

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний

Кафедра агроінжинірингу

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність **208 Агроінженерія**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
агроінжинірингу

_____ Шуляк М.Л.

“08” квітня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ (МАГІСТЕРСЬКУ) РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Луценку Сергію Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності роботи колісного машино-тракторного агрегату на основі використання супутникових навігаційних систем

керівник роботи: Хворост Тетяна В'ячеславівна, к.е.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “01” березня 2024 року № 669/ос

2. Строк подання здобувачем роботи: «19» липня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Нормативно-технічна документація по розробці механізованих технологічних процесів у рослинництві. 2. Науково-технічна література. 3. Літературні джерела інформації та Інтернет ресурси. 4. Монографії, тощо за темою наукового дослідження. 5. Методичні рекомендації до виконання проекту (роботи).

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Стан питання, мета та завдання досліджень. 2. Моделі механіко-математичного аналізу для вдосконалення системи управління рухом машино-тракторних агрегатів. 3. Експериментальні дослідження електромеханічної системи керування. 4 Охорона праці. 5. Економічна доцільність. Загальні висновки. Список літературних джерел.
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Хворост Т.В.		
Економічна доцільність	Мікуліна М.О.		

7. Дата видачі завдання «08» квітня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної (магістерської) роботи	Строк виконання етапів дипломної (магістерської) роботи	Погоджено з керівником дипломної (магістерської) роботи
1.	Збір інформації про діяльність господарстві	до 12.04.2024 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.04.2024 р.	
3.	Складання плану роботи	до 19.04.2024 р.	
4.	Написання вступу	до 22.04.2024 р.	
5.	Підготовка розділу «Аналітична частина»	до 26.04.2024 р.	
6.	Підготовка розділу «Основна частина»	до 03.06.2024 р.	
7.	Підготовка розділу «Охорона праці»	до 14.06.2024 р.	
8.	Підготовка розділу «Економічна доцільність»	до 28.06.2024 р.	
9.	Написання висновків та пропозицій	до 05.07.2024 р.	
10.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 08.07.2024 р.	
11.	Подання роботи на рецензування	до 15.07.2024 р.	
12.	Подання до попереднього захисту	до 19.07.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Луценко С.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної (магістерської) роботи

_____ (підпис)

Хворост Т.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Тема роботи – «Підвищення ефективності роботи колісного машино-тракторного агрегату на основі використання супутникових навігаційних систем».

Пояснювальна записка магістерської роботи на 53 сторінках машинописного тексту, 31 рис., 1 табл., 25 літературних джерел

В магістерській роботі розроблено математичну модель керування рухом МТА і його механіко-математичну модель. Механіко-математична модель була використана при моделюванні руху МТА в режимі реального часу в лабораторних умовах для перевірки працездатності алгоритмів керування.

Проведено математичне моделювання руху МТА. На підставі результатів моделювання підтверджена працездатність моделі керування і адекватність механіко-математичної моделі МТА.

Спроекована і створена електромеханічна система керування рухом, яка використовує супутникові радіонавігаційні системи ГЛОНАСС / GPS. Система забезпечує рух по задається траєкторії без участі водія і може бути використана для керування різними колісними сільськогосподарськими машинами.

Ключові слова: МАШИНО-ТРАКТОРНИЙ АГРЕГАТ, РУХ КОЛІСНИХ МАШИН, ГЛОНАСС, GPS, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РУХОМ

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Стан питання, мета та завдання досліджень.....	9
1.1 Аналіз та огляд математичних моделей керування рухом колісних машин	9
1.2 Аналіз теорій та методик опису взаємодії колеса з опорною поверхнею.....	11
1.3 Оцінка стійкості колісних машин.....	14
1.4 Автоматизоване правління рухом машино-тракторних агрегатів	15
1.5 Агротехнічні вимоги до точності виконання сільськогосподарських робіт	19
2 Моделі механіко-математичного аналізу для вдосконалення системи управління рухом машино-тракторних агрегатів	22
2.1 Математична модель керування рухом для вирішення завдання глобального регулювання	22
2.2 Алгоритми для вирішення завдання локального регулювання	24
2.3 Перевірка працездатності математичної моделі машино-тракторного агрегату.....	26
3 Експериментальні дослідження електромеханічної системи керування.....	29
3.1 Програмно-апаратна схема взаємодії елементів системи керування	29
3.2 Система керування рухом з електромеханічними компонентами	30
3.3 Визначення передавальної функції системи «електричний двигун- рульове керування - керовані колеса ».....	32
3.4 Польові експерименти для оцінки ефективності роботи	

електромеханічної системи керування	33
4 Охорона праці.....	45
4.1 Ризики та безпека автономних систем керування.....	45
4.2 Розробка та впровадження заходів безпеки.....	45
5 Економічна доцільність.....	47
Загальні висновки.....	50
Список використаних джерел.....	51
Додатки	

ВСТУП

Актуальність і ступінь розробленості теми

Сучасне сільське господарство вимагає постійного підвищення продуктивності та ефективності роботи машино-тракторних агрегатів (МТА). У зв'язку з глобальними змінами клімату, зростанням вартості енергоресурсів і необхідністю раціонального використання природних ресурсів, аграрний сектор шукає нові способи оптимізації виробничих процесів. Одним із перспективних напрямків є впровадження супутникових навігаційних систем для підвищення ефективності роботи колісного МТА.

Застосування супутникових навігаційних систем у сільському господарстві дозволяє досягти таких переваг:

1. Підвищення точності виконання агротехнічних операцій. Використання навігаційних систем дозволяє забезпечити точне керування траєкторією руху МТА, що зменшує пропуски та перекриття, сприяє раціональному використанню насіння, добрив і засобів захисту рослин.

2. Зниження витрат на паливно-мастильні матеріали. Оптимізація траєкторії руху та точне планування робочих маршрутів сприяють зменшенню витрат пального, що має важливе значення в умовах зростання цін на енергоресурси.

3. Збільшення продуктивності праці. Використання навігаційних систем дозволяє автоматизувати процеси управління МТА, знижуючи навантаження на оператора, підвищуючи ефективність роботи та зменшуючи час простою техніки.

4. Підвищення якості обробки ґрунту та посівів. Точне дотримання заданих параметрів технологічних операцій сприяє покращенню якості обробки ґрунту та посівів, що позитивно впливає на врожайність і якість продукції.

5. Моніторинг і контроль агротехнічних процесів. Навігаційні системи дозволяють здійснювати моніторинг та контроль за виконанням агротехнічних операцій у реальному часі, що сприяє оперативному виявленню та усуненню недоліків.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи колісного машинотракторного агрегату (МТА) на основі застосування електромеханічної системи керування рухом, що використовує супутникові радіонавігаційні системи ГЛОНАСС / GPS.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі **завдання**:

1. Розробити математичну модель керування рухом МТА і його механіко-математичну модель.

2. Провести математичне моделювання руху МТА для перевірки адекватності розроблених математичних моделей.

Наукова новизна. Створено механіко-математична модель МТА і математичну модель керування рухом для моделювання руху в режимі реального часу в лабораторних умовах.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Математична модель керування рухом МТА.

2. Механіко-математична модель МТА.

3. Електромеханічна система керування рухом, яка використовує супутникові радіонавігаційні системи ГЛОНАСС / GPS.

4. Програмно-апаратний комплекс, що забезпечує функціонування системи керування.

5. Результати теоретичних і експериментальних досліджень.

1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз та огляд математичних моделей керування рухом колісних машин

В сучасному дослідженні та практичному застосуванні автоматизованих систем керування рухом колісних машин, значну увагу приділяється розробці та вдосконаленню математичних моделей, які дозволяють ефективно керувати рухом транспортних засобів. В основі багатьох таких моделей лежать спрощені лінійні рівняння руху автомобіля з двома ступенями свободи.

Метою даного підрозділу є аналіз та огляд математичних моделей керування рухом колісних машин.

Розглянемо прогнозні моделі, яких відбувається прогнозування розташування трактора колісного через певні проміжки часу. Найпоширеніша є модель Макадама. Основа моделі: спрощені рівняння лінійні руху автомобіля. На рис. 1.1 зображена схема траєкторії руху з відхиленням прогнозованої від бажаної, в якій кут повороту колеса (рульового) визначається з величини такого відхилення.

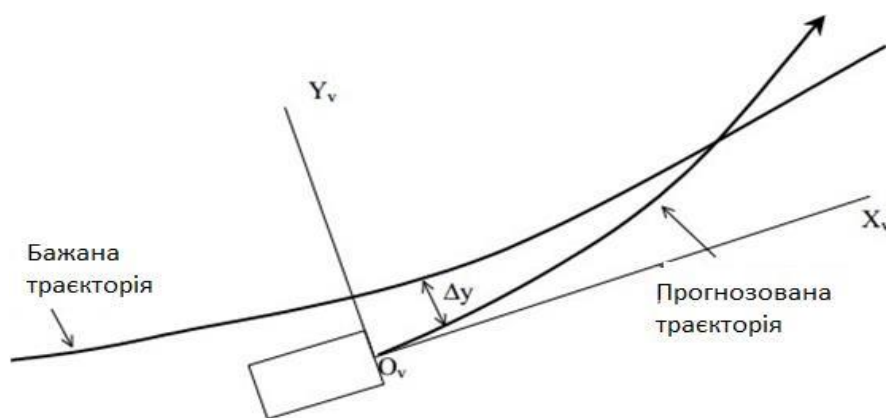


Рисунок 1.1 – Прогнозована і бажана траєкторії руху

Модель Макадама з прогнозуванням другого порядку розглянута в літературних джерелах [3]. В такій моделі розрахунок керування рульового колеса виконується безперервно, тобто на кожному кроці при інтегруванні рівнянь руху. На рис. 1.2 показана схема керування для моделі, що має зворотний зв'язок.

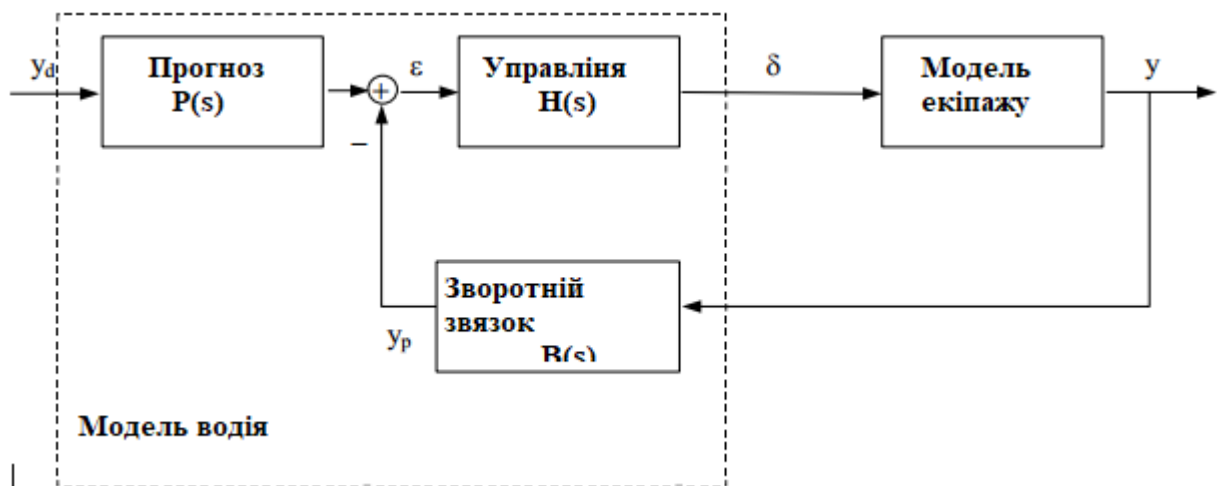


Рисунок 1.2 – Схема керування для моделі з прогнозуванням другого порядку

У операторній формі передавальні функції мають вигляд: $P(s) = e^{T_p s}$ – прогнозування; $H(s) = K e^{-t_d s}$, $LH(s) = \frac{k}{L_p} e^{-t_d s}$, $L_p = vT_p$ -керування; $B(s) = 1 + T_p s + \frac{T_p^2 s^2}{2}$ – зворотній зв'язок.

Після перетворення в тимчасову область отримаємо:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= y_d(t - T_p) - y_p, \\ y_p &= T_p y(t) + \frac{T_p^2 y(t)}{2}, \\ \delta(t) &= \frac{K}{L_p} \varepsilon(t - t_d). \end{aligned}$$

де y , y_p , y_d - реальна, прогнозована і бажана поперечні координати; δ - кут повороту рульового колеса; K - коефіцієнт посилення.

Таким чином, керування обчислюється:

$$\delta(t) = \frac{K}{L_p} \left(y_d(t + T_p - t_d) - T_p y(t - t_d) - \frac{T_p^2 y(t - t_d)}{2} \right),$$

Результати математичного моделювання руху, який керується, розглянути у роботі [2], де наводиться методика прогнозування розташування колісного трактора. А використання регулювання на основі використання матмоделі можемо знайти в роботі [1]. В цих випадках розглянуто траєкторію

криволінійного руху. Отже, при порівнянні результатів обох методик видно, що порядок відхилень від заданої траєкторії машин приблизно має однакове значення. Тобто, обидві методики забезпечують однакову якість руху по рівній (відносно) поверхні.

Для кращого розуміння принципів моделювання будуть розглянуті приклади використання цих моделей у реальних умовах та їх вплив на розробку та вдосконалення алгоритмів керування рухом колісних машин.

Проведення експериментальної перевірки щодо керування колісних машин є доцільним, однак це часто вимагає значних витрат часу та коштів при апробації в польових умовах. Останнім часом широке застосування отримала ідеологія моделювання поведінки механічних систем у реальному часі. Суть її полягає у тому, що для апробації алгоритмів керування рухом колісних машин замінюються їхніми механіко-математичними моделями.

Багато відомих учених займалися опрацюванням, дослідженням та модернізацією розрахункових схем математичних моделей автомобіля. Повний опис всіх аспектів руху колісної машини в динаміці часто не є можливим і не завжди необхідним. У зв'язку з цим виникає необхідність для дослідження експлуатаційних характеристик в реальному часі..

Крім того, варто розглянути можливість апробації розроблених математичних моделей на реальних об'єктах або в симуляторах, щоб перевірити їхню точність та адекватність. Такий підхід дозволить отримати практичні дані про роботу моделей у реальних умовах і зробити відповідні корективи або поліпшення. Особлива увага повинна бути зосереджена на вдосконаленні точності моделей та їхній здатності відображати реальні фізичні процеси, що відбуваються під час руху колісних машин.

1.2 Аналіз теорій та методик опису взаємодії колеса з опорною поверхнею

Одним з ключових аспектів є визначення моментів та сил що виникають при контакті шини з дорожнім покриттям.

Модель «Магічна Формула Пасейкі» (Pasejka Magic Formula), яку запропонував Х. Пасейка, стала широко відомою [3] (Рис.1.3). Вона використовується для опису залежності між різними параметрами, такими як жорсткість (B), форм-фактор (C), максимальне значення (D), фактор кривизни (E), та силою чи моментом (Y(x)), який може бути поздовжнім (Fx) або поперечним (Fy), або моментом відновлення (Mz), у залежності від проскальзування (X) або кута бокового зсуву (Fy, Mz). Коефіцієнти «Магічної формули» залежать від вертикального навантаження на колесо (Fz) і кута розвалу γ . Ці коефіцієнти, такі як $a_0 \dots a_{15}$, $b_0 \dots b_{12}$, $c_0 \dots c_{17}$, визначаються на основі даних (експериментальних) і можуть бути використані для моделювання контактних сил.

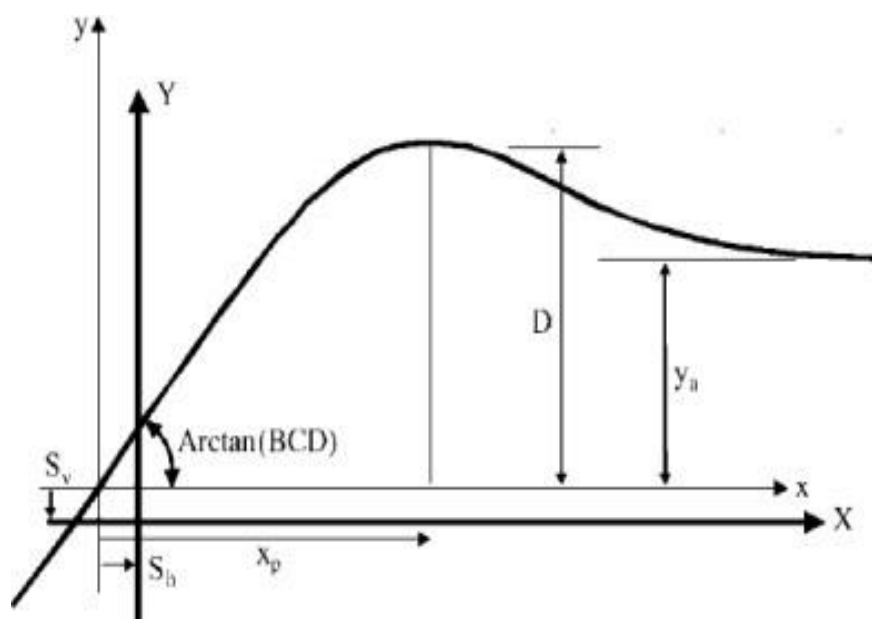


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд кривих для «Магічної Формули Пасейкі»

Модель FIALA є однією популярною моделлю. Вона базується на таких припущеннях, як прямокутна площа контакту, однаковий тиск всередині контактної зони, моделювання шини як балки. В'язко-пружна сила (Fz) обчислюється за формулою:

$$Fz = -kz\Delta r - dzV\Delta r, \quad dz = 2\beta z\sqrt{mkz},$$

де kz - коефіцієнт жорсткості шини в вертикальному напрямку; Δr - вертикальна деформація шини; dz - коефіцієнт демпфірування уздовж вертикальної осі; $V\Delta r$ - швидкість вертикальної деформації шини, βz - частка вертикального демпфірування від критичного; m - маса колеса, кг.

Якщо колесо відірвалося від дороги ($\Delta r > 0$) або вийшла вертикальна сила негативна ($F_z < 0$), то вважається, що $F_z = 0$.

Відносно прослизання s , коефіцієнт тертя μ і поздовжнє проковзування s^* визначаються: $S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$, $\mu = \mu_0 + (M - \mu_0)s$, $S^* = \frac{\mu F_z}{2c_x}$,

де s_x, s_y - Відносне поздовжнє і поперечне прослизання; μ_0 - коефіцієнт тертя при нульовому кріпе; μ_1 - коефіцієнт тертя при повному ковзанні шини; c_x - приватна похідна від поздовжньої сили по подовжньому прослизанню при нульовому поздовжньому кріпе.

З використанням відомого закону, ці рівняння, які містять три невідомих, під час його кочення.

Бічна сила та стабілізуючий момент знаходять при деформації Δ і кутового зсуву ψ :

$$T = C\Delta,$$

$$M = f\psi.$$

Крім того, введено рівняння, яке пов'язує кутовий зсув і поперечну деформацію [12]:

$$\psi = K\Delta.$$

Це додаткове рівняння, проте не враховує поперечне прослизання шини відносно опорної поверхні.

Рівняння кінематичних зв'язків для цього випадку мають вигляд:

$$y_0 + \xi + V\gamma = V_{np},$$

$$\psi + \gamma - V(\alpha_1\xi - \alpha_2\gamma) = \omega_{np}.$$

Тоді:

$$V_{np} = -V \frac{\alpha_1}{\alpha_2} f_1 \xi,$$

$$\omega_{np} = -V \alpha_2 f_2 \gamma.$$

Надається методика експериментального знаходження коефіцієнтів прослизання: лінійного f_1 та кутового f_2 . Рівняння уточнені, (поперечного та поздовжнього напрямку), мають велику кількість коефіцієнтів для коригування.

Через свою складність це рівняння не наводиться. Однак уточнення рівнянь, що стосуються ковзання, не розв'язує основного недоліку - збільшення порядку системи.

1.3 Оцінка стійкості колісних машин

Для якісної і кількісної оцінки стійкості колісних машин використовуються різні оціночні показники і критерії. Одним з найбільш важливих критеріїв є критична швидкість. При дії зовнішнього збурення машина з надмірною рухомістю, що досягає критичну швидкість при задається прямолінійній русі, починає здійснювати криволінійне рух. Поняття критичної швидкості застосовується для оцінки стійкості руху тільки мобільних машин з надлишковою рухомістю.

Мобільний агрегат з недостатньою або середньою рухомістю після припинення обурює впливу зберігає стійкий напрямок руху. Для оцінки керованості машин з недостатньою рухомістю застосовується поняття 25 характеристичної швидкості - швидкості, при досягненні якої кут повороту в два рази перевищує кут повороту машини з нейтральною рухомістю [19].

Оцінка стійкості руху проводиться при застосуванні прямого методу Ляпунова, що полягає у знаходженні функції Ляпунова. Висновок про стійкість руху проводиться після знаходження функції за її властивостями. Використання цього методу дозволить оцінювати стійкість руху при початкових коливаннях (великих), що є перевагою порівняно з першим методом Ляпунова, але застосування цього методу обмежується значними труднощами у визначенні.

У якості оцінок відхилення прямолінійна зсуву (та прискорення) можуть використовуватися (середньоквадратичні) та швидкості повороту (кутової). Для машино-тракторного агрегату основна траєкторія для виконання робіт зазвичай прямолінійна отже по прямій траєкторії застосовуються оціночні показники під час проходження вимірювального відрізка, амплітуда бокових з'єднань.

1.4 Автоматизоване правління рухом машино-тракторних агрегатів

У сільському господарстві для машин та тракторів зазвичай характерне виконання технологічних операцій, які вимагають руху по прямолінійних траєкторіях. Ці траєкторії зазвичай паралельні одній зі сторін поля. Одним з ключових завдань у розробці систем автоматичного водіння є визначення поточного положення машини або трактора відносно заданої траєкторії. Точність руху вздовж цієї траєкторії визначається вимогами до конкретної технологічної операції. Наприклад, для оранки допустима похибка не більше 5 см між рядами. Розв'язання цього завдання можна розділити на два основні напрямки.

Один з напрямків, який зараз широко застосовується, ґрунтується на визначенні поточного місцезнаходження машини або трактора за допомогою спеціальних пристроїв відносно фіксованої системи координат. Поточне положення порівнюється з траєкторією руху, яка зберігається в пам'яті з тією ж системою координат. Для визначення місцезнаходження можуть використовуватися радіотехнічні засоби, супутникові навігаційні системи (GPS-навігація) або інерційні навігаційні системи (ІНС). У випадку з радіотехнічними засобами, на трактор встановлюють два радіодальноміра, які вимірюють відстані до двох фіксованих ретрансляторів, що дозволяє обчислити поточні координати. У випадку з GPS / ГЛОНАСС приймачем, використовується високоточний навігаційний приймач, часто з додатковим стаціонарним приймачем для корекції сигналу та підвищення точності. ІНС системи, як альтернатива GPS-навігації, ґрунтуються на інерційних датчиках, що вимірюють орієнтацію, швидкість та місцезнаходження, але потребують введення початкових умов руху.

Штучний слід формується усвідомлено. Відомий метод керування сільськогосподарською технікою міжряддями в просапних культурах полягає у використанні попередньо нарізаних у ґрунті щілин міжряддя під час посіву культур.

Для створення штучного сліду в деяких дослідженнях використовується кабель, який розміщується під землею і проводить змінний струм звукової частоти. Датчики, встановлені на сільгосптехніці, реєструють електромагнітне поле, що утворюється навколо кабелю, що дозволяє визначити відстань до трактора. Також можуть використовуватися феромагнітні слідопоказники, розміщені під орним шаром або на системах трубопроводів для крапельного поливу, та магніточутливі датчики на сільгосптехніці.

Недавно з'явилися системи, які комбінують обидва підходи до визначення місцезнаходження машино-тракторного агрегату. Наприклад, використання GPS-навігації разом з лазерною системою відстеження сліду або системою обробки зображень. Сигнали місцезнаходження, що генеруються такими комбінованими системами, аналізуються в пристроях керування, і логічний алгоритм оцінює якість цих сигналів, щоб виробити сигнал коригування положення залежно від оцінки якості інформації.

Останнім часом у сільському господарстві все частіше згадується концепція "Точного землеробства" (Precision agriculture). Це високотехнологічна система управління сільським господарством, яка використовує різноманітні технології, включаючи GPS, ГІС, технології моніторингу врожайності, регулювання внесення добрив та інші. Мета полягає у максимізації якості та врожайності сільськогосподарської продукції при зниженні витрат і дотриманні екологічних стандартів.

Системи паралельного та автоматичного водіння є важливою складовою "Точного землеробства".

Автопілотування такі як курсопоказники та агронавігатори, потребують активної участі оператора. Вони працюють наступним чином: відображає інформацію на дисплеї, щоб оператор міг коригувати рух техніки. Зазвичай ці системи забезпечують точність не менше $\pm 0,3$ м, що обмежує їхнє застосування в польових роботах. До прикладів пристроїв належать Outback S-lite, Trimble CFX-750, TeeJet Matrix 430 та інші.(рис.1.4)



Рисунок 1.4 – Система паралельного водіння Outback S-lite

При використанні підрулюючого пристрою завдання вирівнювання транспортного засобу на потрібну траєкторію руху не виконує механізатор, але спеціальний пристрій, який, зазвичай, прикріплюється до рульового колеса. Використання таких пристроїв дозволяє уникнути недоліків людського керування, оскільки психомоторна реакція людини виключається з ланцюжка керування. Деякі зразки підрулюючих пристроїв включають Trimble EZ-Pilot, Trimble AgGPS EZ-Steer, TeeJet UniPilot Pro, Leica QuickSteer.рис.1.5



Рисунок 1.5 – Підрулюючий пристрій Trimble AgGPS EZ-Steer

Системи автопілотування представляють собою наступний етап розвитку підрулюючих пристроїв. Керуючі сигнали для зменшення похибки (коли змінюється траєкторія), через контролер подається на систему керування (гідравлічну) енергомашини за допомогою клапану що усуває інерцію та зазор у керуванні. Крім того, через датчик (спеціально встановлений на

енергомашині), показує маршрутний рух (відхилення ± 2 см) без необхідності втручання механізатора. До прикладів систем автопілотування належать TeeJet FieldPilot, що показано на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Пристрій автопілотування TeeJet FieldPilot

При використанні автоматичного руху необхідно мати супутникові радіонавігаційні системи (СРНС, GNSS) та інші. Точність геолокації має велике значення для точності проведених польових робіт. СРНС складаються з орбітальної групи супутників, наземного керівного комплексу та навігаційних апаратів користувачів системи.

Геолокація трактора має важливе значення для проведення польових робіт. Передача сигналів між об'єктами мають спотворення, пов'язаним з різними факторами, такими як вплив іоносфери, атмосферних шарів, багатолучевість та перешкоди. За свідченнями систем диференційної корегування, різні похибки для: ГЛОНАСС - від чотирьох до семи метрів, GPS – від трьох до шести метрів, а якщо використовуються обидві системи одночасно - 3-5 м. Однак для застосування автопілотування ця точність є недостатньою. Для досягнення точності в дм або см, використовують корекцію.

Забезпечення отримання координат точності сантиметрового рівня при використанні супутника із отриманням коригувань в реальному часі від базової станції рис.1.7



Рисунок 1.7 – Принцип роботи в режимі RTK

RTK може функціонувати як постійно, так і тимчасово в районі проведення польових робіт використовуючи пристрої GSM-зв'язку. Зазвичай ці коригування передаються у форматі RTCM. Ровер, у свою чергу, комбінує дані вимірів з отриманим корегуванням, оскільки на більших відстанях точність вимірювань значно зменшується.

Для уникнення необхідності окремого придбання базової станції для роботи на полі, коригувань регіонального рівня, GNSS-ровер надсилає своє поточне місцезнаходження до центру(керування), у відповідь надсилає коригувальні дані для ровера.

1.5 Агротехнічні вимоги до точності виконання сільськогосподарських робіт

Для забезпечення високої якості виконання технологічних операцій необхідно дотримуватись певних агротехнічних вимог.

Точність обробки. Однією з основних вимог є висока точність руху техніки по полю. Система паралельного водіння повинна забезпечувати точність

в межах $\pm 2-3$ см від заданої траєкторії. Це дозволяє мінімізувати перекриття і пропуски, забезпечуючи рівномірний розподіл добрив, гербіцидів та інших агрохімікатів.

Ширина захвату. При використанні систем паралельного водіння важливо дотримуватись заданої ширини захвату техніки. Ширина захвату повинна бути постійною по всій довжині гону, що досягається завдяки точній навігації. Це дозволяє уникнути подвійної обробки одних і тих самих ділянок та забезпечити рівномірність виконання технологічних операцій.

Швидкість руху техніки. Швидкість руху сільськогосподарської техніки повинна бути оптимальною для кожної конкретної операції. Занадто висока швидкість може призвести до погіршення якості обробки (наприклад, нерівномірне внесення добрив або гербіцидів), а занадто низька – до зниження продуктивності. Системи паралельного водіння дозволяють підтримувати стабільну швидкість руху, що є важливим для досягнення високої якості виконання робіт.

Глибина обробки. Для операцій, пов'язаних із ґрунтообробкою (оранка, культивування, дискування), важливо забезпечити рівномірну глибину обробки по всьому полю. Це досягається за рахунок точного керування технікою та використання систем автоматичного регулювання глибини робочих органів. Відхилення від заданої глибини не повинно перевищувати ± 1 см.

Рівномірність внесення добрив та агрохімікатів. При внесенні добрив, гербіцидів та інших агрохімікатів важливо забезпечити їх рівномірний розподіл по всій площі поля. Системи паралельного водіння дозволяють контролювати ширину захвату та запобігати перекриттям, що забезпечує рівномірний розподіл внесених речовин.

Мінімізація ущільнення ґрунту. Сільськогосподарська техніка може призводити до ущільнення ґрунту, що негативно впливає на його структуру та родючість. Використання систем паралельного водіння дозволяє оптимізувати траєкторії руху техніки, зменшуючи кількість проїздів по одних і тих самих ділянках та, відповідно, мінімізуючи ущільнення ґрунту.

Дотримання технологічних карт. Для кожної технологічної операції розробляються технологічні карти, в яких вказуються основні параметри (швидкість руху, глибина обробки, норма внесення добрив тощо). Використання систем паралельного водіння дозволяє точно дотримуватись цих параметрів, що забезпечує високу якість виконання робіт.

Дотримання агротехнічних вимог при використанні систем паралельного водіння є ключовим фактором для досягнення високої якості виконання сільськогосподарських робіт. Це дозволяє знизити витрати на виробництво, підвищити врожайність та забезпечити екологічну стійкість агроecosystem. Сучасні технології точного землеробства, в тому числі системи паралельного водіння, є невід'ємною частиною інноваційного розвитку сільського господарства.

З табл. 1.1 видно, що більшість сільськогосподарських робіт не вимагають високої точності руху між суміжними проходами.

Таблиця 1.1 - Допустимі вимоги до ширини перекриттів суміжних проходів

Вид діяльності	Перекриття суміжних проходів
Лущення і дискування	0,15-0,20 м
Суцільна культивуація	0,1-0,15 м
Міжрядна культивуація	0,05-0,07 м
Внесення твердих мінеральних добрив	не більше 6% від ширини захоплення агрегату
Внесення органічних добрив	до 0,5 м
Внесення комплексних рідких мінеральних добрив	0,5-0,7 м
Оранка	як якнайменше
Обробка ґрунту комбінованими агрегатами	не менше 0,15
Посів зернових та зернобобових культур	0,05-0,15 м
Посів просапних культур	0,01-0,05 м
Накочення ґрунту і посів	не менше 0,1 м
Боронування зубовими боронами	не менше 0,15-0,2 м
Обприскування посівів	не допускається
Збирання зернових колосових культур	як якнайменше

2 МОДЕЛІ МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ МАШИНО- ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ

2.1 Математична модель керування рухом для вирішення завдання глобального регулювання

Така матмодель базується на напівемпіричній моделі з прогнозуванням, яка використовує методику, запропоновану в [6, 8]. Експериментальні дослідження підтвердили значний вплив інерції трактора на зміну руху трактора (його напрям), були внесені коригування в алгоритм керування, щоб врахувати бічне прискорення трактора. Далі ми розглянемо схему переміщення колісного трактора з точки 0 до прогнозованого положення відносно нерухомої системи координат x, y (див. рис. 2.1).

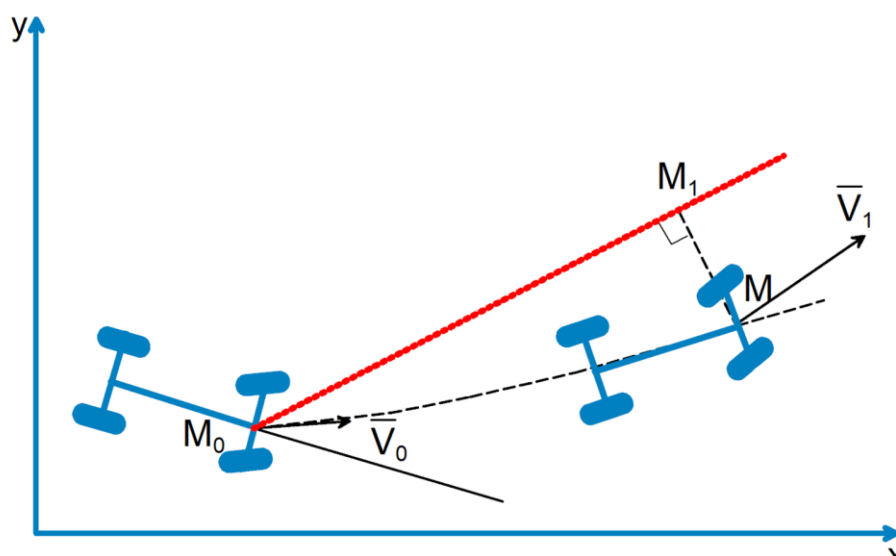


Рисунок 2.1 – Схема переміщення колісного трактора між двома точками

Для визначення поперечного зсуву $MM1$ необхідно мати інформацію про координати точок $M1$ і M . Координати прогнозованого положення M визначаються на основі поточних координат точки $x0, y0$, проєкцій швидкості і прискорення $ax0, ay0$ на координатні осі у поточний момент часу.

$$x_M = x_0 + V_{x_0} t_{\Pi} + a_{x_0} \frac{t_{\Pi}^2}{2}$$

$$y_M = y_0 + V_{y_0} t_{\Pi} + a_{y_0} \frac{t_{\Pi}^2}{2}$$

де t_{Π} - прогнозоване час руху з точки M_0 в M_1 .

Траєкторія розбивається на відрізки, які складаються з прямолінійних відрізків. Рівняння цих відрізків визначаються за допомогою координат двох точок і представляються у формі:

$$y = kx + b$$

Тоді рівняння має вид:

$$y = -\frac{1}{k}x + y_M + \frac{1}{k}x_M.$$

Координати точки M_1 визначаються як розв'язок одночасної системи рівнянь траєкторії та рівняння перпендикуляра від точки M . При аналізі слід враховувати кількість точок перетину, що відповідає кількості відрізків розбиття траєкторії, та перевіряти приналежність точки до відповідного відрізка.

Величину зсува (поперечного) визначимо так:

$$MM_1 = \sqrt{(x_{M_1} - x_M)^2 + (y_{M_1} - y_M)^2}.$$

Визначення Прогнозованої відстані M_0M відбувається так:

$$\Delta x_M = V_{x_0} t_{\Pi} + a_{x_0} \frac{t_{\Pi}^2}{2}, \quad \Delta y = V_{y_0} t_{\Pi} + a_{y_0} \frac{t_{\Pi}^2}{2},$$

$$M_0M = \sqrt{(\Delta x_M)^2 + (\Delta y_M)^2}$$

Значення поточного кута повороту керованих коліс визначається залежно від величини бічного відхиленн та напрямку векторного добутку.

$$\vec{M_0M} \times \vec{M_0M_1} \rightarrow$$

$$\alpha = \frac{k * MM_1 * \text{sign}(\vec{M_0M} \times \vec{M_0M_1})}{M_0M},$$

де k - коефіцієнт посилення (рекомендовано значення від 0.5 до 1). Якщо напрям векторного добутку позитивний, це вказує на те, що трактор розташований праворуч від прогнозованої траєкторії, і поточне значення кута

повороту коліс повинно бути позитивним.

2.2 Алгоритми для вирішення завдання локального регулювання

Завдання локального керування розділяється на дві взаємопов'язані підзадачі. Перша полягає у визначенні напруги (керуючої) до блоку (передається) керування електродвигуном, щоб швидко здійснити необхідний поворот. Друга підзадача - визначення напрямку обертання електродвигуна в кожний момент часу для забезпечення необхідного напрямку обертання коліс. Для вирішення цієї задачі, зображена модель на рисунку 2.2. У цій моделі блок "R" представляє блок регулятора, блок "P" це регульований "r" - задане значення, "e" - похибка, "u" - вихідний сигнал регулятора, "y" – величина регульована.

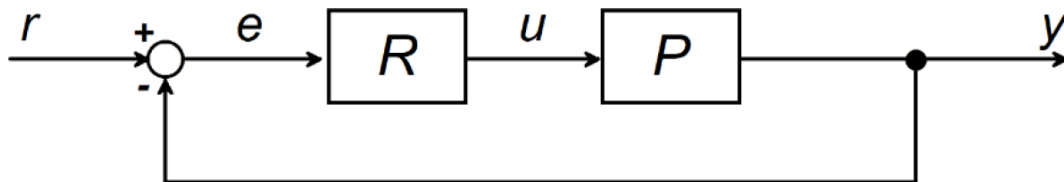


Рисунок 2.2 - Модель ПД-регулятора в системі зі зворотним зв'язком

Мета використання даного регулятора у електромеханічній системі керування, вона полягає у досягненні здійснення повороту коліс за значенням кута за допомогою зміни напруги.

Формула для розрахунку регульованої величини має наступний вигляд:

$$U(n) = K_n E(n) + TK_i \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_d}{T} (E(n) - E(n - 1)),$$

де $U(n)$ - величина напруги, яке необхідно передати на блок керування електродвигуном, K_p , K_i , K_d - пропорційний, інтегральний і диференційний коефіцієнти відповідно, $E(n)$ - помилка неузгодженості дійсного і задається кутів на поточному кроці обчислень n , $E(n - 1)$ - на попередньому кроці, $E(k)$ - помилка на k -ом кроці обчислень, T - час дискретизації.

Для встановлення параметрів ПД-регулювання потрібно встановити

електричний двигун, механізм керування кермом трактора та керовані колеса. У цій системі вхідним сигналом має бути напруга, яка підходить до блоку керування двигуном, а вихідним є кутовий поворот коліс, які керуються.

Таку напругу можна записати через рівняння.

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s^3 + k_2 s^2 + k_3 s}$$

Де k_1, k_2, k_3 - константи, визначаються масовими і електричними параметрами електродвигуна.

Вираз, що розглядається як безінерційний елемент, має такий вигляд:

$$G_2(s) = k_4,$$

де k_4 - коефіцієнт передачі системи «рульове керування - керовані колеса».

За послідовного з'єднання передавальних функцій передавальна функція (загальна) системи виражається таким чином:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{k_1 k_4}{s^3 + k_2 s^2 + k_3 s}$$

Ця функція перевіряє різні умови, включаючи різницю між потрібним і поточним кутами повороту, а також напрямком обертання, для визначення необхідності зміни напрямку обертання.

Далі, у функції перевіряється, чи відповідає різниця між потрібним та поточним кутами повороту заданому значенню ϵ . Якщо різниця перевищує ϵ , та при цьому спостерігається перевищення у поточному напрямку обертання, то здійснюється зміна напрямку. У випадку, коли різниця менша за ϵ , існує перевищення, але не достатньо значне, щоб вимагати зміни напрямку обертання, тому лише занулюється напруга.

У всіх інших випадках, коли не виникає потреби у зміні напрямку обертання та зануленні керуючого напруги, алгоритм ПДД-регулювання працює у звичайному режимі. Якщо на якомусь етапі виявляється необхідність реверсу, алгоритм передбачає затримку перед наступною перевіркою на реверс до тих пір, поки електродвигун фактично не змінить свій напрямок обертання або досягне задану кількість ітерацій алгоритму.

2.3 Перевірка працездатності математичної моделі машино-тракторного агрегату

Масово-геометричні параметри застосовані для моделювання та аналізу тракторно-культиваторної агрегатної системи, яка складалася з трактора МТЗ-1221.2 і культиватора КПЕ-3,8. Значення коефіцієнтів бічного опору коліс трактора МТЗ-1221.2 були визначені за допомогою розрахункових методів. Момент інерції був визначений також за допомогою розрахунків, які були порівняні з експериментальними даними. Коефіцієнти опору зсуву коліс передньої і задньої осей склали відповідно 122500 н / рад та 201500 н / рад, а момент інерції становив 5000 кг за кубічний метр. Опір від робочих органів КПЕ-3,8 був визначений на основі попередніх досліджень і склав 20000 Н.

Було здійснено моделювання руху тракторно-агрегатної системи (МТА) з вказаним кутом повороту керованих коліс. На діаграмі у рис. 2.3 наведені залежності швидкості 2.5 м/с для трактора та знаряддя, плавно апроксимована крокова функція за допомогою кубічного полінома, що забезпечує плавний перехід між значеннями. Попередньо було визначено кінематичний радіус, що становив 15,9 м.

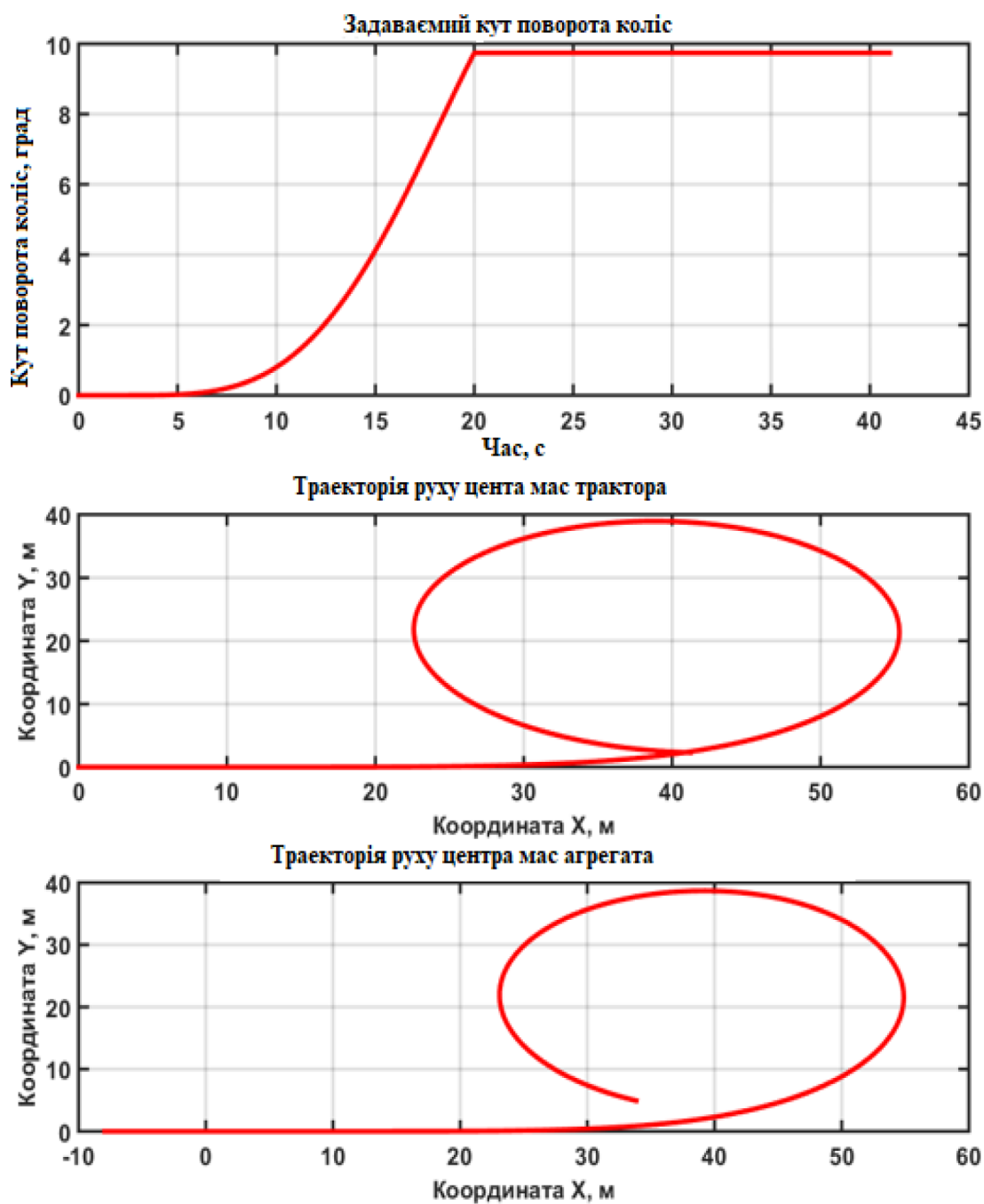


Рисунок 2.3 – Результати моделювання по круговій траєкторії

На діаграмі у рис. 2.4 показаний кутовий поворот комплексу машин при швидкості руху 2.5 м/с.

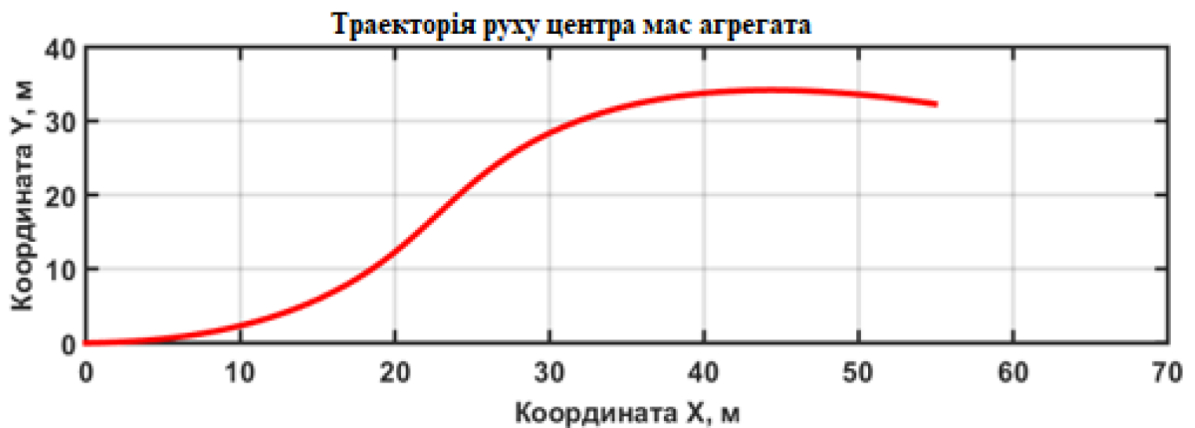
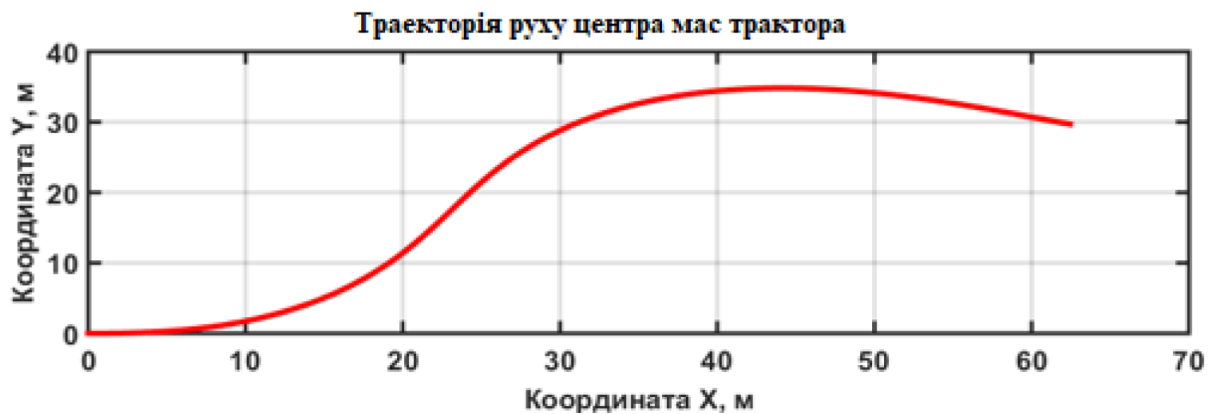
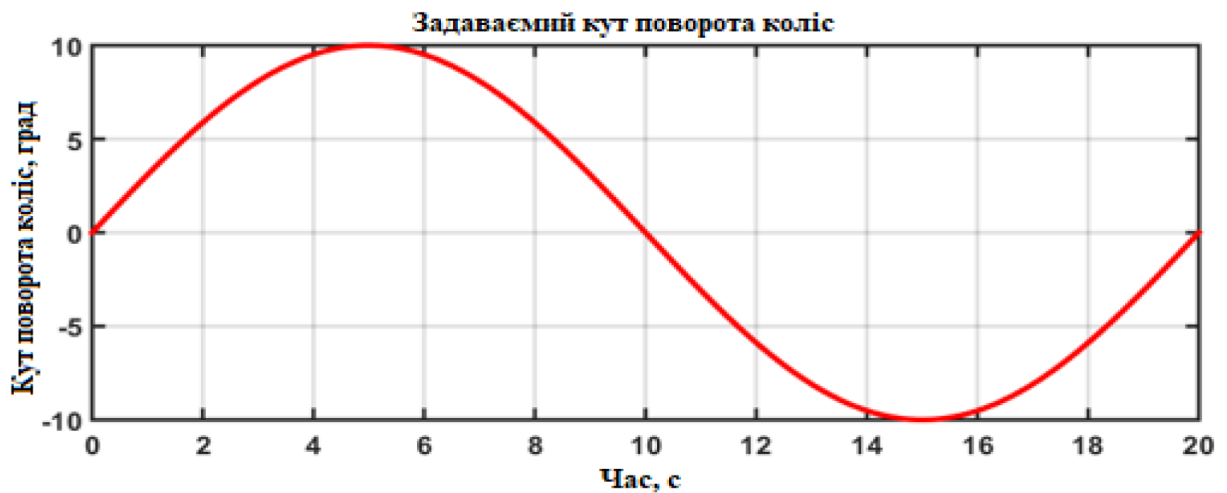


Рисунок 2.4 – Результати моделювання руху при перестроюванні

Із вивчення даних, поданих на рисунках 2.3-2.4 зазначимо, що під час розглянутих маневрів відповідає реальному рухові, що підтверджує готовність математичної моделі до роботи.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Програмно-апаратна схема взаємодії елементів системи керування

Ключовими задачами є створення алгоритму, що забезпечить рух тракторно-агрегатного комплексу (МТА) по заздалегідь заданій траєкторії, а також його програмно-апаратне втілення. Алгоритм керування можна умовно поділити на дві стадії, (див. рис. 3.1).

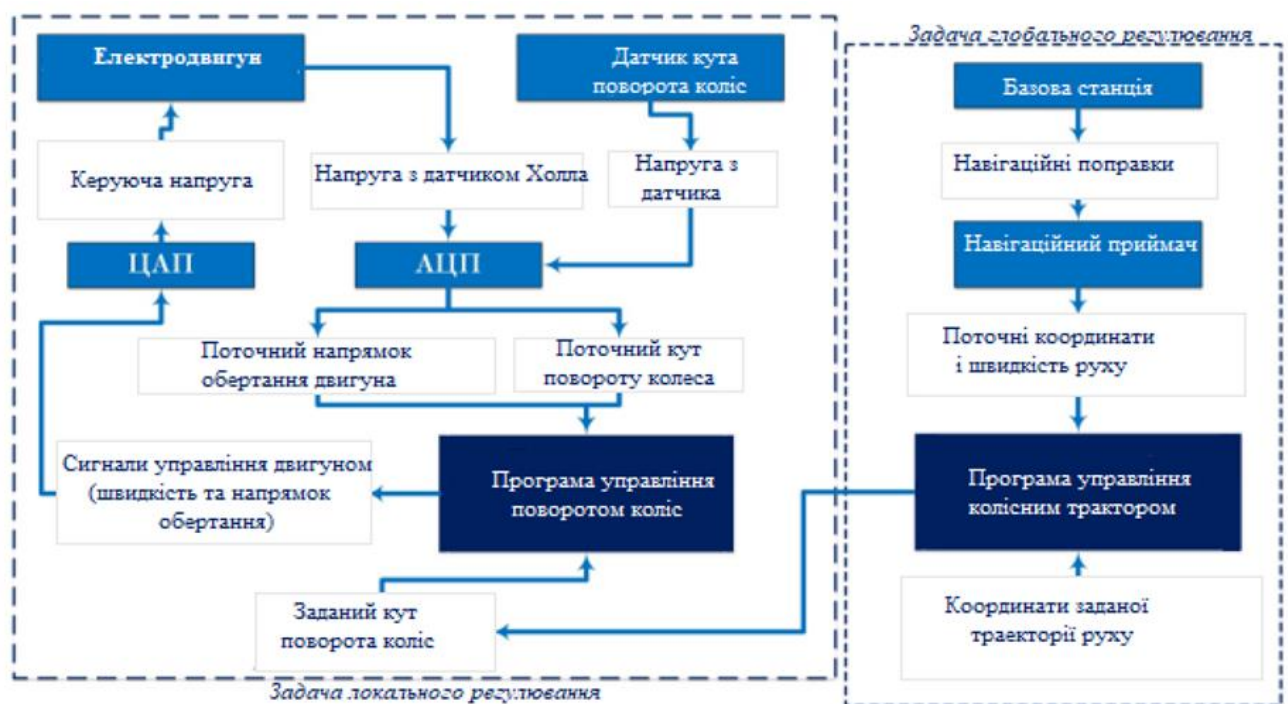


Рисунок 3.1 - Схема взаємодії програмно-апаратних частин системи керування

Поточний кут повороту визначається за допомогою датчика, що встановлений на керованому колесі. З датчика отримують поточну напругу, яка подальшим перетворенням переводиться у значення кута в радіанах. Для цього датчик кута повороту передбачено тарування для встановлення залежності між величинами зчитуваної напруги і кута повороту.

Напрямок обертання електродвигуна програмно визначається на основі сигналів з трьох датчиків Холла, розташованих в електродвигуні. Для

визначення порядку сигналів, що відповідають обертанню електродвигуна за чи проти годинникової стрілки, проведено реєстрацію цих сигналів при обертанні двигуна у різних напрямках.

Напруга, яка отримується з датчиків Холла та датчика кута повороту керованих коліс, спочатку проходить через плату аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Після цього перетворені дані подаються до програми керування поворотом коліс. На основі цих параметрів із використанням модифікованого алгоритму ПД-регулювання проводиться розрахунок керуючої напруги, необхідної для передачі на електродвигун через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

3.2 Система керування рухом з електромеханічними компонентами

Для нашої електромеханічної системи керування ми використали таке обладнання:

- приймач (функція RTK), конкретно модель Emlid Reach;
- безколекторний електродвигун FL86BLS98-JB з редуктором, маючи передавальне число 15;
- перетворювачі: цифро-аналоговий (ЦАП) та аналого-цифровий (АЦП), які були інтегровані в один фізичний пристрій L-Card E14-140M;
- датчик (потенціометричний) МУ-615;
- пристрій для перетворення напруги для живлення, отриманої від електричної мережі трактора;
- ПК (операційна система сімейства Windows) та набір бібліотек .NET Framework 4.5 (або вище).

Щоб полегшити використання блоку керування двигуном, пристрій ЦАП / АЦП і перетворювач напруги були об'єднані в один корпус.

Додатково до вищезазначених пристроїв використовується послуга віртуальних базових станцій SmartNet для доступу до корекційної інформації з геолокацією.

Працює так: при заданій траєкторії руху, система постійно виконує

наступні кроки: приймач надає геолокацію трактора та проекцію його швидкості, через датчик реєструється поворотний кут коліс, через блок управління двигуном трактора, за допомогою 3 датчиків. З цих датчиків зчитуються дані та перекидаються до блоку АЦП, а потім передаються на комп'ютер. Після отримання даних, програма показує напрям обертання ЕД, чи відхилився тракторі від своєї траєкторії, та поворотний кут коліс, якщо є якісь неузгодження, приходить сигнал, що генерується до центрального апарату.

Цей взаємозв'язок наведено на рисунку 3.2.

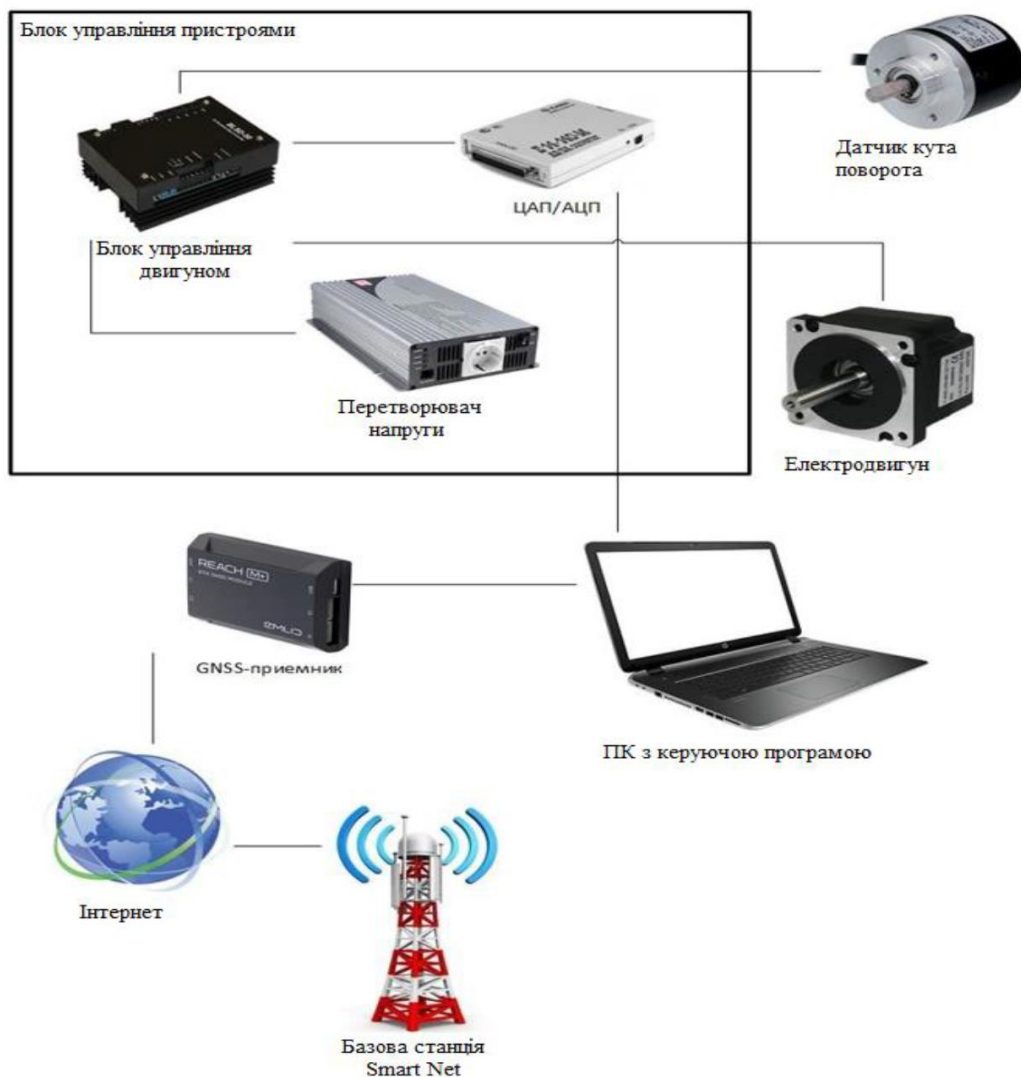


Рисунок 3.2 - Схема взаємодії програмно-апаратних складових системи керування

3.3 Визначення передавальної функції системи «електричний двигун- рульове керування - керовані колеса»

Для забезпечення ефективного, своєчасної та точної роботи потрібно підібрати оптимальні коефіцієнти ПД-регулятора. Для цього потрібно мати інформацію про передавальні моменти. Систему керування встановлюють на механізм (рульовий), всі показники зчитуються із датчиків, що встановлені для поворотного кута коліс. На рис.3.3 зображена динаміка зміни кута повороту коліс залежно від часу для трактора МТЗ-1221.2.

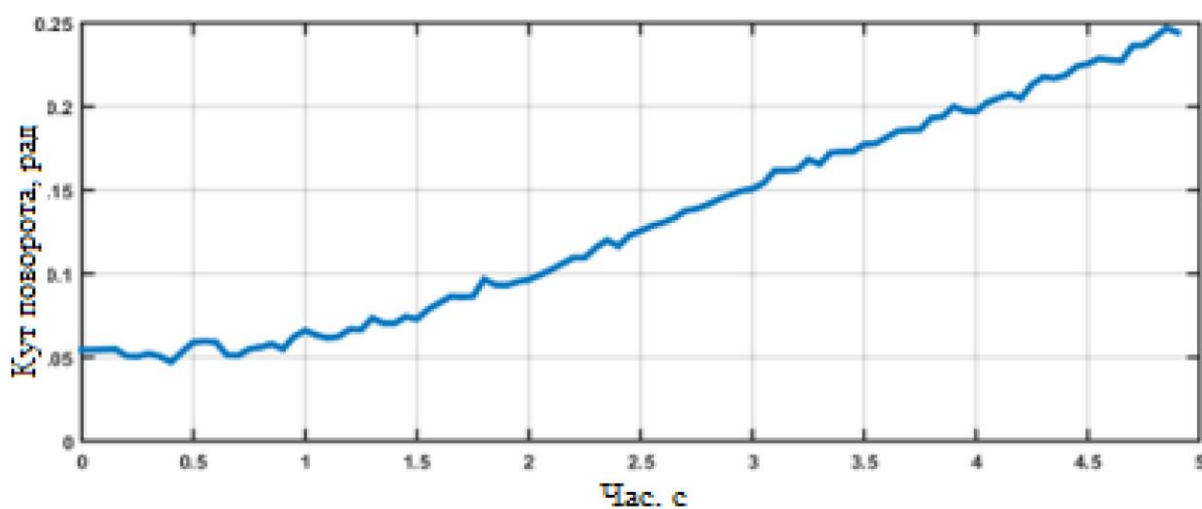


Рис. 3.3. Графік: зміна кута повороту коліс від часу

Рисунок 3.3 - Залежність зміни кута повороту коліс від часу

Значення коефіцієнтів ПД-регулятора, отримані теоретичним шляхом, були перевірені на практиці під час експлуатації трактора на дорозі. Результати цієї апробації зображені на рисунку 3.4.

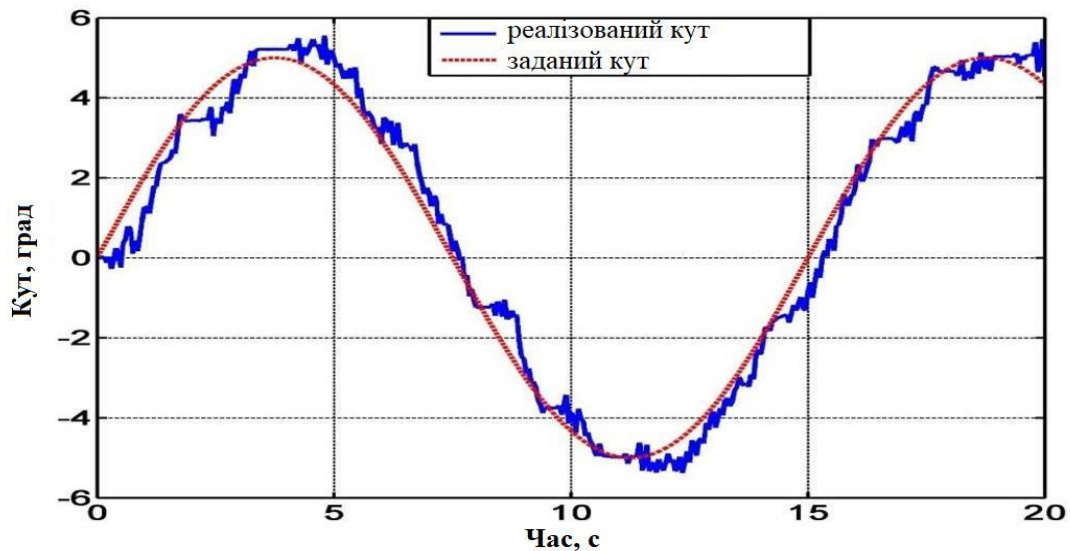


Рисунок 3.4 - Заданий і реалізований кути повороту керування коліс трактора МТЗ 1221.2

Отже, зробимо висновки про відповідність моделі системи "електричний двигун - рульове керування трактора - керувані колеса", відображеної у формі передавальної функції, а також про ефективність регулювання за допомогою ПД-регулятора.

3.4 Польові експерименти для оцінки ефективності роботи електромеханічної системи керування

3.4.1 Проведення експерименту на тракторі МТЗ-80

Для проведення досліджень використовувався трактор МТЗ-80.1.

На рисунках 3.5 і 3.6 показано комплект обладнання та необхідну апаратуру для проведення випробувань.

Електродвигун 1 прикріплюється до керма кронштейном, який має дві складові частини. Верхня частина 2.1 кронштейна містить спеціальну платформу, до якої корпус електродвигуна кріпиться болтами хомутом 4, що з'єднуються між собою за допомогою болтів через отвори, призначені для різних модифікацій тракторів. Ще маємо пружину 3, з допомогою якої з'єднуємо корпус обох частин, а її сил регулюємо натяжним пристроєм 6.

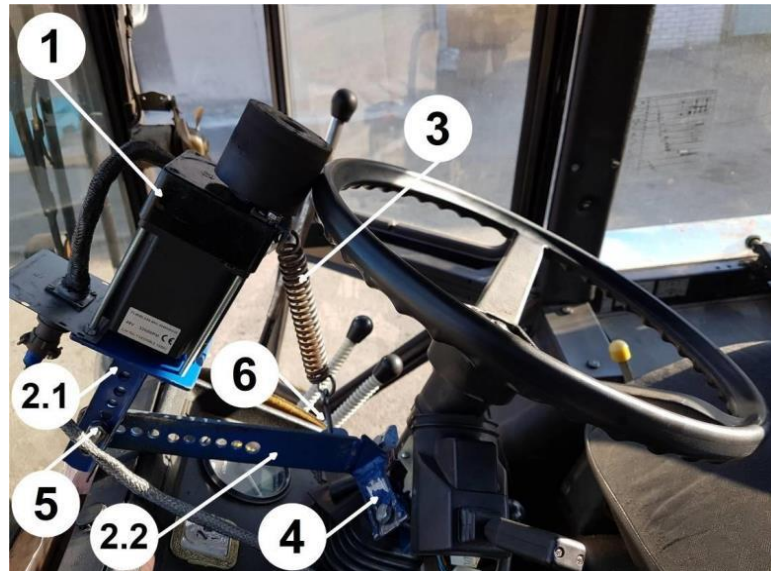


Рисунок 3.5 - Електродвигун з кронштейном для кріплення на рульове колесо

Датчик 1, що прикріплений до платформи (спеціальної) кронштейном 2, який має вбудований магніт для фіксації. Через отвір у кронштейні проходить спиця 3, в якій другий кінець закріплений на рухомій частині робочого датчика, в якого при руху трактора та повороті коліс, його нерухома частина, рухається відносно рухомої, і спиця ковзає через отвір, це запобігає згинанню її (див. рис. 3.6.)

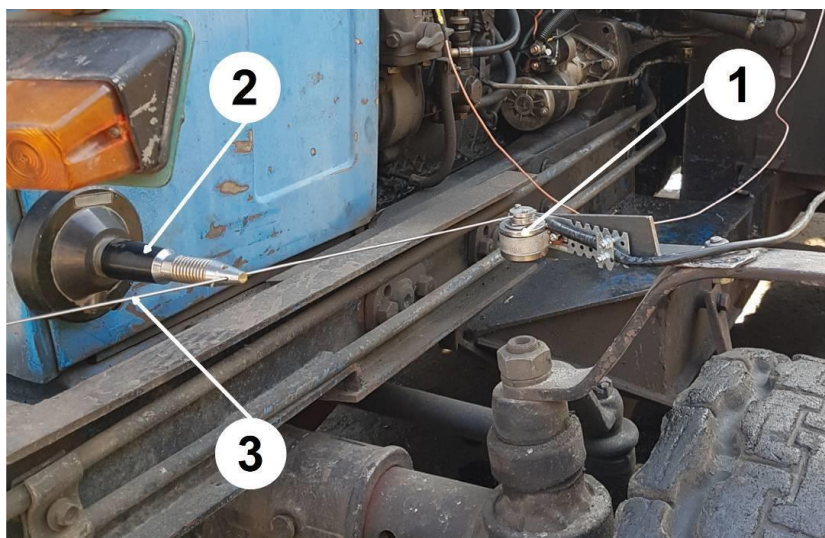


Рис. 3.6. Фіксація датчика кута повороту коліс

Рисунок 3.6 - Кріплення датчика кута повороту коліс

У полі трактор співпрацює з базовою станцією для корекції сигналу. У польових умовах для визначення поточних координат трактора, а також

проекцій його швидкості на координатні осі, використовується навігаційний приймач, що працює спільно з базовою коректує станцією. Антена GNSS-приймача кріпиться на корпус трактора над віссю передніх коліс по центру рами за допомогою магніту. Для того щоб уникнути різких коливань проекцій швидкостей на нерухомі осі під час руху трактора, використовувани в алгоритмі керування, було застосовано експоненціальне згладжування, що забезпечує їх плавне зміна

Експеримент проводився за такою послідовністю: рух трактора проходив по траєкторії, завчасно заданій, з координатами поточного значення. Після – повертався агрегат у початкове положення, і задана траєкторія була реалізована з використанням розробленої системи керування без втручання водія у процес керування.

На рисунку 3.7 зображені задана і реалізована траєкторії під час прямолінійного руху трактора з середньою швидкістю $V_{сер}=0.6$ м/с. Час прогнозу t_p прийняли на рівні 1,5 секунди, а коефіцієнт посилення k становив 0,2.

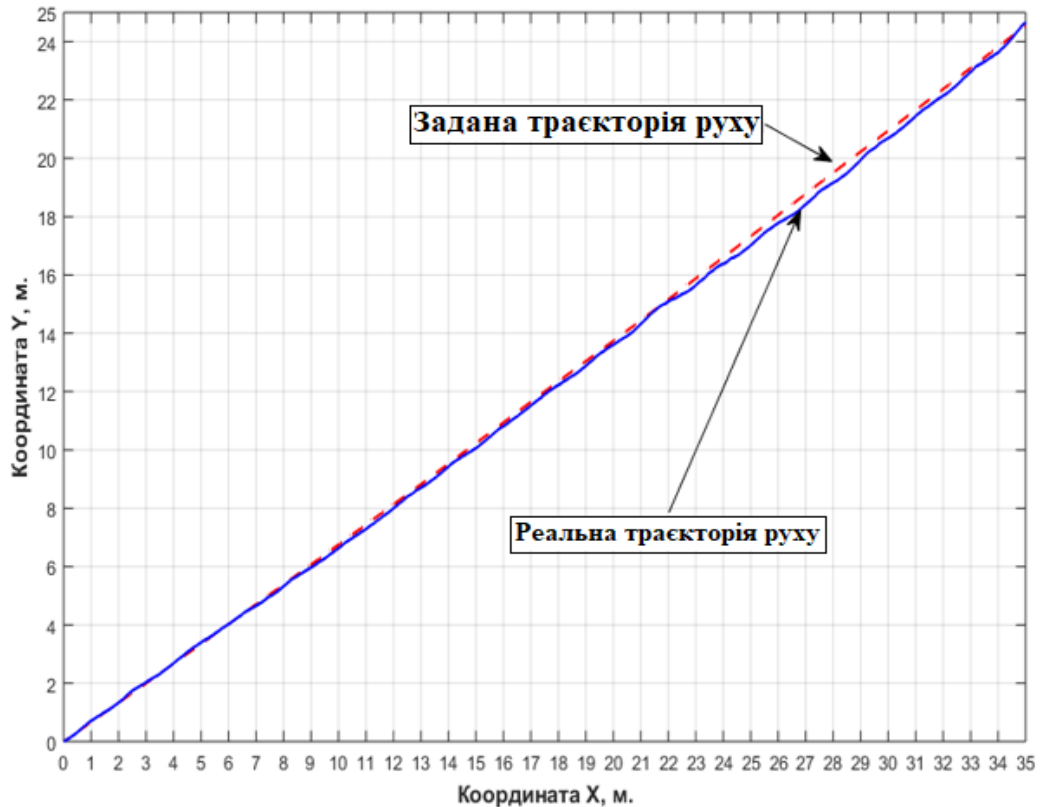


Рисунок 3.7 - Задана і реалізована траєкторії при прямолінійній русі з середньою швидкістю 0,6 м / с

Задана та реалізована траєкторії при такому ж русі, але з швидкістю (середньою) 1,2 м/с зображена на рис.3.8

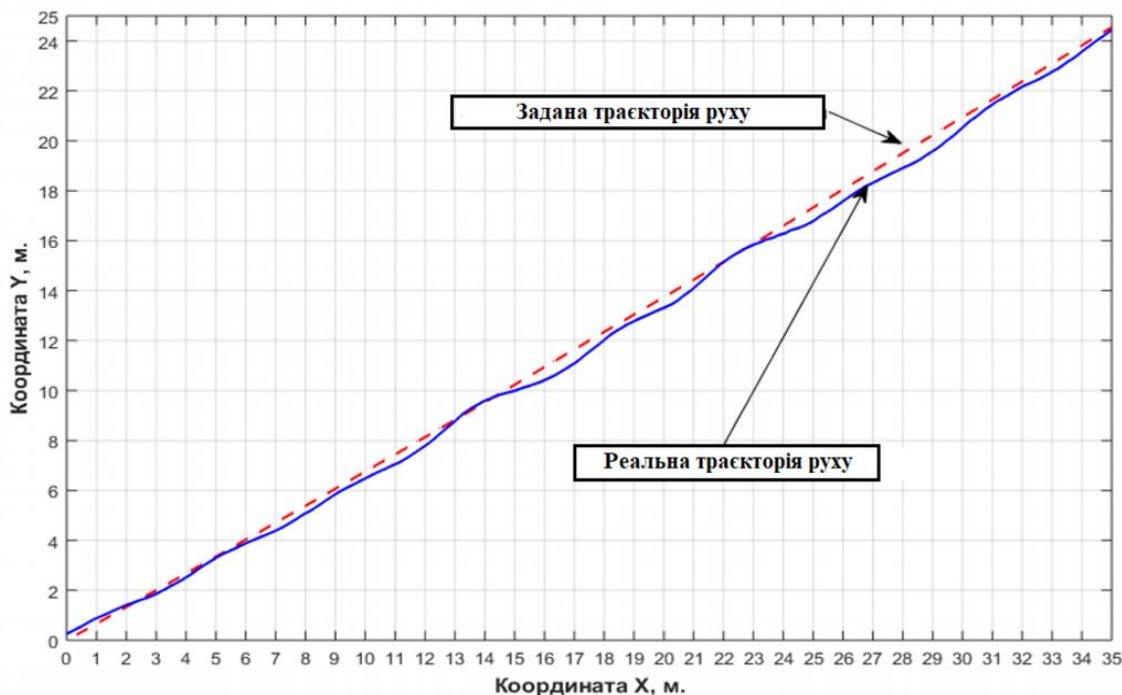


Рисунок 3.8 - Задана і реалізована траєкторії при прямолінійній русі з середньою швидкістю 1,2 м / с

В 1 випадку відхилення σ_{max} має значення: $E_{max} = 0,39$ м, $\sigma=0,17$ м (середнє квадратичне)

В 2 випадку відхилення σ_{max} має значення: $E_{max} = 0,68$ м, $\sigma=0,32$ м (середнє квадратичне).

Задана та реалізована траєкторії, коли рух криволінійний, $V_{сер}=0.6$ м/с. Час прогнозу $t_{п} = 1,5$ с, $k=0,2$ показана на рис. 3.21. При такому русі $E_{max} = 0,26$ м, $\sigma=0,13$ м

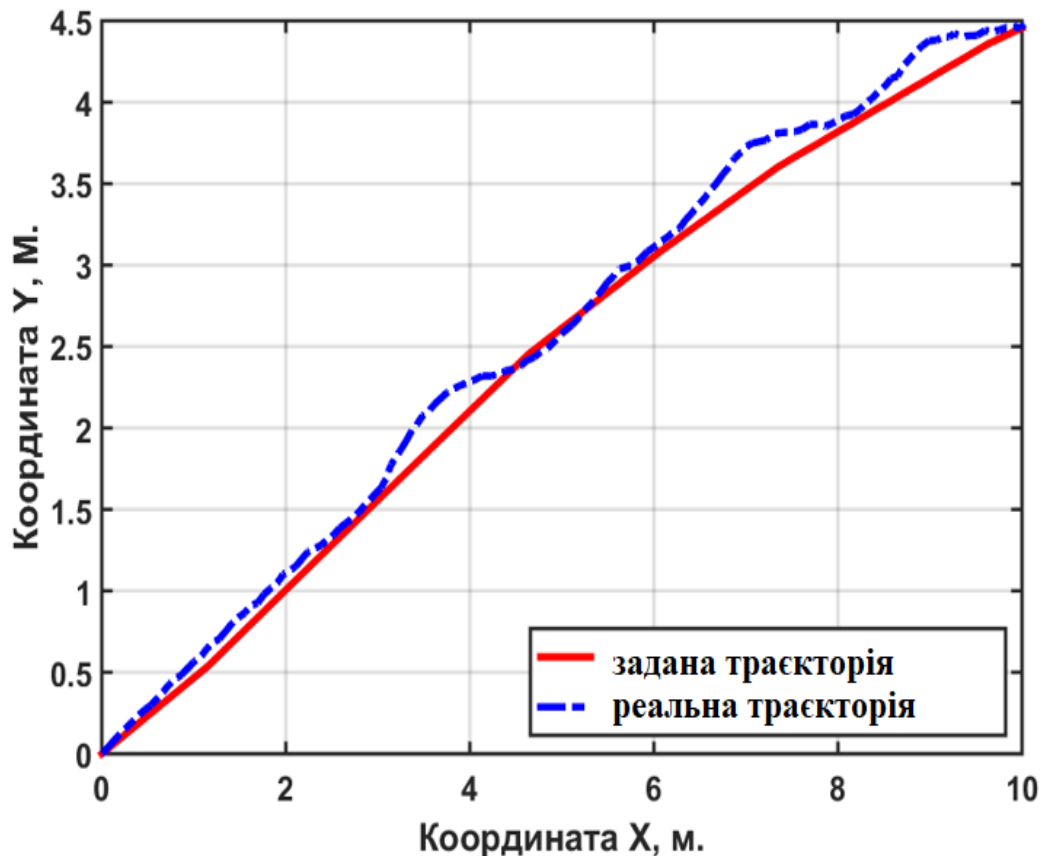


Рис. 3.9. Задана і реалізована траєкторії при криволінійному русі з $V_{сер}=0.6$ м/с.

Рисунок 3.9 - Задана і реалізована траєкторії при криволінійному русі з $V_{сер} = 0,6$ м / с

Результати проведеного експерименту показують, що по прямій лінії траєкторія руху МТА має працездатність в достатній формі. Проте через туге рульове керування та значні люфти, якість руху система не забезпечила по криволінійному русі. Це показує, що ненадійно зроблені кріплення колеса (рульового) до електродвигуна коли має значний опір при повороті.

3.4.1 Проведення експерименту на тракторі МТЗ-1221.2

Для продовження випробувань системи керування обрано сучасний трактор МТЗ-1221.2, який оснащений гідропідсилювачем керма (див. рис. 3.10). Технічні характеристики та особливості цієї моделі докладно описані у літ джерелах. Експеримент проводився у Державному ПДГ ІСГПС. Перед тим. Як було проведено випробування, удосконалили кронштейн, щоб прикріпити

електродвигун до

В результаті аналізу проведеного експерименту можна зробити висновок, що розроблена система керування ефективно працює при русі по прямолінійній траєкторії. Однак через туге керування рульовим механізмом і наявність значних люфтів, система не може забезпечити якісний рух по заданій криволінійній траєкторії. Під час експерименту було виявлено, що кріплення електродвигуна до рульової колонки функціонує недостатньо надійно в умовах значного опору при повороті керма.

Обладнання, використане в експерименті, зображене на рис. 3.10-3.15



Рисунок 3.10 – Обладнання експерименту

За допомогою кронштейна 2, який складається із 2 частин, до колонки рульової кріпиться електродвигун 1. (рис. 3.10). Перша (верхня) частина 2.1 має спеціальну платформу для кріплення корпусу електродвигуна за допомогою болтів, а 2 нижня частина, позиція 2.2, хомутом 4 прикріплюється до валу рульової колонки машини. Ці дві частини з'єднуються пальцем 5. Пружиною 3 притискається ролик електродвигуна до керма та з'єднує кронштейн знизу з електродвигун зверху, а натяжним пристроєм 6 регулюємо зусилля.

Кріплення датчика 1 показано на рисунку 3.11.

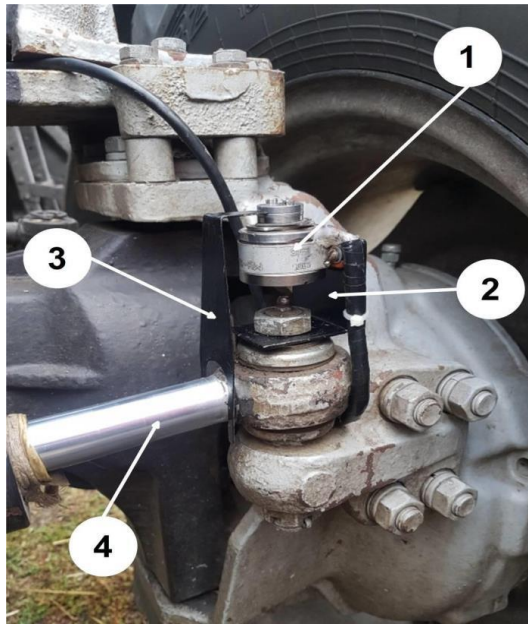


Рисунок 3.11 – Кріплення датчика кута повороту коліс

Щоб визначити координати (поточні) швидкість, з якою рухається МТА, застосуємо GPS-приймач та станцію базову, що корегує. Антену цього приймача прикріплюємо на тракторі (на корпусі) магнітом в місці передньої віссі, ближче до центру рами, див. рис. 3.12



Рисунок 3.12 – Кріплення антени GNSS-приймача

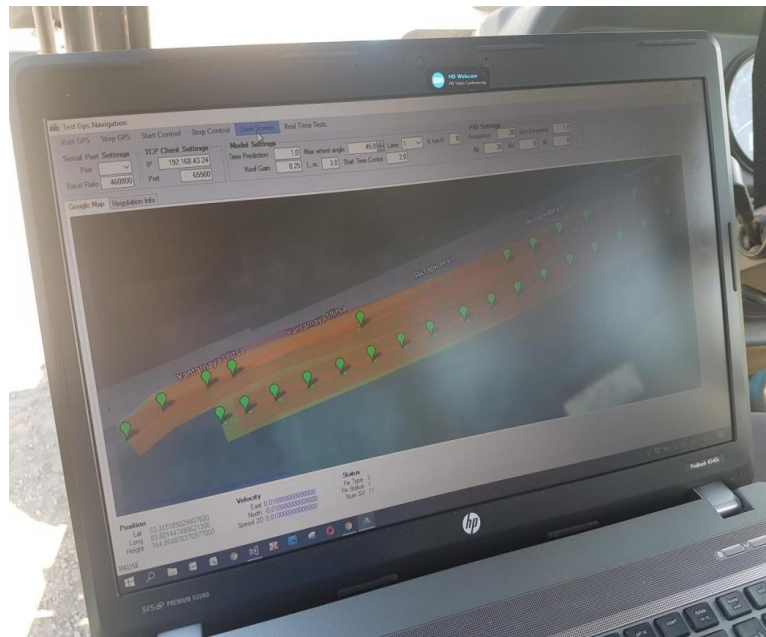


Рисунок 3.13 – ПК з програмою керування

Суть проведеного експерименту полягала в тому, щоб підрулювальний пристрій здійснював керування без участі водія під час руху по заданій траєкторії. Під час експерименту трактор рухався по різним заданим траєкторіям на ґрунті чорнозему, що був дворічною покладдю. На рис. 3.14 показані задана та реалізована траєкторії під час прямолінійного руху з середньою швидкістю трактора $V_{сер}=1.5$ м/с, часом прогнозу $t_p=1,0$ с та коефіцієнтом посилення $k=0,5$. Максимальна помилка при цьому русі становила $E_{max} = 0,23$ м, а середнє квадратичне відхилення – $\sigma= 0,09$ м. На рис. 3.14 представлені графіки необхідних та фактичних кутів повороту керованих коліс під час цього руху.

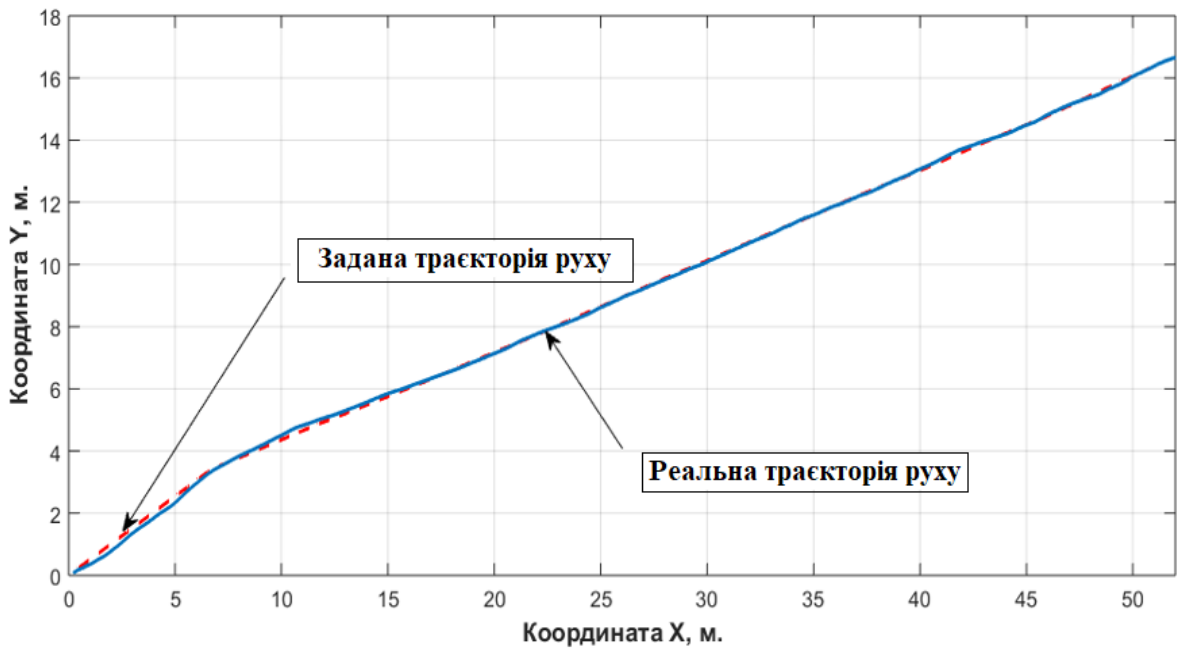


Рисунок 3.14 – Задана і реалізована траєкторії при прямолінійній русі

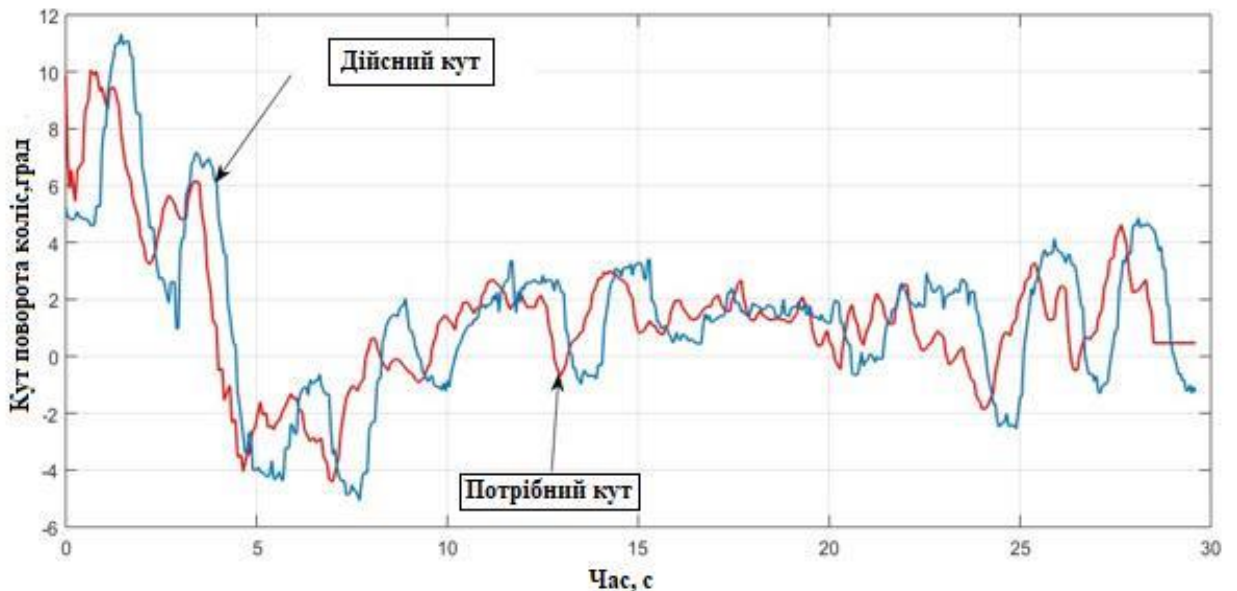


Рисунок 3.15 – Необхідний і дійсний кути повороту коліс при русі по прямолінійній траєкторії

Графіки заданої та реалізованої траєкторії зображені на рис.3.16 при криволінійному русі та значення кутів при цьому русі (рис.3.17) з такими показниками: $V_{сер}=1.3$ м/с , $t_{п}=1,0$ с та $k=0,5$. При криволінійному русі $E_{max} = 0,61$ м, $\sigma=0,27$ м

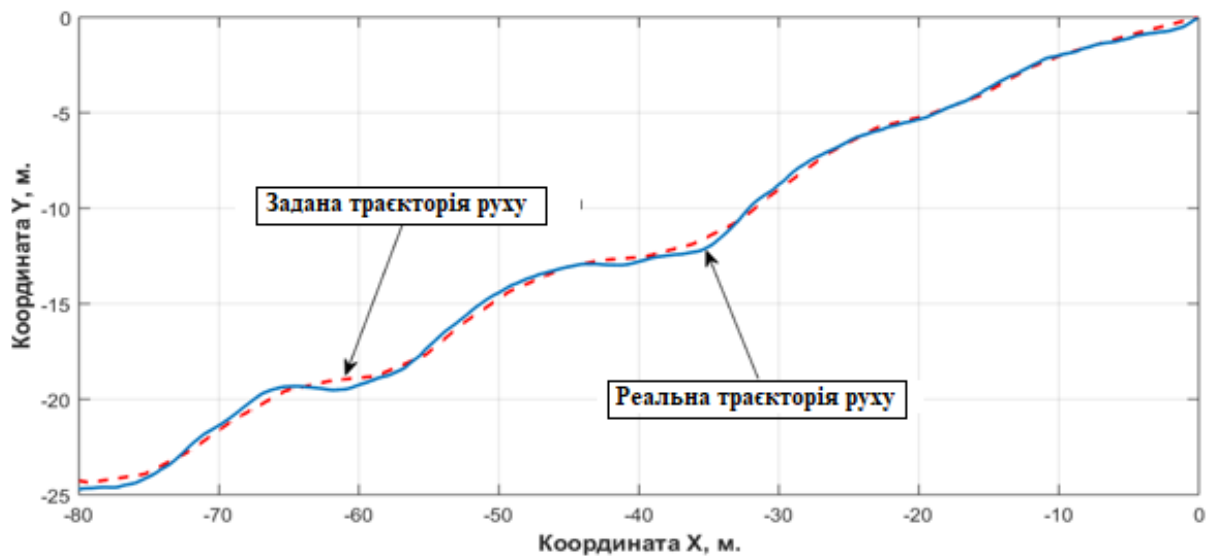


Рисунок 3.16 – Задана і реалізована траєкторії при криволінійному русі

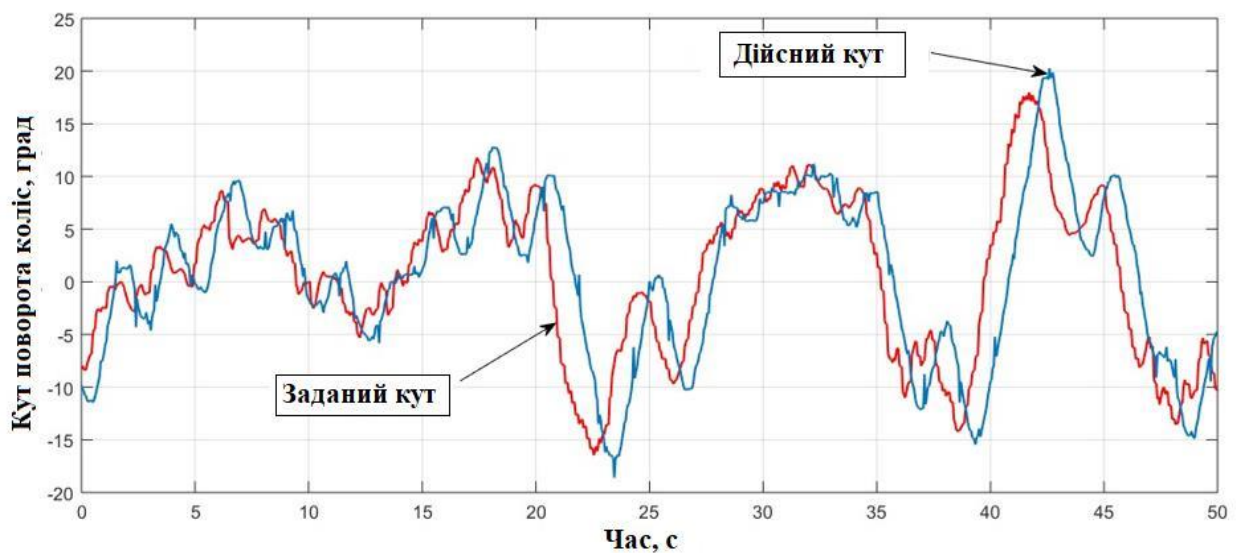


Рисунок 3.17 – Необхідний і дійсний кути повороту коліс при русі по криволінійній траєкторії

Якщо криволінійний рух з розворотним маневром, то маємо такі показники: $V_{сер}=1.6$ м/с , $t_p=1,0$ с та $k=0,4$. При криволінійному русі $E_{max} = 0,61$ м, $\sigma=0,27$ м (рис.3.18)

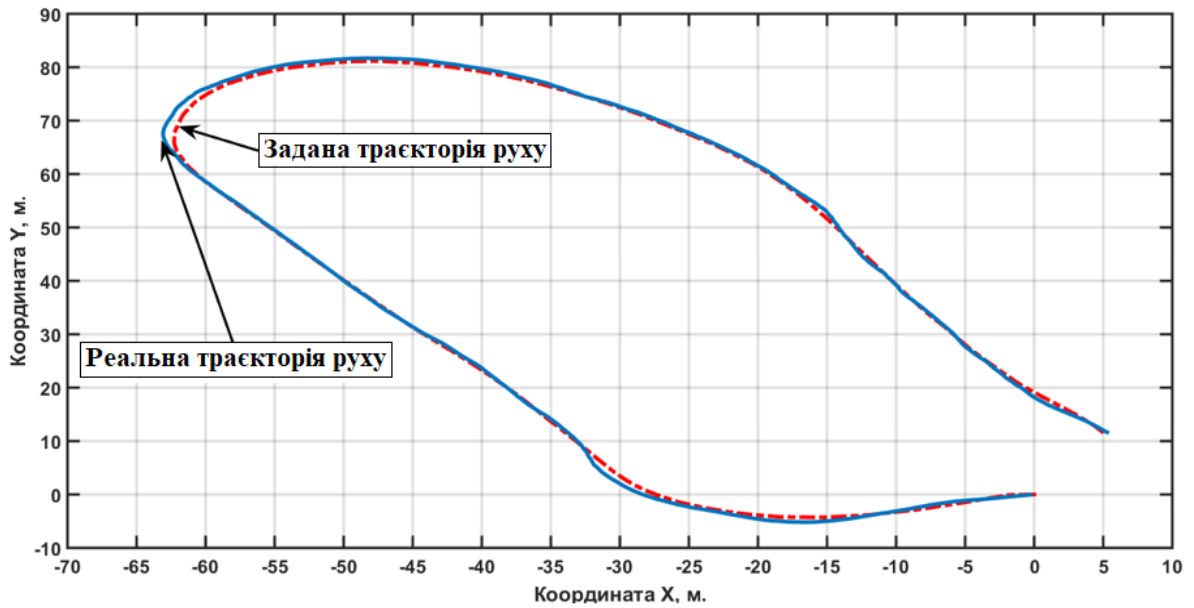


Рисунок 3.18 – Задана і реалізована траєкторії при криволінійному русі з розворотним маневром

Для криволінійного руху значення необхідного і дійсного кутів повороту при розвороті – див. рис. 3.19.

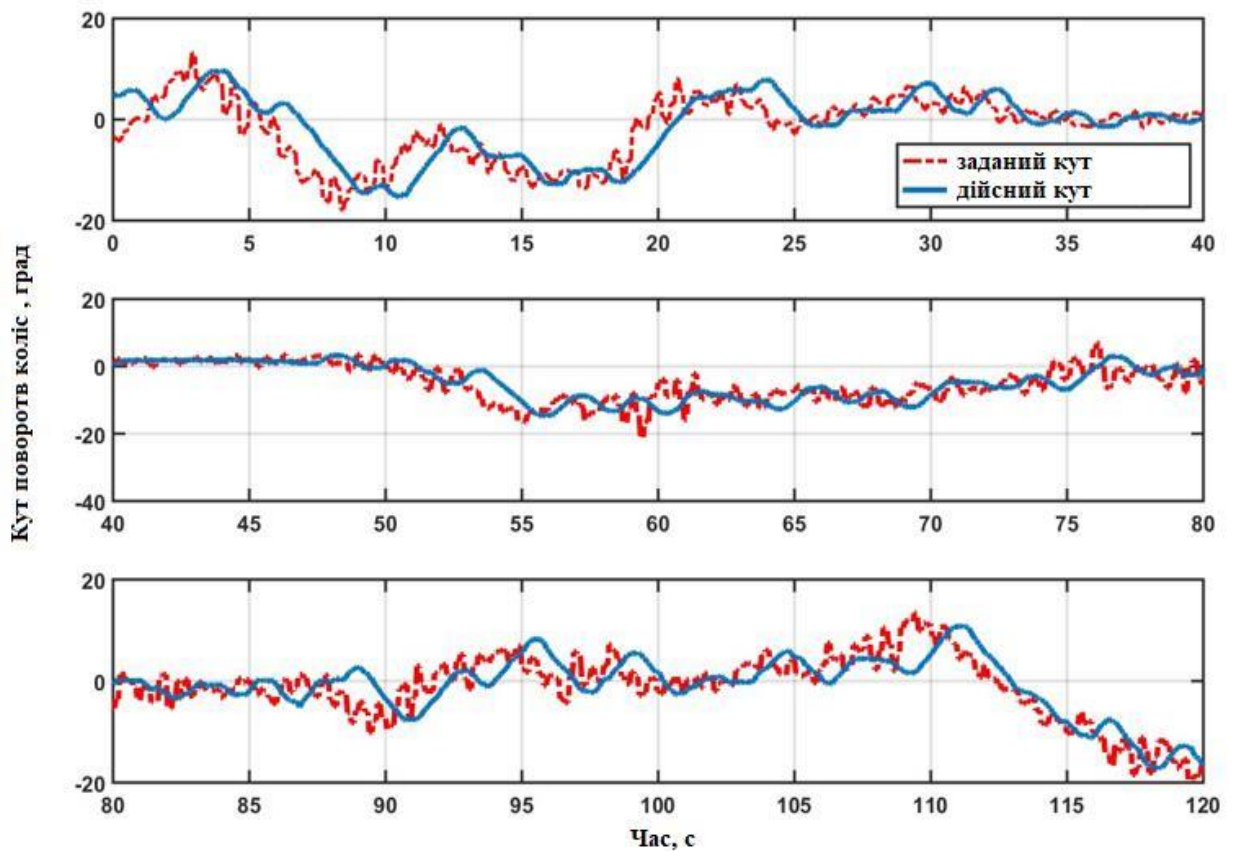


Рисунок 3.19 – Необхідний і дійсний кути повороту коліс при русі по криволінійній траєкторії з розворотним маневром
 При такій схемі руху маємо показники: $E_{max} = 0,93$ м, $\sigma = 0,37$ м

При паралельному русі маємо такі результати: I смуга – задана вихідна траєкторія без системи керування, а II смуга- паралельно першій, реалізується з застосуванням систем керування, див. рис.3.20

При русі по II смузі: $V_{сер}=2,0$ м/с , $t_{п}=1,0$ с та $k=0,25$. Напрямки руху трактора на рисунку зображено стрілками. При застосуванні системи керування в II смузі маємо: $E_{max} = 0,41$ м, $\sigma=0,2$ м

Необхідні та дійсні кути повороту при такому русі зображені на рис. 3.21

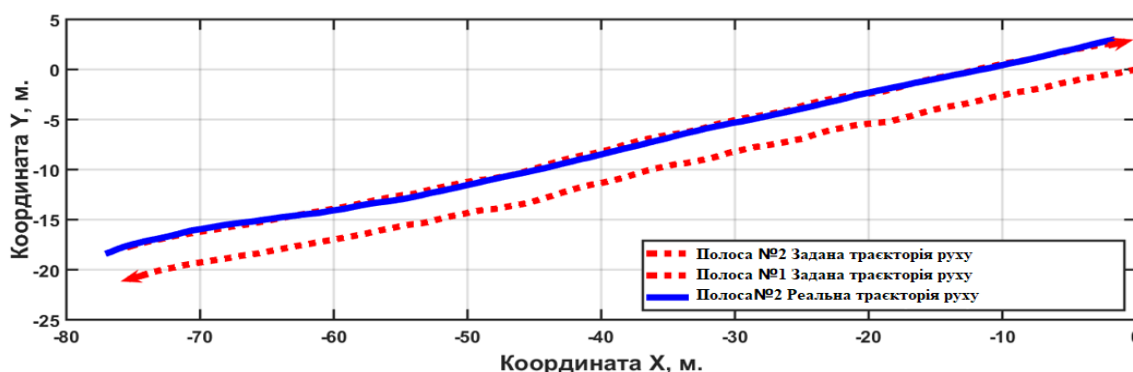


Рисунок 3.20 – Задана і реалізована траєкторії при паралельному русі

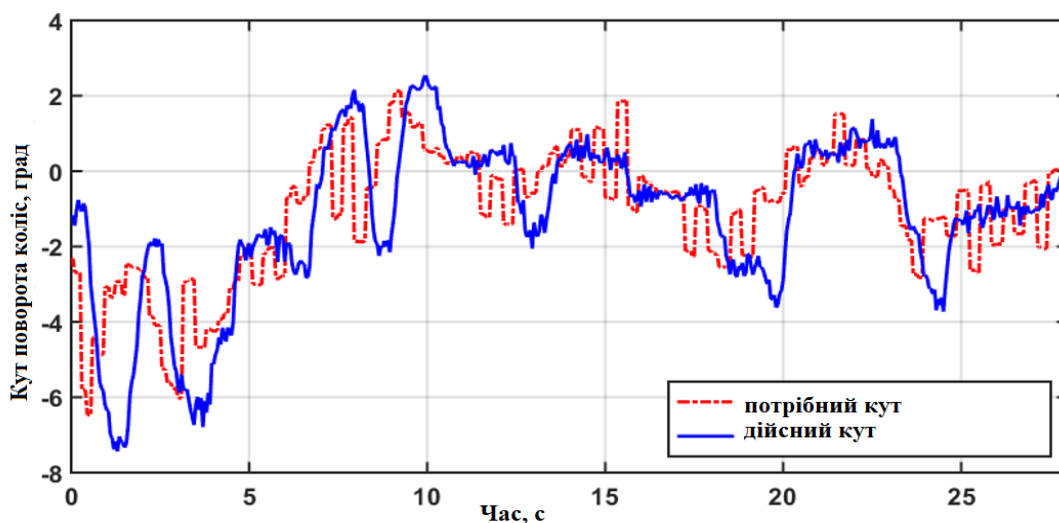


Рисунок 3.21 – Необхідний і дійсний кути повороту керованих коліс при паралельному русі

Отже, розроблена електромеханічна система керування показала результати, що свідчать про позитивне функціонування схеми. Так як основним рухом при виконанні сільськогосподарських робіт використовується прямолінійний, то дана система не перевищує відхилення 0,2 м від заданої траєкторії . Система керування за криволінійним рухом також показує якісні показники, але при ньому зростає середнє квадратичне відхилення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

З впровадженням технологій автономного руху в сільському господарстві, необхідно враховувати безпеку та охорону праці. Системи автономного керування, які використовуються для управління різними колісними сільськогосподарськими машинами, потребують детального аналізу та заходів забезпечення безпеки, щоб зменшити ризики для працівників та оточуючого середовища. Використання автономних систем керування також породжує нові виклики щодо охорони праці, які потребують уваги та вирішення.

4.1 Ризики та безпека автономних систем керування

Автономні системи керування для сільськогосподарських машин можуть створювати різні види ризиків для операторів та оточуючих. Основні загрози безпеці включають:

1. *Колізії з іншими транспортними засобами та перешкодами:* Системи автономного керування повинні бути здатні виявляти та уникати перешкод на своєму шляху, включаючи інші машини, людей, тварин та статичні перешкоди.

2. *Технічні несправності:* Важливо забезпечити надійність систем керування та виявлення несправностей у реальному часі для запобігання аваріям та травмам. Відмова чи несправність датчиків, актуаторів або інших компонентів автономної системи керування може призвести до непередбачуваних рухів машини та аварій.

3. *Взаємодія з людьми:* Системи повинні мати можливість взаємодіяти з операторами або перехожими, щоб уникнути конфліктів та небезпеки.

4. *Програмні помилки:* Помилки у програмному забезпеченні можуть призвести до суттєвих відхилень роботи машини та різних небезпек.

4.2 Розробка та впровадження заходів з безпеки

Першим кроком у забезпеченні безпеки є ідентифікація потенційних небезпек, пов'язаних з автономним рухом машин. Це може включати ризики

зіткнень з іншими машинами, перешкодами на дорозі, а також небезпеки, пов'язані зі специфікою роботи сільськогосподарських машин.

Після ідентифікації небезпек необхідно розробити та впровадити відповідні заходи з безпеки. Це може включати такі заходи, як:

- Розробка системи дистанційного моніторингу та керування, яка дозволить операторам віддалено контролювати роботу автономних машин та вчасно реагувати на небезпечні ситуації.
- Використання датчиків та систем візуального спостереження для виявлення перешкод на шляху машин та уникнення зіткнень. Розробка алгоритмів, які дозволяють автономним машинам уникати перешкод та захищати навколишнє середовище.
- Розробка систем аварійного гальмування та управління, які можуть автоматично реагувати на небезпечні ситуації та забезпечувати безпеку навколишнього середовища.
- Навчання операторів та технічного персоналу з експлуатації та взаємодії з автономними системами для ефективного управління ними та реагування на випадки аварій.
- Розробка та впровадження процедур для екстреної зупинки автономних систем у разі виникнення непередбачених ситуацій або аварій.

5 ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ

Результати експериментальних досліджень свідчать про задовільну роботу розробленої системи рульового керування під час прямолінійного руху. Однак під час навігації по криволінійній траєкторії виникали проблеми через жорстке рульове керування та значний люфт у механізмі рульового керування. Було помічено, що кріплення електродвигуна до рульової колонки було недостатньо надійним за високого опору керму.

Економічний аналіз впровадження електромеханічної системи рульового керування свідчить про її життєздатність для застосування в сільському господарстві. Незважаючи на незначні обмеження, які спостерігаються під час навігації по криволінійній траєкторії, загальна продуктивність системи відповідає вимогам для ефективної роботи в типових сільськогосподарських завданнях. Таким чином, впровадження цієї технології може підвищити продуктивність і точність сільськогосподарської техніки, сприяючи сталим методам ведення сільського господарства.

Аналіз витрат:

Аналіз витрат охоплює інвестиції початкові та пов'язані з електромеханічною системою рульового керування. Початкові інвестиції включають вартість придбання компонентів системи рульового керування, витрати на встановлення та будь-які необхідні модифікації існуючої конструкції трактора. Експлуатаційні витрати включають витрати на технічне обслуговування, енергоспоживання електродвигуна та потенційні витрати на ремонт.

Аналіз переваг:

Аналіз переваг кількісно визначає економічні переваги, отримані від впровадження електромеханічної системи рульового керування. Це включає підвищення продуктивності, підвищення ефективності використання палива за рахунок більш точного керування кермом, зниження витрат на оплату праці, пов'язаних із ручним керуванням, і потенційну економію на уникненні

пошкодження врожаю завдяки покращеній маневреності.

Розрахунок рентабельності інвестицій:

Розрахунок рентабельності інвестицій порівнює чисті вигоди від електромеханічної системи рульового керування з початковими інвестиціями. Він враховує прогнозовану тривалість життя системи, ставки дисконту та будь-які додаткові потоки доходу в результаті впровадження системи. Аналіз чутливості може бути проведений для оцінки впливу різних параметрів на рентабельність інвестицій, таких як зміни цін на паливо, витрати на робочу силу або витрати на технічне обслуговування.

Аналіз витрат і вигод:

Аналіз витрат і вигод об'єднує результати оцінки витрат і вигод для визначення загальної економічної життєздатності електромеханічної системи рульового керування. Це передбачає порівняння загальної теперішньої вартості витрат із загальною теперішньою вартістю вигод протягом життєвого циклу системи. Аналіз чутливості також можна застосувати для оцінки стійкості системи до невизначених економічних умов або технологічного прогресу.

На рис. 5.1 показана діаграма, яка демонструє економічну доцільність результатів експериментальних досліджень системи рульового керування для сільськогосподарських завдань. Діаграма показує ефективність роботи системи для різних видів робіт, таких як оранка, культивування, боронування, коткування, вирівнювання ґрунту, лушення, обприскування, внесення добрив тощо, разом з відхиленнями від заданої траєкторії.

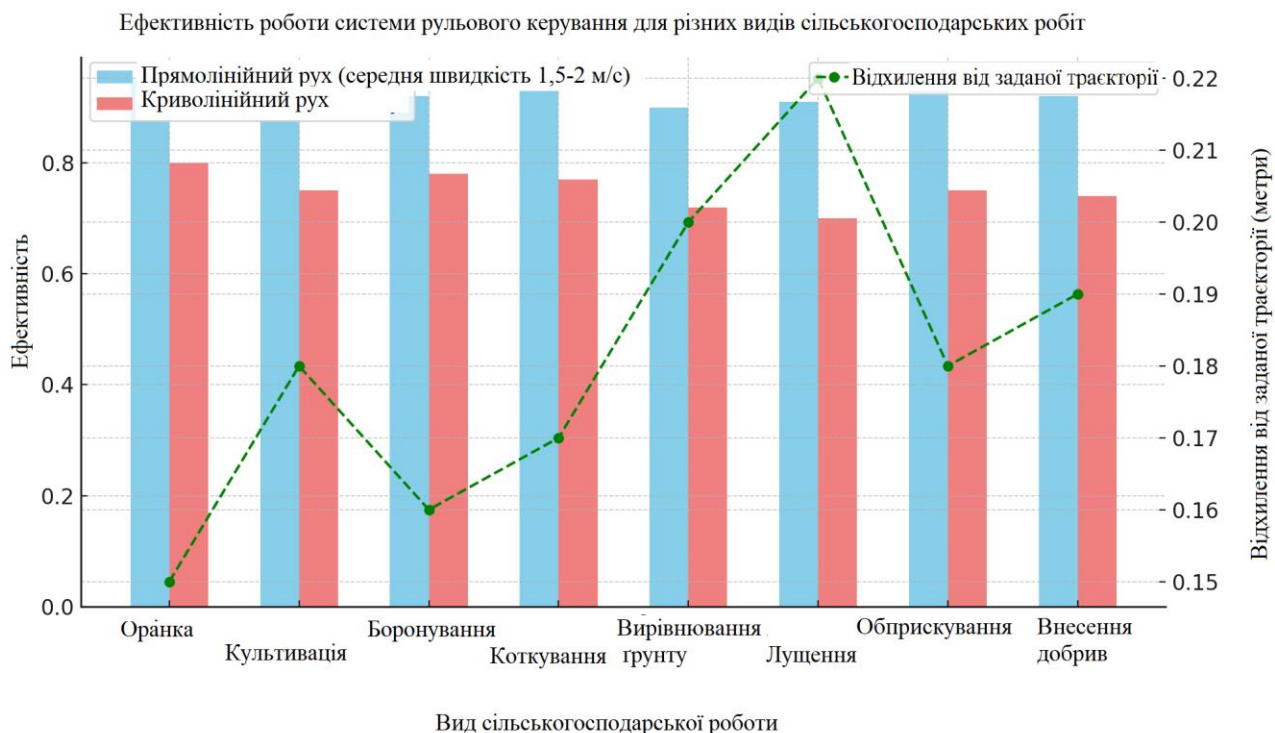


Рисунок 5.1 – Діаграма економічної доцільності результатів експериментальних досліджень системи рульового керування для сільськогосподарських завдань

Основні висновки:

1. Ефективність роботи системи під час прямолінійного руху є задовільною, а відхилення від заданої траєкторії не перевищували 0,2 метра при середній швидкості 1,5-2 м/с.

2. Проблеми виникали при навігації по криволінійній траєкторії через жорстке рульове керування та значний люфт у механізмі рульового керування.

3. Кріплення електродвигуна до рульової колонки потребувало удосконалення за умов високого опору керму.

Експерименти підтвердили надійність системи, особливо при установці на трактор МТЗ-1221.2. Електромеханічна система рульового керування продемонструвала позитивну функціональність, що робить її придатною для різноманітних сільськогосподарських завдань.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті наукового дослідження були успішно вирішені наступні завдання:

1. Проведений аналіз математичних моделей керування рухом МТА і його механіко-математичних моделей.

2. Проведено математичне моделювання руху МТА. На підставі результатів моделювання підтверджена працездатність моделі керування і адекватність механіко-математичної моделі МТА.

3. Спроектвана і створена електромеханічна система керування рухом, яка використовує супутникові радіонавігаційні системи ГЛОНАСС / GPS. Система забезпечує рух по задається траєкторії без участі водія і може бути використана для керування різними колісними сільськогосподарськими машинами.

4. Розроблено прикладне ПО, що забезпечують функціонування системи керування і реалізує алгоритми локального і глобального регулювання, а також керування рухом МТА в режимі реального часу. Програмне забезпечення має модульну структуру, що дозволяє доповнювати систему новими апаратними компонентами.

5. Проведено дорожні випробування електромеханічної системи керування рухом на тракторі МТЗ-80.1 і польові випробування на МТЗ-1221.2. Результати експериментальних досліджень підтвердили хорошу працездатність системи при установці її на трактор МТЗ-1221.2. Середнє квадратичне відхилення при задається прямолінійній русі не перевищує 0,2 м при середній швидкості руху 1,5-2 м / с, що дозволяє використовувати розроблену систему керування на більшості видів механізованих сільськогосподарських робіт (боронування, дискування, вирівнювання ґрунту, луцення, культивация, коткування, внесення добрив, обприскування).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEH - Agricultural Engineering. 2018. Vol. 54, No1. P.95-104.
2. Bo Li, Ying Chen, Jun Chen Modeling of soil–claw interaction using the discrete element method (DEM). Soil and Tillage Research. 2020. Vol. 158, 5, P. 41-49.
3. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. № 3. С. 6-12.
4. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. Solid State Phenomena. 2019. Vol. 291. P. 110-120.
5. Solona O.V., Kovbasa V.P., Kupchuk I.M. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during forming process a channel for an antifiltration screen. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. №2. С. 81-89.
6. Spirin A., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Increasing the reliability of agricultural machinery work. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічні науки». Випуск 198 «Механізація сільськогосподарського виробництва», 2019, с 86–90.
7. Веселовська Н.Р., Руткевич В.С., Шаргородський С.А. Технологічні основи сільськогосподарського машинобудування: навч. посіб. Вінниця: 2019. 234 с.
8. Видмиш А.А., Возняк О.М., Замрій М.А. Розробка способу визначення максимально досяжного коефіцієнта підсилення (передачі) KmS. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 3(98). С. 25-31.
9. Грушецький С.М., Яропуд В.М., Токарчук О.А. Організація експлуатації та технічного обслуговування транспортних засобів і машин в Україні і за кордоном. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. №1(112). С. 126–136.

10. Гунько І.В., Музичук В.І., Служалюк М.В. Дослідження технічного сервісу машин в АПК. Техніка, енергетика та транспорт АПК. 2019. №2 (105). С. 43–51.

11. ДСТУ 4973:2008 Трактори. Технічне діагностування. Параметри та якісні ознаки технічного стану. – [Чинний від 2009.01.01] –К. : Мінагрополітики України, 2009. – III, 18 с. – (Галузевий стандарт України).

12. Ковбаса В.П., Солона О.В., Спірін А.В., Цуркан О.В. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. №1(100) Том 1, С. 44-49.

13. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. Вібрації в техніці та технологіях. 2019. №3 (90). С. 44-52.

14. Купчук І.М., Зубар І.В., Онищук Ю.В., Дідик А.М., Замрій М.А. Комп'ютерна програма "Harvesting Cereals Optimization v.1.2". 2021. (№ 103729).

15. Матвійчук В.А., Любін М.В., Токарчук О.А., Рубаненко О.О. Особливості частотно-регульованого електроприводу для транспортуючих систем АПК. Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки, 2019 р., №6, С. 39-43.

16. Ольшанський В. П., Сліпченко М. В., Спольнік О. І., Замрій М. А. Вільні коливання осцилятора за наявності квадратичного в'язкого опору та сухого тертя. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 2(97). С. 33-40.

17. Омелянов О.М. Особливості використання механічних коливань в технологічних процесах. Вібрації в техніці та технологіях. 2019. №4(87) С. 129–134.

18. Солона О.В. Застосування сучасних мехатронних систем та роботизованих комплексів у АПК України. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 3 (110). С. 71-76.

19. Солона О.В., Ковбаса В.П.. Обґрунтування параметрів робочих органів для укладання внутрішньогрунтових зрошувачів: Монографія. Вінниця, 2020 – 155 с.

20. Лебедев А.Т. Функціональна точність і працездатність рульового керування трактора. Матеріали Всеукраїнської науко-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». Харків, ХНТУСГ, 2018. – С. 74 – 75. 92

21. Яропуд В. М., Твердохліб І. В., Спірін А. В. Машина та обладнання і їх використання в рослинництві: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, 2020. 308 с.

22. Надикто В. Т., Улексін В. О. Колійна та мостова системи землеробства: монографія. Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2018. 270 с 41.

23. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. et al. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. № XXXI (1). P. 10–16.

24. Лебедев А. Т. Аналіз методів та засобів оцінки тягових властивостей трактора / А. Т. Лебедев, М. Л. Шуляк, А. М. Стельмах // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування = *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Automobile and Tractor Construction* : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 2. – С. 108-117.

25 Лебедев А. Т. Енергозбереження тракторів в умовах адаптації до систем точного землеробства /АТ Лебедев, МЛ Шуляк, ВВ Рапута // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». – Харків: ДБТУ- 2022.-с.179.

ДОДАТКИ