по нерівних поверхнях, їхня ефективність у підтримці стабільності на високих швидкостях і складних ділянках обмежена [Enlai Zheng et al., 2019].

Зростає інтерес до активних та напівактивних систем підвіски, здатних адаптуватися до умов дорожнього покриття. Такі підвіски можуть автоматично регулювати жорсткість і демпфування залежно від швидкості руху та інших умов експлуатації. Це значно знижує вібрації та навантаження на оператора, а також покращує загальний комфорт під час експлуатації сільськогосподарської техніки [Ahn et al., 2023].

Гідропневматичні підвіски зазвичай використовуються для зменшення вібрацій, але існують і інші підходи. Наприклад, деякі дослідники запропонували використання пневматичних систем з активним контролем тиску для зменшення коливань на сидінні. В експериментальних умовах такі системи показали ефективність у зниженні вібрацій при різних швидкостях [Mattetti et al., 2019].

Інша стратегія вдосконалення підвісок полягає в комбінуванні традиційної підвіски з сучасними алгоритмами контролю, такими як лінійний квадратичний гауссовий контроль (ЛКГ). Використання таких алгоритмів дозволяє контролювати демпфування в реальному часі, забезпечуючи адаптацію підвіски до змін умов і зменшення рівня вібрацій до 50% [Ahn et al., 2023]. Це створює комфортніші умови для оператора та підвищує безпеку.

Поряд з цим, багатокритеріальна оптимізація також відіграє важливу роль у вдосконаленні підвіски. Використовуючи методи оптимізації, науковці можуть досягати оптимального поєднання демпфування, стабільності та стійкості при різних умовах експлуатації. Наприклад, метод багатокритеріальної оптимізації дозволяє створювати підвіски, які знижують рівень вібрацій та покращують стабільність руху тракторів на високих швидкостях [Zhang et al., 2022].

Впровадження нових матеріалів також є важливим аспектом для вдосконалення підвіски. Нові амортизуючі матеріали дозволяють створювати легші та більш стійкі до зношування підвіски, що робить їх більш довговічними та ефективними. Такі матеріали, як поліуретанові еластомери, часто використовуються в амортизуючих елементах, що знижує загальну вагу підвіски та покращує її здатність до поглинання вібрацій [Choi et al., 2020].

Деякі дослідники зосереджуються на вдосконаленні підвіски через інтеграцію пасивних і напівактивних елементів, що дозволяє досягти оптимального балансу між амортизацією та стабільністю. Такий підхід передбачає використання напівактивних амортизаторів, які можуть змінювати свої характеристики відповідно до умов руху, тим самим забезпечуючи більшу стабільність на нерівних поверхнях та комфорт для оператора [Zhang et al., 2022].

Важливо також враховувати зміну умов роботи сільськогосподарської техніки, яка працює на високих швидкостях і складних поверхнях. У зв'язку з цим адаптивні системи підвіски стають ключовими у забезпеченні безпеки та продуктивності сільськогосподарських машин, особливо при роботі в умовах підвищених навантажень на оператора та техніку [Mattetti et al., 2019].

### 1.1. Основні проблеми при розробці підвіски для сільськогосподарських тракторів

Розробка підвіски для сільськогосподарських тракторів є важливим аспектом забезпечення ефективності та надійності роботи техніки в різних

умовах. Однак цей процес має низку технічних та економічних проблем. Ось основні з них:

1. Висока вантажопідйомність і міцність конструкції: Сільськогосподарські трактори працюють в умовах, де необхідна висока вантажопідйомність та здатність витримувати значні навантаження. При цьому конструкція підвіски повинна бути досить міцною для забезпечення стабільності, але в той же час не занадто важкою, щоб не знижувати ефективність роботи та не збільшувати витрат пального.

2. Нерівні і важкі умови експлуатації: Трактори часто працюють на непідготовлених, болотистих або дуже нерівних поверхнях. Підвіска повинна поглинати удари, щоб мінімізувати вплив на інші компоненти машини та зменшити втому оператора.

3. Стійкість до корозії та зносу: Оскільки трактори експлуатуються в складних погодних умовах, з високою вологістю і агресивними хімічними речовинами (наприклад, добривами), матеріали підвіски повинні бути стійкими до корозії та зносу.

4. Мануальність та механічні навантаження: Трактори часто мають велику кількість зчіпок, що призводить до додаткових навантажень на підвіску. Зчеплення з ґрунтом та переміщення через важкі поля можуть створювати додаткові труднощі для системи підвіски.

5. Економічність та простота обслуговування: Підвіска повинна бути економічною в виробництві та обслуговуванні. Складні та дорогі компоненти підвищують загальну вартість тракторів, тому важливо знайти баланс між високою технологічністю і доступною ціною.

6. Вплив на комфорт оператора: Підвіска повинна знижувати вібрацію і удари, щоб поліпшити комфорт оператора. Це важливо, оскільки оператори часто проводять багато годин за кермом і великі механічні навантаження можуть впливати на їх ефективність і здоров'я.

7. Поглинання енергії та еластичність: Розробка підвіски, що забезпечує достатній рівень амортизації при мінімальних витратах енергії, є

складним завданням. Це вимагає балансу між механічною стійкістю і поглинанням ударів без шкоди для продуктивності.

8. Налаштування під різні умови роботи: Сільськогосподарські трактори можуть працювати в різних умовах — на полях з різним типом ґрунту, на дорогах, в горах тощо. Підвіска повинна бути адаптована до різних умов, забезпечуючи надійність у будь-якому середовищі.

Підвіска для сільськогосподарських тракторів повинна бути здатною витримувати значні навантаження, оскільки ці трактори часто працюють з важкими навісними та причіпними знаряддями. Наприклад, під час обробки ґрунту або транспортування вантажів, система підвіски піддається постійному тиску від важких компонентів, що можуть змінювати вагу в залежності від умов роботи. Збільшена вантажопідйомність сприяє стабільності трактора, але також потребує високої міцності конструкції. Це може включати використання посиленних матеріалів та додаткових елементів, які знижують ризик поломки.

Конструкція підвіски має бути досить міцною, щоб не дозволити змінювати геометрію або структуру трактора під впливом великих навантажень. Враховуючи різноманітні умови роботи, від рівних полів до важких доріг, підвіска повинна бути проєктована так, щоб забезпечити стабільність на будь-якій поверхні. При цьому необхідно врахувати не лише статичні навантаження, а й динамічні, які виникають під час руху трактора.

У той же час надмірне збільшення міцності може призвести до підвищення ваги компонента, що знизить ефективність використання пального. Так, наприклад, важка підвіска може спричинити більші витрати пального через збільшене тертя та інші втрати енергії. Це може також призвести до зниження маневреності машини, особливо на полях, де важливо досягти оптимальної швидкості обробки землі.

Не менш важливим є те, що надмірне зміцнення підвіски може збільшити витрати на її виготовлення. Використання дорогих матеріалів або складних технологій виготовлення не завжди є доцільним з економічної точки

зору. Це вимагає від інженерів пошуку оптимального балансу між міцністю, вагою та вартістю виготовлення.

Для досягнення оптимальних характеристик підвіски важливо також передбачити додаткові елементи для зниження навантажень на інші частини трактора. Наприклад, використання амортизаторів або пружин може допомогти зменшити механічний вплив на шасі, двигун та інші важливі компоненти. Однак це також збільшує складність конструкції.

Загалом, розробка підвіски з високою вантажопідйомністю вимагає ретельного планування та врахування багатьох факторів, таких як матеріали, конструктивні елементи, технології виготовлення та вартість. Це ключова проблема для забезпечення ефективності і надійності тракторів.

Сільськогосподарські трактори часто експлуатуються в складних умовах, таких як важкі дороги, нерівні та болотисті поля. Це створює значні труднощі для розробки підвіски, оскільки система повинна бути здатною ефективно поглинати удари і забезпечувати стабільність навіть на складних поверхнях. Наприклад, під час роботи на ґрунтах з низьким рівнем ущільнення трактор може стикатися з проблемами, такими як осідання чи пробуксовка, що вимагає від підвіски додаткових властивостей для зниження ефекту ударів.

Крім того, нерівності на полях можуть змусити трактор рухатись через різні перешкоди, такі як каміння, корчі або пні. У таких випадках підвіска повинна бути здатною зменшити ці удари, щоб мінімізувати знос не тільки самих підвісок, а й інших компонентів машини. Якщо система не здатна ефективно поглинати ці удари, це може призвести до поломок чи скорочення терміну служби трактора.

Оскільки сільськогосподарські трактори працюють у різноманітних кліматичних умовах, розробка підвіски повинна враховувати зміну температурних режимів та вологості. Це особливо важливо на болотистих або сирих ґрунтах, де постійна волога може викликати корозію та зниження міцності компонентів підвіски. В таких умовах використання антикорозійних

покриттів і спеціальних матеріалів, стійких до вологи та хімічних реагентів, стає важливим елементом розробки.

Аналогічно, під час роботи на важких ґрунтах трактор може зустрічати великі нерівності та навіть вибоїни, що призводять до значних механічних навантажень. Важливою характеристикою підвіски в таких умовах є її здатність зберігати стабільність трактора, не дозволяючи йому втрачати рівновагу або маневреність. Це дозволяє підтримувати точність роботи сільськогосподарських знарядь.

Також, в умовах сильної рельєфної зміни поверхні підвіска повинна мати можливість адаптуватися до різних типів ґрунтів та змінювати жорсткість для зниження впливу різних типів нерівностей. Сучасні системи активної підвіски можуть забезпечити подібні можливості, однак це додає складності конструкції та збільшує її вартість.

Таким чином, розробка підвіски для тракторів, що працюють в складних умовах, вимагає врахування великої кількості факторів, таких як тип ґрунту, кліматичні умови, механічні навантаження і вплив різних перешкод. Інженери повинні забезпечити ефективне поглинання ударів та стабільність машини на всіх етапах роботи.

Сільськогосподарські трактори часто працюють в умовах, де є підвищена вологість, різноманітні хімічні речовини (наприклад, добрива або пестициди) та інші агресивні фактори, які можуть призводити до корозії металевих частин. Корозія є однією з основних проблем, оскільки вона значно скорочує термін служби компонентів підвіски і може спричинити серйозні поломки або втрату ефективності роботи. Тому для запобігання корозії важливо вибирати матеріали, що мають високу стійкість до цих факторів.

Для досягнення високої стійкості до корозії використовуються різноманітні матеріали, такі як нержавіюча сталь, а також спеціальні покриття, що забезпечують захист від вологи та хімічних речовин. Проте це може збільшити витрати на виготовлення підвісок, що вимагає від виробників балансувати між економічністю та ефективністю. Використання

антикорозійних матеріалів також важливо для зниження витрат на обслуговування, оскільки зменшується необхідність частого ремонту або заміни пошкоджених частин.

Крім того, на знос компонентів підвіски також впливають різні фактори, зокрема інтенсивність використання трактора, тип ґрунту та частота обробки важких ділянок. Зношування елементів підвіски може призводити до зниження їх ефективності, що, в свою чергу, негативно впливає на керованість і комфорт оператора. Для боротьби з цим використовуються спеціальні сплави та матеріали, що мають підвищену зносостійкість, однак вони часто мають високу вартість.

Щоб знизити рівень зношування, можна використовувати додаткові системи мастила, які зменшують тертя між рухомими частинами підвіски. Це дозволяє знизити механічні навантаження та зменшити ризик поломки окремих елементів. Водночас важливо ретельно стежити за станом підвіски, оскільки навіть незначні дефекти можуть призвести до серйозних наслідків.

У результаті важливо не лише забезпечити стійкість підвіски до корозії та зносу, а й постійно вдосконалювати технології виготовлення і обслуговування для забезпечення довговічності тракторів. Це включає правильний вибір матеріалів, обробку поверхні та запровадження регулярного технічного обслуговування.

Під час роботи з сільськогосподарськими знаряддями трактор постійно піддається механічним навантаженням, зокрема від роботи з важким обладнанням, таким як плуги, культиватори чи сівалки. Ці знаряддя можуть змінювати свою вагу залежно від умов роботи, і підвіска повинна бути здатною адаптуватися до цих змін. Постійне навантаження може створювати додаткові проблеми для конструкції підвіски, оскільки це збільшує ймовірність її поломки.

При роботі з важкими механізмами трактор також має постійно маневрувати, що додатково підвищує навантаження на систему підвіски. Це може призвести до перегріву або надмірного зносу окремих елементів. Для

зниження цього ризику конструкція підвіски повинна включати систему амортизації, що здатна зменшити навантаження під час руху по нерівних ділянках.

Крім того, маневреність тракторів може бути обмежена через обмежену жорсткість підвіски, що не дозволяє точного регулювання висоти та кутів зчеплення з землею. Це може спричинити проблеми при роботі з точними сільськогосподарськими знаряддями, де важлива кожна деталь. Система підвіски повинна бути оптимізована для роботи з різними типами знарядь і забезпечувати точність виконання операцій.

Забезпечення стабільності роботи підвіски при високих механічних навантаженнях вимагає використання високоякісних матеріалів і інноваційних технологій. Вони повинні витримувати постійне навантаження без втрати своїх характеристик, що особливо важливо для забезпечення ефективної роботи трактора в умовах високої інтенсивності.

Також важливо враховувати, що тривале навантаження може негативно впливати на операторів, викликаючи втомленість і зниження концентрації. Для цього система підвіски повинна забезпечувати максимальний комфорт, знижуючи удари та вібрації, що дозволить оператору працювати протягом довгих годин без великого навантаження на здоров'я.

Однією з основних проблем при розробці підвіски для тракторів є забезпечення її економічності. Вартість виробництва компонентів підвіски безпосередньо впливає на загальну ціну трактора, що є важливим фактором для покупців. Висока ціна може зробити техніку менш привабливою для сільськогосподарських виробників, тому важливо знайти оптимальний баланс між якістю та витратами.

До того ж підвіска повинна бути легкою в обслуговуванні. Часті ремонти або заміна компонентів можуть значно підвищити експлуатаційні витрати. Оскільки трактори працюють в складних умовах, де є ризик поломок, для зменшення витрат на обслуговування та ремонт, необхідно передбачити простоту заміни деталей та доступ до всіх елементів підвіски.

У зв'язку з економічністю важливо також враховувати довговічність матеріалів. Використання матеріалів, які забезпечують тривалу експлуатацію без необхідності частих замін, дозволяє знижувати витрати на обслуговування. Однак такі матеріали часто мають високу початкову вартість, що вимагає від виробників правильно обирати між вигодами довгострокової експлуатації та початковими витратами.

Також підвіска повинна бути спроектована так, щоб зменшити вплив на паливні витрати. Складні та важкі компоненти можуть збільшувати загальну вагу трактора, що в свою чергу збільшить витрату пального. Тому важливо розробляти підвіски, які є не тільки міцними і ефективними, але й економічними в плані експлуатації.

Окрім того, підвіска повинна бути адаптована до різних видів сільськогосподарських робіт. Різноманітність умов експлуатації вимагає від системи підвіски здатності адаптуватися до різних типів обробки землі. Це може включати в себе зручну настройку жорсткості та іншого функціоналу для різних задач, що дозволяє зберігати ефективність при мінімальних витратах.

Враховуючи всі ці фактори, економічність і простота обслуговування підвіски є ключовими аспектами, які визначають її успіх на ринку.

## 1.2. Існуючі конструктивні рішення та їх недоліки

Пасивні підвіски — це найпростіший тип підвісних систем, що використовується в сільськогосподарських тракторах. Вони складаються з пружин (листових або спіральних) і демпферів, що знижують вібрації та удари, передані від коліс на кузов і сидіння оператора. Основною їх характеристикою є те, що всі компоненти системи мають сталу жорсткість і не змінюють свої характеристики в залежності від умов руху або рельєфу дороги. Тобто, елементи цієї підвіски не адаптуються до змінного навантаження чи коливань.

Конструктивні особливості пасивної підвіски:

1. Пружини — основним елементом пасивної підвіски є пружини, які забезпечують амортизацію коливань. Вони можуть бути листовими або спіральними. Листової тип часто використовується у більш важких машинах через свою витривалість та простоту конструкції, тоді як спіральні пружини забезпечують кращу стабільність на рівних поверхнях.

2. Демпфери — додатковим елементом є амортизатори, які зменшують відскок пружин та вловлюють енергію ударів. Вони можуть бути заповнені газом або маслом, що дозволяє знижувати рівень вібрацій. Демпфери в пасивних системах часто мають статичні характеристики і не можуть адаптуватися до зміни умов.

До переваг пасивних підвісок можна віднести:

- Низька вартість: Пасивні системи прості в виготовленні та не потребують складних електронних або гідравлічних компонентів, що робить їх економічно вигідними.

- Надійність: Завдяки простій конструкції пасивні підвіски мають високу надійність і довговічність. Вони не потребують складного обслуговування і можуть працювати в найскладніших умовах.

- Мінімальні вимоги до енергозабезпечення: Оскільки пасивні системи не потребують додаткових джерел енергії, вони зберігають ефективність без використання електричних чи гідравлічних насосів.

В якості недоліків пасивних підвісок виділяють наступне:

- Немає адаптивності: Однією з основних проблем пасивних підвісок є відсутність можливості адаптуватися до змінних умов. Це означає, що система не може налаштувати свою жорсткість або демпфування в залежності від рельєфу або швидкості, що може призводити до зниження комфорту оператора.

- Малий ефект при високих швидкостях та нерівних поверхнях: Під час руху по дуже нерівним поверхням або на високих швидкостях пасивні підвіски можуть не забезпечувати достатнього рівня комфорту і безпеки для оператора.

Це може призвести до зростання втомлюваності оператора і навіть до погіршення продуктивності роботи (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Аналіз основних типів підвісок

Тип підвіски	Ключові особливості	Переваги	Недоліки
Пасивна	Простий дизайн з пружинами і амортизаторами, не адаптується до умов дороги	Низька вартість, надійність, низькі витрати на обслуговування	Обмежений комфорт, немає адаптації до змінних умов
Напівактивна	Регульовані амортизатори з системою управління для адаптації в реальному часі	Покращений комфорт, адаптація до змінних умов, зменшення вібрацій	Вища вартість, складніше в обслуговуванні
Активна	Датчики та актуатори, що постійно змінюють характеристики підвіски в реальному часі	Найвищий рівень комфорту та стабільності, оптимальна ізоляція від вібрацій	Дуже висока вартість, великі енергетичні витрати, складне обслуговування

Напівактивні підвіски є більш складною системою, яка додає елемент адаптації до змінних умов. Вони використовують активні компоненти, такі як електричні або гідравлічні регулятори, для зміни жорсткості амортизаторів або пружин в залежності від умов дорожнього покриття.

Конструктивні особливості напівактивної підвіски:

1. Гідравлічні або електронні регулятори — напівактивна підвіска використовує системи, які можуть змінювати рівень демпфування у реальному часі. Це дозволяє адаптуватися до різних умов дороги, таких як глибокі ями чи слизькі ділянки.

2. Алгоритми управління — важливим елементом напівактивних підвісок є алгоритми управління, які автоматично налаштовують характеристики підвіски залежно від параметрів трактора та навколишніх умов. Для цього часто використовують моделі, такі як лінійно-квадратичний гауссів контроль (LQG), що дозволяє оптимізувати роботу підвіски.

Переваги напівактивних підвісок:

- Адаптивність: Напівактивні підвіски дозволяють динамічно змінювати характеристики демпфування в залежності від умов дороги, що значно покращує комфорт і безпеку оператора.

- Зниження вібрацій: За допомогою автоматичного налаштування амортизаторів можна значно знизити рівень вібрацій, що передаються на сидіння оператора, що є важливим для збереження здоров'я та підвищення продуктивності.

- Покращена стабільність на різних поверхнях: Напівактивні підвіски здатні адаптуватися до різних типів рельєфу, що робить трактор більш стабільним і зручним у використанні, особливо на нерівних або складних поверхнях.

Недоліки напівактивних підвісок:

- Вища вартість: Оскільки напівактивні підвіски вимагають використання додаткових регуляторів та складних алгоритмів управління, їх вартість значно вища за пасивні системи.

- Складність обслуговування: На відміну від пасивних підвісок, напівактивні системи потребують регулярного обслуговування для перевірки функціонування електронних або гідравлічних компонентів, що може збільшити витрати на утримання трактора (табл. 1.1).

Активні підвіски — це найрозвинутіші технології, що використовують високотехнологічні системи управління для активної зміни характеристик підвіски в реальному часі. Вони включають в себе датчики для визначення змін в умовах дорожнього покриття і відповідні системи керування, які можуть активувати амортизатори чи пружини для миттєвого зниження вібрацій.

Конструктивні особливості активної підвіски:

1. Інтеграція сенсорів і актуаторів — активні підвіски потребують встановлення сенсорів для моніторингу стану дороги та коливань машини. Ці дані передаються на систему управління, яка керує актуаторами, що можуть змінювати жорсткість і демпфування підвіски.

2. Електронні системи управління — основною характеристикою активних підвісок є використання комп'ютерних систем, які здійснюють постійну адаптацію підвіски на основі отриманих даних про дорогу. Ці системи часто використовують складні математичні моделі та алгоритми для оптимізації роботи підвіски.

Переваги активних підвісок:

- Найвищий рівень комфорту: Оскільки активні підвіски здатні постійно адаптуватися до змінних умов, вони можуть забезпечити максимально комфортну їзду для оператора, навіть на дуже нерівних або складних поверхнях.

- Зниження впливу вібрацій: Завдяки миттєвій реакції на зміну умов, активні підвіски ефективно зменшують вплив вібрацій на сидіння оператора, що може значно покращити здоров'я оператора.

- Покращена стійкість: Вони забезпечують вищу стійкість трактора при русі на високих швидкостях або на складних трасах, що є важливим для безпеки.

Недоліки активних підвісок:

- Висока вартість: Найбільшим недоліком є висока вартість таких систем через складні технології, використання датчиків, актуаторів і систем управління.

- Потреба в енергії: Активні системи потребують значної кількості енергії для роботи датчиків та актуаторів, що може збільшити витрати на експлуатацію і обслуговування (Табл. 1.1).

### 1.3 Аналіз сучасних напрямів проектування транспортних засобів

Активні системи підвіски в тракторних сидіннях є одними з найбільш передових технологій на ринку, і їх впровадження є важливим кроком у вдосконаленні комфорту та безпеки для операторів сільськогосподарських машин. Основною особливістю таких систем є їх здатність реагувати на зміни умов робочого середовища та адаптувати підвіску в режимі реального часу. Завдяки використанню сенсорів і електронних пристроїв, активні підвіски можуть виявляти навіть незначні зміни в дорозі або відчуття від навантаження, автоматично налаштовуючи жорсткість системи для забезпечення більш рівномірного та комфортного руху.

Активні системи підвіски можуть включати різноманітні механізми, як, наприклад, гідравлічні або електричні амортизатори, які працюють разом з датчиками швидкості, гравітації та навантаження. Вони аналізують змінні умови, такі як нерівності дороги, поштовхи чи вплив сільськогосподарських знарядь, і, залежно від ситуації, коригують жорсткість сидіння, щоб зменшити негативний вплив на тіло оператора. Це дозволяє не тільки покращити комфорт, але й значно знизити втомленість та підвищити ефективність роботи.

Найбільша перевага таких систем полягає в тому, що вони можуть зменшити навантаження на м'язи та суглоби оператора, що є важливим аспектом для людей, які проводять багато годин за кермом трактора. Системи активно реагують на підвищені вібрації або удари, що знижує ризик виникнення болів у спині, шиї та інших частинах тіла. Це також може мінімізувати можливість розвитку хронічних захворювань, пов'язаних із тривалими фізичними навантаженнями.

Такі системи мають високу адаптивність, що дозволяє налаштовувати сидіння в залежності від потреб кожного оператора. Застосування таких технологій особливо вигідне на великих фермерських господарствах, де кілька операторів можуть використовувати одну техніку, і кожен з них потребує

індивідуального підходу до налаштування сидіння. Це дає можливість мінімізувати вплив втоми і підвищити продуктивність праці.

Також важливою складовою є здатність таких підвісок працювати в умовах низьких температур або при високих навантаженнях, що часто характерно для сільськогосподарської техніки. Вони повинні бути ефективними в будь-яких кліматичних умовах, тому розробники працюють над створенням систем, які зберігають свої характеристики незалежно від зовнішніх факторів. Це дозволяє зробити систему більш універсальною і придатною для використання в різних регіонах.

В майбутньому розвиток активних систем підвіски буде спрямований на удосконалення технології, збільшення її ефективності та зниження витрат на виробництво. Вже зараз активно проводяться дослідження щодо використання нових матеріалів та покращення механізмів регулювання, щоб забезпечити більш точну адаптацію підвіски до умов роботи та зменшити витрати на обслуговування.

Пневматичні підвіски є одними з найбільш популярних варіантів підвісок для сидінь тракторів завдяки їх високій ефективності у поглинанні вібрацій та ударів. У таких системах замість традиційних пружин використовуються пневматичні елементи, що здатні забезпечити значно м'якше і комфортніше сидіння. Пневматична система регулює рівень амортизації в залежності від навантаження, що дозволяє оператору залишатися комфортним навіть при русі по нерівній або кам'янистій місцевості.

Однією з основних переваг пневматичних підвісок є їх здатність адаптуватися до різних умов. Наприклад, на рівних ділянках дорога не буде настільки жорсткою, як на пересіченій місцевості. Пневматична підвіска має можливість "підлаштовуватися" під кожен з цих сценаріїв, забезпечуючи більш високий рівень комфорту при різних типах руху. Це дозволяє оператору зберігати свою працездатність протягом тривалих робочих змін без значного стомлення або болів в суглобах.

Також пневматичні сидіння здатні забезпечити більш рівномірний розподіл ваги оператора, що мінімізує точкове навантаження на хребет. Така система особливо важлива для тих, хто має різну масу тіла або працює в умовах, де сидіння постійно піддається змінам висоти через нерівності або велику кількість підйомів і спусків. Регулювання жорсткості пневматичного сидіння дозволяє забезпечити оптимальний комфорт для кожного користувача.

Пневматичні підвіски також мають велику популярність завдяки можливості налаштування для зменшення або збільшення рівня амортизації в залежності від характеру виконуваних робіт. Для сільськогосподарських робіт це надзвичайно важливо, оскільки різні типи знарядь можуть вимагати різного рівня комфортності сидіння. Це дозволяє операторам тракторів швидко адаптувати сидіння під конкретну ситуацію і продовжувати працювати без перерв.

Проте пневматичні системи мають і певні недоліки. Вони можуть бути чутливими до температурних змін, оскільки на низьких температурах повітря в пневматичній підвісці може втратити свою еластичність, що знижує ефективність амортизації. Крім того, втрата повітря з системи або пошкодження компонентів може призвести до зниження якості роботи підвіски, що вимагає регулярного обслуговування та перевірки.

Незважаючи на ці обмеження, пневматичні підвіски продовжують вдосконалюватися завдяки новим матеріалам і технологіям. Сучасні розробки передбачають використання більш стійких до температурних коливань матеріалів, що значно підвищує ефективність системи. Крім того, у нових моделях тракторів починають з'являтися вдосконалені пневматичні сидіння, здатні працювати навіть у найскладніших умовах.

Вібрації є однією з основних причин, що знижують комфорт оператора при роботі на тракторі. Згідно з численними дослідженнями, тривале вплив вібрацій може призвести до різних проблем зі здоров'ям, зокрема до розвитку болів у спині, шиї та головних болів. Одним із найбільш ефективних підходів

до зниження вібрацій є інтеграція в сидіння спеціальних систем віброізоляції, які здатні поглинати частину коливань, зменшуючи їх вплив на організм людини.

Ці системи включають в себе віброізоляційні матеріали, які встановлюються на важливих елементах сидіння, таких як основа або підлокітники. Вони здатні поглинати вібрації в широкому діапазоні частот, що дозволяє значно знижувати рівень вібрацій, які передаються через сидіння. В результаті цього оператор відчуває менший дискомфорт навіть при русі по дуже нерівних поверхнях.

Однією з найбільш прогресивних технологій у зниженні вібрацій є використання спеціальних амортизуючих матеріалів, що поєднують високу еластичність і здатність до поглинання енергії удару. Наприклад, використання полімерів або вуглецевих волокон у підвісці сидіння дозволяє досягти значного зменшення вібрацій без шкоди для міцності і надійності конструкції. Такі матеріали можуть змінювати свою форму в залежності від інтенсивності вібрацій, що дозволяє ще більш точно налаштувати ефективність амортизації.

У більш складних системах до цих віброізоляційних технологій додаються електронні пристрої, які дозволяють контролювати рівень вібрацій в режимі реального часу і коригувати роботу підвіски. Це дозволяє сидінню адаптуватися не тільки до зміни типу місцевості, але і до змін інтенсивності робочого процесу. Наприклад, при роботі з важкими знаряддями система може підвищувати рівень амортизації, щоб зменшити вплив на хребет оператора.

Важливим моментом у інтеграції систем зменшення вібрацій є їх здатність не лише поглинати механічні коливання, але й знижувати шум, що виникає в процесі руху. Високий рівень шуму може негативно впливати на концентрацію оператора і викликати додатковий стрес. Віброізоляційні системи, які також зменшують рівень шуму, здатні значно покращити умови роботи та знизити рівень стомленості під час тривалих змін.

Одним із перспективних напрямків розвитку є інтеграція в сидіння систем, що дозволяють не лише знижувати вібрації, але й прогнозувати їх появу на основі аналізу попередніх умов роботи. Це дозволить оптимізувати роботу підвіски для різних видів сільськогосподарської техніки та створити більш інтелектуальну систему, яка сама адаптується до умов навколишнього середовища.

Використання електронних систем для регулювання сидіння є однією з основних тенденцій в удосконаленні тракторних сидінь. Вони дозволяють оператору налаштовувати сидіння в залежності від своїх фізіологічних характеристик, а також від характеру виконуваної роботи. Ці системи включають в себе датчики, які вимірюють такі параметри, як вага оператора, ступінь втоми, а також вплив зовнішніх факторів, таких як нерівності на дорозі.

Електронні системи можуть автоматично коригувати висоту сидіння, кут нахилу спинки, а також рівень амортизації підвіски в залежності від результатів вимірювань. Це дозволяє знизити навантаження на спину та суглоби, підвищуючи комфорт та ефективність роботи оператора. Водночас такі системи можуть бути налаштовані на індивідуальні параметри, що забезпечує оптимальну підтримку навіть для різних людей з різною вагою та фізіологічними характеристиками.

Важливою складовою є здатність систем автоматично адаптувати сидіння під час руху. Наприклад, коли трактор потрапляє на нерівну ділянку, система автоматично підвищує жорсткість підвіски, щоб зменшити вплив вібрацій. Це дозволяє операторам зберігати фокус на роботі та мінімізувати фізичне навантаження, що є важливим для продуктивності.

Електронні системи також мають велику потенційну роль у безпеці оператора. Вони можуть попереджати про неправильне положення сидіння або, наприклад, перевантаження сидіння, яке може негативно вплинути на здоров'я оператора. Крім того, ці технології можуть включати в себе функції

для контролю динаміки водіння, що дозволяє адаптувати сидіння для комфортного виконання різних видів сільськогосподарських робіт.

Завдяки інтеграції в системи сидінь технологій, таких як штучний інтелект, електронні регулювання можуть стати ще більш точними. Вони будуть здатні прогнозувати поведінку оператора, адаптуючи налаштування під час роботи в залежності від типу робіт. Така адаптація підвищить загальний рівень комфорту, зменшуючи втому навіть при тривалій роботі.

Використання таких технологій дозволяє не лише підвищити комфорт, але й зменшити знос сидіння, оскільки всі налаштування здійснюються більш точно. Це дозволяє зберігати ефективність системи підвіски та зменшувати витрати на обслуговування.

В результаті аналізу сучасних тенденцій та перспективних підходів до вдосконалення підвіски сидіння тракторів можна зробити кілька ключових висновків.

По-перше, активні системи підвіски є одними з найбільш інноваційних рішень для підвищення комфорту оператора. Їх здатність адаптуватися до змінних умов робочого середовища та налаштовувати рівень амортизації в реальному часі дозволяє знижувати навантаження на тіло оператора і підвищувати ефективність роботи. Впровадження таких систем дозволяє забезпечити високий рівень комфорту навіть при тривалих робочих змінах.

По-друге, пневматичні підвіски продовжують залишатися популярним рішенням для зменшення вібрацій та забезпечення рівномірного розподілу ваги оператора. Вони мають високу адаптивність до різних умов і дозволяють значно покращити комфорт при роботі на нерівних ділянках. Однак, для досягнення максимальної ефективності, пневматичні системи потребують регулярного обслуговування та перевірки, оскільки можуть бути чутливими до температурних змін.

По-третє, інтеграція систем зменшення вібрацій є важливим кроком у покращенні умов праці операторів тракторів. Відповідні технології, що використовують віброізоляційні матеріали та амортизуючі системи,

дозволяють знижувати втомлюваність і мінімізувати ризики для здоров'я, особливо при довготривалому впливі вібрацій. Поєднання цих систем з електронними датчиками дає можливість адаптувати підвіску до різних умов, підвищуючи комфорт та продуктивність праці.

Застосування електроніки для регулювання сидіння тракторів відкриває нові можливості для індивідуального налаштування підвіски. Автоматичне налаштування висоти, жорсткості та кутів сидіння в залежності від параметрів оператора і умов роботи не тільки підвищує комфорт, але й допомагає знизити ризики виникнення травм та забезпечує більш ефективне використання техніки. Завдяки технологіям штучного інтелекту такі системи можуть вивчати поведінку оператора та підлаштовувати підвіску для оптимального результату.

Незважаючи на значні досягнення в розробці підвісок для сидінь тракторів, виклики все ж залишаються. Вони включають в себе потребу в удосконаленні технологій для підвищення стійкості до зовнішніх факторів, таких як температурні коливання, а також необхідність зниження витрат на обслуговування та підтримку складних систем. Однак, з розвитком нових матеріалів і технологій, можна очікувати подальше зниження цих обмежень.

Таким чином, сучасні підходи до вдосконалення підвіски сидіння тракторів мають великий потенціал для підвищення комфорту і безпеки операторів. Залишаючи фокус на інноваціях, таких як активні та пневматичні системи, а також інтеграція електроніки для точного налаштування, ці технології обіцяють значно поліпшити умови роботи в сільському господарстві і зменшити фізичне навантаження на операторів.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДВІСКИ СИДІННЯ

### 2.1. Визначення необхідних характеристик підвіски для польових умов

Тип ґрунту та його стан є одним з основних чинників, що впливають на вибір характеристик підвіски для сільськогосподарської техніки. Ґрунт може бути різним за складом, вологістю, ущільненням і наявністю нерівностей. Кожен тип ґрунту має свої вимоги до підвіски, тому важливо точно визначити умови, в яких трактор буде працювати. Наприклад, на цілих землях, де ґрунт може бути м'яким або перезволоженим, підвіска повинна бути дуже чутливою до змін у навантаженні та здатною ефективно поглинати удари і вібрації. Для таких умов часто використовуються пневматичні або гідравлічні підвіски, які дозволяють забезпечити оптимальний рівень амортизації.

Для роботи на важких ґрунтах, зокрема в умовах глинистих або кам'янистих ділянок, підвіска повинна мати вищу жорсткість, щоб уникнути занурення коліс трактора в землю або надмірного прогинання. У таких випадках часто застосовуються пружинні елементи або спеціальні системи з високим рівнем стабільності. На твердіших, ущільнених ґрунтах необхідно забезпечити таку підвіску, яка не тільки зменшує вібрації, але й дозволяє підтримувати необхідну стабільність техніки під час руху.

Вибір підвіски також залежить від рівня зносу ґрунту. Наприклад, на оброблених або зораних полях, де ґрунт стає більш рівним і ущільненим, підвіска повинна бути налаштована таким чином, щоб забезпечити високу прохідність при збереженні необхідної підтримки для оператора. Водночас для роботи в більш нерівних, невідсортованих землях, де багато каменів чи інших перешкод, необхідно вибирати підвіски з підвищеною амортизацією для зменшення ударних навантажень.

Один з важливих аспектів при виборі підвіски для конкретного типу ґрунту — це її здатність адаптуватися до змін у складі або стані ґрунту. Сучасні пневматичні та активні системи підвіски дозволяють автоматично

коригувати рівень жорсткості залежно від типу робочого середовища, що дозволяє зберігати комфорт і стабільність техніки без необхідності вручну налаштовувати систему під кожну конкретну ситуацію.

Іншою важливою характеристикою є можливість підвіски до адаптації до різних умов ґрунту протягом одного робочого дня. Наприклад, коли трактор рухається з поля на поле з різними типами ґрунтів, підвіска повинна мати можливість адаптуватися без необхідності зупиняти техніку для ручного налаштування. Це забезпечує більшу ефективність роботи і зменшує час на налаштування техніки.

В результаті, визначення типу ґрунту та його стану дозволяє вибрати оптимальну підвіску, яка забезпечить ефективність роботи та комфорт для оператора, мінімізуючи фізичне навантаження при одночасному підвищенні прохідності та стабільності техніки.

Навантаження на сидіння оператора є важливим фактором при розрахунку характеристик підвіски для тракторів. Це включає в себе не лише масу самого оператора, але й додаткові навантаження, пов'язані з експлуатацією техніки в польових умовах. Наприклад, коли трактор працює з важкими сільськогосподарськими знаряддями або вантажами, підвіска повинна мати можливість адаптуватися до змін в навантаженні, забезпечуючи комфорт оператора при великих коливаннях ваги. Крім того, з урахуванням різних фізіологічних характеристик операторів, підвіска повинна бути налаштована таким чином, щоб забезпечити оптимальну підтримку незалежно від індивідуальних особливостей людини.

При визначенні необхідних характеристик підвіски слід враховувати тип роботи, що виконується. Наприклад, при роботі на складних, нерівних ділянках навантаження на сидіння збільшується через удари та вібрації, які передаються через колеса трактора. Підвіска повинна бути здатною до ефективного поглинання цих навантажень, при цьому не змінюючи жорсткість під час руху, що забезпечує максимальний комфорт для оператора.

Одним з важливих аспектів є підтримка рівномірного розподілу навантаження на сидіння, щоб не виникало точкових навантажень, які можуть призвести до болю або втоми у оператора. Сучасні пневматичні системи підвіски дозволяють автоматично регулювати рівень амортизації в залежності від ваги оператора, що дозволяє досягти найбільш комфортного положення сидіння при мінімальних втратах енергії.

Розрахунок підвіски для польових умов повинен також враховувати час, який оператор проводить на сидінні. Тривала робота на тракторі може призводити до втоми, тому система підвіски повинна забезпечити не тільки комфорт, але й підтримку здоров'я оператора. Для цього підвіска має забезпечувати рівномірний розподіл навантаження на спину та інші частини тіла, що дозволяє знизити ризик виникнення болю в суглобах або хребті.

Сучасні електронні системи регулювання можуть адаптувати підвіску до різних операцій без потреби втручання оператора, враховуючи вагу та фізіологічні параметри кожної конкретної людини. Це дозволяє значно підвищити комфорт, адже автоматичне налаштування підвіски під конкретного оператора зменшує навантаження на м'язи та суглоби, що є важливим для здоров'я.

Таким чином, підвіска повинна бути спроектована таким чином, щоб забезпечити підтримку оператора при різних навантаженнях, забезпечити комфорт упродовж тривалої роботи і адаптуватися до фізіологічних особливостей кожного оператора.

Швидкість руху трактора та тип виконуваних робіт визначають характеристики підвіски в різних польових умовах. Наприклад, для робіт, які вимагають високої швидкості, таких як транспортування вантажів на великі відстані, підвіска повинна бути достатньо жорсткою, щоб забезпечити стабільність техніки при великих швидкостях. Однак при русі на великі відстані підвіска не повинна бути надто жорсткою, щоб не виникало додаткових вібрацій, які можуть заважати зручності та комфортності роботи оператора.

Для повільних робіт, таких як обробка ґрунту або сівба, підвіска повинна бути набагато м'якшою, щоб ефективно поглинати удари і нерівності поверхні. Важливо, щоб підвіска була здатна до адаптації в реальному часі в залежності від швидкості руху і типу робіт. Це дозволяє зберігати комфорт оператора навіть при переміщенні через різні ділянки поля з різними типами ґрунтів.

Одним з найбільш ефективних рішень є використання пневматичних систем підвіски, які дозволяють коригувати рівень амортизації в залежності від зміни швидкості або характеру робіт. Такі системи можуть автоматично налаштовувати підвіску для зменшення вібрацій при швидкому русі і для більш м'якого руху при повільних операціях.

Крім того, важливо враховувати характер робіт, що виконуються, оскільки для кожної конкретної операції можуть бути необхідні різні налаштування підвіски. Для робіт, які вимагають точності, таких як сівба, важливо забезпечити зниження вібрацій для уникнення помилок у виконанні. Для важких робіт, таких як обробка важкого ґрунту або транспортування важких вантажів, підвіска повинна бути налаштована так, щоб максимально знизити вплив вібрацій на оператора.

Підвіска, що адаптується до змінних умов швидкості та типу робіт, дозволяє підвищити ефективність роботи та знизити втомлюваність оператора. Це забезпечує не тільки зручність, але й безпеку під час роботи в складних умовах.

Нерівності поверхні та вібраційні навантаження є одними з основних факторів, що визначають характеристики підвіски в польових умовах. При русі по нерівних ділянках ґрунту трактор може відчувати сильні вібрації та удари, які передаються через сидіння до оператора. Підвіска повинна бути спроектована так, щоб ефективно поглинати ці вібрації та удари, знижуючи їхній вплив на оператора.

Основним завданням підвіски в таких умовах є зниження вібрацій в діапазоні частот, що виникають при русі через ямки, камені та інші нерівності

на полі. Для цього використовуються спеціальні віброізоляційні матеріали, пружинні елементи та гідравлічні амортизатори. Однак вибір системи підвіски залежить від інтенсивності вібрацій і необхідної жорсткості, що дозволяє забезпечити достатню підтримку при русі по складному ґрунту.

Важливою характеристикою є також здатність підвіски до адаптації до різних типів нерівностей. Наприклад, при русі по великих вибоїнах або оброблених землях, підвіска повинна зменшувати вібрації, але при цьому не занадто сильно прогинатися, щоб не викликати нестабільність. Для цього розробляються активні та пневматичні системи, які автоматично налаштовуються в залежності від типу поверхні.

Такі системи здатні розпізнавати тип вібрацій та підлаштовувати підвіску для зменшення їхнього впливу. Це забезпечує не тільки комфорт оператора, але й підвищує ефективність роботи трактора, оскільки менша кількість вібрацій знижує ймовірність поломок та зносу техніки.

Можливість регулювання та адаптації підвіски є важливою характеристикою для забезпечення оптимального комфорту та ефективності роботи сільськогосподарської техніки в різних умовах. Сучасні підвіски можуть мати як ручне, так і автоматичне регулювання жорсткості, що дозволяє підлаштовувати систему під конкретні умови роботи, тип ґрунту, навантаження на сидіння та швидкість руху. Автоматичне регулювання підвіски є дуже зручним, оскільки система сама коригує рівень амортизації в реальному часі в залежності від змін навантаження або умов роботи.

Одним із популярних рішень є пневматичні підвіски, які дозволяють точно регулювати рівень жорсткості за допомогою компресорів та пневматичних мембран. Це дає змогу оператору налаштувати підвіску на максимально комфортний рівень залежно від особистих переваг або специфіки виконуваних робіт. Пневматичні системи також можуть автоматично адаптуватися до змін у вазі оператора або знаряддя, що забезпечує стабільність під час роботи.

Для тракторів, які працюють в умовах значних змін навантаження, таких як використання різних сільськогосподарських знарядь, адаптивні підвіски з гідравлічними або електронними системами управління є найбільш ефективними. Ці системи дозволяють не тільки налаштувати жорсткість, але й управляти різними режимами роботи, такими як перевезення важких вантажів або робота на нерівних поверхнях. Вони можуть бути запрограмовані на конкретні налаштування, що підвищує продуктивність та знижує втомлюваність оператора.

Один із недавніх трендів у розвитку підвісок для сільськогосподарських тракторів — це інтеграція системи адаптивного управління, яка може в реальному часі змінювати параметри підвіски залежно від швидкості, умов навколишнього середовища або поточного навантаження. Такі системи значно знижують рівень вібрацій і ударних навантажень, покращуючи комфорт оператора і знижуючи втомлюваність. Це дуже важливо для ферм, де робота з трактором триває по кілька годин без перерви.

Додатково варто зазначити, що можливість регулювання також допомагає підвищити безпеку оператора, оскільки адаптивна система дозволяє швидко змінювати рівень амортизації в разі несподіваних змін умов — наприклад, при переході з м'якого ґрунту на тверду поверхню. Це дозволяє мінімізувати ризик виникнення аварійних ситуацій через нестабільність техніки або неправильну амортизацію.

Таким чином, можливість регулювання підвіски є не лише важливою для комфорту оператора, але й сприяє збільшенню продуктивності роботи та підвищенню безпеки на полі. Автоматизовані або напівавтоматичні системи, що адаптуються до різних умов, стають стандартом для сучасних тракторів.

Надійність та мінімальні вимоги до обслуговування є важливими характеристиками підвіски для сільськогосподарських тракторів, оскільки техніка часто працює в умовах, що сприяють її забрудненню, стиранню та зношуванню. Вибір підвіски, яка не потребує частого технічного

обслуговування або дорогих замінних частин, значно знижує експлуатаційні витрати та збільшує час безперебійної роботи техніки.

Однією з найбільших переваг гідравлічних та пневматичних підвісок є їх здатність до ефективного поглинання вібрацій без необхідності постійного технічного обслуговування. Ці системи, на відміну від механічних підвісок, потребують мінімальних зусиль для підтримки їх в робочому стані, а перевірки та налаштування проводяться лише при зміні експлуатаційних умов або на початку сезону. Однак, варто зазначити, що пневматичні системи можуть вимагати перевірки герметичності повітряних мембран, а гідравлічні — перевірки рівня рідини.

Для забезпечення надійності підвіски необхідно використовувати матеріали та компоненти, які стійкі до високих навантажень і агресивних умов, таких як волога, пил, високі температури або шкідливі хімічні речовини. Вибір матеріалів для підвісних елементів — це важливий аспект, оскільки матеріали повинні бути стійкими до механічного зношування та корозії, щоб гарантувати тривалий термін служби системи.

Крім того, важливо враховувати простоту обслуговування підвіски. Трактори, які працюють в польових умовах, часто не мають доступу до спеціалізованих майстерень, тому конструкція підвіски повинна бути такою, щоб її обслуговування можна було здійснювати самостійно або з мінімальними затратами часу та ресурсів. Легкість у заміні компонентів, наявність запасних частин та технічна документація — усе це значно спрощує процес технічного обслуговування.

Для забезпечення надійності також важливо регулярно проводити перевірку технічного стану підвіски. Перевірка стану гідравлічних або пневматичних елементів, контроль за зношенням пружин або амортизаторів дозволяє своєчасно виявити потенційні проблеми, що можуть призвести до несправності. Оскільки сільськогосподарські роботи вимагають великої кількості годин на полі, важливо зменшити ризик поломок підвіски, що може призвести до зупинки роботи.

Завдяки використанню вдосконалених матеріалів та інноваційних технологій, таких як безконтактні амортизатори або автоматичні системи регулювання, сучасні підвіски мають високу надійність і стійкість до великих навантажень, що забезпечує тривалий термін експлуатації без необхідності частих ремонтів. Це дозволяє фермерам значно знизити витрати на обслуговування техніки і підвищити загальну ефективність її роботи.

Таким чином, надзвичайно важливо вибирати підвіску, яка має високу надійність, мінімальні вимоги до обслуговування та довговічність. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, але й дозволяє забезпечити безперебійну роботу техніки в складних польових умовах.

Визначення необхідних характеристик підвіски для сільськогосподарських тракторів є важливим аспектом для забезпечення ефективності та безпеки роботи техніки в польових умовах. Основні фактори, які впливають на вибір підвіски, включають тип та стан ґрунту, швидкість руху, тип робіт, навантаження на сидіння оператора, нерівності поверхні та вібраційні навантаження, а також можливість регулювання і адаптації підвіски до змінних умов.

Тип ґрунту та його стан визначають жорсткість і адаптивність підвіски, що дозволяє забезпечити стабільність та комфорт при роботі на різних ділянках. Для кожного типу ґрунту потрібно обирати оптимальну систему підвіски, яка буде ефективно поглинати удари та вібрації. Важливою характеристикою підвіски є її здатність до регулювання в залежності від змінних умов — швидкості руху, типу робіт, а також індивідуальних особливостей оператора.

Регулювання підвіски дає змогу адаптувати її до різних навантажень та умов, що підвищує комфорт оператора і ефективність роботи. Сучасні технології, такі як пневматичні та гідравлічні системи з автоматичним регулюванням, забезпечують підвищений рівень адаптації та комфорту. Водночас, важливим аспектом є надійність системи підвіски, що повинна бути

стійкою до зношування та мати мінімальні вимоги до обслуговування, що значно знижує експлуатаційні витрати.

Нерівності поверхні та вібраційні навантаження вимагають наявності систем, здатних ефективно поглинати удари та знижувати рівень вібрацій, що впливають на оператора та техніку. Сучасні підвіски дозволяють оптимізувати амортизацію в реальному часі в залежності від умов роботи, що підвищує загальну стабільність трактора.

Таким чином, для забезпечення високої продуктивності та комфорту в польових умовах, підвіска трактора повинна бути адаптивною, надійною та з мінімальними вимогами до обслуговування. Правильний вибір та налаштування підвіски дозволяє знизити фізичне навантаження на оператора, покращити безпеку і збільшити ефективність роботи техніки.

## 2.2. Використання багатокомпонентної моделі підвіски

Багатокомпонентні моделі підвіски сільськогосподарських тракторів допомагають точно моделювати динамічну поведінку підвіски, враховуючи різні її елементи та взаємодію з іншими частинами трактора. Такі моделі враховують не лише пружини та демпфери, але й деталі, як рама, колеса, навантаження та дорожній рельєф. Це дозволяє оцінити, як різні фактори впливають на комфорт оператора і стабільність трактора, що є особливо важливим для оптимізації робочих умов на нерівних поверхнях.

Розглянемо кілька типових математичних моделей, що описують багатокомпонентні підвіски:

Диференціальні рівняння для моделі з двома ступенями свободи: У такій моделі використовуються рівняння другого порядку для опису руху маси  $m_1$  (сидіння оператора) і маси  $m_2$  (шасі). Основні сили в моделі включають пружні сили  $k_1$  та  $k_2$ , а також демпфуючі сили  $c_1$  та  $c_2$ .

Рівняння руху виглядають так:

$$\begin{aligned}
m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_2) &= 0 \\
m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c_2 \left( \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 (x_2) - c_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_2) &= F_{\text{road}}
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

де:  $x_1$  і  $x_2$  — зміщення відповідних мас,

$F_{\text{road}}$  — сила, яка прикладається через колеса в точці контакту з дорогою.

Модель із двома ступенями свободи є базовою математичною моделлю, яка широко застосовується для оцінки вертикальних коливань у транспортних засобах. У випадку підвіски сидіння сільськогосподарського трактора ця модель використовується для розгляду взаємодії між сидінням оператора та шасі. Вона передбачає, що система складається з двох основних мас: сидіння оператора  $m_1$  і шасі  $m_2$ , що кріпляться до підвіски. Рівняння для цієї системи виражаються через диференціальні рівняння другого порядку, які враховують пружні сили, що впливають на систему через елементи підвіски, а також демпфуючі сили, які знижують інтенсивність коливань за рахунок амортизаторів. Такий підхід дозволяє оцінити вертикальні зміщення й сили, що діють на оператора під час руху по нерівних поверхнях.

Однією з головних переваг цієї моделі є її відносна простота, оскільки вона використовує тільки два ступені свободи, що спрощує обчислення і підвищує швидкість аналізу. Модель підходить для початкових етапів проектування і дозволяє проводити базову оцінку динамічної поведінки підвіски. Проте така модель має свої обмеження, оскільки не враховує складні взаємодії між колісною базою трактора і дорожнім покриттям, а також не охоплює бічні і поздовжні коливання. Таким чином, її використання обмежене ситуаціями, коли потрібен швидкий і відносно точний аналіз тільки вертикальних коливань.

У рівняннях цієї моделі використовуються коефіцієнти жорсткості  $k_1$  та  $k_2$ , а також демпфування  $c_1$  та  $c_2$ . Пружні сили діють як відновлювальні, повертаючи систему до початкового стану, тоді як демпфери допомагають знижувати амплітуду коливань. Коли трактор натрапляє на нерівність, система

починає коливатися, і завдяки амортизаторам ці коливання поступово згасають, забезпечуючи стабільність для оператора. Такий підхід вивчався у роботах [Zhang] і колег, де дослідники описують застосування таких моделей для тракторів у сільському господарстві та дають рекомендації щодо оптимізації демпфування для поліпшення комфорту оператора для двох мас формуються на основі другого закону Ньютона, що дозволяє описати динамічну поведінку системи. Коли шасі піддається зовнішньому впливу (наприклад, через контакт із нерівностями), коливання передаються на сидіння оператора. Завдяки цим рівнянням можна прогнозувати, як будуть змінюватися позиції мас у часі, а також визначати оптимальні значення жорсткості та демпфування для зниження вібрацій. Такий підхід підтверджено результатами досліджень, що показують, як параметри підвіски впливають на зниження вібрацій для забезпечення комфорту та продуктивності оператора .

Моделі для напівактивних і активних підвісок: Для більш точного моделювання напівактивних і активних підвісок використовуються математичні моделі з адаптивним демпфуванням. Такі моделі можуть включати керуючі функції, що дозволяють змінювати коефіцієнти жорсткості і демпфування в залежності від дорожніх умов. Для цього часто використовують рівняння управління:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt \quad (2.2)$$

де:  $u(t)$  — керуючий сигнал для зміни жорсткості підвіски,

$e(t)$  — похибка між бажаним і поточним положенням підвіски,

$K_p, K_d, K_i$  — коефіцієнти пропорційного, диференційного та інтегрального посилення.

Модель із трьома ступенями свободи ускладнює розрахунки, дозволяючи охопити більшу кількість факторів, які впливають на динаміку підвіски. Окрім сидіння оператора і шасі, до моделі додається ще одна маса, що представляє колісну базу. Це дає можливість більш точно враховувати вплив дорожнього покриття на всю систему. Колеса взаємодіють із

нерівностями дороги, що породжує додаткові сили, які передаються на шасі  $i$ , відповідно, на сидіння оператора. Це робить модель із трьома ступенями свободи ідеальною для дослідження динаміки в реальних умовах.

Така модель є більш реалістичною, оскільки дозволяє врахувати зворотний зв'язок між колісною базою та шасі, що важливо при розробці підвіски для транспортних засобів, які експлуатуються на нерівних поверхнях. Вона дозволяє краще розрахувати амплітуду коливань у всіх частинах системи і передбачити, як колісна база та її взаємодія з дорогою впливатимуть на загальну стійкість трактора. Така модель широко розглядається у спеціалізованій літературі, зокрема у роботах [Wong (2020)], де описані методи моделювання для наземних транспортних засобів, включаючи трактори, що використовуються у складних польових умовах[20].

У моделі [19] застосовуються рівняння, що враховують коливання як для сидіння оператора, так і для колісної бази. Для кожної маси вводяться свої параметри жорсткості та демпфування. Крім того, модель дає можливість варіювати коефіцієнти жорсткості для різних типів ґрунту, що важливо для застосування в сільському господарстві, де трактор працює на нерівних полях. Завдяки додатковим ступеням свободи модель є складнішою, але надає детальне уявлення про динаміку підвіски, яке може бути використане для налаштування оптимальної жорсткості амортизаторів і пружин [19].

Рівняння для моделювання багатокomпонентних систем із декількома ступенями свободи: У складних багатокomпонентних моделях, що враховують взаємодію всіх елементів трактора, використовують рівняння Лагранжа або метод кінцевих елементів для розв'язку. Рівняння Лагранжа зокрема допомагають звести систему до однієї інтегральної форми, де для кожного ступеня свободи визначається своя функція Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.3)$$

де:  $L=T-V$  — функція Лагранжа, яка є різницею кінетичної енергії  $T$  та потенційної енергії  $V$ ,

$q_i$  — узагальнені координати (наприклад, зміщення кожної маси),

$Q_i$  — узагальнені зовнішні сили.

Багаточастинна модель є найбільш складною та точнішою моделлю, яка використовується для розрахунків багатокомпонентних підвісок. Вона включає всі основні частини трактора, такі як рама, підвіска, колеса, а також інші структурні елементи, як карданні з'єднання та гідравлічні системи. Для кожного компонента визначаються індивідуальні параметри, включаючи жорсткість і демпфування, що дозволяє моделювати взаємодію всіх частин. Відповідно, таку модель можна використовувати для точного розрахунку навантажень на трактор і впливу дорожнього покриття на всі його компоненти [28].

У багаточастинних моделях застосовуються рівняння Лагранжа, які дозволяють враховувати взаємодію різних частин системи, обчислюючи кінетичну та потенційну енергії кожного компонента. Лагранжеві рівняння дають можливість враховувати внутрішні сили, що виникають між частинами під час коливань, забезпечуючи точніший прогноз поведінки системи при різних режимах навантаження. В книзі Miloslavskiy (2022) запропоновані рівняння та алгоритми для розв'язання багаточастинних задач, що дозволяє використовувати цю модель при розробці адаптивних підвісок для тракторів [28].

Реалізація цієї моделі вимагає високої обчислювальної потужності і детальних даних про параметри кожної частини трактора. Багаточастинна модель дозволяє оцінювати вплив рельєфу на раму та колесну базу, а також відстежувати, як ці навантаження передаються на підвіску і операторське місце. Така точність дозволяє інженерам налаштовувати всі параметри підвіски для забезпечення оптимальної роботи трактора в польових умовах.

### 2.3. Математичне моделювання системи підвіски

Для створення нової математичної моделі підвіски сидіння сільськогосподарського трактора на основі існуючих моделей можна об'єднати переваги моделей з двома і трьома ступенями свободи, а також застосувати принципи адаптивного демпфування з активним керуванням. Така комбінована модель дозволить враховувати не лише коливання сидіння та шасі, але також динаміку взаємодії з колесами та можливість коригування жорсткості і демпфування в реальному часі на основі умов дороги.

Врахування трьох мас та адаптивного демпфування:

Використання трьох мас у моделі забезпечує більш реалістичне відображення роботи підвіски, оскільки враховує основні елементи трактора, які впливають на комфорт оператора: сидіння, шасі та колісну базу. Сидіння оператора ( $m_1$ ) є першим компонентом, на який безпосередньо передаються коливання через шасі ( $m_2$ ), і саме тут відбувається поглинання основної частини вібрацій, що впливають на комфорт і безпеку оператора. Другий компонент, шасі, є основною конструктивною частиною трактора, яка підтримує сидіння і всі інші компоненти, включаючи колеса, з'єднані з дорожньою поверхнею. Колісна база ( $m_3$ ) враховує контакт із поверхнею, де виникають найсильніші зовнішні сили, такі як удари від нерівностей та перешкод на полі.

Введення адаптивного демпфування дозволяє змінювати параметри демпфера в реальному часі залежно від дорожніх умов і рівня коливань. Це означає, що підвіска може динамічно підлаштовуватися під різні типи рельєфу, що є особливо важливим для сільськогосподарської техніки, яка працює на полях з різноманітними типами ґрунту. Використання адаптивного демпфера дозволяє забезпечити вищий рівень поглинання енергії коливань, ніж це можливо у випадку статичних моделей з фіксованими параметрами демпфування. Це забезпечує стабільніший рівень комфорту для оператора незалежно від зовнішніх умов.

Крім того, адаптивне демпфування знижує амплітуду коливань при русі трактора, особливо на високій швидкості. При виникненні нерівностей на

шляху адаптивний демпфер швидко змінює свої параметри, щоб підвищити жорсткість або зменшити демпфування, залежно від потреби, тим самим забезпечуючи рівновагу між комфортом і стабільністю. Цей підхід особливо корисний для сільськогосподарських машин, оскільки допомагає знижувати ударні навантаження на конструкцію трактора та продовжувати його термін служби, запобігаючи передчасному зношенню.

Такий підхід, коли враховуються три маси та адаптивні параметри демпфування, забезпечує комплексний захист від вібрацій та ударних навантажень на різних рівнях. Він створює можливості для розробки нових конструкцій підвісок, що є важливим у випадках, коли техніка використовується у жорстких умовах. Крім того, це підвищує ефективність праці оператора, оскільки мінімізує його втому, що позитивно впливає на продуктивність.

Модель складатиметься з трьох основних мас — сидіння оператора ( $m_1$ ), шасі ( $m_2$ ) та колісної бази ( $m_3$ ).

Крім пружин і демпферів, вводяться адаптивні демпфери, здатні змінювати свої параметри в реальному часі на основі дорожніх умов і параметрів коливань.

Датчики і активне керування.

Використання датчиків у системі забезпечує постійний моніторинг зміщення та швидкості кожного елемента системи: сидіння, шасі та колісної бази. Це дозволяє системі збирати актуальну інформацію про поточні коливання, визначати рівень амплітуди та періодичність впливів, які виникають під час руху по нерівному рельєфу. Датчики фіксують зміни у швидкості та положенні кожного компонента, що дозволяє контролювати процес і своєчасно реагувати на зміни в зовнішніх умовах, автоматично змінюючи параметри демпферів. Завдяки цьому система швидко адаптується до будь-яких коливань, підтримуючи стабільність конструкції і знижуючи ризики для оператора.

Активне керування системою здійснюється завдяки інтегрованим пропорційним ( $P$ ), диференційним ( $D$ ) і інтегральним ( $I$ ) коефіцієнтам, які дозволяють коригувати систему відповідно до змінних умов навантаження. Величина зусиль, що подається на демпфери, розраховується автоматично на основі сигналів від датчиків.  $P$ -контролер швидко реагує на зміни і забезпечує стабільність у найкоротший час, тоді як  $D$ -контролер розраховує швидкість зміни коливань, знижуючи перехідні коливання, а  $I$ -контролер враховує накопичену похибку для досягнення бажаного рівня стабільності. Таке поєднання дозволяє забезпечити високоточне керування параметрами демпфування.

Такий підхід до активного керування має суттєву перевагу у порівнянні зі звичайними системами демпфування, оскільки він не лише стабілізує коливання, але й підтримує комфорт оператора, адаптуючись до різних дорожніх умов. Наприклад, під час різких ударів система здатна зменшити жорсткість демпфера для пом'якшення впливу, а потім поступово повернути параметри на попередній рівень для підтримання стабільності. Це дозволяє зберегти енергію, зменшити знос амортизаторів та підтримати комфорт для оператора, що особливо важливо у довготривалих робочих умовах.

Активне керування також допомагає збалансувати амортизаційні зусилля з урахуванням змінної швидкості трактора. На високих швидкостях система знижує ризик динамічних ударів, забезпечуючи плавність руху. Це позитивно впливає на загальну стабільність транспортного засобу, а також на здоров'я оператора, оскільки зменшує вплив стомлюючих вертикальних коливань, спричинених нерівною поверхнею поля.

Система буде містити датчики для збору інформації про зміщення і швидкість коливань кожної з мас. Відповідно до цих даних будуть змінюватися коефіцієнти жорсткості і демпфування підвіски.

Сигнал керування буде подаватися на демпфери для підтримки стабільності і комфорту оператора.

Диференціальні рівняння для запропонованої моделі.

Диференціальні рівняння другого порядку, що використовуються в моделі, дозволяють враховувати динаміку зміщення та прискорення кожного елемента системи, описуючи поведінку підвіски при різних типах впливів. Для сидіння оператора ( $m_1$ ) та шасі ( $m_2$ ) такі рівняння виражають силу, що діє між ними, через зміну положень  $x_1$  і  $x_2$  відповідно, враховуючи коефіцієнти жорсткості та демпфування  $k_{12}$  і  $c_{12}$ . Це дозволяє описати, як коливання від шасі передаються на сидіння і які сили утворюються для їхнього погашення.

Включення колісної бази ( $m_3$ ) додає додаткові ступені свободи, що дозволяє охопити фактори, пов'язані із взаємодією трактора з дорожньою поверхнею. Рівняння для  $m_3$  враховують зовнішню силу  $F_{road}$ , яка представляє вплив нерівного рельєфу на колеса. За допомогою цих рівнянь система може обчислити, як нерівності на полі впливають на вертикальні зміщення всієї конструкції трактора і як це впливає на стабільність та комфорт. Таким чином, диференціальні рівняння забезпечують точний математичний опис динаміки підвіски в умовах реальної експлуатації.

Таке обчислення вертикальних переміщень та взаємних сил між масами є критичним для визначення оптимальних параметрів демпфування і жорсткості. Воно дозволяє визначити, які зусилля потрібні для підтримання рівноваги і стабільності сидіння при різних режимах руху. Завдяки цьому інженери можуть налаштовувати систему таким чином, щоб забезпечити максимальну безпеку та зниження вібрацій, враховуючи умови конкретного рельєфу або робочого середовища.

Ці рівняння також сприяють кращому розумінню фізичних процесів, які відбуваються під час руху трактора, зокрема впливу нерівного рельєфу на комфорт оператора. Вони допомагають визначити, як змінюються амплітуди і частоти коливань у залежності від різних параметрів дороги, що дозволяє моделі адаптуватися до різних умов експлуатації.

Рівняння руху для сидіння оператора  $m_1$ :

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_{12}(x_1 - x_2) + k_{12}(x_1 - x_2) = 0, \quad (2.4)$$

де:  $x_1$  — положення сидіння оператора,

$c_{12}$  і  $k_{12}$  — демпфування і жорсткість між сидінням і шасі.

Рівняння руху для шасі  $m_2$ :

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c_{23}(x_2 - x_3) + k_{23}(x_2 - x_3) - c_{12}(x_1 - x_2) - k_{12}(x_1 - x_2) = 0, \quad (2.5)$$

де:  $x_2$  — положення шасі,

$c_{23}$  і  $k_{23}$  — демпфування і жорсткість між шасі та колесами.

Рівняння руху для колісної бази  $m_3$ :

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + c_{road}(x_3) + k_{road}(x_3) - c_{23}(x_2 - x_3) - k_{23}(x_2 - x_3) = F_{road}, \quad (2.6)$$

де:  $x_3$  — положення колісної бази,

$c_{road}$  і  $k_{road}$  — коефіцієнти демпфування і жорсткості, що представляють дорожню поверхню,

$F_{road}$  — зовнішня сила, яка діє на колеса з боку дороги.

Рівняння для активного керування  $u(t)$ :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt, \quad (2.7)$$

де:  $e(t) = x_{desired} - x_1$  — похибка між бажаним положенням сидіння і його фактичним зміщенням,

$K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  — пропорційний, диференціальний та інтегральний коефіцієнти відповідно, що налаштовують демпфери.

Більш точне моделювання: модель дозволяє точно оцінити коливання в сидінні, шасі та колесах, враховуючи їхню взаємодію.

Завдяки активному керуванню, система може в реальному часі змінювати демпфування і жорсткість, забезпечуючи стабільність на різних типах дорожнього покриття.

Активне керування зменшує коливання, що дозволяє підтримувати комфорт оператора і знижувати його втомлюваність.

Ця модель дає можливість створити підвіску для тракторів, яка автоматично адаптується до умов, що є критичним для сільськогосподарських машин, які експлуатуються на нерівних полях.

Нова модель дозволяє суттєво знизити негативний вплив вібрацій і ударів на оператора завдяки поєднанню трьох ступенів свободи і адаптивного демпфування з активним керуванням. Це особливо важливо для сільськогосподарських машин, які часто працюють на нерівних поверхнях і піддаються інтенсивним коливанням. Завдяки адаптивному демпферу та активному керуванню з PDI-контролем система підвищує комфорт оператора та знижує рівень стомленості, дозволяючи йому працювати довше без зниження ефективності.

Очікуваний вплив нової моделі на техніку і робочий процес буде помітний у підвищенні продуктивності і надійності. Оскільки модель знижує амплітуди коливань, зменшується знос елементів підвіски та конструкції трактора, що знижує витрати на технічне обслуговування і ремонт. Це особливо корисно для сільськогосподарських підприємств, оскільки сприяє зменшенню витрат на експлуатацію та продовженню терміну служби техніки.

Завдяки активному керуванню модель здатна адаптуватися до різних умов експлуатації, забезпечуючи однаково високий рівень комфорту незалежно від типу поверхні. Це значно покращує умови праці оператора, забезпечуючи йому стабільність навіть при роботі на нерівному рельєфі. Це допомагає уникнути стомленості, спричиненої вібраціями, і знижує ризики для здоров'я оператора.

Загалом, така модель забезпечує більш гнучкий та ефективний підхід до проектування підвіски для сільськогосподарських тракторів. Вона дозволяє розробляти підвіски, які відповідають сучасним вимогам комфорту і надійності, одночасно знижуючи витрати і покращуючи продуктивність у складних умовах.

### РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ЖОРСТКОСТІ, ДЕМПФУВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСКИ

Оптимізація жорсткості, демпфування та конструкції підвіски є важливим аспектом для досягнення балансу між комфортом оператора і стійкістю сільськогосподарських транспортних засобів, які працюють в умовах нерівного рельєфу. Головна мета оптимізації — зменшити вплив вібрацій на оператора і збільшити стабільність трактора. Жорсткість і демпфування повинні бути збалансовані таким чином, щоб забезпечити поглинання енергії коливань, що виникають від нерівностей дороги, при цьому запобігаючи передаванню високих амплітуд на операторське місце. Для цього використовують експериментальні підходи, чисельні методи і моделювання в спеціалізованих програмах.

Одним з перших кроків оптимізації є визначення параметрів жорсткості підвіски. Жорсткість безпосередньо впливає на те, наскільки добре підвіска поглинає удари від поверхні. Занадто висока жорсткість може призвести до того, що удари від нерівностей будуть передаватися оператору, викликаючи дискомфорт і втому. З іншого боку, надто низька жорсткість може призвести до втрати стійкості транспортного засобу, особливо на високих швидкостях. Тому необхідно точно розрахувати і налаштувати жорсткість так, щоб підвіска забезпечувала компроміс між поглинанням вібрацій та стабільністю руху.

Оптимізація демпфування також є критично важливою для системи підвіски. Демпфери призначені для зменшення амплітуди коливань шляхом поглинання кінетичної енергії. Відповідні коефіцієнти демпфування повинні запобігати надмірним коливанням без надмірного обмеження рухливості підвіски. Це досягається через підбір демпферів, які здатні адаптуватися до різних умов, змінюючи свою жорсткість залежно від типу поверхні, швидкості руху та навантаження. Активне демпфування, де характеристики демпфера змінюються автоматично на основі датчиків, особливо корисне для зменшення навантаження на оператора на складних ділянках.

Поліпшення конструкції підвіски включає внесення змін у компоненти, що дозволяють підвісці адаптуватися до зміни умов експлуатації. Це можуть бути посилені елементи кріплення, нові матеріали для пружних елементів, що забезпечують вищу зносостійкість та міцність, або використання модульних систем підвіски, які можна регулювати залежно від потреб. Наприклад, багатоступенева підвіска може ефективно поглинати удари на складних рельєфах за рахунок регулювання жорсткості на кожному етапі руху, що знижує ризик пошкоджень і покращує комфорт оператора.

Комп'ютерне моделювання є важливим етапом оптимізації, оскільки дозволяє оцінити ефективність різних параметрів підвіски ще до їх впровадження. За допомогою програмного забезпечення, такого як ANSYS або MATLAB, інженери можуть створити чисельні моделі для аналізу поведінки підвіски при різних умовах навантаження. Ці моделі дозволяють вивчити взаємодію параметрів жорсткості та демпфування і визначити їх оптимальні значення, що забезпечують необхідний рівень комфорту та стабільності.

Нарешті, експериментальне тестування є ключовим для підтвердження теоретичних результатів. Після того, як чисельна модель розрахована і оптимізована, підвіска проходить серію польових випробувань для оцінки реальних умов роботи. Ці тести дозволяють оцінити, наскільки ефективно підвіска поглинає коливання, а також наскільки вона впливає на загальну стабільність транспортного засобу і комфорт оператора.

### 3.1. Експериментальна перевірка моделі

Вібрація є одним із найбільш досліджуваних ергономічних факторів, що впливають на здоров'я працівників і їхню робочу ефективність. Людська вібрація визначається як вплив механічної вібрації на людське тіло. У всьому світі мільйони людей під час роботи зазнають впливу механічних вібрацій. Вплив вібрації є критичним з точки зору здоров'я людини, комфорту на робочому місці, продуктивності праці, якості роботи та безпеки.

Довготривалий вплив вібрації на все тіло (WBV) може спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям, зокрема з хребтом і болі в нижній частині спини, залежно від інтенсивності, частоти, напрямку, тривалості та розподілу вібрації на людське тіло. Окрім здоров'я працівників, їхня безпека, комфорт і ефективність роботи також негативно залежать від WBV.

Працівники багатьох професій, зокрема трактористи, піддаються впливу WBV на транспортних засобах як на дорогах, так і поза ними. Значна кількість досліджень була проведена для вивчення впливу високих рівнів WBV на операторів сільськогосподарських тракторів. Зазвичай трактори не мають підвісок, що призводить до вищих рівнів вібрацій порівняно з іншими дорожніми транспортними засобами. Підвіски між шинами, осями і рамою у дорожніх транспортних засобах відсутні в тракторах; єдиною підвіскою є підвіска між рамою та кабіною, а також сидінням.

Транспортні засоби, які рухаються по нерівних поверхнях, зазнають вібрацій, спричинених нерівностями, по яких вони пересуваються. Якби такі транспортні засоби не мали підвісної системи, кожний удар, який би відчувався під час руху, передавався б безпосередньо оператору. Підвісна система поглинає деякі з найшкідливіших частот вібрації. Проте підвісна система також має власну резонансну частоту, і на цій частоті амплітуда вібрації може бути більшою. Порівняно з іншими транспортними засобами, захист водіїв тракторів від вібрацій є недостатнім.

Проведено значну кількість аналізів вібрацій сидіння трактора, і було виявлено, що рівень індукованих вібрацій значно перевищує комфортний рівень для оператора.

Було виконано значну кількість експериментальних та аналітичних робіт з підвіски сидіння трактора, оскільки вібрацію сидіння трактора можна зменшити до рівня комфорту для водія.

З іншого боку, аналітично приділено дуже мало уваги зниженню вібрацій за допомогою нової пасивної системи підвіски.

На основі аналізу досліджень та визначених проблем, сформульовано таку проблему як зменшення вібрації сидіння трактора, використовуючи нову пасивну систему підвіски з пружинами і демпфером, щоб забезпечити комфорт оператора та провести аналіз у порівнянні з поточною системою підвіски (рис. 3.1).

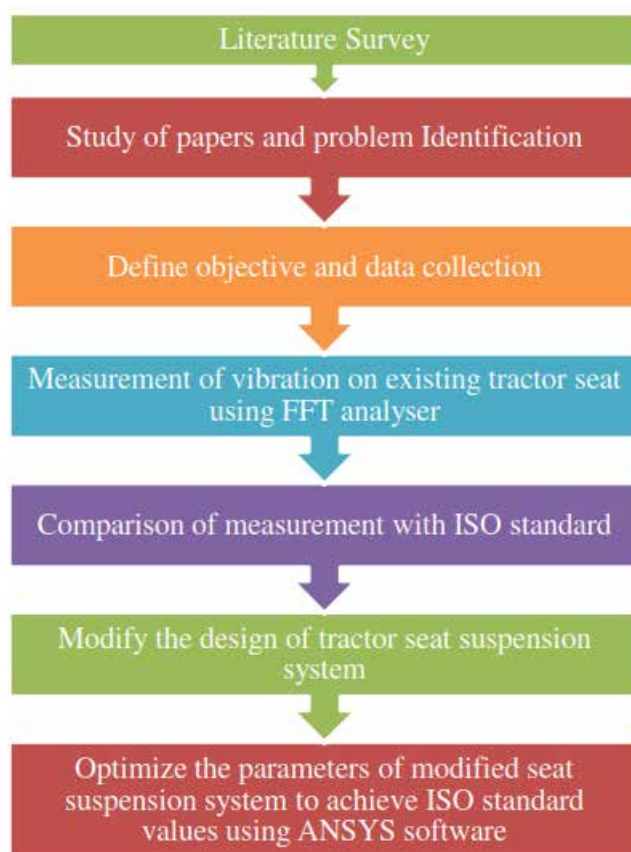


Рисунок 3.1 – Методика експериментальних досліджень

Для вирішення цієї проблеми поставлені наступні завдання:

- 1) Виміряти розміри стандартного сидіння трактора і врахувати технічні характеристики трактора. Провести зчитування прискорення за допомогою аналізатора FFT.
- 2) Порівняти отримані дані з ISO-стандартами.
- 3) Розробити та спроектувати нову систему підвіски, яка зменшить вібрації, що передаються через сидіння.
- 4) Зняти показники на модифікованому сидінні, щоб перевірити комфорт під час руху, тим самим підвищивши потенціал оператора та визначивши параметри для модифікованого сидіння.

5) Порівняти результати, отримані для існуючої підвіски сидіння і модифікованої підвіски.

Аналізатор FFT (швидке перетворення Фур'є) — це метод, який дозволяє представити хвильові сигнали як сукупність синусоїд з певною амплітудою та частотою. Огляд цих хвиль у частотній області замість часової може бути корисним, оскільки всі компоненти сигналу стають більш наочними. Динамічні сигнали зазвичай є комбінацією синусоїд з різною амплітудою, частотою та фазою. Трансформація сигналів з часової області в частотну дозволяє виявити індивідуальні компоненти в складних сигналах.

Теорема Фур'є стверджує, що будь-яка хвиля у часовій області може бути представлена у вигляді зваженої суми синусів і косинусів. Аналізатор спектра FFT зчитує вхідний сигнал, обчислює амплітуду його синусоїдальних і косинусоїдальних компонентів та відображає спектр цих частотних компонентів. Деякі вимірювання, які важко провести у часовій області, значно спрощуються у частотній області.

Техніка FFT дозволяє аналізувати всі частотні компоненти одночасно, що забезпечує значну перевагу в швидкості. У разі ширини діапазону 100 кГц і 400 частотних ліній весь спектр займає всього 4 мс для вимірювання.

Для цього дослідження було використано два стандартні сидіння, які є типовими для сучасних моделей тракторів (рис. 3.2). Сидіння мали компактную конструкцію, спеціально розроблену для використання в сільськогосподарських тракторах. Компоненти підвіски були розміщені за спинкою сидіння. Кожне сидіння було оснащено амортизуючими елементами: пружинами із сталевого дроту, масляними амортизаторами та буферами з гуми, які обмежують рух вгору та вниз. Сидіння безпосередньо кріпиться до шасі, що означає, що більшість сил передається на водія через підвіску сидіння. Такі сидіння є типовими для багатьох позашляхових транспортних засобів, таких як трактори, землерийні машини та промислові вантажівки, оскільки вони здатні забезпечити базову амортизацію в умовах важкої експлуатації.

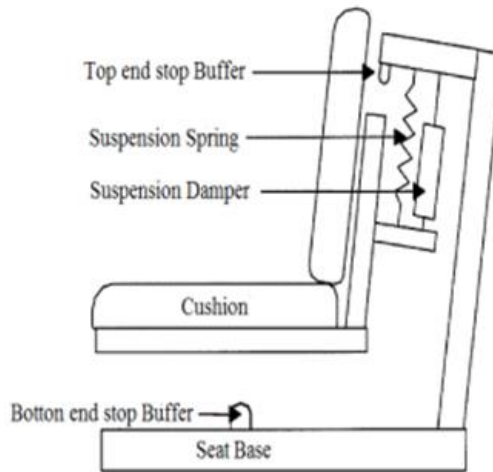


Рисунок 3.2 – Звичайне тракторне сидіння

Конструкція сидінь для тракторів зазвичай включає систему пружин, амортизаторів та направляючий механізм, а також буферні обмежувачі, які контролюють вертикальні переміщення. Наприклад, один буфер обмежує рух сидіння вгору, а інший — вниз. У цьому дослідженні було використано систему підвіски з чотирьохшаровим з'єднанням і двома гвинтовими пружинами (з коефіцієнтом жорсткості 11,3 Н/мм) та гідравлічним амортизатором (з коефіцієнтом демпфування 0,920 Н·с/мм). Система також має буфери для обмеження переміщення у вертикальному напрямку.

Сидіння було протестовано за допомогою трьохосьового акселерометра, встановленого на місці оператора, щоб зафіксувати рівень прискорення відповідно до міжнародного стандарту ISO 2631/1 (1985). Тестування проводилося на трьох типах поверхонь: зерновому полі, плантації цукрової тростини та дорогах, імітуючи реальні умови при таких завданнях, як оранка, культивування і боронування.

Вимірювання вертикального середньоквадратичного прискорення при швидкості 5 км/год для стандартного сидіння (рис. 3.3-3.5).

Під час випробувань стандартного сидіння в умовах культивування на рівній поверхні було зафіксовано рівень вертикального середньоквадратичного прискорення.

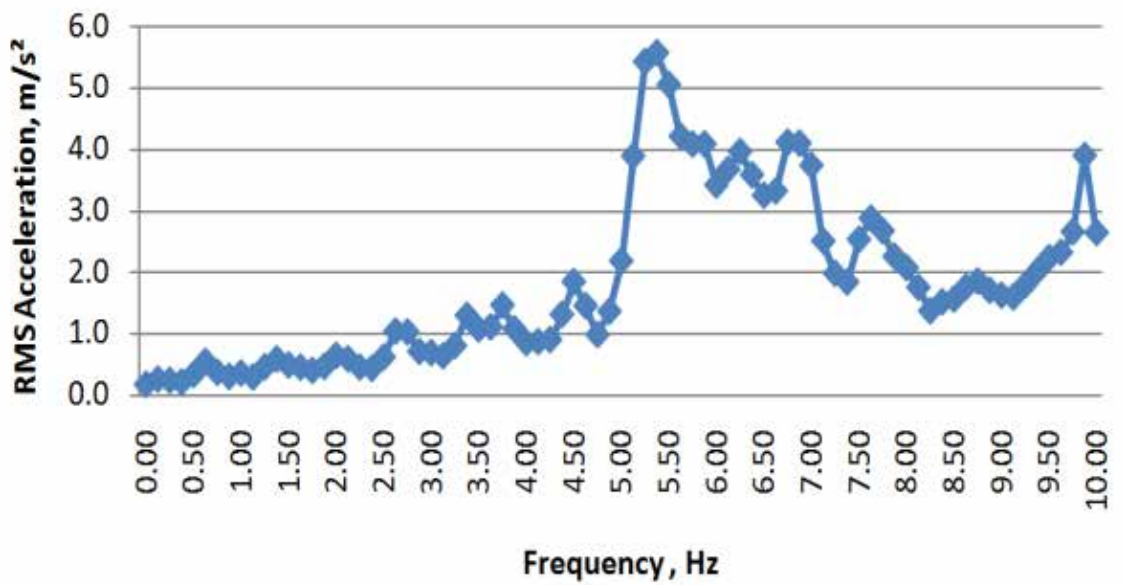


Рисунок 3.3 – Обробіток рівного поля зі звичайним сидінням трактора при 05 км/год

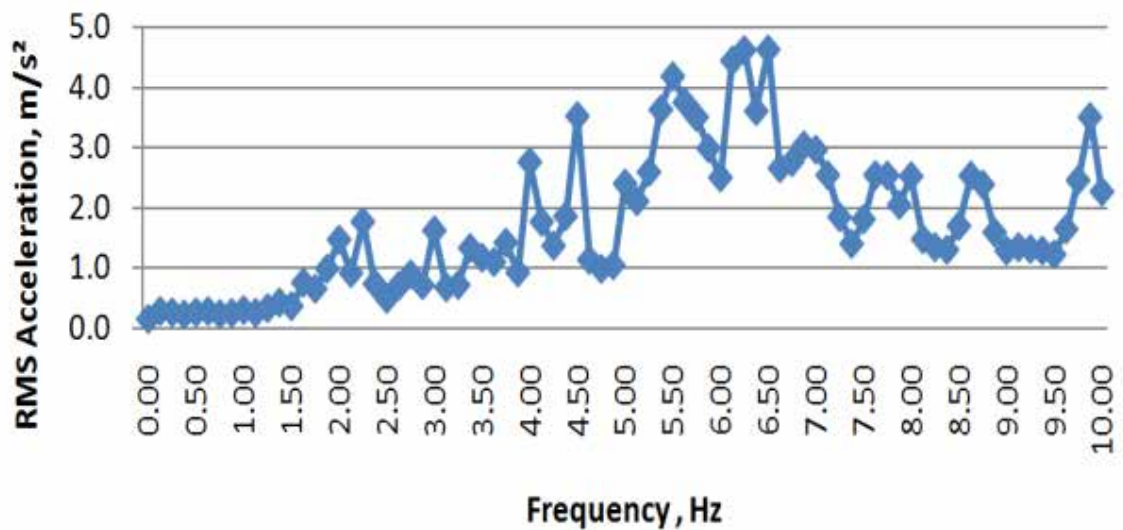


Рисунок 3.4 – Обробіток поля цукрової тростини зі звичайним сидінням трактора зі швидкістю 05 км/год

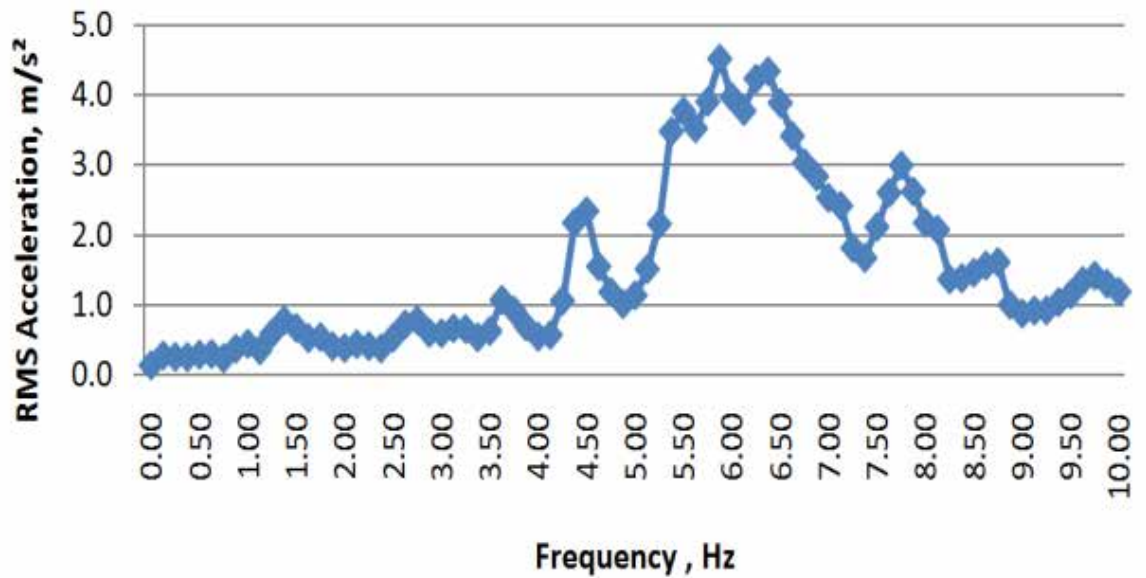


Рисунок 3.5 – Культиватор на дорозі зі звичайним сидінням трактора при 05 км/год

Вимірювання середньоквадратичного вертикального прискорення на 08 км/год для звичайного тракторного сидіння.

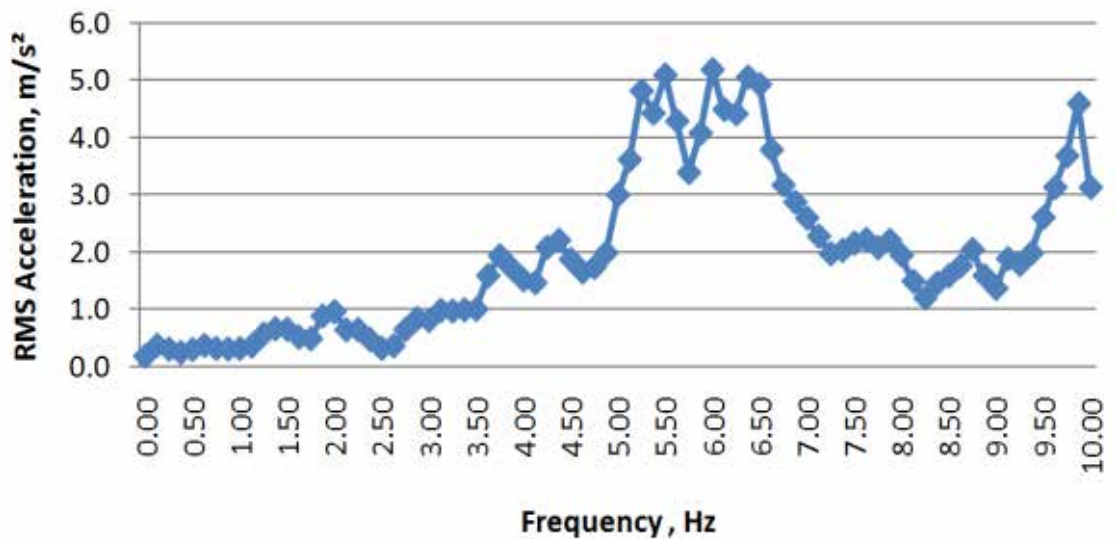


Рисунок 3.6 – Обробіток рівного поля зі звичайним сидінням трактора зі швидкістю 08 км/год

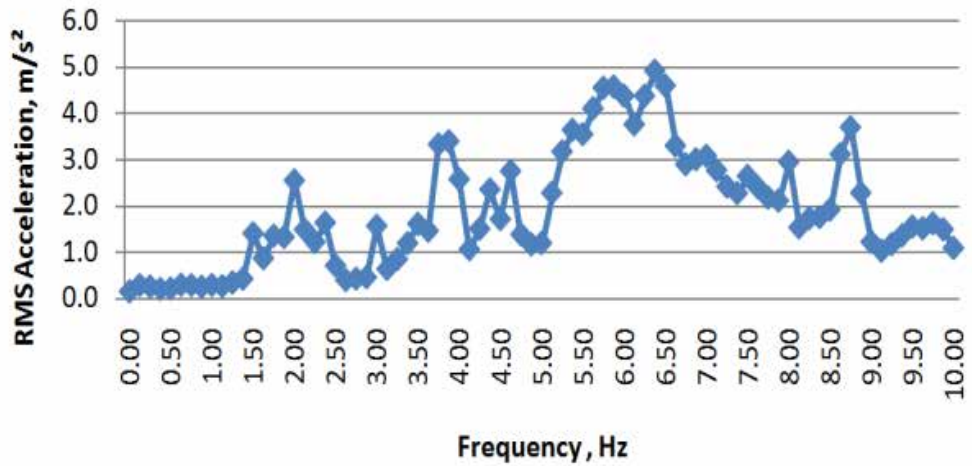


Рисунок 3.7 – Обробіток поля цукрової тростини зі звичайним сидінням трактора зі швидкістю 08 км/год.

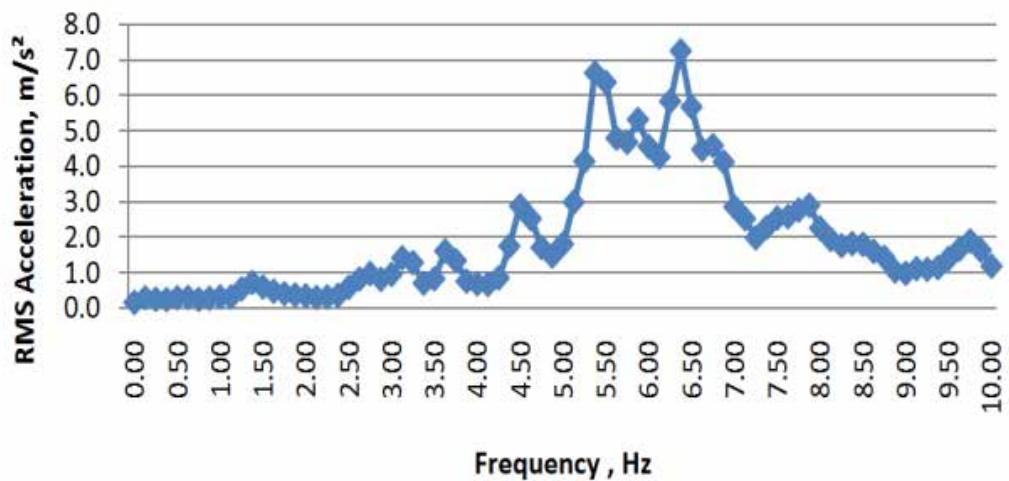


Рисунок 3.8 – Культиватор на дорозі зі звичайним сидінням трактора при 08 км/год

Змінена конфігурація сидіння показана на рис. 3.9. Вона складається з пружини і системи демпфера. Пружина і демпфер з'єднані паралельно між собою. До кожного з'єднанні пружина і демпфер інші за допомогою поперечних планок, які шарнірно закріплені на центр. Один кінець пружини прикріплений до одного кінця штанги і кріпиться до сидіння трактора, де інший кінець пружини шарнірно прикріплений до один кінець іншої планки за допомогою ролика.

Подібним чином один кінець демпфера шарнірно прикріплений до одного кінця планки, яка закріплена на шасі, де інший кінець шарнірно прикріплений до планки за допомогою ролика. Система складається з кінцевого упору, як показано на рис. 3.9.

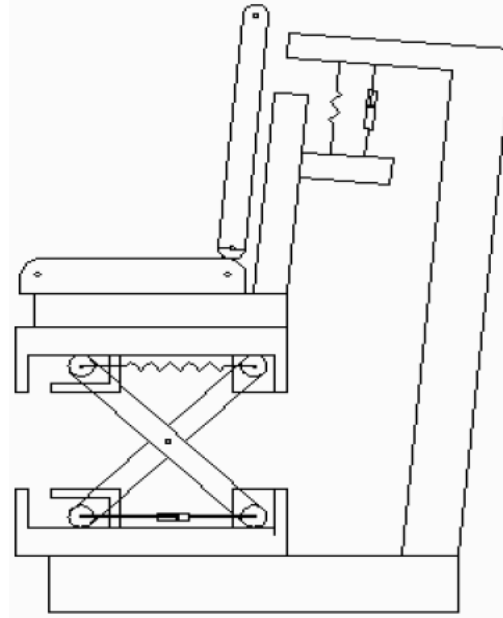


Рисунок 3.9 – Модифіковане сидіння трактора

Вимірювання середньоквадратичного вертикального прискорення на 05 км/год для модифікованого тракторного сидіння (рис. 3.10).

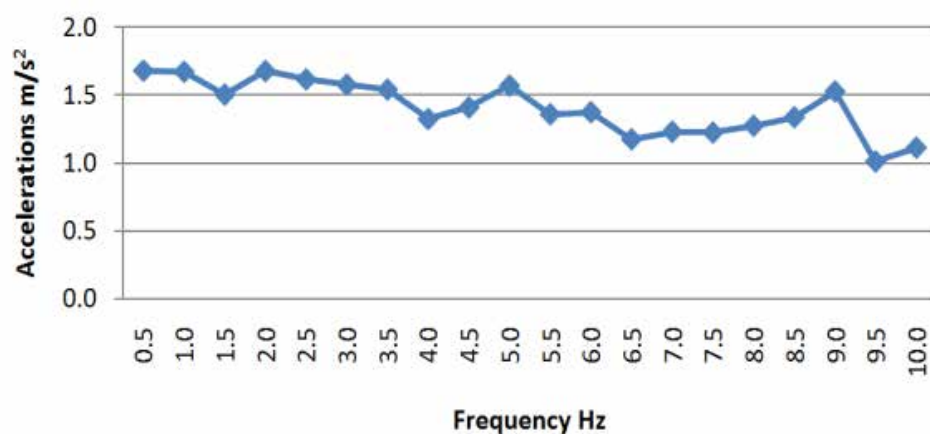


Рисунок 3.10 – Обробіток рівного поля з модифікованим сидінням трактора зі швидкістю 05 км/год

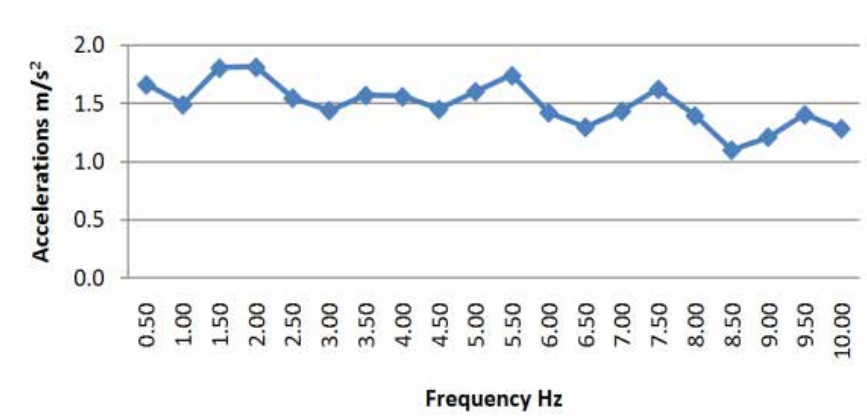


Рисунок 3.11 – Обробіток поля цукрової тростини з модифікованим сидінням трактора зі швидкістю 08 км/год

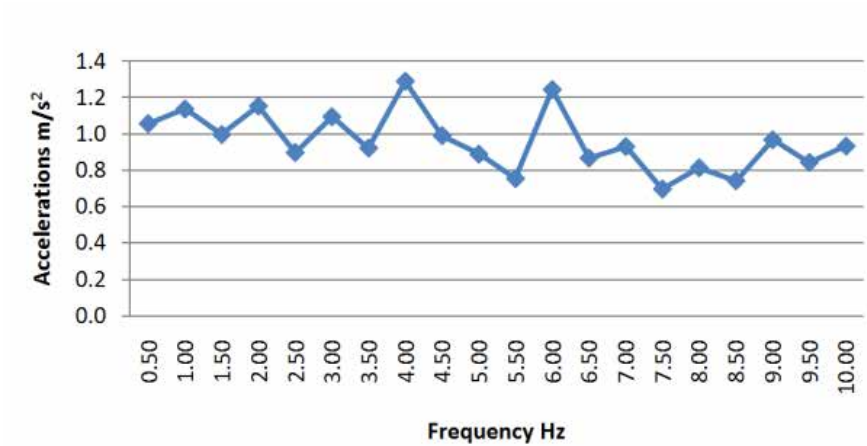


Рисунок 3.12 – Культиватор на дорозі з модифікованим сидінням трактора на 05 км/год

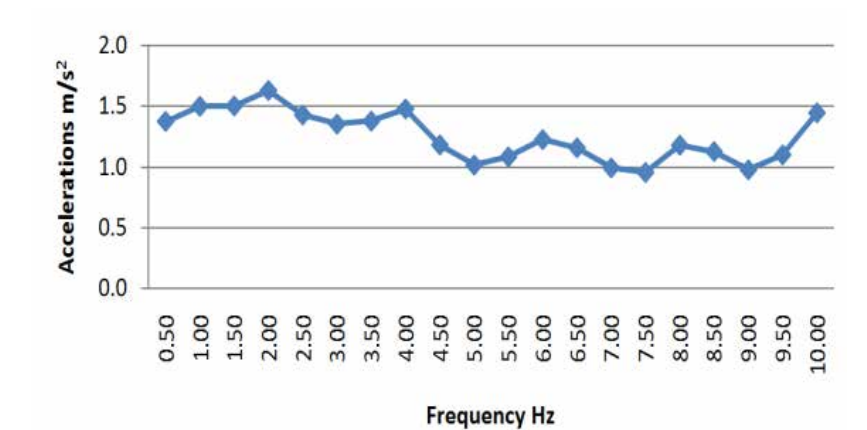


Рисунок 3.13 – Обробіток рівного поля з модифікованим сидінням трактора зі швидкістю 08 км/год

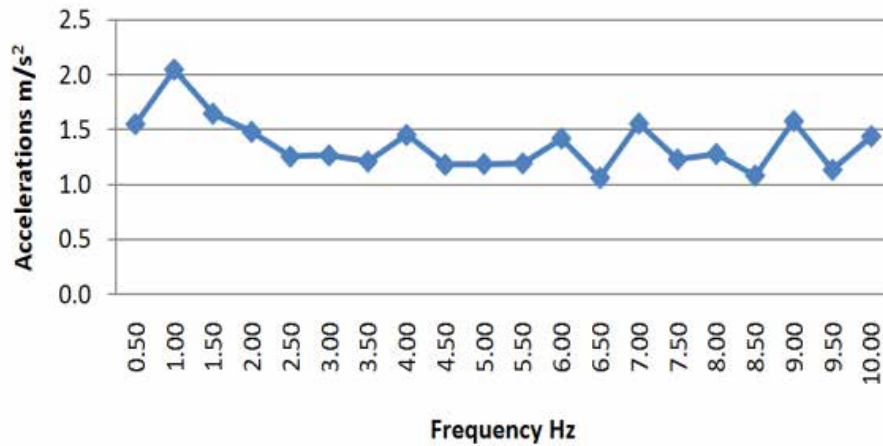


Рисунок 3.14 – Обробіток поля цукрової тростини з модифікованим сидінням трактора зі швидкістю 08 км/год

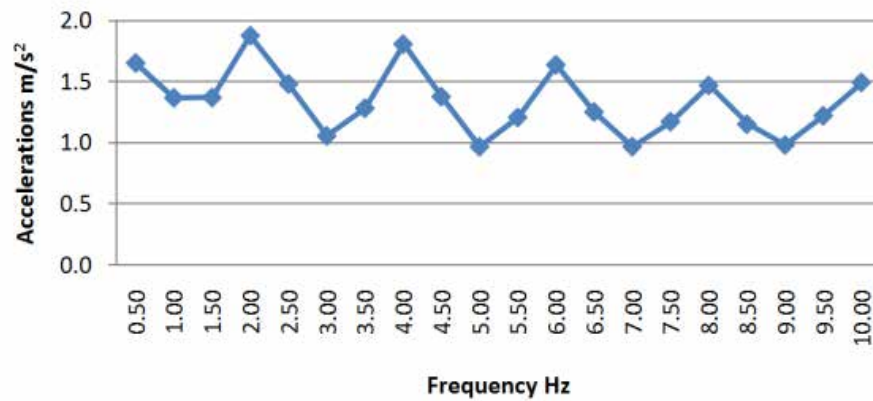


Рисунок 3.15 – Культиватор на дорозі з модифікованим сидінням трактора на 08 км/год

### 3.2. Моделювання системи підвіски сидіння трактора в ANSYS

Методика моделювання підвіски сидіння трактора в ANSYS виглядає наступним чином:

#### 1. Підготовка геометрії та вибір моделі:

Створюється або імпортується 3D-модель сидіння трактора та компонентів підвіски (наприклад, пружин і демпферів) у середовище ANSYS. Якщо доступні точні геометричні розміри компонентів, використовують їх для побудови точних моделей.

Виберається тип підвіски для моделювання — пасивна, напівактивна чи активна. Це допоможе визначити, які компоненти слід додати, наприклад, демпфери, пружини або елементи активного управління.

## 2. Задання матеріальних властивостей:

Призначають кожному компоненту відповідні матеріальні властивості, такі як модуль пружності, коефіцієнт Пуассона для пружин, демпферів, рами та сидіння.

Якщо підвіска включає нелінійні матеріали, наприклад, гумові буфери, додають їх нелінійні характеристики, щоб модель точно відтворювала реальні умови.

## 3. Налаштування сітки:

Генерують сітку для кожного елемента підвіски та сидіння. Для компонентів, що зазнають великих деформацій, таких як пружини і амортизатори, створюють дрібнішу сітку, щоб підвищити точність моделювання.

Використовують адаптивну сітку для складних геометрій, щоб знизити обчислювальні витрати без втрати точності.

## 4. Накладання граничних умов і навантажень:

Задають фіксації для точок кріплення підвіски до шасі трактора.

Застосовують відповідні навантаження, зокрема вагу оператора, динамічні сили, що виникають під час руху по нерівностях, і зовнішні сили (наприклад, удари та вібрації).

Вказують граничні умови для контактів між компонентами (наприклад, між демпферами і рамою), щоб забезпечити реалістичне відтворення взаємодії.

## 5. Виконання аналізу:

Виберають тип аналізу, наприклад, статичний або динамічний, залежно від цілей моделювання. Для оцінки вібрацій та амортизації зазвичай використовується гармонійний або спектральний аналіз.

Налаштовуюють параметри аналізу, такі як частотний діапазон для динамічних розрахунків, щоб дослідити вплив різних частот вібрації на сидіння та підвіску.

#### 6. Аналіз результатів:

Переглядають результати моделювання, зокрема графіки зміщення, деформацій та напружень у підвісці і сидінні.

Оцінюють вертикальне прискорення (rms) сидіння для відповідності стандартам ISO (наприклад, ISO 2631 для вібрацій), що дозволяє визначити рівень комфорту для оператора (рис. 3.16 – 3.18).

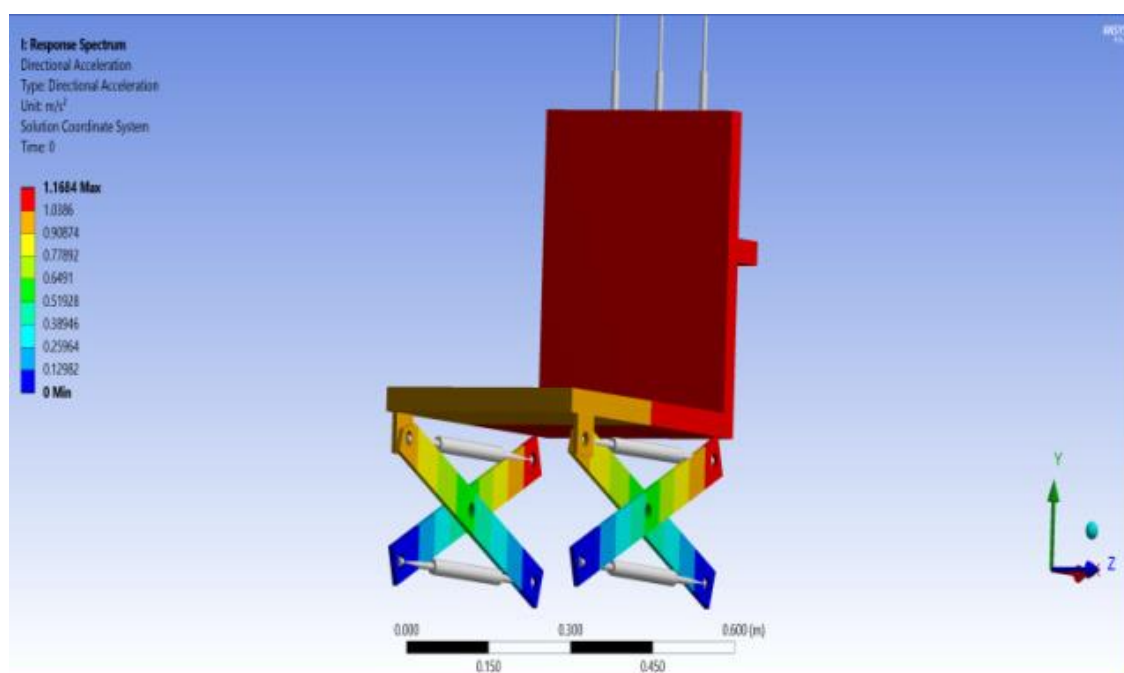


Рисунок 3.16 – Середньоквадратичне прискорення з культиватором на рівному полі

Роблять висновки щодо ефективності підвіски та можливих покращень у конструкції.

Після проведення тестування сидіння сільськогосподарського трактора на двох різних швидкостях — 5 км/год і 8 км/год — порівняння вимірених значень середньоквадратичного прискорення (rms) сидіння трактора згідно з вимогами стандарту ISO 2631-1 показало, що частотно-зважене середньоквадратичне прискорення в вертикальному напрямку перевищує

максимальний рівень, встановлений як «Обережність для здоров'я» для тракторів підвищеної прохідності.

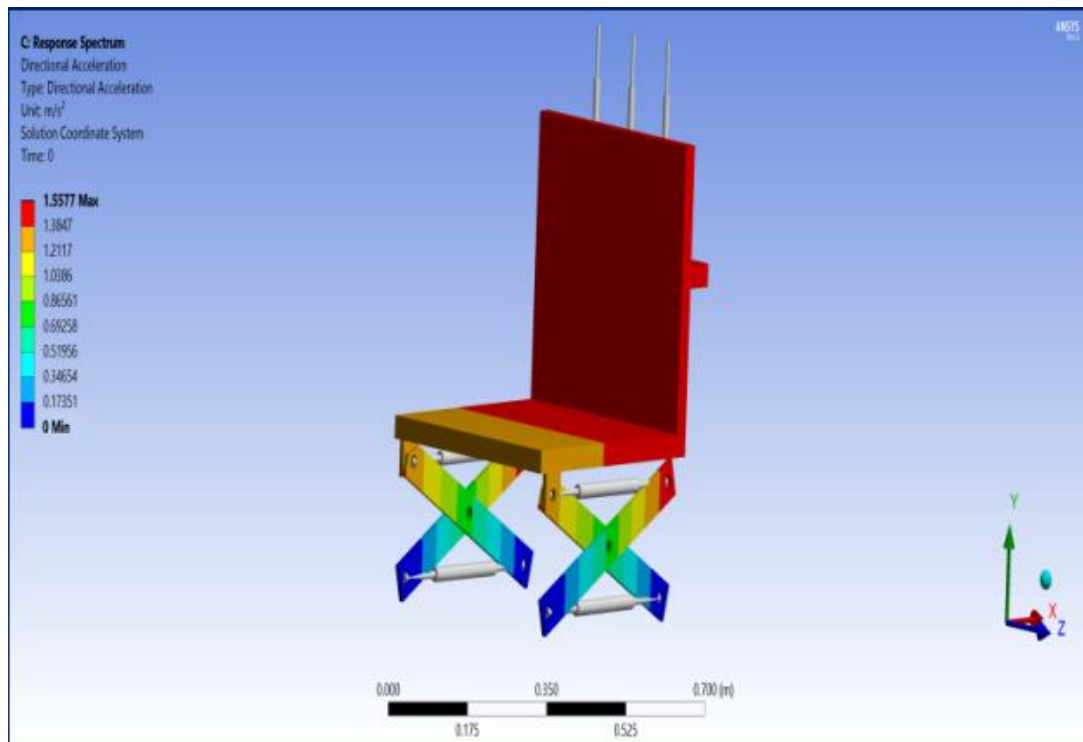


Рисунок 3.17 – Середньоквадратичне прискорення з культиватором на полі цукрової тростини

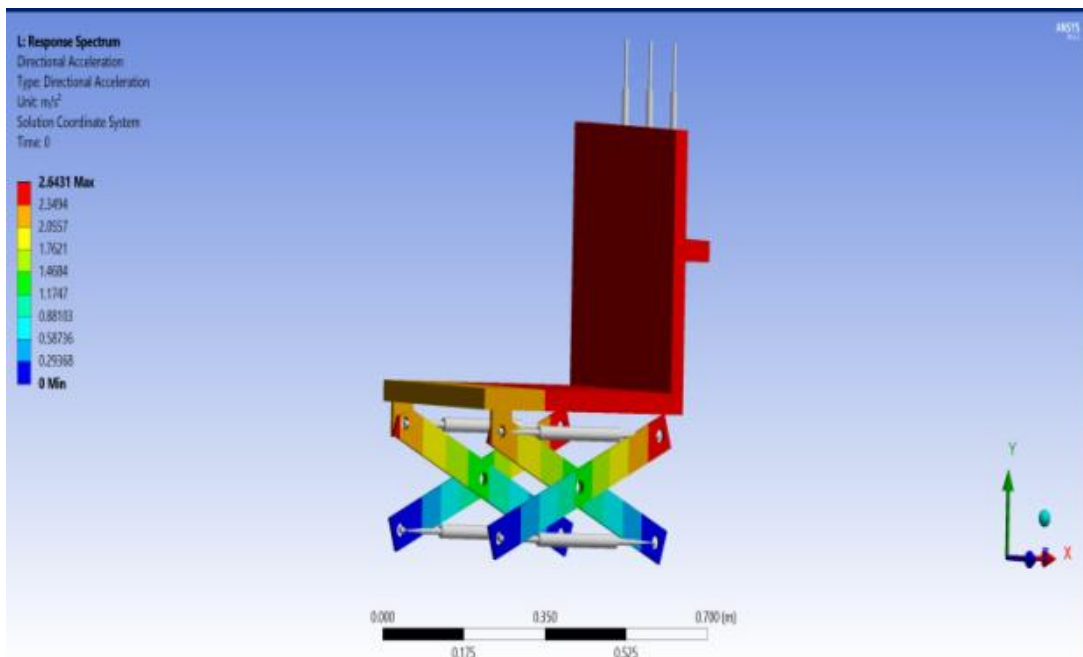


Рисунок 3.18 – Середньоквадратичне прискорення з культиватором на дорозі

Зареєстровані результати тестування показали, що середньоквадратичне прискорення для сидіння тракторів без модифікації підвіски становило  $1,5 \text{ м/с}^2$  з плугом і варіювалося від 1 до  $6,5 \text{ м/с}^2$  при різних умовах навантаження. Однак після розробки модифікованої системи підвіски та проведення вимірювань за допомогою аналізатора ШПФ вібрація значно знизилася. Зокрема, середньоквадратичне прискорення зменшилось до  $1,5\text{-}3,3 \text{ м/с}^2$  з плугом,  $1\text{-}1,8 \text{ м/с}^2$  з культиватором і  $1,5\text{-}3 \text{ м/с}^2$  з бороною. У результаті система з модифікованою підвіскою наближається до рівнів «Зони обережності для здоров'я» за стандартом ISO 2631, що свідчить про значне поліпшення комфорту оператора. У той час як для тракторного сидіння зі стандартною підвіскою рівень прискорення перевищує допустимі межі цієї зони.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз різних типів підвісок показав, що існують проблеми, такі як необхідність поліпшення стійкості до температурних коливань та зменшення витрат на обслуговування складних систем. Однак завдяки новим матеріалам і технологіям ці обмеження можна подолати. Сучасні підходи, включаючи активні, пневматичні системи та інтеграцію електроніки для точного налаштування, мають великий потенціал для підвищення комфорту й безпеки операторів, зменшуючи фізичне навантаження і покращуючи умови роботи в сільському господарстві.

2. Для забезпечення високої продуктивності та комфорту в польових умовах, підвіска трактора повинна бути адаптивною, надійною та з мінімальними вимогами до обслуговування. Правильний вибір та налаштування підвіски дозволяє знизити фізичне навантаження на оператора, покращити безпеку і збільшити ефективність роботи техніки.

3. Запропоновано математичну модель підвіски сидіння сільськогосподарського трактора на основі існуючих моделей яка може об'єднати переваги моделей з двома і трьома ступенями свободи, а також застосувати принципи адаптивного демпфування з активним керуванням. Така комбінована модель дозволить враховувати не лише коливання сидіння та шасі, але також динаміку взаємодії з колесами та можливість коригування жорсткості і демпфування в реальному часі на основі умов дороги.

4. Очікуваний вплив нової моделі на техніку і робочий процес буде помітний у підвищенні продуктивності і надійності. Оскільки модель знижує амплітуди коливань, зменшується знос елементів підвіски та конструкції трактора, що знижує витрати на технічне обслуговування і ремонт. Це особливо корисно для сільськогосподарських підприємств, оскільки сприяє зменшенню витрат на експлуатацію та продовженню терміну служби техніки. Завдяки активному керуванню модель здатна адаптуватися до різних умов

експлуатації, забезпечуючи однаково високий рівень комфорту незалежно від типу поверхні. Це значно покращує умови праці оператора, забезпечуючи йому стабільність навіть при роботі на нерівному рельєфі. Це допомагає уникнути стомленості, спричиненої вібраціями, і знижує ризики для здоров'я оператора.

5. Після проведення тестів сидіння сільськогосподарського трактора на двох різних швидкостях — 5 км/год і 8 км/год — порівняння вимірних значень середньоквадратичного (RMS) прискорення сидіння трактора відповідно до стандарту ISO 2631-1 показало, що величина частотно-зваженого середньоквадратичного прискорення у вертикальному напрямку перевищує верхню межу зони «Обережності для здоров'я» для тракторів підвищеної прохідності. Зареєстроване середньоквадратичне прискорення для сидіння становило 1,5 м/с<sup>2</sup> із плугом і від 1 до 6,5 м/с<sup>2</sup> при різних умовах навантаження. Після розробки модифікованої системи підвіски та вимірювань середньоквадратичного прискорення за допомогою аналізатора ШПФ результати показали, що вібрацію вдалося знизити до рівня, що наближається до «Зони обережності для здоров'я». Значення прискорення зменшились до 1,5 - 3,3 м/с<sup>2</sup> із плугом, 1 - 1,8 м/с<sup>2</sup> із культиватором і 1,5 - 3 м/с<sup>2</sup> із бороною. Для тракторного сидіння зі стандартною підвіскою рівень прискорення перевищує межі «Зони обережності для здоров'я», тоді як із модифікованою підвіскою система наближається до цих меж, що відповідає вимогам стандарту ISO 2631.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hostens, I., Deprez, K., & Ramon, H. (2004). "An Improved Design of Air Suspension for Seats of Mobile Agricultural Machines" published in Journal of Sound and Vibration. This study explores the vibration reduction performance of air suspension systems, which offer better comfort by reducing harmful low-frequency vibrations.
2. Yu, Ji-Hoon, Lee, Kyu-Cheol, Park, Hyung-Bae, et al. (2008). "Development of 2-DOF Active Seat Suspension System for Agricultural Tractor" from ASABE. This paper presents a 2-degree-of-freedom (2-DOF) active suspension system for agricultural tractor seats to effectively reduce vibrations across a wide frequency range.
3. Cadou, J., & Bowser, R. (2000). "Agricultural Tractor Chassis Suspension System for Improved Ride Comfort". This paper explores various suspension system designs that can enhance operator comfort by reducing the vibration transmitted to the operator.
4. Kazuhiko OHMIYA, "Seat Suspension System For Improving Ride Comfort".
5. KenanMelemez, MetinTunay and Tuna Emir, "The role of seat suspension in whole-body vibration affecting skidding tractor operators", Journal of Food, Agriculture & Environment Vol.11 (1): 1211-1215. 2013
6. Se Jin Park, Chae-Bogk Kim, Chul Jung Kim, Jeong Woo Leem, "Comfortable driving postures for Koreans", International Journal of Industrial Ergonomics 26 (2000) 489-497
7. Ch.Sreedhar; Dr. K.C.B. Raju, Dy.G.M.BHEL; Dr. K. NarayanaRao, "Development and Optimization of Vibration Protection Seats (Tempered Springs) for Agricultural Tractor", Proceedings of the World Congress on Engineering 2008 Vol-II WCE 2008, July 2 - 4, 2008, London, U.K.
8. K.Walker-Bone and K.T. Palmer, "Musculoskeletal disorders in farmers and farm workers", Journal (2003) Southampton, UK

9. Іваненко О. В., Шевченко О. В., Ярошенко В. В. "Моделювання динамічних характеристик підвіски сидіння трактора при умовах сільськогосподарських робіт". Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 2018.
10. Горбатенко В. В., Соколов О. І. "Вдосконалення динаміки підвіски сидіння тракторів для зменшення вібраційного навантаження на оператора". Наукові праці Державного аграрного університету, 2019
11. Дьяків М. С., Мельничук Т. М. "Розробка методики оптимізації параметрів підвіски сидіння для сільськогосподарської техніки". Сільськогосподарська інженерія, 2021.
12. Бабенко І. М., Орлов О. П. "Динамічні дослідження підвіски сидіння сільськогосподарського колісного трактора". Наукові записки Державного університету, 2020
13. Луценко О. М., Петров В. Л. "Вплив конструктивних параметрів підвіски сидіння на комфортність роботи оператора сільськогосподарського трактора". Агроінженерія та машинобудування, 2019.
14. Сидоренко В. К., Пилипчук М. І. "Оптимізація підвіски сидіння трактора з урахуванням вібраційної динаміки". Техніка та технології сільськогосподарського виробництва, 2020
15. Сергієнко М. А., Макаренко В. І. "Теоретичне обґрунтування вибору матеріалів для підвісок сидінь сільськогосподарських машин". Транспортні технології України, 2022.
16. Жуков М. В., Кравчук А. М. "Моделювання амортизації підвіски сидіння тракторів для поліпшення комфортності оператора". Інженерія та технології агропромислового комплексу, 2021
17. Мирошниченко А. О., Гудзь В. В. "Аналіз вібраційного навантаження оператора тракторів з різними типами підвісок сидінь". Вісник технічних наук України, 2020.
18. Василенко І. В., Степаненко О. О. "Підвищення ефективності підвіски сидіння сільськогосподарських тракторів за рахунок поліпшення

характеристик демпфування". Науковий вісник Національного аграрного університету, 2023

19. Zhang, S., Wei, W., Chen, X., Xu, L., & Cao, Y. (2023). "Vibration Performance Analysis and Multi-Objective Optimization Design of a Tractor Scissor Seat Suspension System." *Agriculture*, 13(1), 48. doi:10.3390/agriculture13010048.

20. Yu, J., Lee, K., & Park, H.-B. (2008). "Development of 2-DOF Active Seat Suspension System for Agricultural Tractor." *ASABE 2008 Annual International Meeting*.

21. Hostens, I., Deprez, K., & Ramon, H. (2004). "An Improved Design of Air Suspension for Seats of Mobile Agricultural Machines." *Journal of Sound and Vibration*.

22. Cadou, J., & Bowser, R. (2000). "Agricultural Tractor Chassis Suspension System for Improved Ride Comfort." *Journal of Agricultural Engineering*.

23. Sakamoto, Y., & Tani, J. (2020). "Design and Optimization of Active Seat Suspension Systems for Tractors." *Journal of Mechanical Engineering Science*. This study focuses on the development of an active suspension system using smart materials for enhanced comfort.

24. Velasco, M., Martín, J., & González, R. (2017). "Influence of Suspension Characteristics on Tractor Vibration Reduction." *International Journal of Vehicle Design*. This research delves into the optimization of suspension elements for reducing vibration.

25. Wei, W., & Zhang, S. (2022). "Optimization of Tractor Seat Suspension System Based on Simulation." *Applied Mechanics and Materials*. This paper explores the optimization of tractor seat suspension using simulations to reduce operator discomfort.

26. Wang, D., Zhang, Y., & Li, T. (2019). "Development of Semi-Active Suspension Systems for Agricultural Tractors." *Journal of Agricultural Engineering*. This paper discusses the role of semi-active suspensions in improving the dynamic performance of tractor seats.

27. Xu, W., Li, Z., & Jin, Y. (2018). "Active Vibration Control of Tractor Seat Suspensions Using Magnetorheological Dampers." *Journal of Sound and Vibration*.
28. Zhang, L., Zhang, Y., & Wang, Y. (2019). "Research on Tractor Suspension Systems Using Nonlinear Vibration Theory." *International Journal of Mechanical Sciences*. This study examines the use of nonlinear theories in suspension design to improve vibration damping.
29. Jiang, Y., & Zhang, X. (2020). "Optimization of Tractor Seat Suspension Using Genetic Algorithm." *Computational Mechanics*. The study applies genetic algorithms to optimize suspension parameters for better vibration attenuation.
30. Wei, J., & Liu, X. (2019). "A Comparative Study of Active and Passive Suspension for Agricultural Tractors." *Journal of Engineering for Agriculture and Food*.
31. Zhou, C., & Wang, Y. (2021). "Design and Optimization of Tractor Seat Suspension System for Comfort Improvement." *Mechanical Systems and Signal Processing*.
32. Zhang, H., Li, L., & Zhou, H. (2017). "Design of Active Seat Suspension System for Tractors Based on the PID Control Algorithm." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*.
33. Sui, X., Li, Z., & Zhang, S. (2020). "Study on Tractor Seat Suspension Based on Vibration Isolation Performance." *Journal of Vibration and Acoustics*.